

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 21.05.2025 12:08:08

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1a0e76f

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

### **Методические указания**

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

для студентов направления подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2025 г.

## Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование лабораторных работ	
4.	Содержание лабораторных работ	
4.1	Лабораторная работа № 1. Максимальная токовая защита (МТЗ). Моделирование максимальной токовой защиты линии электропередачи.	
4.2	Лабораторная работа № 2. Токовая отсечка на линиях с односторонним питанием. Моделирование мгновенной токовой отсечки линии электропередачи.	
4.3	Лабораторная работа №3. Токовая отсечка на линиях с двусторонним питанием. Моделирование максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием.	
4.4	Лабораторная работа №4. Защита воздушных и кабельных ЛЭП. Моделирование дифференциальной защиты линии электропередачи.	
4.5	Лабораторная работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора.	
4.6	Лабораторная работа №6. Защита воздушных и кабельных ЛЭП. Токовая направленная защита линий электропередачи в кольцевой сети.	
4.7	Лабораторная работа №7. Дифференциальная токовая защита. Продольная дифференциальная защита линии электропередачи.	
7.8	Лабораторная работа №8. Дифференциальная токовая защита. Поперечная дифференциальная защита параллельных линий электропередачи.	
4.9	Лабораторная работа №9. Дистанционная защита. Дистанционная защита линий электропередачи в сети с двусторонним питанием.	
4.10	Лабораторная работа №10. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени линии электропередачи и вводного выключателя.	

- 4.11 Лабораторная работа №11. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Максимальная токовая защита с блокировкой по минимальному напряжению.
  - 4.12 Лабораторная работа №12. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Дифференциальная защита трансформатора.
  - 4.13 Лабораторная работа №13. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Токовая защита трансформатора.
  - 4.14 Лабораторная работа №14. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Дифференциальная защита сборных шин
  - 4.15 Лабораторная работа №15. Релейная защита шин. Логическая защита сборных шин
  - 4.16 Лабораторная работа №16. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое повторное включение линии электропередачи.
  - 4.17 Лабораторная работа №17. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое повторное включение сборных шин
  - 4.18 Лабораторная работа №18. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое включение резерва секционного выключателя.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
- 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
  - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
  - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины
- Приложения

## Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

## ***1. Цель и задачи изучения дисциплины***

Целью изучения дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» является формирование знаний о принципах организации и технической реализации релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

Задачей изучения дисциплины является усвоение студентами основных принципов выполнения защит, как отдельных элементов, так и системы в целом, а также основных положений по расчету систем релейной защиты.

## ***2. Оборудование и материалы***

Аппаратные средства:

- Лаборатория теоретических основ электротехники, релейной защиты и электробезопасности с интерактивным мультимедиа оборудованием
- Лабораторное оборудование «Электроэнергетика-релейная защита и автоматика»
- Комплект типового лабораторного оборудования «Электроэнергетика - однолинейная модель»
- Научно-исследовательский комплекс «Централизованные средства защиты, автоматизации и управления электроэнергетических систем», исполнение стендовое компьютерное
- Научно-исследовательский комплекс «Автоматизированные средства управления и защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий»

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

## ***3. Наименование лабораторных работ***

Для очно-заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа № 1. Максимальная токовая защита (МТЗ). Моделирование максимальной токовой защиты линии электропередачи – 2 часа; Лабораторная работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора – 2 часа; Лабораторная работа №15. Релейная защита шин. Логическая защита сборных шин – 2 часа; Лабораторная работа №16. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое повторное включение линии электропередачи – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
6 семестр			
1	<b>Лабораторная работа № 1. Максимальная токовая защита (МТЗ).</b> Моделирование максимальной токовой защиты линии электропередачи. Изучение устройства, принципа действия и схем максимальной токовой защиты (МТЗ).	4	
2	<b>Лабораторная работа № 2. Токовая отсечка на линиях с односторонним питанием.</b> Моделирование мгновенной токовой отсечки линии электропередачи. Изучение устройства, принципа действия и схем токовой отсечки (ТО).	4	
3	<b>Лабораторная работа №3. Токовая отсечка на линиях с двусторонним питанием.</b> Моделирование максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием. Исследование МТЗ и ТО двух линий электропередачи с односторонним питанием.	4	
4	<b>Лабораторная работа №4. Защита воздушных и кабельных ЛЭП.</b> Моделирование дифференциальной защиты линии электропередачи. Изучение устройства, принципа действия и схем дифференциальной защиты линии электропередач.	4	
5	<b>Лабораторная работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита.</b> Моделирование дифференциальной защиты трансформатора. Изучение устройства, принципа действия и схем дифференциальной защиты силового трансформатора.	4	
6	<b>Лабораторная работа №6. Защита воздушных и кабельных ЛЭП.</b> Токовая направленная защита линий электропередачи в кольцевой сети. Ознакомление студентов с принципом действия, схемой и выбором уставок токовой направленной защиты линий электропередачи в кольцевой сети.	4	
7	<b>Лабораторная работа №7. Дифференциальная токовая защита.</b> Продольная дифференциальная защита линии электропередачи. Изучить принцип действия и назначение продольной дифференциальной токовой направленной защиты.	4	

8	<b>Лабораторная работа №8. Дифференциальная токовая защита.</b> Поперечная дифференциальная защита параллельных линий электропередачи. Изучить принцип действия и назначение поперечной дифференциальной токовой направленной защиты.	4	
9	<b>Лабораторная работа №9. Дистанционная защита.</b> Дистанционная защита линий электропередачи в сети с двусторонним питанием. Ознакомиться с принципом действия дистанционной защиты линий.	4	
<b>Итого за 6 семестр:</b>		<b>36</b>	
<b>7 семестр</b>			
10	<b>Лабораторная работа №10. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации.</b> Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени линии электропередачи и вводного выключателя. Изучить принцип действия максимальной токовой защиты, изучить методы расчета и проверки уставок защиты, исследовать факторы, влияющие на селективность и зону действия МТЗ.	2	
11	<b>Лабораторная работа №11. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации.</b> Максимальная токовая защита с блокировкой по минимальному напряжению. Изучить принцип действия максимальной токовой защиты с блокировкой по минимальному напряжению, изучить методы расчета и проверки уставок защиты, исследовать влияние пусковых органов напряжения на чувствительность МТЗ.	2	
12	<b>Лабораторная работа №12. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации.</b> Дифференциальная защита трансформатора. Изучить принцип действия дифференциальной защиты трансформатора, изучить особенности дифференциальных защит трансформаторов, связанные с необходимостью выравнивания вторичных токов по величине, изучить особенности настройки параметров дифференциальных реле с торможением типа ДЗТ-11, исследовать факторы, влияющие на селективность, зону действия и чувствительность защиты.	2	
13	<b>Лабораторная работа №13. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации.</b> Токовая защита трансформатора. Изучить особенности расчета установок, селективности и зоны срабатывания токовой отсечки	2	

	и максимальной токовой защиты трансформатора, изучить особенности расчета установок защиты от перегрузки силового трансформатора.		
14	<b>Лабораторная работа №14. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации.</b> Дифференциальная защита сборных шин Изучить принцип действия дифференциальной защиты шин, исследовать факторы, влияющие на селективность, зону действия и чувствительность защиты.	2	6
15	<b>Лабораторная работа №15. Релейная защита шин.</b> Логическая защита сборных шин Изучить принцип действия и область применения логической защиты сборных шин, исследовать факторы, влияющие на селективность и зону действия ЛЗШ.	2	6
16	<b>Лабораторная работа №16. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты.</b> Автоматическое повторное включение линии электропередачи. Изучить алгоритмы работы устройств АПВ на линиях с односторонним питанием, изучить особенности взаимодействия устройств АПВ и релейной защиты, изучить принципы расчета установок АПВ линий электропередач с односторонним питанием.	2	6
17	<b>Лабораторная работа №17. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты.</b> Автоматическое повторное включение сборных шин Изучить особенности работы устройств автоматического повторного включения шин, изучить особенности взаимодействия устройств АПВ шин и устройств релейной защиты.	2	
18	<b>Лабораторная работа №18. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты.</b> Автоматическое включение резерва секционного выключателя. Изучить принцип действия и особенности работы устройств автоматического включения резерва секционного выключателя.	2	
	<b>Итого за 7 семестр:</b>	<b>18</b>	<b>18</b>
	<b>Итого:</b>	<b>54</b>	<b>18</b>

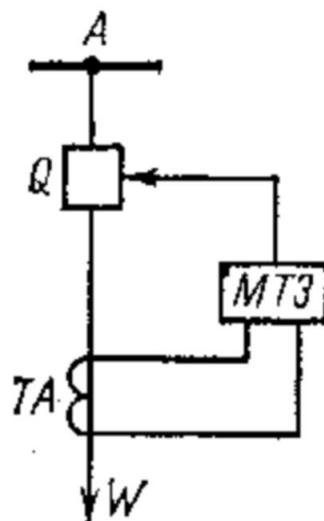
#### 4. Содержание лабораторных работ

##### Лабораторная работа № 1. Максимальная токовая защита (МТЗ). Моделирование максимальной токовой защиты линии электропередачи.

**Цель работы:** Изучение устройства, принципа действия и схем максимальной токовой защиты (МТЗ).

##### Основы теории:

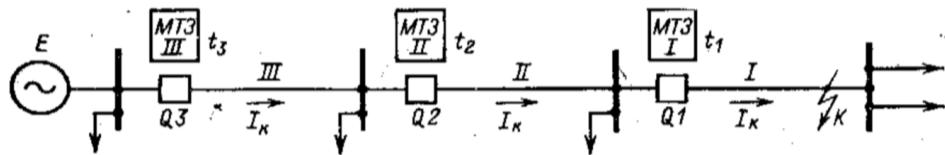
Как отмечалось ранее, одним из наиболее характерных признаков КЗ явл. Появление сверхтока, кот. становится  $I_{нагр.}$ . На использовании этого принципа и основано действие МТЗ.



Принцип действия МТЗ

К реле МТЗ через ТА подводится ток, проходящий по защищаемому элементу (линии W). Когда ток достигает заранее установленного значения, защита приходит в действие (срабатывает) и отключает выключатель Q. Значение тока, при котором происходит срабатывание защиты, называется током срабатывания ( $I_{сраб.}$ ). Появление сверхтока в к-л элементе не всегда является признаком повреждения этого элемента, ибо сверхток проходит и по неповреждённым, но связанным с повреждённым элементами цепи.

Так: в электросети, состоящей из 3<sup>х</sup> последовательно соединённых участков, при КЗ в (•)К сверхток проходит от источника G к месту повреждения как по повреждённому участку I, так и по неповреждённым II и III.



Работа МТЗ в радиальной сети с односторонним питанием

Если сверхток превысит ток срабатывания, то недопустимо, чтобы сработали все три защиты. Правильная ликвидация аварии будет иметь место в том случае, если сработает МТЗ I и отключит выключатель Q1, ближайший к месту повреждения. Это и есть требование избирательности или селективности к МТЗ. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы (в частности) МТЗ участков имели разл.  $t_{\text{сраб.}}$ , возрастающее по направлению к источнику питания.

Время срабатывания защиты от момента возникновения сверхтока до воздействия на выключатель называется выдержкой времени. В данном случае наименьшую выдержку времени  $t_1$  должна иметь защита МТЗ I; несколько  $>$  - ю  $t_2$  – защита МТЗ II и самую  $>$  -  $t_3$  – МТЗ III.

Для выявления момента возникновения аварии и обеспечения действия - МТЗ состоит из пускового органа, кот. выявляет момент возникновения КЗ и производит пуск защиты и замедляющего органа (выдержки времени), который замедляет действие защиты для обеспечения селективности.

Такие токовые реле, как например, РТВ, РТ-80, РТ-90 совмещают в себе обе описанные функции.

МТЗ является наилучшей простой и дешёвой защитой и, поэтому, применяется для защиты Г, Тр-ров, ЭД и ЛЭП с односторонним, а в ряде случаев и с двусторонним питанием.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом однофазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений.

Отключите (если включен) выключатель A9.

Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, 1,0.

Установите желаемые параметры линии электропередачи Л, например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи A2 и A3 равными 50 Ом и 0,1 Гн.

Установите желаемый ток срабатывания реле A10, например, 1,0 А.

Установите желаемое время срабатывания реле АН, например, 1,0 с.

Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.

Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

Включите выключатель A9. В результате загорится зеленая лампа блока А8, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

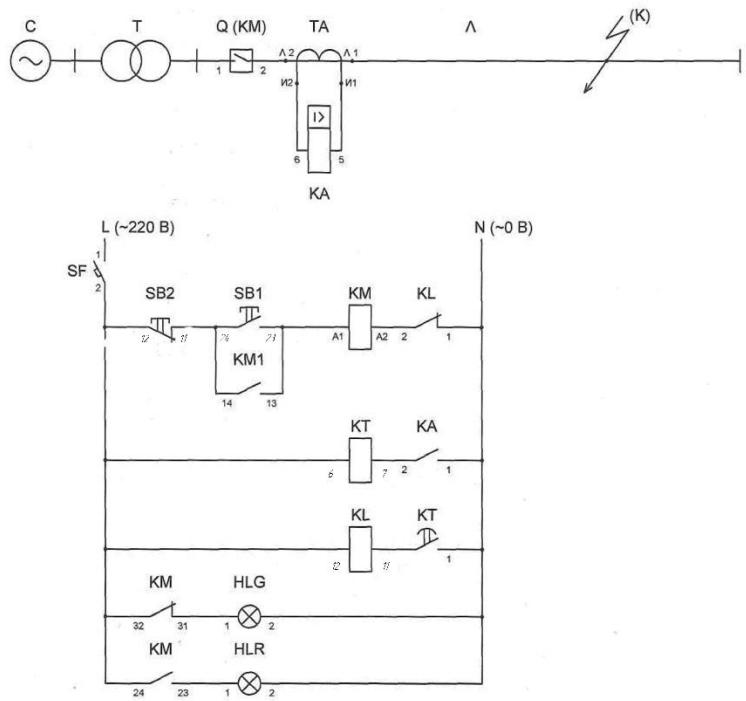
Нажмите верхнюю кнопку поста управления А7. В результате включится контактор А4 (выключатель Q) и на модели линий А2, А3 (линию Л) будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке А8. Зеленая лампа в блоке А8 погаснет.

Смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л. Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий А2 и А3. В результате сработает максимальная токовая защита и поврежденная линия электропередачи Л (модели линий А2, А3) с выдержкой времени отключится (отключатся) от источника питания выключателем Q (контактором А4). Красная лампа в блоке А8 погаснет, а зеленая загорится.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

Выньте проводник «П» из гнезда.

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1 выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.



### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что такое максимальная токовая защита (МТЗ) и как она выполняется?
2. Какие достоинства и недостатки максимальных токовых защит?
3. Какая область применения МТЗ?
4. Как определяется относительный коэффициент чувствительности максимальной токовой защиты?
5. Как выбирают ток срабатывания МТЗ?
6. Что такое коэффициент запуска, коэффициент отстройки?
7. Что такое максимальные токовые направленные защиты?
8. Как выполняют МТЗ с зависимыми характеристиками выдержки времени?

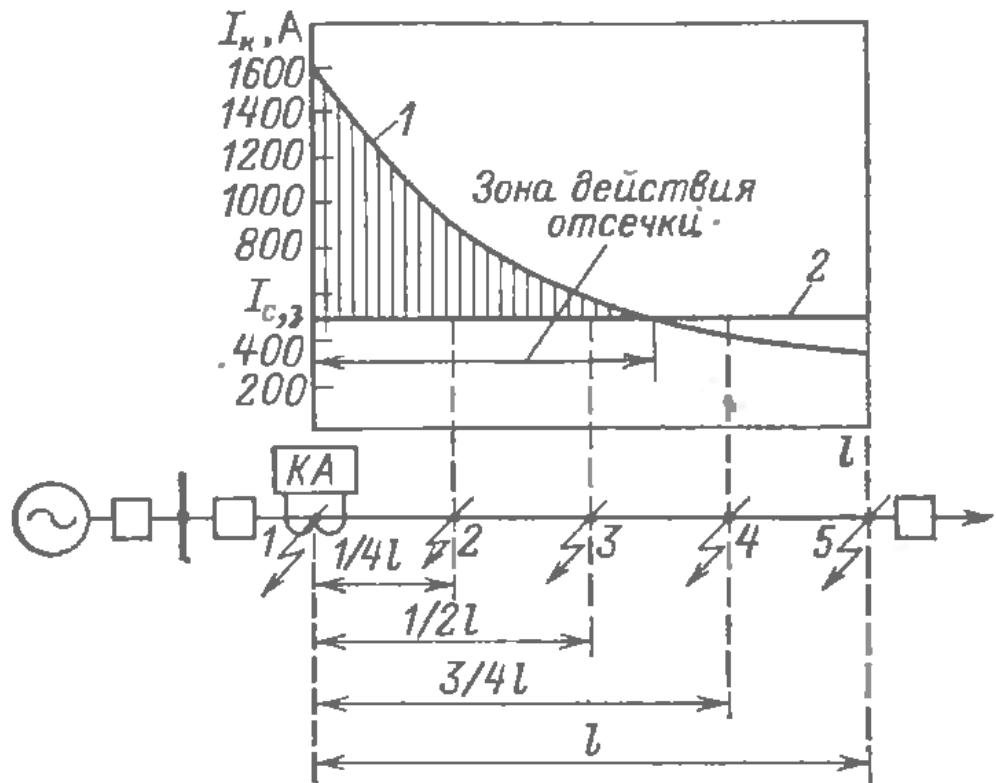
**Лабораторная работа № 2. Токовая отсечка на линиях с односторонним питанием. Моделирование мгновенной токовой отсечки линии электропередачи.**

**Цель работы:** Изучение устройства, принципа действия и схем токовой отсечки (ТО).

**Основы теории:**

Токовой отсечкой наз. МТЗ с ограниченной зоной действия, имеющая в случае мгновенное действие.

В отл. от МТЗ селективность действия ТО обеспечивается не выдержкой времени, а ограничением зоны её действия. Для этого Исраб. отсечки отстраивается не от тока нагрузки, а от тока КЗ в конце защищаемой линии или от другой определённой, где ТО не должна действовать.



Принцип действия токовой отсечки на линии с односторонним питанием

Зона действия отсечки определяется графически: для этого вычисляются токи КЗ, проходящие по защищаемой линии при КЗ в начале и конце её, а также на расстоянии  $\frac{1}{4}$ ;  $\frac{1}{2}$ ;  $\frac{3}{4}$  длины от начала и строится кривая изменения тока КЗ в зависимости от удаления

места КЗ от источника питания (кривая 1). По приведённой формуле рассчитывается ток срабатывания отсечки и на этом же чертеже проводится прямая тока срабатывания (прямая 2). Точка пересечения кривой 1 с прямой 2 определяет зону действия отсечки. Отсечка действует в зоне, где  $I_{K3} > I_{crab}$ .

***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений.

Отключите (если включен) выключатель A9.

Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, 1,0.

Установите желаемые параметры линии электропередачи Л, например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи A2 и A3 равными 50 Ом и 0,1 Гн.

Установите желаемый ток срабатывания реле A10, например, 1,0 А.

Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.

Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

Включите выключатель A9. В результате загорится зеленая лампа блока А8. сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

Нажмите верхнюю кнопку поста управления A7. В результате включится контактор A4 (выключатель Q) и на модели линий A2, A3 (линию Л) будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке А8. Зеленая лампа блоке А8 погаснет.

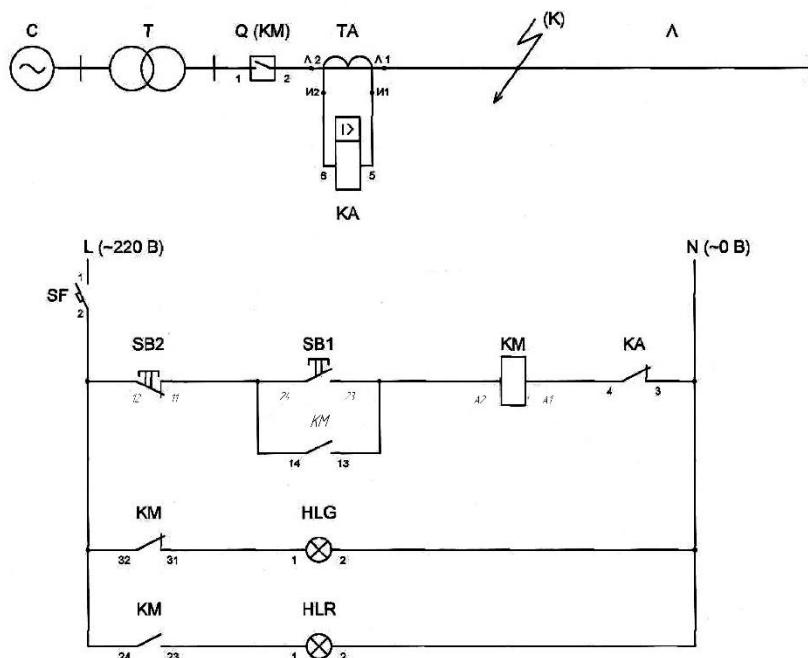
Смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л. Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий A2 и A3. В результате сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия Л (модели линий A2, A3) отключится от

источника питания выключателем Q (контактором А4). Красная лампа в блоке А8 погаснет, а зеленая загорится.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

Выньте проводник «П» из гнезда.

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1 и выключатель «СЕТЬ» измерителя PL



### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Каковы принцип действия и область применения ТО линии электропередачи?
2. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
3. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемой ЛЭП?

***Лабораторная работа №3. Токовая отсечка на линиях с двусторонним питанием. Моделирование максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием.***

**Цель работы:** Исследование МТЗ и ТО двух линий электропередачи с односторонним питанием.

***Основы теории:***

В радиальных сетях с односторонним питанием максимальную токовую защиту включают с питающей стороны каждой линии. При этом для обеспечения селективности отключения выдержку времени защиты подбирают по ступенчатому принципу, согласно которому у каждой последующей защиты, считая по направлению к источнику питания, выдержку времени принимают на ступень времени больше, чем у предыдущей защиты.

Рассмотрим пример защиты от однофазного короткого замыкания на землю кабельных линий в сети напряжением 6—10 кВ с заземленной нейтралью.

Токовая отсечка может быть выполнена быстродействующей или с выдержкой времени.

В отличие от максимальной токовой защиты действие токовой отсечки заранее ограничивается зоной действия. Это делается для соблюдения селективности (избирательности действия), которая обеспечивается путем выбора тока срабатывания отсечки, а не выдержки времени (при максимальной токовой защите).

Принцип действия токовой отсечки для ЛЭП с односторонним питанием поясняет рисунок ниже — а.

Известно, что ток к. з. в линии определяется величиной сопротивления от источника питания до места повреждения и уменьшается с удалением последнего (кривая 1, на рисунке ниже положение — б). Наименьший ток к. з. возникает при повреждении в конце линии (в точке К-2), а наибольшее — в начале ее (в точке К-3).

***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений.

Отключите (если включен) выключатель A9.

Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, 1,0.

Установите переключателями желаемые параметры моделей линий электропередачи A2 и A3, например, 50 Ом и 0,1 Гн.

Установите желаемый ток срабатывания реле A10 и A15, например, 1,0 А.

Установите желаемое время срабатывания реле АН, например, 1,0

Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.

Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

Включите выключатель A9. В результате загорится зеленая лампа блока А8, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

Нажмите последовательно две верхние кнопки поста управления А7. В результате включатся выключатели Q1, Q2 (контакторы А4, А13) и на линии Л1, Л2 (модели линий А2, А3) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке А8. Зеленая лампа в блоке А8 погаснет.

Смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л2. Для чего воткните проводник «П» в гнездо начала модели линии А3. В результате сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия Л2 (модель линии А3) отключится от источника питания выключателем Q2 (контактором А13). Вторая сверху красная лампа в блоке А8 погаснет.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

Выньте проводник «П» из гнезда.

Нажмите вторую сверху кнопку поста управления А7. В результате включится выключатель Q2 (контактор А13) и на линию Л2 (модель линии А3) вновь будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся вторая сверху красная лампа в блоке А8.

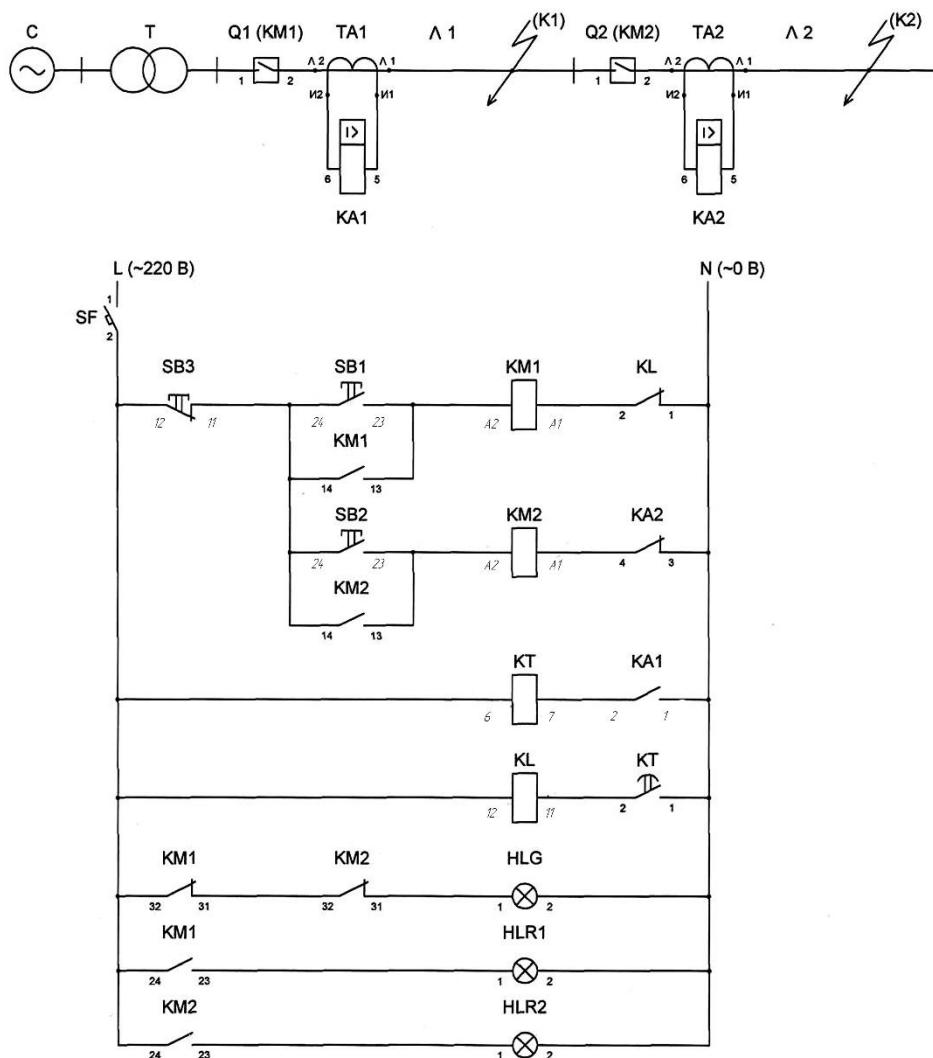
Смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л1. Для чего воткните проводник «П» в гнездо конца модели линии А2. В результате сработает максимальная токовая защита и поврежденная линия электропередачи Л1 (модель линии А3) с выдержкой

времени отключится от источника питания выключателем Q1 (контактором A4). Первая сверху красная лампа в блоке А8 погаснет.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

Выньте проводник «П» из гнезда.

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1 и выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.



### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;

6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Виды токовых защит, их краткая характеристика и отличие друг от друга.
2. Принцип действия и селективность МТЗ.
3. Выбор тока срабатывания МТЗ.
4. Выбор выдержки времени МТЗ.
- 5.. Схема двухфазной двухрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
6. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
7. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с зависимой выдержкой времени.
8. Согласование защит по чувствительности.
9. Принцип действия ТО.
10. Мгновенные ТО на линиях с односторонним питанием.
11. ТО с выдержкой времени.
12. ТО с блокировкой по напряжению.

## ***Лабораторная работа №4. Защита воздушных и кабельных ЛЭП. Моделирование дифференциальной защиты линии электропередачи.***

**Цель работы:** Изучение устройства, принципа действия и схем дифференциальной защиты линии электропередач.

### ***Основы теории:***

На линиях отходящих от шин электростанций или узловых подстанций, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение КЗ в пределах всей защищаемой линии без выдержки времени. Это требование нельзя выполнить с помощью мгновенных токовых отсечек, защищающих только часть линии. Кроме того, отсечки неприменимы по условию селективности, на коротких ЛЭП, где токи КЗ в начале и в конце линии примерно одинаковы. В этих случаях используются дифференциальные защиты (ДЗ), обеспечивающие мгновенное отключение КЗ в любой точке защищаемого участка и не действующие при КЗ за пределами зоны действия.

Дифференциальные защиты подразделяются на: продольные – для защит как одинарных, так и параллельных линий; поперечные – для защиты только параллельных линий.

Измерительный орган продольной дифференциальной токовой защиты включается на разность токов по концам защищаемого объекта

В реле защиты проходит ток  $I_p$ , равный разности вторичных токов измерительных трансформаторов тока ТА1 и ТА2  $I_{12}$  и  $I_{22}$ . При внешнем коротком замыкании в точке К2 токи  $I_1$  и  $I_2$  по концам защищаемого объекта одинаковы, и ток  $I_p = I_{12} - I_{22}$  принципиально равен нулю. При коротком замыкании на защищаемом объекте в точке К1 в реле защиты проходит практически арифметическая сумма вторичных токов короткого замыкания от источников питания ЭС1 и ЭС2 и защита срабатывает. Теоретически ток срабатывания защиты мог бы быть равен нулю. Однако, если учитывать наличие погрешностей измерительных трансформаторов тока защиты, ток в реле защиты при отсутствии короткого замыкания на защищаемом объекте равен току небаланса, значение которого тем больше, чем больше ток в первичных обмотках трансформаторов тока. Поэтому ток срабатывания защиты отстраивается от тока небаланса, имеющего место при максимальном токе, проходящем через защищаемый объект при внешнем КЗ:

При подаче напряжения на схему загорается зеленая сигнальная лампа HLG1. При нажатии на кнопку включения SB1 включаются контакторы KM1 и KM2 и на защищаемую линию подается напряжение. Загораются красные сигнальные лампы HLR1 и HLR2, получающие питание через контакт KM1.2 и KM2.2 соответственно. Зеленая сигнальная лампа HLG1

гаснет. При отпускании кнопки SB1 обмотки контакторов получают питание через нормально разомкнутый контакт этого контактора KM1.1. При нажатии на кнопку SB2 контактор KM1 и KM2 отключается. Напряжение с линии снимается. Красные сигнальные лампы гаснут, зеленая загорается.

При коротком замыкании в т. K1 обмотка реле тока, включенная на разность токов в начале и конце линии, получает питание, и контакт KA1.1 токового реле размыкает цепь питания контактора KM1.

При коротком замыкании в т. K2 токи в начале и конце линии одинаковы, разность этих токов мала, токовое реле не срабатывает. Таким образом, защита действует только при кз на защищаемой линии.

При исчезновении напряжения питающей сети контакторы отключаются. При восстановлении напряжения в сети контакторы остаются отключенным. В эксперименте рассмотренный алгоритм реализован на основе программируемого контроллера.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых эксперименте, с гнездом "PE" однофазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений.

Отключите (если включен) выключатель A9.

Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора A1, например, 1,0.

Установите желаемые параметры линии электропередачи Л, например, 100 Ом 1 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линии электропередачи A2 и A3 равными 50 Ом и 0,1 Гн.

Установите желаемый ток срабатывания реле A10, например, 1,0 А.

Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя P1.

Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

Включите выключатель А9. В результате загорится зеленая лампа блока А8. сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

Включить кнопку «пуск» поста управления А7. В результате включатся контакторы А4, А13 (выключатели Q1, Q2) и на модели линий А2, А3 (линию Л) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке А8. Зеленая лампа в блоке А8 погаснет.

Смоделируйте короткое замыкание К1на линии электропередачи Л. Для чего вткните проводник «П» в гнездо между моделями линий А2 и А3. В результате сработает дифференциальная защита и поврежденная линия Л (модели линий А2, А3 отключится (отключатся) от источника питания выключателями Q1 и Q1 (контакторами А4 и А13). Красные лампы в блоке А8 погаснут, а зеленая лампа загорится.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

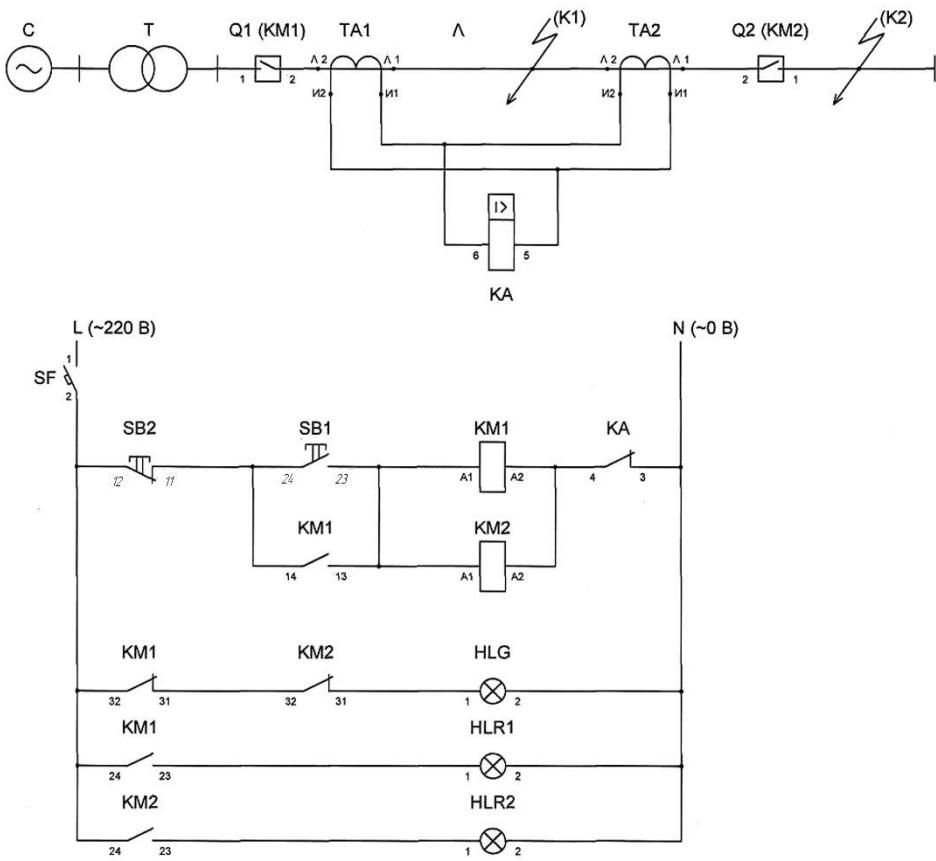
Выньте проводник «П» из гнезда.

Смоделировать короткое замыкание К2 на конце линии Л (вне зоны действия дифференциальной защиты). Для чего воткнуть проводник «П» в гнездо «1» выключателя Q2 (контактора А13). Убедиться, что дифференциальная защита в действии не приходит.

Считать значение тока короткого замыкания

Вынуть проводник «П» из гнезда.

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.



### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Каковы принцип действия и область применения дифференциальной токовой защиты линии электропередачи?
2. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
3. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемой ЛЭП ?

## **Лабораторная работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора.**

**Цель работы:** Изучение устройства, принципа действия и схем дифференциальной защиты силового трансформатора.

### **Основы теории:**

Для защиты трансформаторов от коротких замыканий (КЗ) между фазами, на землю и от замыканий витков одной фазы широкое распространение получила дифференциальная защита. Принцип действия дифференциальной защиты трансформаторов, также как и дифференциальной защиты линий и шин, основан на сравнении величины и направления токов до и после защищаемого элемента (в данном случае трансформатора). При внешнем КЗ и нагрузке токи с обоих концов трансформатора направлены в одну сторону, и находятся в определенном соотношении, равным коэффициенту трансформации трансформатора. При КЗ в трансформаторе токи направлены встречно от шин к месту повреждения. В первом случае защита не должна действовать, во втором – должна работать. С учетом этого и выполняется схема защиты.

Измерительные трансформаторы тока, питающие схему, устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора. Дифференциальное реле включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока. Для того, чтобы защита не работала при нагрузке и внешних КЗ, необходимо уравновесить вторичные токи в плечах защиты так, чтобы ток в реле, равный их разности, отсутствовал. Это является условием селективности защиты при внешних КЗ.

В дифференциальной защите линий первичные токи в начала и в конце защищаемого участка одинаковы, поэтому для выполнения условия селективности достаточно иметь равенство коэффициентов трансформации трансформаторов тока. Иное положение имеет место в дифференциальной защите трансформаторов. Первичные токи обмоток трансформатора не равны по величине и в общем случае не совпадают по фазе.

В трансформаторе с соединением обмоток звезда-треугольник первичные и вторичные токи отличаются по величине и фазе. В трансформаторе с соединением обмоток звезда-звезда токи различаются только по величине.

Выравнивание первичного и вторичного токов защищаемого трансформатора с соединением обмоток звезда-треугольник по фазе осуществляется соединением в треуголь-

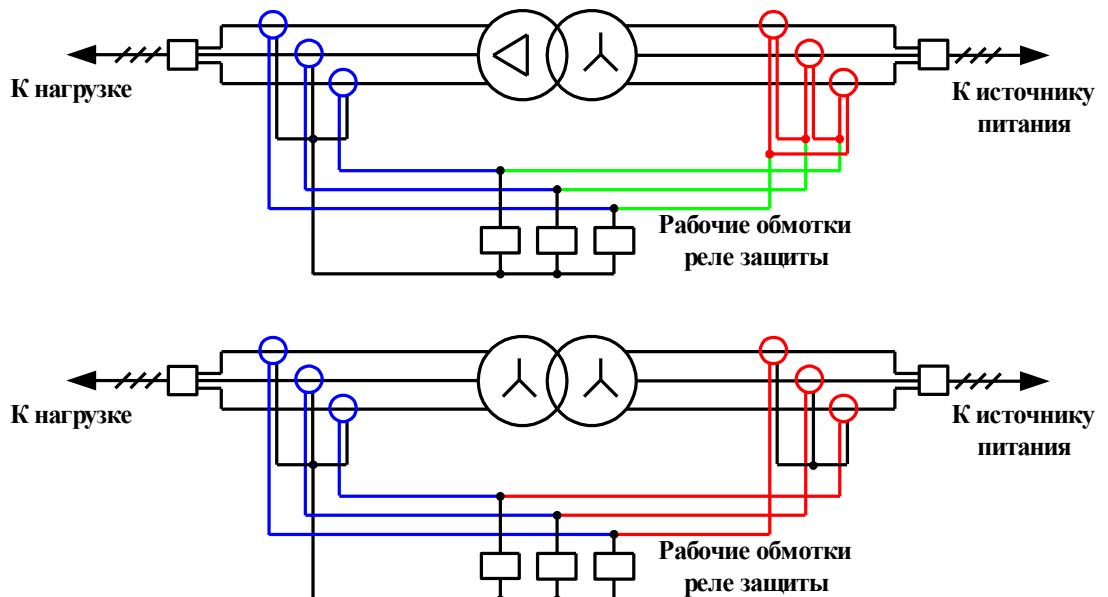
ник вторичных обмоток трансформаторов тока, устанавливаемых со стороны звезды силового трансформатора. Соединение в треугольник обмоток трансформаторов тока должно точно соответствовать соединению в треугольник обмоток силового трансформатора. Трансформаторы тока, расположенные на стороне треугольника силового трансформатора, соединяются в звезду.

Выравнивание величин вторичных токов в плечах дифференциальной защиты достигается подбором коэффициентов трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты и параметров специально для этой цели устанавливаемых трансформаторов или автотрансформаторов.

Величина тока небаланса в дифференциальной защите трансформаторов оказывается обычно большей, чем в дифференциальной защите линий и шин, что объясняется наличием дополнительных составляющих в токе небаланса. Еще одним фактором, влияющим на работу дифференциальной защиты, являются броски тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение.

Применение быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ) позволяет выполнить простую и быстродействующую дифференциальную защиту, надежно отстроенную от токов небаланса и бросков токов намагничивания.

В дифференциальных защитах, установленных на трансформаторах с регулированием напряжения под нагрузкой или многообмоточных трансформаторах с несколькими питающими обмотками, токи небаланса в установившемся режиме имеют значительную величину. В этих случаях дифференциальная защита с реле, включенными через БНТ, получается малочувствительной. Чувствительность дифференциальной защиты в указанных случаях может быть повышена путем применения дифференциальных реле с торможением.



В данном эксперименте моделируется трансформатор (см. рис), обмотки которого могут иметь схему соединения звезда-звезда или звезда-треугольник. Одна сторона трансформатора подключена к источнику питания, другая – к нагрузке. С обеих сторон трансформатора включены измерительные трансформаторы тока и трехполюсные выключатели. Существует возможность устраивать короткие замыкания на выводах трансформатора и на шинах нагрузки.

На компьютере с помощью специальной программы моделируется дифференциальная защита трансформатора. Защита настраивается под нужное соединение и напряжение обмоток силового трансформатора. Также защита может работать с торможением от тока внешнего КЗ или без него. При срабатывании защита воздействует на оба выключателя.

При правильно собранной схеме и корректно выбранных уставках защита должна срабатывать при замыкании в ее зоне действия и не должна действовать при КЗ на выводах нагрузки.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" однофазного источника питания G1.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений.

Отключите (если включен) выключатель А9.

Установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора А1, например, 1,0.

Установите желаемые параметры линии электропередачи Л, например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи А2 и А3 равными 50 Ом и 0,1 Гн.

Установите желаемый ток срабатывания реле А10, например, 1,0 А.

Включите выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.

Включите источник G1. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка.

Включите выключатель А9. В результате загорится зеленая лампа блока А8, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

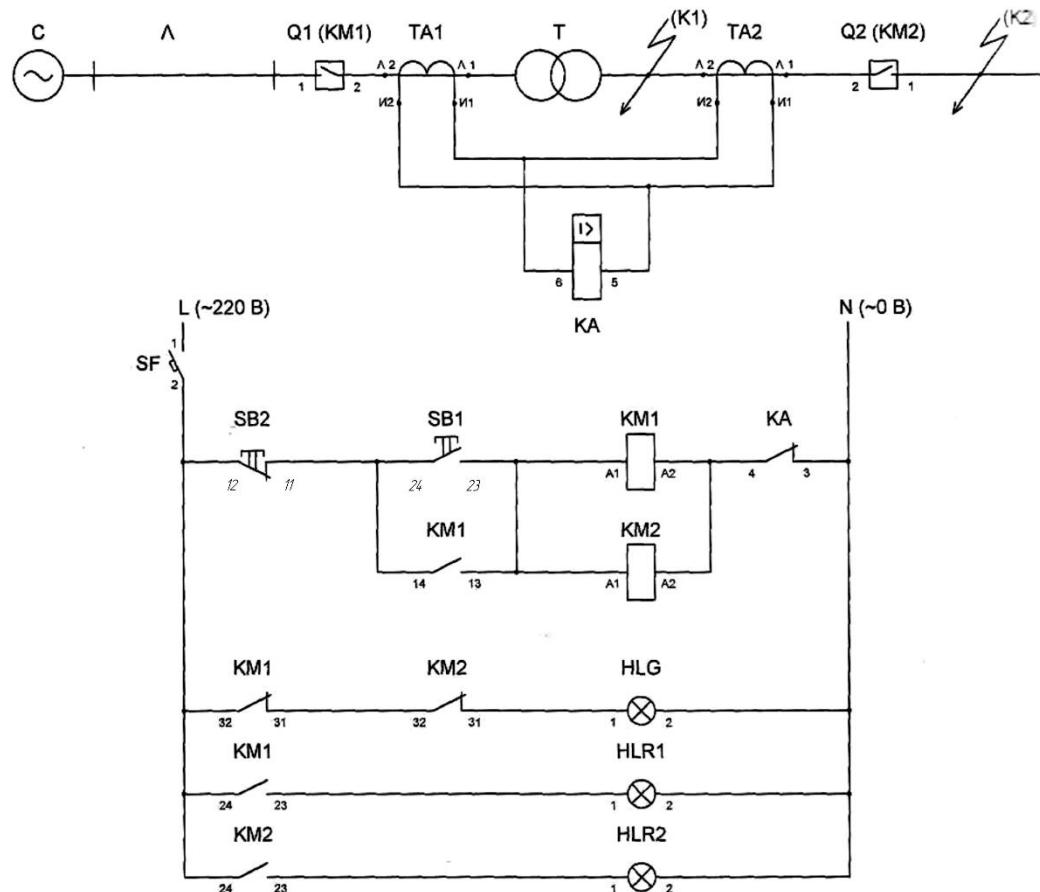
Нажмите последовательно две верхние кнопки поста управления А7. В результате включатся контакторы А4, А13 (выключатели Q1, Q2) и на модели линий А2, А3 (линию Л) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке А8. Зеленая лампа в блоке А8 погаснет.

Смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л. Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий А2 и А3. В результате сработает дифференциальная защита и поврежденная линия Л (модели линий А2, А3) отключится (отключится) от источника питания выключателями Q1 и Q2 (контакторами А4 и А13). Красные лампы в блоке А8 погаснут, а зеленая лампа загорится.

С индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты.

Выньте проводник «П» из гнезда.

По завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1 и выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.



***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

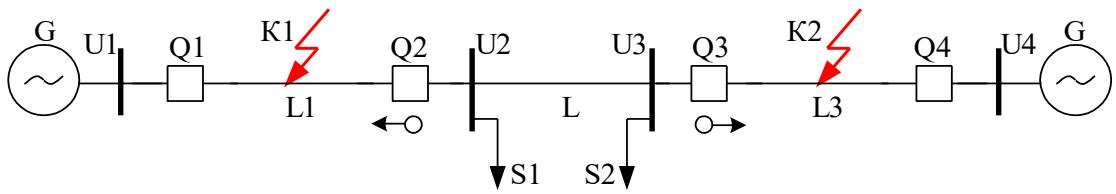
1. Каковы принцип действия и область применения дифференциальной защиты трансформатора?
2. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
3. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемом трансформаторе?

## Лабораторная работа №6. Защита воздушных и кабельных ЛЭП. Токовая направленная защита линий электропередачи в кольцевой сети.

**Цель работы:** Ознакомление студентов с принципом действия, схемой и выбором уставок токовой направленной защиты линий электропередачи в кольцевой сети.

### Основы теории:

Защита, действующая только при определенном направлении (знаке) мощности короткого замыкания (КЗ), называется направленной. Необходимость в применении направленных защит возникает в сетях с двусторонним питанием. Защита в этих сетях не только реагирует на появление тока КЗ, но и для обеспечения селективности также учитывает направление мощности КЗ в защищаемой линии (иначе говоря, фазу тока в линии относительно напряжения на шинах).



В сетях с двусторонним питанием (см. рис) и в кольцевых сетях направление тока и мощности КЗ зависит от места возникновения повреждения. Например, при коротком замыкании в точке К2 через защиту на выключателе Q3 проходит ток в направлении от шин подстанции 3 к месту повреждения. При коротком замыкании в точке К1 через эту же защиту проходит ток в противоположном направлении.

Если принять, что в первом случае ток короткого замыкания отстает от напряжения U3 на шинах подстанции 3, а мощность КЗ положительна и направлена от шин в линию, то во втором случае ток КЗ сдвинут на 1800 относительно тока КЗ в первом случае, а соответствующая этому мощность КЗ отрицательна и направлена из линии к шинам. Таким образом, направление мощности КЗ, проходящей по линии, характеризует, где возникло повреждение: на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.

Это обстоятельство используется в направленной защите, которая по знаку мощности определяет, на каком присоединении возникло повреждение и действует только при КЗ на защищаемом участке.

Простая токовая защита, не реагирующая на знак мощности, действует как при КЗ на защищаемой линии, так и при повреждениях на других присоединениях, отходящих от

шин подстанции, питающей защищаемую линию. Поэтому получить селективное отключение КЗ в сетях с двусторонним питанием с помощью простой токовой защиты, как правило, невозможно.

На основании изложенного можно сформулировать следующие принципы выполнения селективной защиты в сетях с двусторонним питанием:

1. Защита устанавливается с обеих сторон от защищаемой линии и действует при направлении мощности от шин в линию.

2. Выдержки времени на защитах, работающих при одном направлении мощности, должны быть согласованы между собой по ступенчатому принципу с нарастанием по направлению к источнику питания, от тока которого действуют рассматриваемые защиты.

В данном эксперименте моделируется сеть с двусторонним питанием, состоящая из трех последовательно соединенных линий (см. рис.). К дальним от источников питания шинам линий L1 и L3 подключены нагрузки S1 и S2. Выключатели Q1 и Q2 расположены по концам линии L1, выключатели Q3 и Q4 – по концам линии L3. Точки коротких замыканий K1 и K2 находятся в середине линий L1 и L3 соответственно.

На компьютере с помощью специальной программы моделируются четыре токовые защиты, каждая из которых воздействует на один из выключателей Q1-Q4. Защиты, управляющие выключателями Q2 и Q3, могут иметь орган направления мощности.

Если уставки защит выбраны правильно, то при коротком замыкании отключается только та линия, на которой оно возникло (при КЗ в точке K1 отключаются выключатели Q1 и Q2, при КЗ в точке K2 – Q3 и Q4).

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда «ТК» источника G1.

Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, обращая особое внимание на полярность включения в схему измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также полярность вторичных сигналов с них.

Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей A2, A4, A6, A8 установите в положение «АВТ.», выключателей A10 и A13 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блоков A1 и A9 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линий электропередачи A3 и A7 переключателями установите, например, следующими:  $R = 200$  Ом,  $L/RL=1,2/32$  Гн/Ом,  $C1=C2=0$  мкФ. Выберите мощность активной нагрузки A11, например 20% от 50 Вт в используемых фазах. Выберите мощность индуктивной нагрузки A9, например 40% от 40 Вар в используемых фазах.

Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A2, A4, A6, A8, A10, A13 блока A17 ввода-вывода цифровых сигналов.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A12, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Направленная защита.ехе».

Смоделируйте требуемый вариант защиты, для чего задайте уставки, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.

Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись»; введите защиты нажатием на соответствующую кнопку и непосредственно после этого смоделируйте короткое замыкание на одной из линий, включив выключатель A10 или A13. После отключения защитой «поврежденной» линии выведите защиты и остановите запись. Проанализируйте отображенные осцилограммы токов и напряжений линий, состояние выключателей, а также информацию о последовательности произошедших событий в журнале работы защиты, вызывать который можно нажатием на соответствующую кнопку.

При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

Масштабирование осцилограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

Двигать график осцилограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

На экране также отображается состояние выключателей A2, A4, A6, A8.

В случае срабатывания той или иной защиты на соответствующей осциллограмме появляется информирующая об этом надпись.

Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.

Уставки токов и напряжений следует задавать амплитудными значениями.

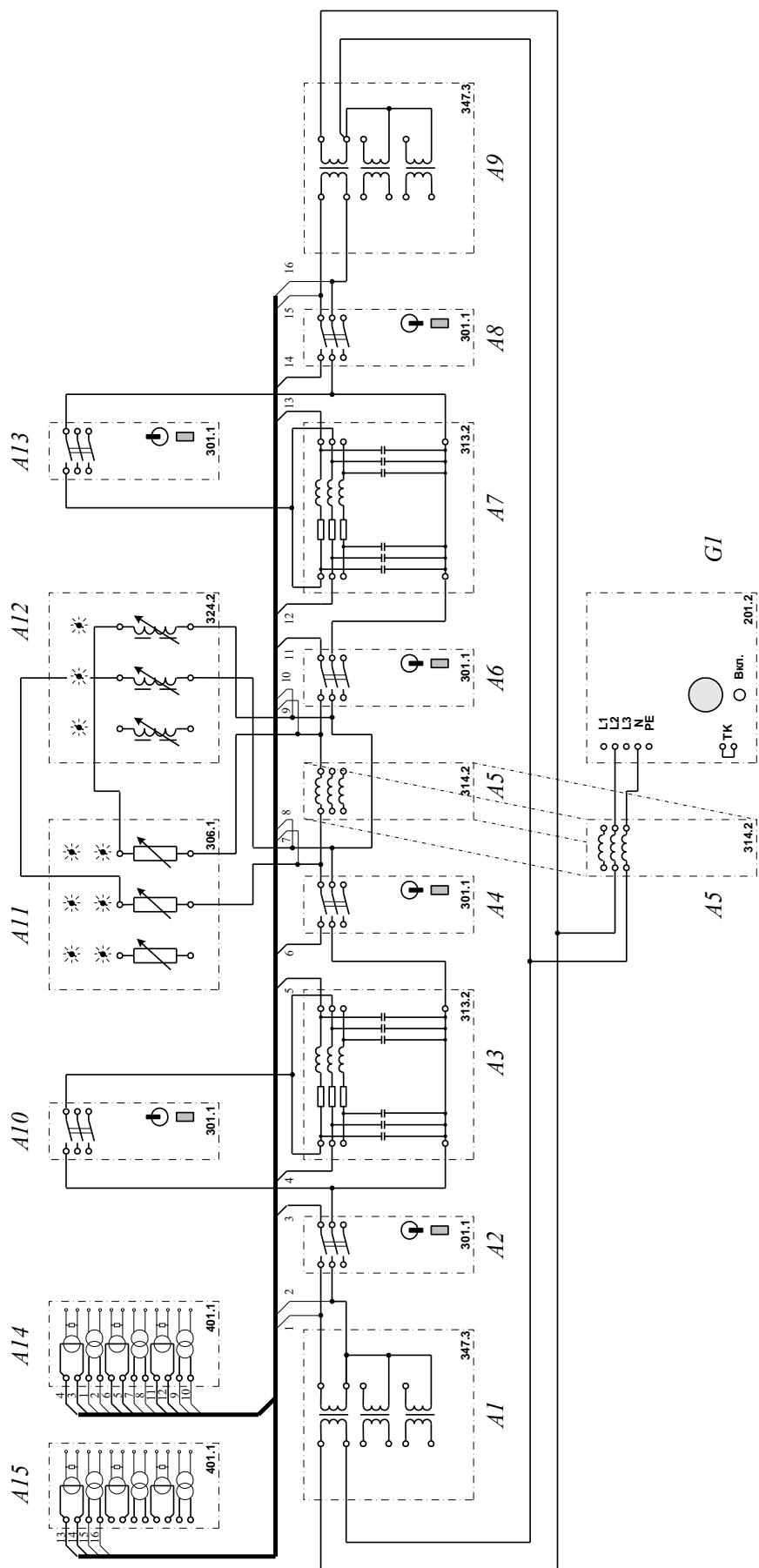
При возникновении неправдоподобных результатов эксперимент следует повторить.

Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Его длину можно изменять в пункте меню «Настройки».

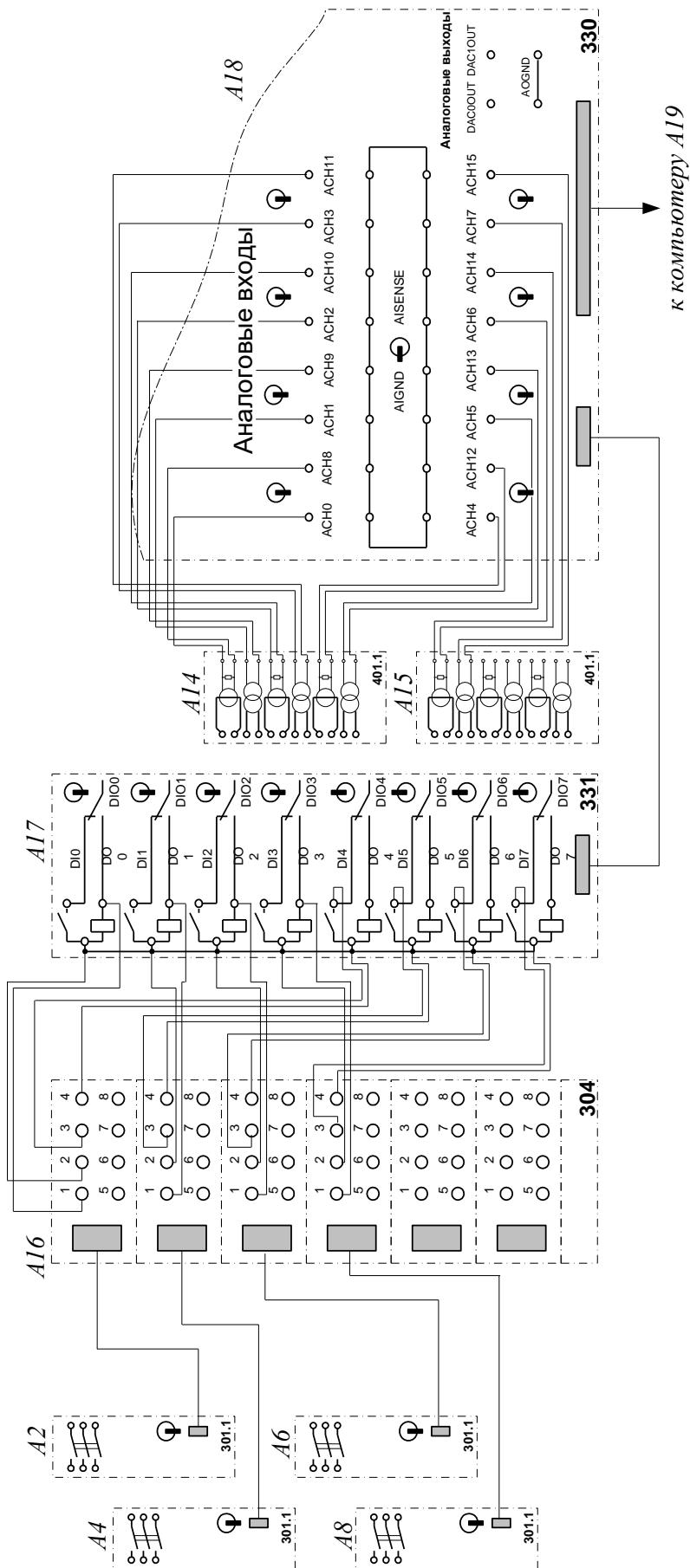
По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков A2, A4, A6, A8, A10, A13, A17.

Пример результатов описанного опыта приведен в приложении.

## Электрическая схема соединений



## Продолжение электрической схемы соединений



***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Когда применяется МТНЗ?
2. Когда имеет место мертвая зона МТНЗ?
3. Укажите достоинства и недостатки 90о схемы включения реле мощности.
4. Назовите основные типы реле мощности.
5. Как выбирается ток срабатывания МТНЗ?
6. Как выбирается время срабатывания МТНЗ?
7. Что такое каскадное действие защит?
8. В каких сетях имеет место каскадное действие защит?

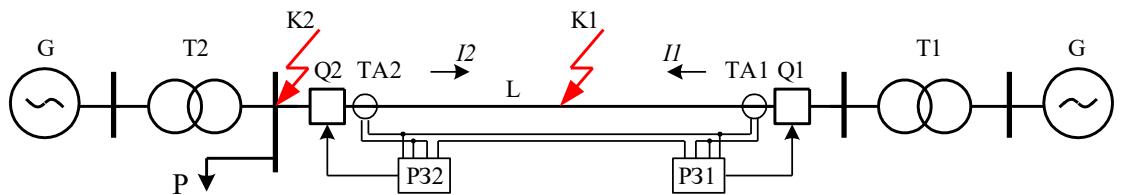
## Лабораторная работа №7. Дифференциальная токовая защита. Продольная дифференциальная защита линии электропередачи.

**Цель работы:** Изучить принцип действия и назначение продольной дифференциальной токовой направленной защиты.

### Основы теории:

На линиях, отходящих от шин электростанций или узловых подстанций энергосистем, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение коротких замыканий (КЗ) без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии электропередачи. К защитам, способным удовлетворить это условие, относятся дифференциальные защиты. Они обеспечивают мгновенное отключение КЗ в любой точке защищаемой линии и обладают селективностью при КЗ за пределами этой линии. Дифференциальные защиты подразделяются на продольные и поперечные. Первые служат для защиты как одноцепных, так и параллельных (двухцепных) линий, вторые – только двухцепных линий.

Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на сравнении величины и фазы токов в начале и конце защищаемой линии.



Как видно из вышеприведенного рисунка, при внешнем коротком замыкании в точке K2 токи I1 и I2 по концам защищаемой линии направлены в одну сторону и равны по величине, а при КЗ на защищаемой линии (в точке K1) они направлены в разные стороны и, как правило, не равны друг другу. Следовательно, сопоставляя величину и фазу токов I1 и I2, можно определить, где возникло КЗ – на линии или за ее пределами. Такое сравнение токов по величине и фазе осуществляется в реагирующем органе дифференциальной защиты.

Для реализации защиты по концам линии устанавливают трансформаторы тока TA1 и TA2 с одинаковым коэффициентом трансформации. Их вторичные обмотки соединяют и подключают к дифференциальному реле (P31, P32) таким образом, чтобы при внешних КЗ в точке K2 ток в реле был равен разности токов в начале и конце линии, а при КЗ на линии в точке K1 – их сумме.

Токи небаланса в дифференциальных защитах линий при сквозных КЗ могут достигать значительных величин. Значение токов небаланса может обуславливаться большими

кратностями токов внешнего КЗ, неодинаковостью трансформаторов тока по концам линии, их значительной загрузкой и другими причинами.

Для отстройки от токов небаланса получили распространение дифференциальные реле с торможением. Ток срабатывания у таких реле возрастает с увеличением тока внешнего КЗ.

В данном эксперименте моделируется линия электропередачи с двусторонним питанием, по концам которой установлены выключатели и трансформаторы тока (см. рис). Имеется возможность устраивать короткие замыкания на защищаемой линии и вне ее. На защищаемой линии можно устраивать металлические КЗ и КЗ через дополнительное сопротивление, имитирующее дугу.

С помощью специальной программы на компьютере моделируется продольная дифференциальная защита линии, которая может работать с использованием или без использования торможения от внешнего КЗ. В программе существует возможность имитировать погрешность трансформаторов тока. При срабатывании защита воздействует одновременно на выключатели Q1 и Q2.

В правильно собранной схеме защита без торможения должна срабатывать при КЗ на линии (точка K1) и не должна срабатывать при КЗ за ее пределами (точка K2).

Возможно также убедиться в том, что в случае КЗ через дугу дифференциальная защита без торможения не способна работать селективно ни при каких значениях уставок (справедливо при определенном значении погрешности трансформаторов тока; подробнее см. приложение). Ввод в работу торможения позволяет создать селективную дифференциальную защиту.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда «TK» источника G1.

Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей A2 и A4 установите в положение «АВТ.», выключателей A8 и A9 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока А1 выставьте равными, например, 133/230 В. Параметры линий электропередач А3 и А5 переключателями установите, например, следующими:  $R = 150$  Ом,  $L/RL=0,9/24$  Гн/Ом,  $C1=C2=0$  мкФ. Выберите мощность активной нагрузки А6, например 100% от 50 Вт в фазах, используемых как активная нагрузка и 40% от 50 Вт в третьей фазе.

Смоделируйте металлическое короткое замыкание в середине линии. Для этого соедините клеммы K1 и K2 между собой.

Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей А2, А4, А7, А9 а также блока А11 ввода-вывода цифровых сигналов.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А14, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Продольная дифзащита.exe».

Задайте уставки защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.

Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись», введите защиту нажатием на соответствующую кнопку. Смоделируйте короткое замыкание в зоне действия защиты, включив выключатель А9. После отключения защитой «поврежденной» линии проанализируйте отображенные осциллограммы токов.

Проделайте эксперимент еще раз, моделируя короткое замыкание вне зоны действия защиты с помощью выключателя А7. Проанализируйте полученные осциллограммы токов.

Отключите источник питания G1, разомкните клеммы K1 и K2, симулировав тем самым короткое замыкание через дугу.

Вновь включите источник G1 и, проделав несколько экспериментов, убедитесь, что при данных параметрах схемы реле без торможения не может обеспечить правильную работу защиты.

Ведите торможение (в окне задания уставок защиты). Проделав эксперименты, убедитесь, что защита теперь работает правильно.

При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

Двигать график осцилограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

На экране также отображается состояние выключателей А2 и А4.

Точные значения любых времен следует определять по осцилограмме, а не по журналу работы защит.

Уставки токов следует задавать амплитудными значениями.

При возникновении неправдоподобных результатов эксперимент следует повторить.

Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Параметры буфера, а именно его полную длину и длину «эпилога» (фактически – время записи после свершения интересующего события, в данном случае – срабатывания сигнализации) можно изменять в пункте меню «Настройки».

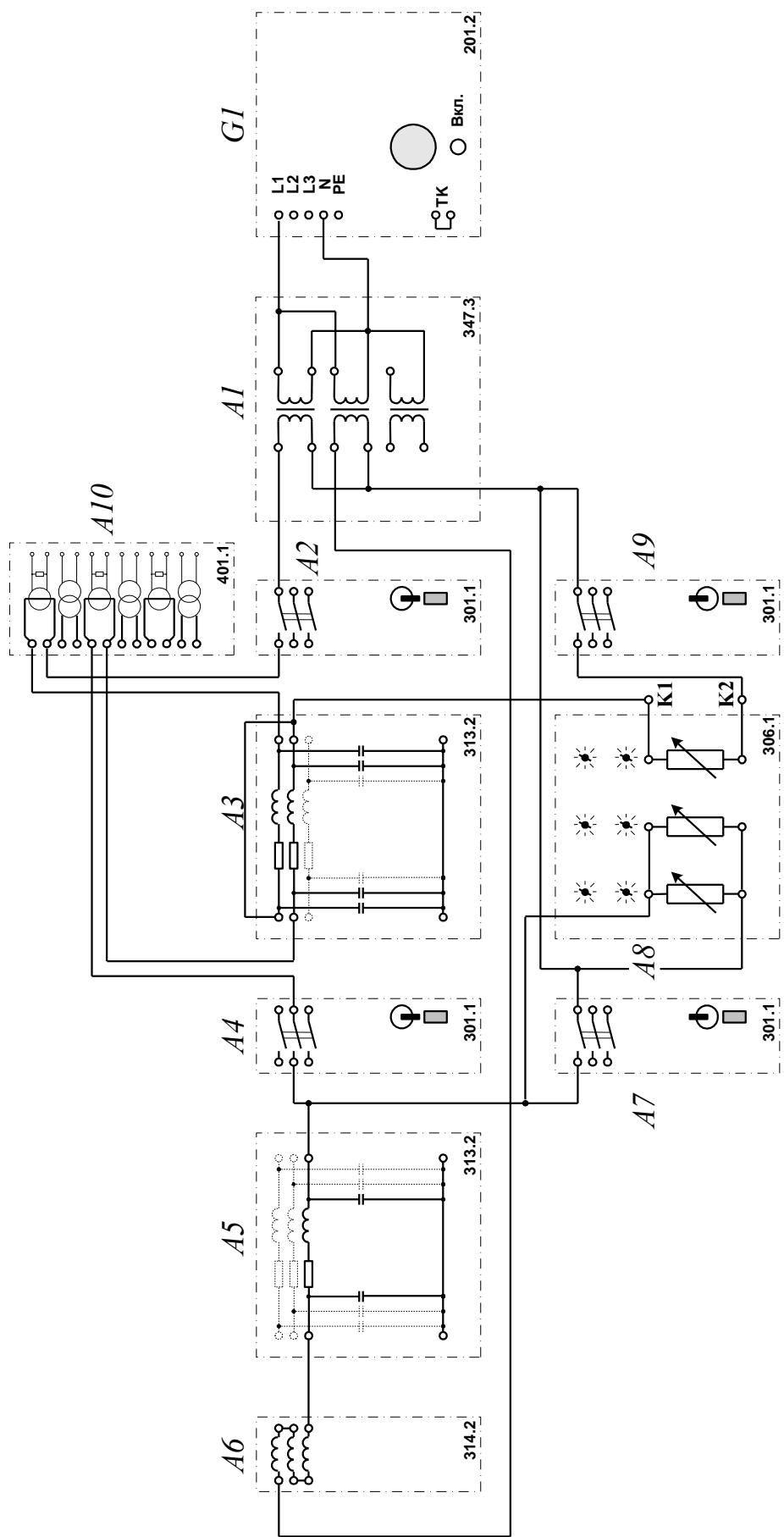
Задать погрешность трансформаторов тока можно в пункте меню «Настройки -> Погрешность трансформаторов тока».

Дифференциальная защита является защитой мгновенного действия. Тем не менее, среди уставок защиты присутствует и уставка выдерки времени, необходимая, во-первых, для повышения наглядности результатов экспериментов, и, во-вторых, для отстройки защиты от коммутационных помех.

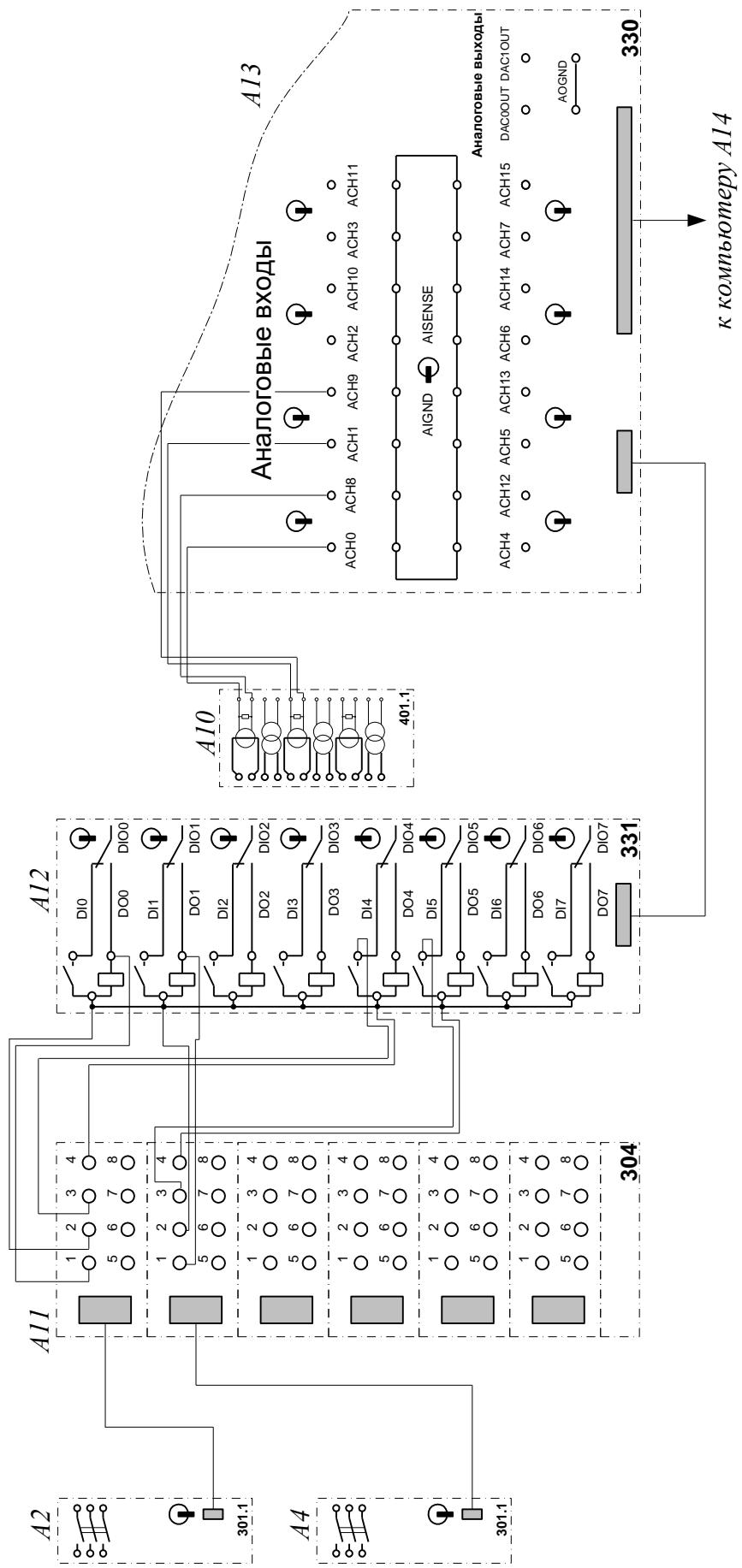
По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков А2, А4, А7, А9, А12.

Пример результатов описанных опытов приведен в приложении.

## Электрическая схема соединений



## Продолжение электрической схемы соединений



### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Объяснить принцип действия продольной дифференциальной защиты.
2. Почему дифференциальная защита не реагирует на токи нагрузки, токи внешних коротких замыканий и токи качаний генераторов частей электроэнергетической системы?
3. В каком токовом режиме работы защищаемого объекта ток небаланса будет иметь максимальное значение?
4. С каких трансформаторов тока в реальной трехфазной цепи подаются вторичные токи на входы измерительных органов защиты? Привести примеры.
5. Чем объяснить наличие тока небаланса в цепях измерительной части защиты?
6. Сколько трансформаторов тока необходимо использовать на каждом конце защищаемой трехфазной линии электропередачи напряжением 35 кВ?
7. Сколько трансформаторов тока необходимо использовать на каждом конце защищаемой трехфазной линии электропередачи напряжением 220 кВ? Напряжением 110 кВ?
8. Изобразить простейшую электрическую принципиальную схему измерительной части продольной дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 35 кВ, выполненную на релейных элементах; сделать то же для линии напряжением выше 69 кВ.
9. Какой наиболее существенный недостаток имеют дифференциальные защиты линий электропередачи? В чем заключается наибольшая трудность при выполнении таких защит?
10. Где располагаются устройства (комплекты) продольных дифференциальных защит линий? В каких электроустановках? В каких частях этих электроустановок?
11. Каковы причины возникновения погрешностей в работе продольных дифференциальных защит линий электропередачи, за счет чего устраняется их отрицательное воздействие на работу защиты?

12. В чем количественно выражаются, состоят погрешности в работе рассматривающей защиты?

13. Каким видом селективности обладает изучаемая в этой работе защита?

14. Каково быстродействие изучаемой в работе защиты?

## ***Лабораторная работа №8. Дифференциальная токовая защита. Поперечная дифференциальная защита параллельных линий электропередачи.***

**Цель работы:** Изучить принцип действия и назначение поперечной дифференциальной токовой направленной защиты.

### ***Основы теории:***

На линиях, отходящих от шин электростанций или узловых подстанций энергосистем, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение короткого замыкания (КЗ) в пределах всей защищаемой линии без выдержки времени. К защитам, способным удовлетворить это условие, относятся дифференциальные защиты. Они обеспечивают мгновенное отключение КЗ в любой точке защищаемой линии и обладают селективностью при КЗ за пределами этой линии. Дифференциальные защиты подразделяются на продольные и поперечные. Первые служат для защиты как одноцепных, так и двухцепных (параллельных) линий, вторые – только двухцепных линий.

Токовая поперечная дифференциальная защита предназначается для параллельных линий с общим выключателем на обе линии. При одностороннем питании параллельных линий защита устанавливается только со стороны источника питания, а в сети с двусторонним питанием – с обеих сторон параллельных линий.

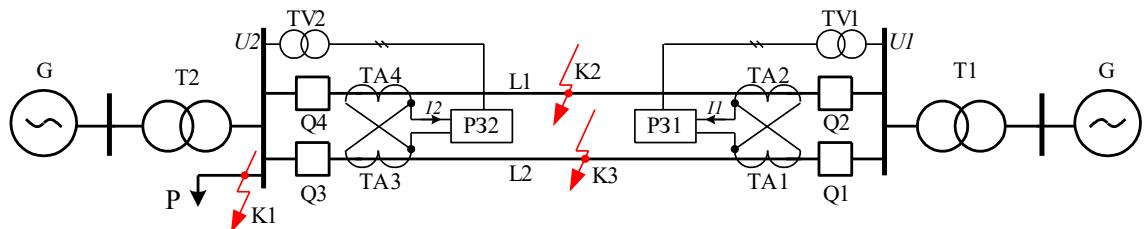
В нормальном режиме работы, при внешних КЗ и качаниях по параллельным линиям протекают одинаковые токи. При КЗ на одной из защищаемых линий токи в линиях становятся разными. Следовательно, сопоставляя величину и фазу токов в параллельных линиях, можно устанавливать факт возникновения КЗ в зоне действия защиты.

При удалении точки КЗ от места установки защиты соотношение токов по поврежденной и неповрежденной линиям изменяется. Часть линий вблизи шин противоположной подстанции не охватывается защитой вследствие уменьшения разницы токов, на которую реагирует защита. Участок линий, в пределах которого при КЗ ток в защите недостаточен для ее срабатывания, называется мертввой зоной защиты.

Направленная поперечная дифференциальная защита применяется на параллельных линиях с самостоятельными выключателями на каждой линии. К защите таких линий предъявляется требование – отключать только ту из двух линий, которая повредилась.

На линиях с двусторонним питанием зона, в пределах которой направленная дифференциальная защита не действует пока поврежденная линия не отключится с противоположной стороны, называется зоной каскадного действия защиты. Зона каскадного действия

определяется на основе таких же соображений, как и мертвая зона ненаправленной дифференциальной защиты параллельных линий.



В рассматриваемом эксперименте моделируются две параллельные линии электропередачи L1 и L2 с двусторонним питанием (см. рис). По концам каждой из них имеются выключатели Q1-Q4 и трансформаторы тока TA1-TA4. К шинам, питающим линии, подключены трансформаторы напряжения TV1 и TV2. От шин подстанции 2 получает питание нагрузка P.

Короткие замыкания устраиваются на обеих линиях электропередачи (в точках K2, K3), а также на питающих их шинах вне зоны действия защиты (в точке K1).

На компьютере с помощью специальной программы моделируются дифференциальные защиты, установленные с обеих сторон линий L1 и L2. Каждая из защит может быть ненаправленная – в таком случае она воздействует на оба выключателя вместе, или направленная – тогда защита определяет, где именно возникло повреждение и воздействует лишь на один выбранный выключатель. При этом любую защиту можно отключить и рассматривать работу оставшейся защиты отдельно.

В рамках описываемого опыта при правильно собранной схеме и определенных параметрах ее элементов можно определить мертвую зону защиты и зону каскадного действия защит (подробнее см. в указаниях по проведению эксперимента).

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда «TK» источника G1.

Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей A2, A3, A6, A7 установите в положение «АВТ.», выключателей A10 и A11 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока A1 выставьте равными, например, 133/230 В. Параметры линий электропередачи A3 и A5 переключателями установите, например, следующими:  $R = 150 \text{ Ом}$ ,  $L/RL=0,9/24 \text{ Гн/Ом}$ ,  $C1=C2=0 \text{ мкФ}$ . Выберите мощность активной нагрузки A9, например 100% от 50 Вт в используемой фазе.

Смоделируйте короткое замыкание на одной из защищаемых линий. Например, для замыкания на первой (верхней по рисунку) линии соедините гнезда K0 и K1 между собой.

Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A2, A3, A6, A7, A10, A11 а также блока A15 ввода-вывода цифровых сигналов.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A17, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Поперечная дифзащита.exe».

Задайте уставки защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.

Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись», введите защиту нажатием на соответствующую кнопку. Смоделируйте короткое замыкание в зоне действия защиты, включив выключатель A11. После отключения защитой «поврежденной» линии проанализируйте осцилограммы токов и напряжений.

Проделайте эксперимент еще раз, моделируя короткое замыкание вне зоны действия защиты с помощью выключателя A10. Проанализируйте полученные осцилограммы токов и напряжений.

Используя окно задания уставок, смоделируйте направленные дифференциальные защиты. Повторите эксперимент. Убедитесь в том, что отключается лишь та линия, на которой произошло «повреждение».

Установите параметры линии A5 следующими:  $R = 50 \text{ Ом}$ ,  $L/RL=0,3/8 \text{ Гн/Ом}$ . Повторите эксперимент, моделируя замыкание в зоне действия защиты. Убедитесь в том, что короткое замыкание смоделировано в зоне каскадного действия защит. Проанализируйте полученные осцилограммы и журнал работы защит, обращая внимание на последовательность произошедших событий.

При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

Масштабирование осцилограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз.

Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

На экране также отображается состояние выключателей A2, A3, A6, A7.

Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.

Уставки токов следует задавать амплитудными значениями.

При возникновении неправдоподобных результатов эксперимент следует повторить.

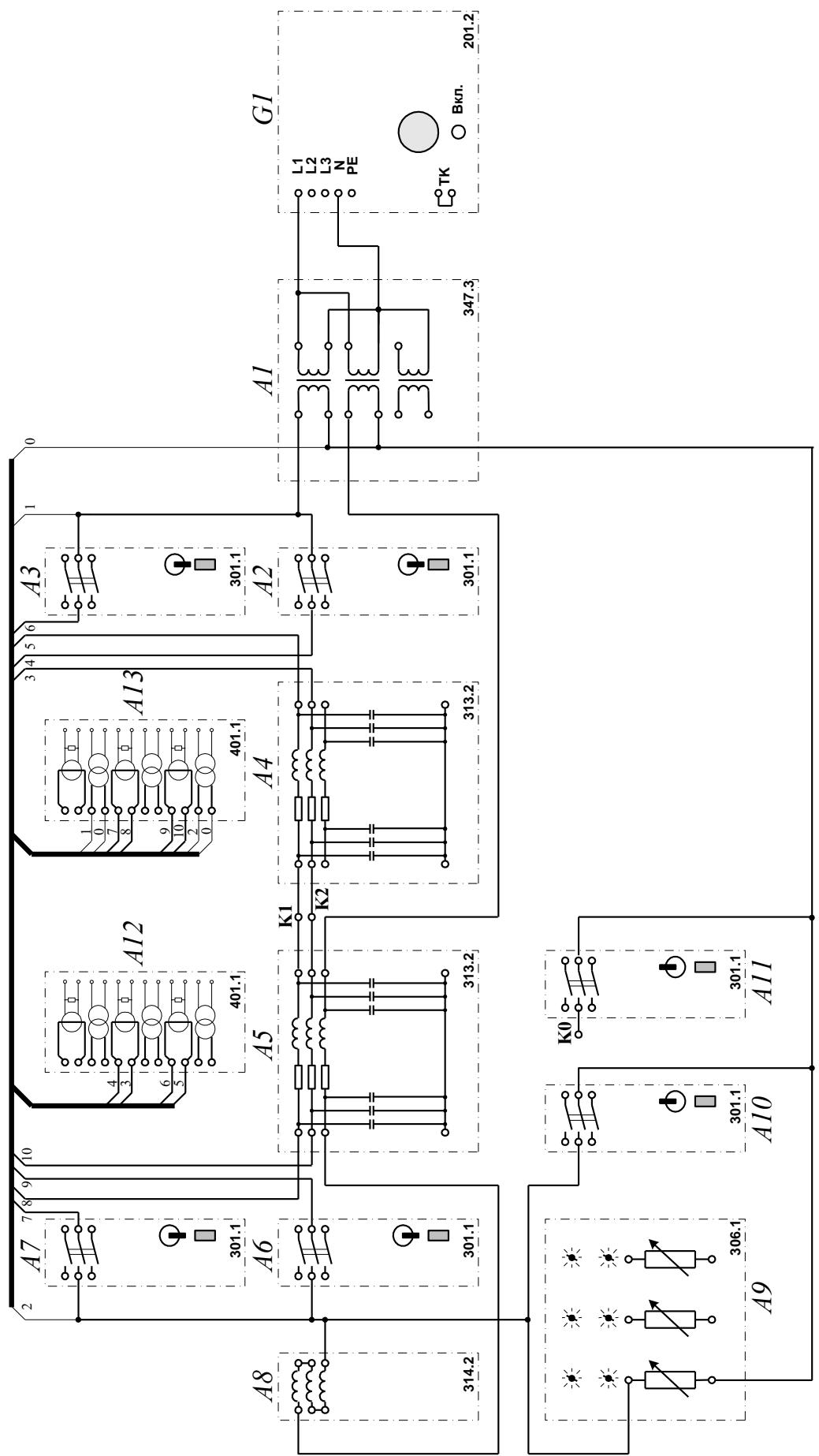
Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Параметры буфера, а именно его полную длину и длину «эпилога» (фактически – время записи после свершения интересующего события, в данном случае – срабатывания защиты) можно изменять в пункте меню «Настройки». Например, если срабатывание защиты ожидается через 0,5 секунды после начала короткого замыкания, то для того, чтобы увидеть предаварийный режим, режим короткого замыкания и режим после отключения повреждения длину буфера в целом можно принять равной 2-м секундам, а длину эпилога (по сути, это длина записи режима после отключения КЗ) – 0,5–1 секунде.

Дифференциальная защита является защитой мгновенного действия. Тем не менее, среди уставок защиты присутствует и уставка выдержки времени, необходимая, во-первых, для повышения наглядности результатов экспериментов, во-вторых, для отстройки защиты от коммутационных помех и в-третьих – для гарантированно правильного определения защитой направления мощности.

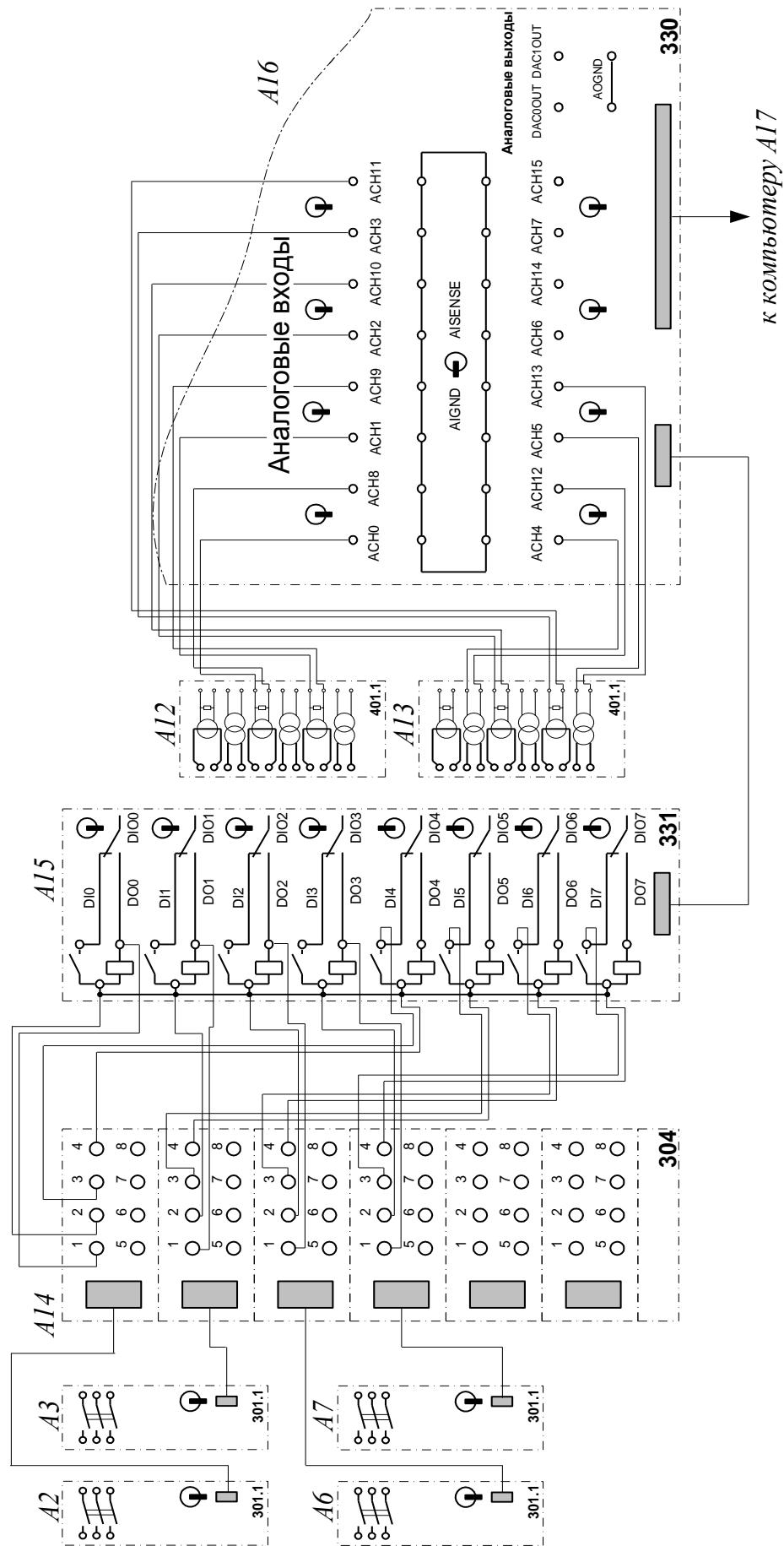
По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков A2, A3, A6, A7, A10, A11, A15.

Пример результатов описанных опытов приведен в приложении.

## Электрическая схема соединений



## Продолжение электрической схемы соединений



***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Почему дифференциальная защита выполняется без выдержки времени?
2. Чем опасен обрыв соединительного провода в плече дифференциальной защиты?
3. Каковы причины, вызывающие ток небаланса в реле в нормальном режиме и при внешнем КЗ?
4. Как выполнить схему направленной поперечной дифференциальной защиты при отсутствии специального реле направления мощности двустороннего действия?
5. В чем недостаток каскадного действия защиты?
6. Почему наличие блокировки по напряжению повышает чувствительность направленной поперечной дифференциальной защиты?

## ***Лабораторная работа №9. Дистанционная защита. Дистанционная защита линий электропередачи в сети с двусторонним питанием.***

**Цель работы:** Ознакомиться с принципом действия дистанционной защиты линий.

### ***Основы теории:***

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения короткого замыкания (КЗ). Токовые отсечки не всегда применимы, а продольные дифференциальные защиты могут устанавливаться только на коротких линиях.

В связи с этим возникает необходимость в применении других принципов, позволяющих получить защиты с необходимым быстродействием, обеспечивающие селективность и чувствительность в электрических сетях любой конфигурации. Одной из таких защит является дистанционная защита.

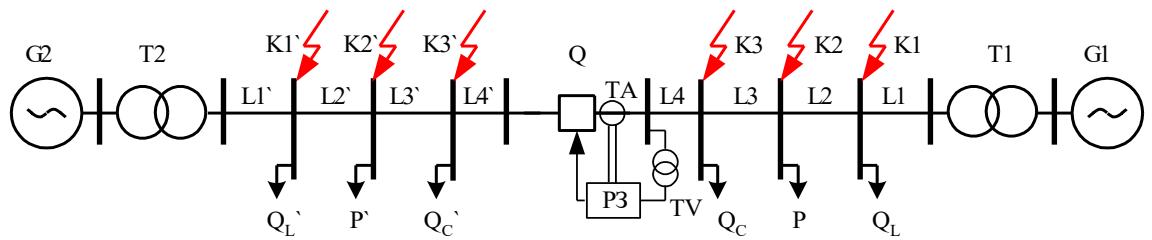
Выдержка времени дистанционной защиты зависит от расстояния (дистанции) между местом установки защиты и точкой КЗ, и нарастает плавно или ступенчато с увеличением этого расстояния. При таком принципе действия ближайшая к месту повреждения дистанционная защита всегда имеет меньшую выдержку времени, чем более удаленные защиты, благодаря этому автоматически обеспечивается селективное отключение поврежденного участка.

Основным элементом дистанционной защиты является дистанционный орган, определяющих удаленность КЗ от места установки защиты. В качестве дистанционного органа используется реле сопротивления, непосредственно или косвенно реагирующее на полное, активное или индуктивное сопротивление линии.

Первоначально дистанционная защита выполнялась с помощью реле сопротивления, реагирующих только на абсолютную величину сопротивления до точки КЗ. По мере увеличения протяженности линий электропередачи и роста передаваемой по ним нагрузки абсолютные значения сопротивлений при КЗ в конце линий стали соизмеримы с сопротивлениями при аварийной нагрузке на линиях электропередачи. В таких условиях реле сопротивления, реагирующие на абсолютные значения сопротивления, уже не могли точно отличить КЗ от нагрузки. В связи с этим дистанционные защиты выполняют реагирующими не только на абсолютную величину сопротивления, но и на величину угла (здесь  $x$  и  $r$  – соответственно реактивное и активное сопротивления от точки КЗ до места установки защиты), т.к. при КЗ и при передаче больших потоков мощности углы сопротивлений различаются.

Для этой цели были разработаны реле сопротивления, у которых сопротивление срабатывания реле. Такая зависимость называется характеристикой срабатывания реле.

Сопротивление  $Z$  является комплексной величиной, поэтому характеристики срабатывания реле изображают на комплексной плоскости в осях  $r$ ,  $x$ . В этой системе координат характеристика срабатывания реле является пограничной кривой, определяющей условия действия реле. Наиболее распространены характеристики реле в виде окружности (ненаправленное или направленное реле полного сопротивления и реле со смещенной круговой характеристикой), эллипса, прямой линии (реле реактивного сопротивления), многоугольника.



В данном эксперименте моделируются восемь последовательно соединенных линий электропередачи ( $L1-L4$ ,  $L1'-L4'$ ), питающихся с двух сторон от двух источников  $G1$ ,  $G2$  (см. рис.). К шинам этих линий подсоединенны различные электрические нагрузки ( $P$ ,  $QL$ ,  $QC$ ,  $P'$ ,  $QL'$ ,  $QC'$ ). Выключатель  $Q$  включен между линиями  $L4$  и  $L4'$ .

Существует возможность устраивать короткие замыкания в шести точках схемы ( $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $K1'$ ,  $K2'$ ,  $K3'$ ) на разных расстояниях и с разных сторон от выключателя  $Q$ .

С помощью измерительных трансформаторов фиксируется ток и напряжение вблизи выключателя  $Q$ .

На персональном компьютере посредством специальной программы моделируется дистанционная защита  $P3$ , действующая на выключатель  $Q$ . Защита может иметь от одной до трех ступеней с различными выдержками времени и различными характеристиками срабатывания реле. Также программа может работать в режиме осциллографа. При этом защита на выключатель не воздействует, но имеется возможность посмотреть ток, напряжение и положение вектора комплексного сопротивления относительно графиков зон срабатывания защиты в реальном времени.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.

Соедините гнезда «ТК» источника G1.

Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.

Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.

Переключатель режима работы трехполюсного выключателя А3 установите в положение «АВТ.», выключателя А9 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока А1 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линий электропередач А2 и А4 переключателями установите, например, следующими:  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $L/RL=1,2/32 \text{ Гн/Ом}$ ,  $C1=C2=0 \text{ мкФ}$ .

Выберите мощность активной нагрузки А7, например 10% от 50 Вт в первой фазе, 100% - во второй.

Выберите мощность индуктивной нагрузки А6, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 80% - во второй.

Выберите мощность емкостной нагрузки А8, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 20% - во второй.

Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей А3, А9 а также блока А12 ввода-вывода цифровых сигналов.

Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А14, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Дистанционная защита.ехе».

Используя главное меню, выберите режим работы программы «Осциллограф». В этом режиме релейная защита на выключатель не воздействует, зато имеется возможность в реальном времени посмотреть ток, напряжение и вектор сопротивления дистанционной защиты. Произвольным образом изменяйте величины нагрузок сети и наблюдайте изменение длины и фазы вектора комплексного сопротивления. Некоторые примеры значений нагрузок и получающиеся при их использовании картинки на экране приведены в приложении.

Задайте характеристики защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте характеристики, заданные по умолчанию.

Установите первоначальные значения всех нагрузок схемы.

Смоделируйте короткое замыкание. Например, соедините точки К0 и К1 между собой и включите выключатель А9. Аналогичным образом имитируйте другие короткие замыкания, соединяя точки К1-К6 с точкой К0. Обратите внимание на изменение вектора комплексного сопротивления, а также на то, в какую область срабатывания при каком коротком замыкании попадает вышеупомянутый вектор. Для точного определения факта попадания вектора в ту или иную область ориентируйтесь на круглые индикаторы в правом нижнем углу экрана.

Выберите режим работы программы «Защита».

Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись», введите защиту нажатием на соответствующую кнопку. Смоделируйте одно из вышеописанных шести коротких замыканий. После отключения защитой «повреждения» проанализируйте осциллограммы токов и напряжений, а также положение вектора сопротивления в различные моменты времени. Некоторые примеры получающихся картинок с экрана приведены в приложении.

При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

Масштабирование осциллограммы токов и напряжений производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.

Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.

Масштабировать векторные диаграммы, а также графики зон срабатывания защит в окне задания уставок можно путем нажатия на соответствующие кнопки в правом нижнем углу графика.

На экране также отображается состояние выключателя А3.

В режиме работы «Осциллограф» выключатель А3 можно включить, нажав на соответствующую виртуальную кнопку (после нажатия кнопка исчезнет).

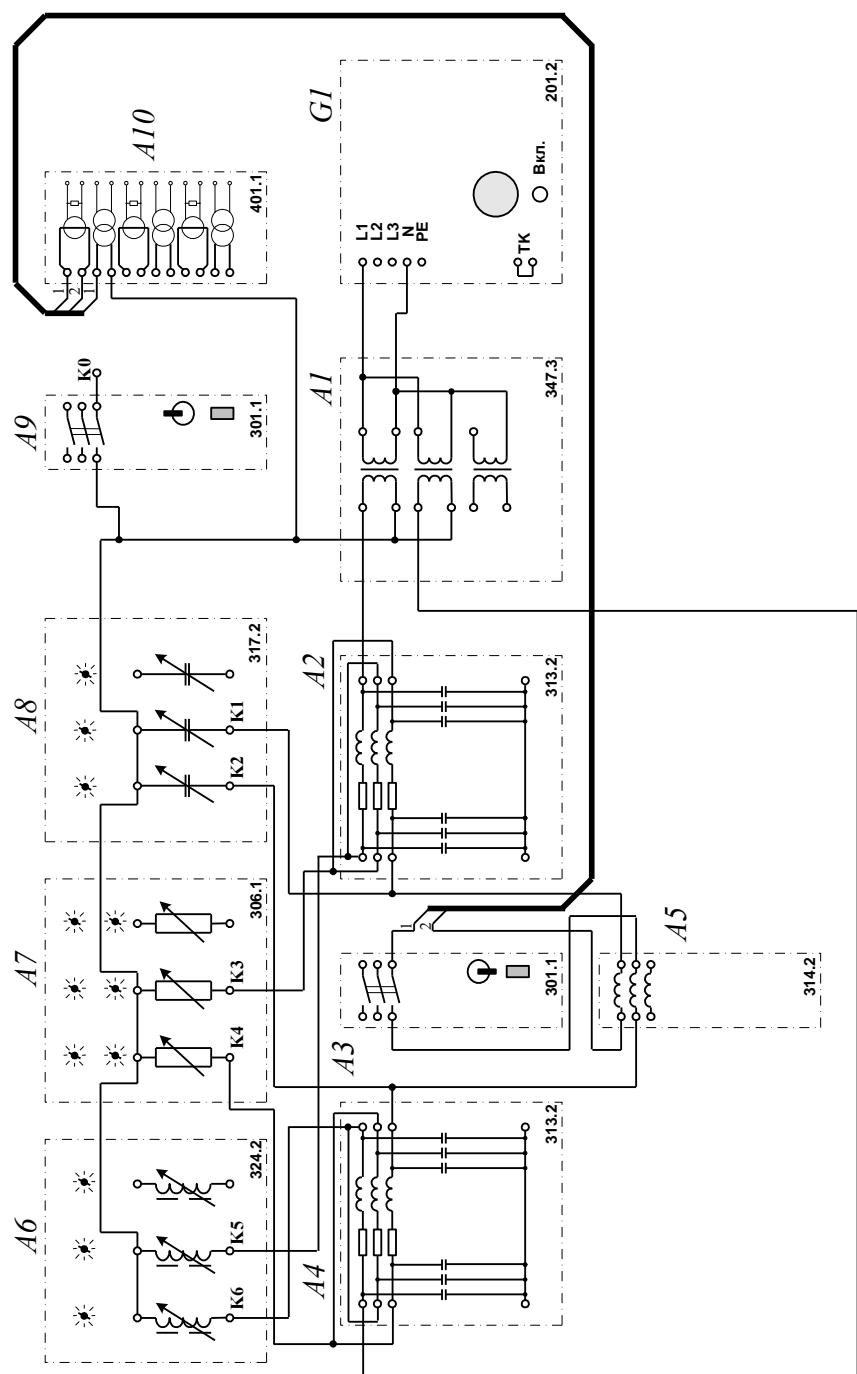
В режиме «Защита» после срабатывания защиты можно посмотреть вектор сопротивления в любой момент времени. Для этого необходимо щелкнуть по интересующему моменту времени на графике осциллограмм тока и напряжения, одновременно удерживая нажатой клавишу «Shift».

Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.

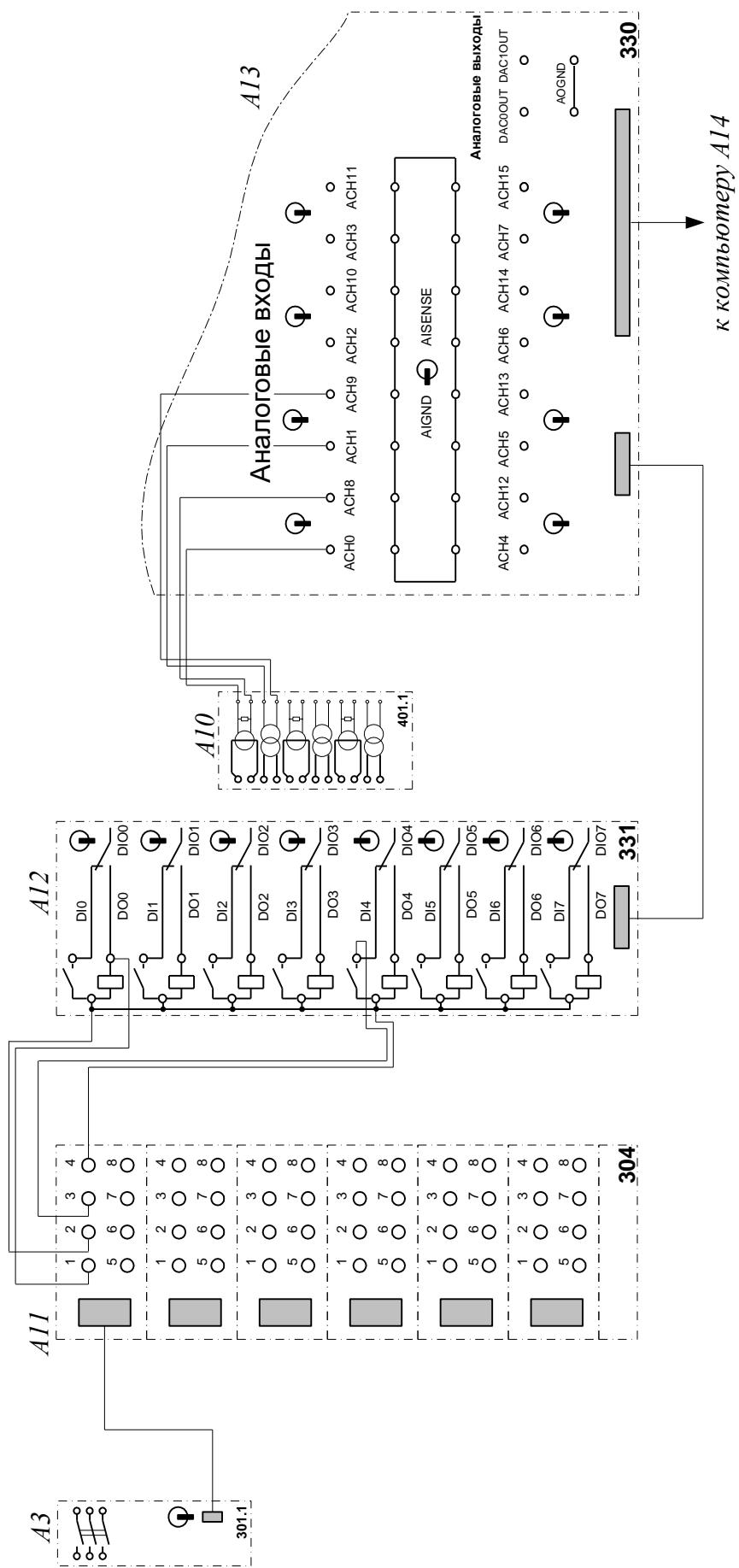
Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Параметры буфера, а именно его полную длину и длину «эпилога» (фактически – время записи после свершения интересующего события, в данном случае – срабатывания защиты) можно изменять в пункте меню «Настройки». Например, если срабатывание защиты ожидается через 2 секунды после начала короткого замыкания, то для того, чтобы увидеть предаварийный режим, режим короткого замыкания и режим после отключения повреждения длину буфера в целом можно принять равной 5-и секундам, а длину эпилога (по сути, это длина записи режима после отключения КЗ) – 0,5–1 секунде.

По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков A3, A9, A12.

## Электрическая схема соединений



## Продолжение электрической схемы соединений



***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. В каких случаях применяется дистанционная защита линий?
2. Назовите параметр на который срабатывает линия.
3. Какие бывают характеристики выдержек времени дистанционной защиты?
4. Каким образом согласовывают дистанционные защиты между собой?
5. Из каких функциональных частей состоит ДЗ, поясните их?
6. Какие бывают характеристики срабатывания дистанционной защиты?
7. Какими достоинствами и недостатками обладает ДЗ?

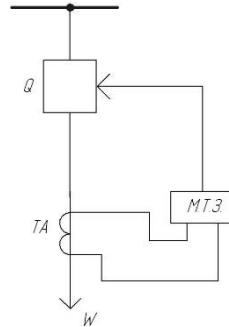
**Лабораторная работа №10. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени линии электропередачи и вводного выключателя.**

**Цель работы:** Изучить принцип действия максимальной токовой защиты, изучить методы расчета и проверки уставок защиты, исследовать факторы, влияющие на селективность и зону действия МТЗ.

**Основы теории:**

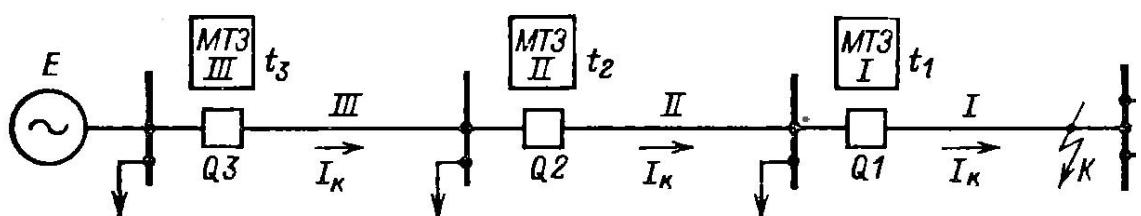
МТЗ – основная защита для воздушных линий с односторонним питанием. МТЗ оснащаются не только ЛЭП, но также и силовые трансформаторы, кабельные линии, мощные двигатели напряжением 6, 10 кВ.

Основным и наиболее характерным признаком К.З. является появление сверхтока, который становится во много раз больше тока нагрузки. На использовании этого принципа и основано действие М.Т.З.



К реле М.Т.З. через ТА подводится ток, проходящий по защищаемому элементу (линии  $W$ ). Когда ток достигает заранее установленного значения, защита приходит в действие (срабатывает) и отключает выключатель  $Q$ . Значение тока, при котором происходит срабатывание защиты, называется током срабатывания. Появление сверхтока в каком либо элементе, не всегда является признаком повреждения этого элемента, ибо сверхток проходит и по неповрежденным элементам цепи.

Так в электросети, состоящей из трех последовательно соединенных участков, при К.З. в точке К. сверхток проходит от источника  $G$  к месту повреждения как по поврежденному участку  $I$ , так и по неповрежденным:  $II$  и  $III$ .



Если сверхток превысит ток срабатывания, то недопустимо, чтобы сработали все три защиты. Правильная ликвидация аварии будет иметь место в том случае, если сработает М.Т.З. 1 и отключит выключать  $Q_1$ , ближайший к месту повреждения – это и есть требование к избирательности или селективности М.Т.З.. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы М.Т.З. участков имели различное время срабатывания, возрастающее по направлению к источнику питания.

Время срабатывания защиты от момента возникновения сверхтока до воздействия на выключатель называется выдержкой времени. В данном случае наименьшую выдержку времени  $t_1$  должна иметь защита М.Т.З. I; несколько большую  $t_2$  – защита М.Т.З. II и самую большую  $t_3$  – М.Т.З. III.

***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 2 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения фазных токов вводного выключателя и выключателя кабельной ЛЭП на первой секции сборных шин (каналы A1 и A2 к фазам А и С модуля вводного выключателя, каналы A3 и A7 к фазам А и С модуля выключателя кабельной ЛЭП). Вход модуля выключателя короткозамыкателя QK3 подключить к модулю короткозамыкателя, а выход — к клеммам А3, В3, С3 модуля выключателя кабельной ЛЭП 1СШ (точка K1). Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 модуля вводного выключателя, модулей выключателя кабельной ЛЭП, модуля двигателевой нагрузки и модуля секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводного выключателя и выключателя короткозамыкателя в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы - Лабораторный комплекс - DeltaProfi). Открыть лабораторную работу

командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №02 МТЗ с независимой выдержкой времени».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиты МТ31, МТ32 в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольники «МТ31» и «МТ32», в появившемся диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный — включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3 и Q6. При этом на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока.

6) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТА6, пропорциональное току нагрузки  $I_{h. \text{ макс}}$

7) Рассчитать ток срабатывания защиты МТ32 по классической формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h \cdot k_3}{k_e} \cdot I_{h. \text{ макс}}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,055$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,97$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ32»; в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

8) Включить выключатели Q5, Q7 и Q8. Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТА3, пропорциональное току нагрузки ввода №1  $I_{B. \text{ макс}}$ .

9) Рассчитать ток срабатывания защиты МТ31 по классической формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h \cdot k_3}{k_e} \cdot I_{h. \text{ макс}}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,050$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1,92$ . Коэффициент у возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,97$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31»; в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

10) Рассчитать выдержки времени срабатывания защит МТ31 и МТ32 в соответствии со ступенчатым принципом обеспечения селективности действия. Задать полученные выдержки времени в диалоговых окнах настройки параметров защит.

11) Перевести защиты МТ31 и МТ32 в режим работы «действие на отключение». Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает защита МТ32, отключая выключатель Q 6.

12) Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на первой секции сборных шин (клеммы А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП. Точка К2). Включить питание стенда. Сбросить указательное реле защиты МТ32. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8.

13) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает защита МТ31, отключая выключатель Q3.

14) Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на второй секции сборных шин (клеммы А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП. Точка К3). Включить питание стенда. Сбросить указательное реле защиты МТ31. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8.

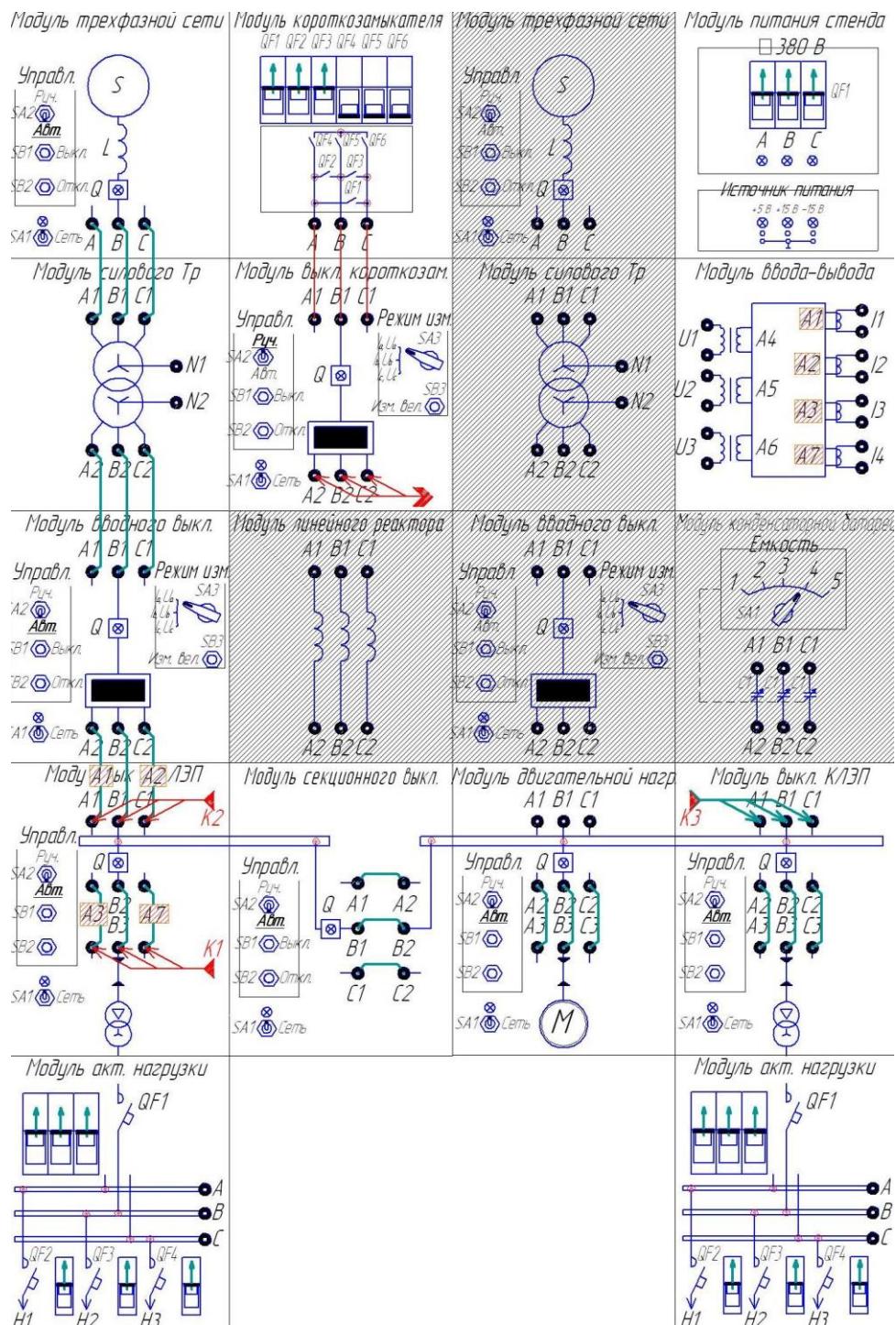
15) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных установках, срабатывает защита МТ31, отключая выключатель Q3.

16) Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на кабельной ЛЭП первой секции сборных шин (клеммы А3, В3, С3 модуля выключателя кабельной ЛЭП. Точка К1). Включить питание стенда. Сбросить указательное реле защиты МТ31. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8.

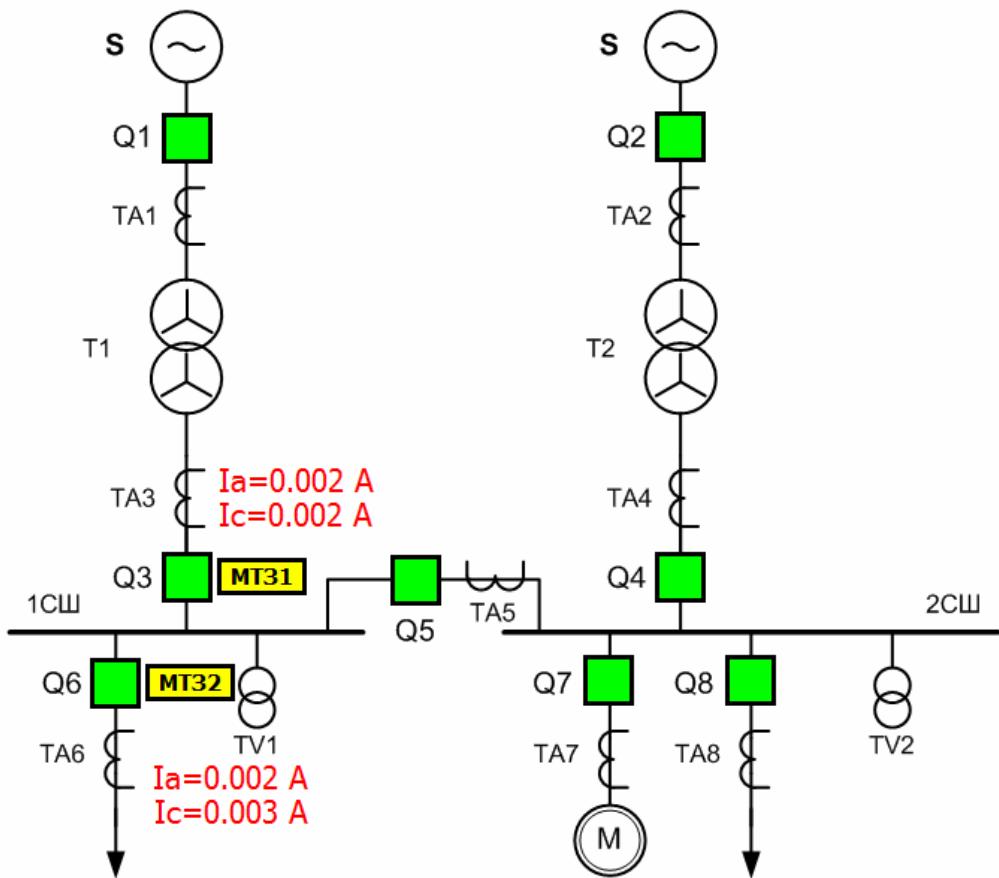
17) Перевести защиту МТ32 в режим работы «действие на сигнал» для имитации её отказа. Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает защита МТ31, отключая выключатель Q3.

18) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

19) Сделать выводы о селективности действия защиты, определить, какие из исследованных точек короткого замыкания относятся к основной и какие к резервной зоне действия защиты МТЗ1. Оформить отчет по лабораторной работе.



Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени линии электропередачи и вводного выключателя. Схема электромонтажная



Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени линии электропередачи и вводного выключателя. Мнемосхема

#### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### *Контрольные вопросы:*

1. Как выбирается уставка по току для максимальной токовой защиты (МТЗ) с независимой выдержкой времени?
2. Что такое коэффициент схемы, используемый при определении  $I_{cp}$ ?
3. Назовите основной недостаток применения максимальной токовой защиты.

5. В каких случаях и зачем при определении тока срабатывания измерительного органа защиты используется коэффициент схемы?

4. Как выставить уставку тока на реле КА?

**Лабораторная работа №11. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Максимальная токовая защита с блокировкой по минимальному напряжению.**

**Цель работы:** Изучить принцип действия максимальной токовой защиты с блокировкой по минимальному напряжению, изучить методы расчета и проверки уставок защиты, исследовать влияние пусковых органов напряжения на чувствительность МТЗ.

**Основы теории:**

Максимальной токовой защитой с пуском (блокировкой) по напряжению

Из схемы защиты, представленной на рисунке 3.8 видно, что защита будет действовать на отключение только после срабатывания реле минимального напряжения.

Для обеспечения надёжной работы защиты при всех видах междуфазных и однофазных к.з. устанавливаются три реле минимального напряжения 1, включаемые на линейные напряжения сети и одно реле минимального напряжения 2 реагирующее на появление напряжения нулевой последовательности.

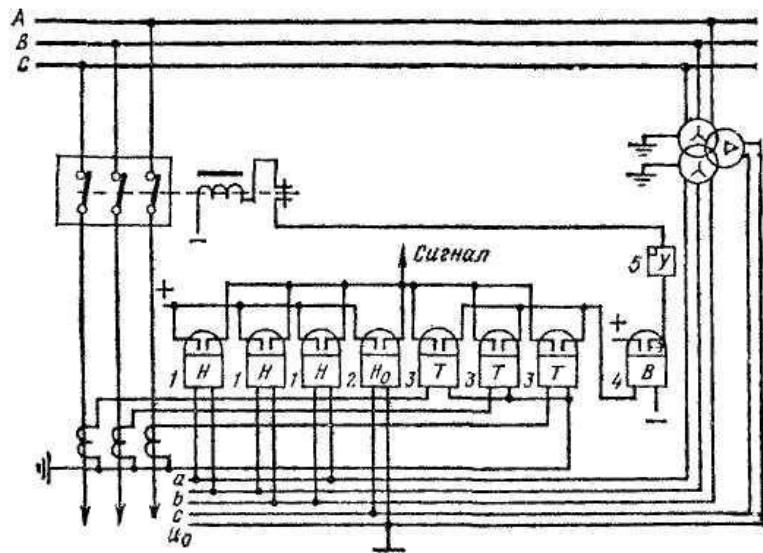


Схема МТЗ с блокировкой минимального напряжения.

В сетях с изолированной нейтралью токовая часть схемы МТЗ с пуском по напряжению выполняется двухфазной. В части реле напряжения схема выполняется 3-х фазной для обеспечения надёжной работы при 2-х фазных к.з., а реле напряжения, реагирующее на нулевую последовательность, не устанавливается, так как защита должна действовать только при междуфазных к.з.

Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению отстраивается не от максимального тока нагрузки линии, а от тока нормальной нагрузки  $I_n$  норм, который

обычно в 1,5÷2,0 раза меньше  $I_{h. max}$ , в результате чего резко повышается чувствительность защиты при к.з.

$$I_{c.z.} = K_h I_{h.norm};$$

Напряжение срабатывания защиты выбирается исходя из следующих условий:

1. реле напряжения не должны срабатывать (замкнуть контакты) при минимальном значении рабочего напряжения:

$$U_{c.z.} < U_{раб.мин};$$

2. реле напряжения должны возвращаться (разомкнуть контакты) после отключения к.з. и восстановления напряжения до уровня минимального рабочего:

$$U_{воз.} < U_{раб.мин};$$

где  $U_{воз.} = \frac{1}{K_h} U_{раб.мин}$ ;  $K_h$  – коэффициент надёжности.

Учитывая, что  $K_B = \frac{U_{воз.}}{U_{c.p.}}$  окончательная формула для расчёта напряжения срабатывания МТЗ с пуском по напряжению:  $U_{c.z.} = \frac{U_{раб.мин}}{K_h K_B}$ ;

Напряжение  $U_{раб.мин}$  обычно принимается на 5-10 % ниже нормального значения.

Чувствительность защиты по напряжению проверяется по максимальному значению напряжения при к.з. в конце зоны действия защиты, при этом коэффициент чувствительности:

$$K_u = \frac{U_{c.z.}}{U_{k.max}} \geq 1,5;$$

Напряжение срабатывания реле максимального напряжения, реагирующего на появление напряжения нулевой последовательности отстраивается от напряжения небаланса фильтра напряжений нулевой последовательности (обмотки разомкнутого треугольника ТН), т.е.  $U_{c.p.} > U_{kб}$  и обычно принимается равным 15-20 % максимального напряжения на зажимах реле при однофазных к.з.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 3 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!).

Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения линейных напряжений модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин (канал А4 на напряжение АВ, канал А5 на напряжение ВС, канал А6 на напряжение СА) и измерения фазных токов ввода первой секции сборных шин (канал А1 к фазе А, канал А2 к фазе С). Вход модуля выключателя короткозамыкателя QK3 подключить к модулю короткозамыкателя, а выход — к клеммам А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 вводного выключателя, выключателей кабельной ЛЭП, двигательной нагрузки и секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводного выключателя и выключателя короткозамыкателя в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы — Лабораторный комплекс — DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы — Релейная защита и автоматика - Работа №03 МТЗ с пуском по напряжению».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиту МТЗН в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТЗН», в появившемся диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление — Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый - отключен, красный — включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3 и Q6. При этом на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов и напряжений, соответственно, во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока и напряжения.

6) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТАЗ, пропорциональное току нагрузки ввода первой секции сборных шин  $I_{h. max}$  при включённом левом модуле активной нагрузки. Записать значение напряжения на выходе измерительного трансформатора TV 1  $U_{h. min}$ .

7) Рассчитать ток срабатывания защиты МТЗН по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h}{k_e} \cdot I_{h. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,2$ .

Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,95$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТЗН», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток и напряжение 220В срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

8) Перевести защиту МТЗН в режим действия на отключение. Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, защита срабатывает, отключая выключатель Q3.

9) Отключить выключатель короткозамыкателя. Сбросить указательное реле защиты МТЗН.

10) Перевести защиту МТЗН в режим работы «действие на сигнал»

11) Дистанционно включить выключатели Q3, Q5, Q7 и Q8. При этом, на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов и напряжений, соответственно, во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока и напряжения.

12) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТАЗ, пропорциональное току нагрузки ввода первой секции сборных шин  $I_{h. max}$  при полной активной и индуктивной нагрузке. Записать значение напряжения на выходе измерительного трансформатора TV 1  $U_{h. min}$ .

13) Рассчитать ток срабатывания защиты МТЗН по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h}{k_e} \cdot I_{h. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,2$ .

Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,95$ .

8) Рассчитать напряжение срабатывания защиты по формуле:

$$U_{C.3.} = \frac{k_h}{k_e} \cdot U_{h. min}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 0,8$ .

Коэффициент возврата реле напряжения принять равным  $k_e = 1,05$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТЗН», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток и напряжение срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

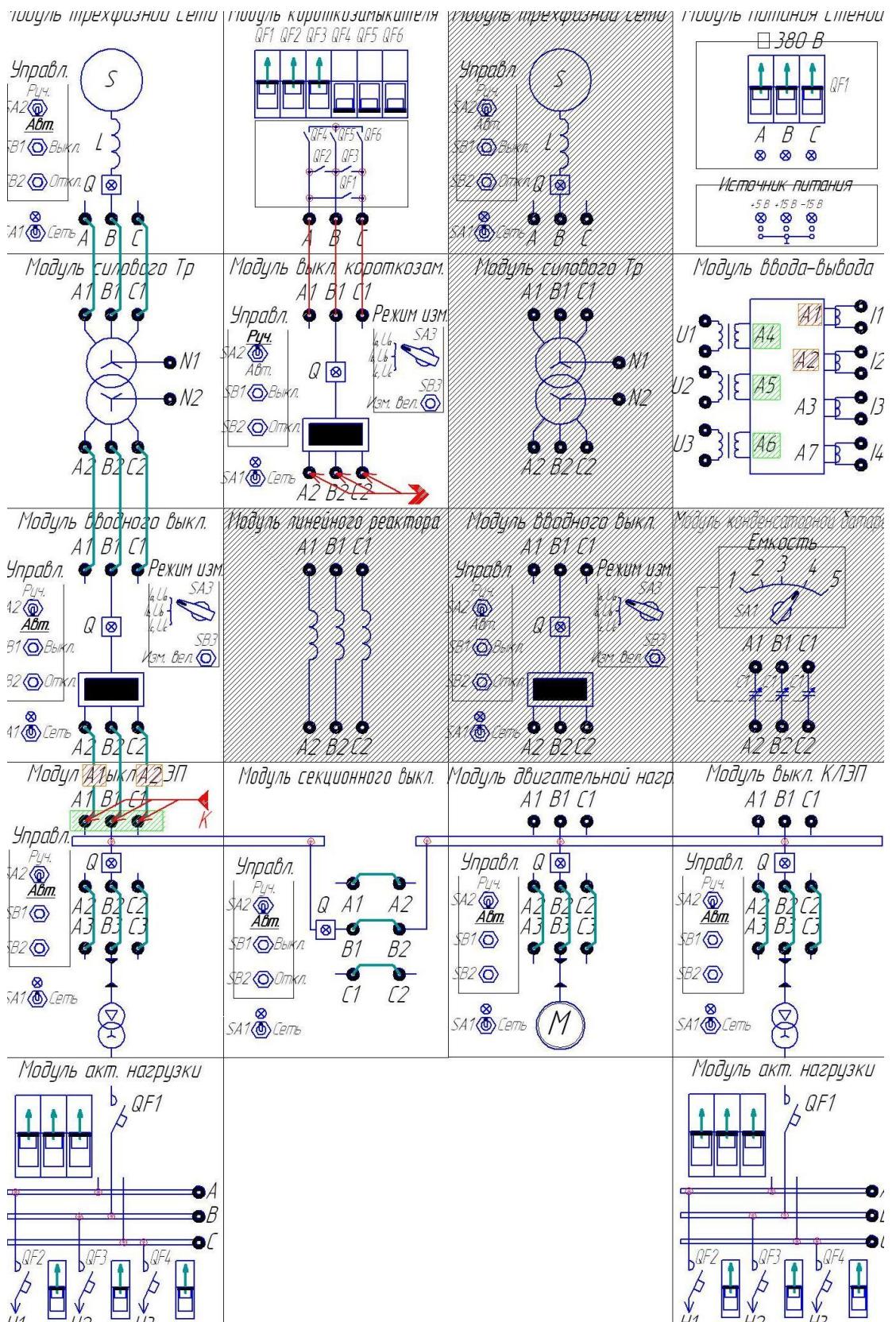
14) Перевести защиту МТЗН в режим действия на отключение. Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, защита срабатывает, отключая выключатель Q3.

15) Отключить выключатель короткозамыкателя. Сбросить указательное реле защиты МТЗН. Включить выключатель Q3.

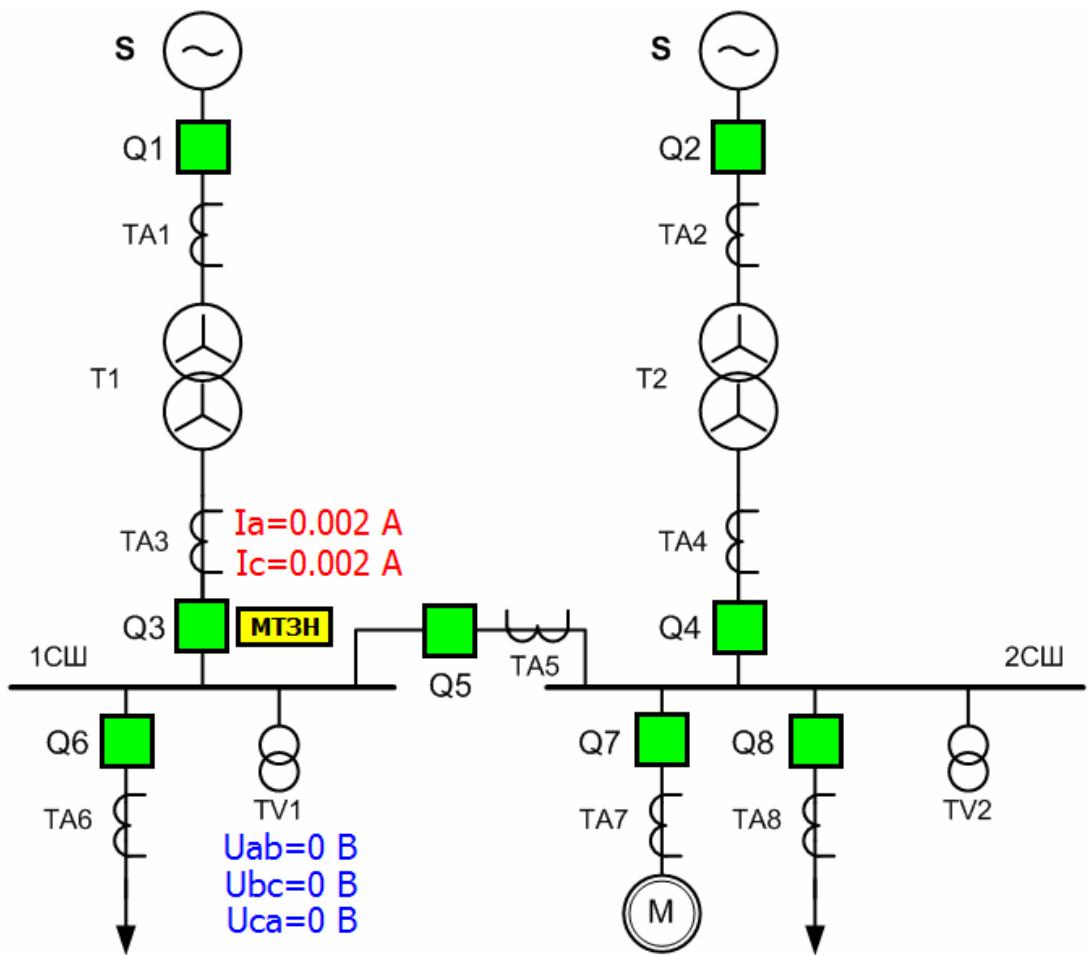
16) Для исследования поведения защиты при пуске двигательной нагрузки обратить внимание на то, что ток в измерительном трансформаторе ТАЗ значительно превышает ток срабатывания защиты, рассчитанный, как в п 7), так и в п. 13). Однако, при правильно выбранных уставках, защита не срабатывает.

17) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

18) Сделать выводы о селективности действия защиты, объяснить, почему защита не срабатывает при выходе двигателя на номинальный режим, когда пусковой ток превышает ток уставки защиты, указать особенности данного вида защиты по сравнению с обычной МТЗ. Оформить отчет по лабораторной работе.



Максимальная токовая защита с пуском по напряжению. Схема электромонтажная



Максимальная токовая защита с пуском по напряжению. Мнемосхема

#### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### *Контрольные вопросы:*

1. Почему при выборе уставки по току для максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению не учитывают коэффициент самозапуска двигательной нагрузки?
2. Как влияет наличие пусковых органов напряжения в схеме защиты на ее чувствительность?

3. Назовите основные достоинства и недостатки максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению.
4. Как влияет обрыв в измерительных цепях напряжения на селективность действия защиты?
5. Как производится оценка чувствительности изучаемой защиты?
6. Зачем на реле тока, напряжения, времени, используемые в данной работе, подается дополнительное питание?

## ***Лабораторная работа №12. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Дифференциальная защита трансформатора.***

**Цель работы:** Изучить принцип действия дифференциальной защиты трансформатора, изучить особенности дифференциальных защит трансформаторов, связанные с необходимостью выравнивания вторичных токов по величине, изучить особенности настройки параметров дифференциальных реле с торможением типа ДЗТ-11, исследовать факторы, влияющие на селективность, зону действия и чувствительность защиты.

### ***Основы теории:***

Для защиты трансформаторов от коротких замыканий (КЗ) между фазами, на землю и от замыканий витков одной фазы широкое распространение получила дифференциальная защита. Принцип действия дифференциальной защиты трансформаторов, также как и дифференциальной защиты линий и шин, основан на сравнении величины и направления токов до и после защищаемого элемента (в данном случае трансформатора). При внешнем КЗ и нагрузке токи с обоих концов трансформатора направлены в одну сторону, и находятся в определенном соотношении, равным коэффициенту трансформации трансформатора. При КЗ в трансформаторе токи направлены встречно от шин к месту повреждения. В первом случае защита не должна действовать, во втором – должна работать. С учетом этого и выполняется схема защиты.

Измерительные трансформаторы тока, питающие схему, устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора. Дифференциальное реле включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока. Для того, чтобы защита не работала при нагрузке и внешних КЗ, необходимо уравновесить вторичные токи в плечах защиты так, чтобы ток в реле, равный их разности, отсутствовал. Это является условием селективности защиты при внешних КЗ.

В дифференциальной защите линий первичные токи в начала и в конце защищаемого участка одинаковы, поэтому для выполнения условия селективности достаточно иметь равенство коэффициентов трансформации трансформаторов тока. Иное положение имеет место в дифференциальной защите трансформаторов. Первичные токи обмоток трансформатора не равны по величине и в общем случае не совпадают по фазе.

В трансформаторе с соединением обмоток звезда-треугольник первичные и вторичные токи отличаются по величине и фазе. В трансформаторе с соединением обмоток звезда-звезда токи различаются только по величине.

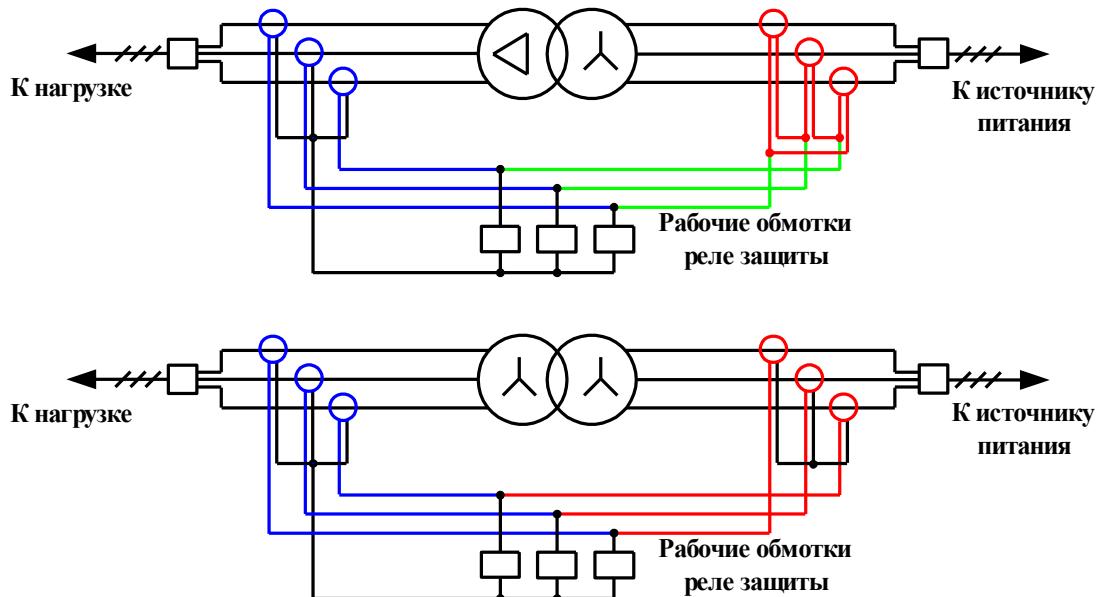
Выравнивание первичного и вторичного токов защищаемого трансформатора с соединением обмоток звезда-треугольник по фазе осуществляется соединением в треугольник вторичных обмоток трансформаторов тока, устанавливаемых со стороны звезды силового трансформатора. Соединение в треугольник обмоток трансформаторов тока должно точно соответствовать соединению в треугольник обмоток силового трансформатора. Трансформаторы тока, расположенные на стороне треугольника силового трансформатора, соединяются в звезду.

Выравнивание величин вторичных токов в плечах дифференциальной защиты достигается подбором коэффициентов трансформации трансформаторов тока дифференциальной защиты и параметров специально для этой цели устанавливаемых трансформаторов или автотрансформаторов.

Величина тока небаланса в дифференциальной защите трансформаторов оказывается обычно большей, чем в дифференциальной защите линий и шин, что объясняется наличием дополнительных составляющих в токе небаланса. Еще одним фактором, влияющим на работу дифференциальной защиты, являются броски тока намагничивания при включении трансформатора под напряжение.

Применение быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ) позволяет выполнить простую и быстродействующую дифференциальную защиту, надежно отстроенную от токов небаланса и бросков токов намагничивания.

В дифференциальных защитах, установленных на трансформаторах с регулированием напряжения под нагрузкой или многообмоточных трансформаторах с несколькими питающими обмотками, токи небаланса в установившемся режиме имеют значительную величину. В этих случаях дифференциальная защита с реле,ключенными через БНТ, получается малочувствительной. Чувствительность дифференциальной защиты в указанных случаях может быть повышена путем применения дифференциальных реле с торможением.



В данном эксперименте моделируется трансформатор (см. рис), обмотки которого могут иметь схему соединения звезда-звезда или звезда-треугольник. Одна сторона трансформатора подключена к источнику питания, другая – к нагрузке. С обеих сторон трансформатора включены измерительные трансформаторы тока и трехполюсные выключатели. Существует возможность устраивать короткие замыкания на выводах трансформатора и на шинах нагрузки.

На компьютере с помощью специальной программы моделируется дифференциальная защита трансформатора. Защита настраивается под нужное соединение и напряжение обмоток силового трансформатора. Также защита может работать с торможением от тока внешнего КЗ или без него. При срабатывании защита воздействует на оба выключателя.

При правильно собранной схеме и корректно выбранных уставках защита должна срабатывать при замыкании в ее зоне действия и не должна действовать при КЗ на выводах нагрузки.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

- 1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 4 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения токов со стороны высокого и низкого напряжения силового трансформатора на первой секции сборных шин (канал A1 к фазе А со стороны ВН, A2 к фазе А со стороны НН).

Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 вводного выключателя, выключателя кабельной ЛЭП, двигательной нагрузки и секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводного выключателя и выключателя короткозамыкателя в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

- 2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск — Программы — Лабораторный комплекс — DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы — Релейная защита и автоматика — Работа №04 Дифференциальная защита трансформатора».
- 3) В программе «DeltaProfi» перевести защиту ДЗТ в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗТ», в появившемся диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»),
- 4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.
- 5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный - включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8. При этом, на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов, пропорциональные токам первичной I1 и вторичной I2 обмоток защищемого трансформатора. Занести данные значения в таблицу 4.1.
- 6) Создать внешнее трехфазное короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. Определить значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора в режиме внешнего короткого замыкания  $I_{1K}$  и  $I_{2K}$ . Занести данные значения в таблицу 4.1. Отключить выключатель короткозамыкателя.

Таблица 4.1.

Параметр	Значение
Ток нагрузки со стороны ВН $I_1$ , А	
Ток нагрузки со стороны НН $I_2$ , А	
Ток внешнего короткого замыкания со стороны ВН $I_{1K}$ , А	
Ток внешнего короткого замыкания со стороны НН $I_{2K}$ , А	
Ток срабатывания реле $I_{CP}$ , А	
Число витков 2 уравнительной обмотки $\omega_{osn.} = \omega_{yp. 2}$	
Число витков 1 уравнительной обмотки $\omega_{neosn.} = \omega_{yp. 1}$	
Расчетное значение тока небаланса	
$I_{HB.PAC}$ , А	
Число витков тормозной обмотки $\omega_{torm.}$	

7) Рассчитать ток срабатывания реле по формуле:

$$I_{CP} = \frac{k_{otstr.} \cdot I_2}{n_{TA1}}$$

Коэффициент отстройки  $k_{otstr.}$  принять равным 1,5;

Коэффициент трансформации  $n_{TA1}$  трансформатора тока ТА1 принять равным 0,1.

Занести значение тока срабатывания реле в таблицу 1.4.

8) Определить расчетное число витков 2<sup>й</sup> уравнительной обмотки для основной стороны (сторона НН) по формуле:

$$\omega_{osn. pac} = \frac{100}{I_{CP}} .$$

Выбрать число витков 2<sup>й</sup> уравнительной обмотки  $\omega_{osn.} = \omega_{yp. 2}$ , как ближайшее целое значение, занести его в таблицу 1.4.

9) Определить расчетное число витков 1<sup>й</sup> уравнительной обмотки для неосновной стороны (сторона ВН) по формуле:

$$\omega_{neosn.osn.} = \frac{\omega_{osn. pac} \cdot I_{osn.}}{I_{neosn.}} = \omega_{osn. pac} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

Выбрать число витков 1<sup>й</sup> уравнительной обмотки  $\omega_{neosn.} = \omega_{yp. 1}$  как ближайшее меньшее целое значение, занести его в таблицу 1.4.

10) Определить расчетное значение тока небаланса по формуле:

$$I_{HB.PAC} = I'_{HB} + I''_{HB} = (I_{1K} - I_{2K}) + \frac{\omega_{neosn. pac} - \omega_{neosn.}}{\omega_{neosn.}} \cdot I_{2K}$$

Занести данное значение в таблицу 1.4.

11) Определить расчетное число витков тормозной обмотки по формуле:

$$\omega_{\text{торм.расч.}} = k_{\text{отст.}} \cdot \frac{I_{\text{НБ.Расч.}} \cdot \omega_{\text{неосн.расч.}}}{I_{2K} \cdot \operatorname{tg} \alpha}$$

Принять  $\operatorname{tg} \alpha = 0,75$

Коэффициент отстройки  $k_{\text{отст.}}$  принять равным 1,5;

Выбрать число витков тормозной обмотки  $\omega_{\text{торм.}}$  как ближайшее целое из возможных значений уставок реле ДЗТ-11, занести его в таблицу 1.4.

12) В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗТ») задать рассчитанные значения чисел витков тормозной и уравнительных обмоток. Перевести защиту в режим действия на отключение.

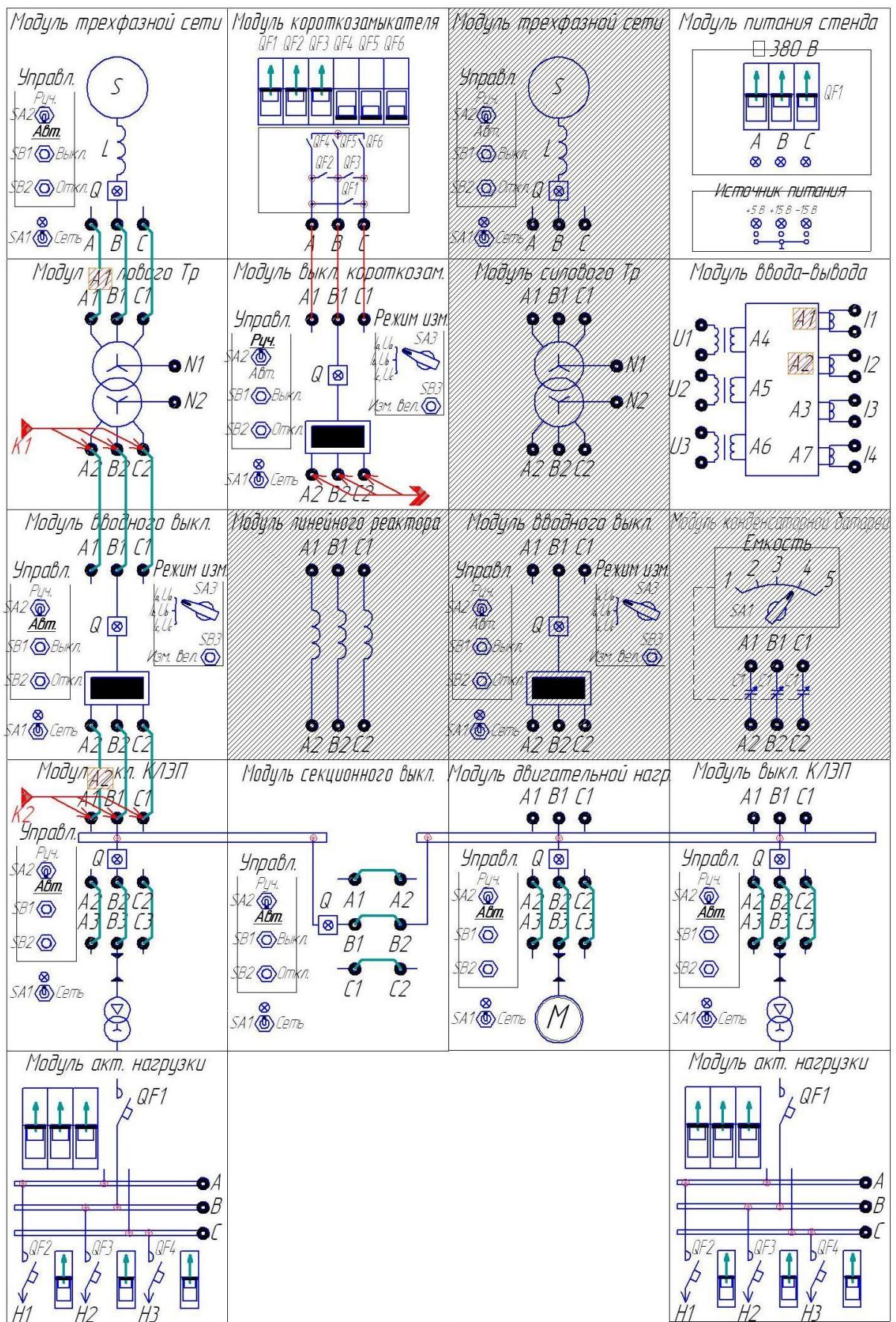
13) Создать внешнее короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. Убедится в том, что защита не срабатывает при внешнем коротком замыкании. Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на стороне НН силового трансформатора первой секции сборных шин (клещмы A2, B2, C2 модуля силового трансформатора). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8.

14) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, защита срабатывает, отключая выключатели Q1 и Q3.

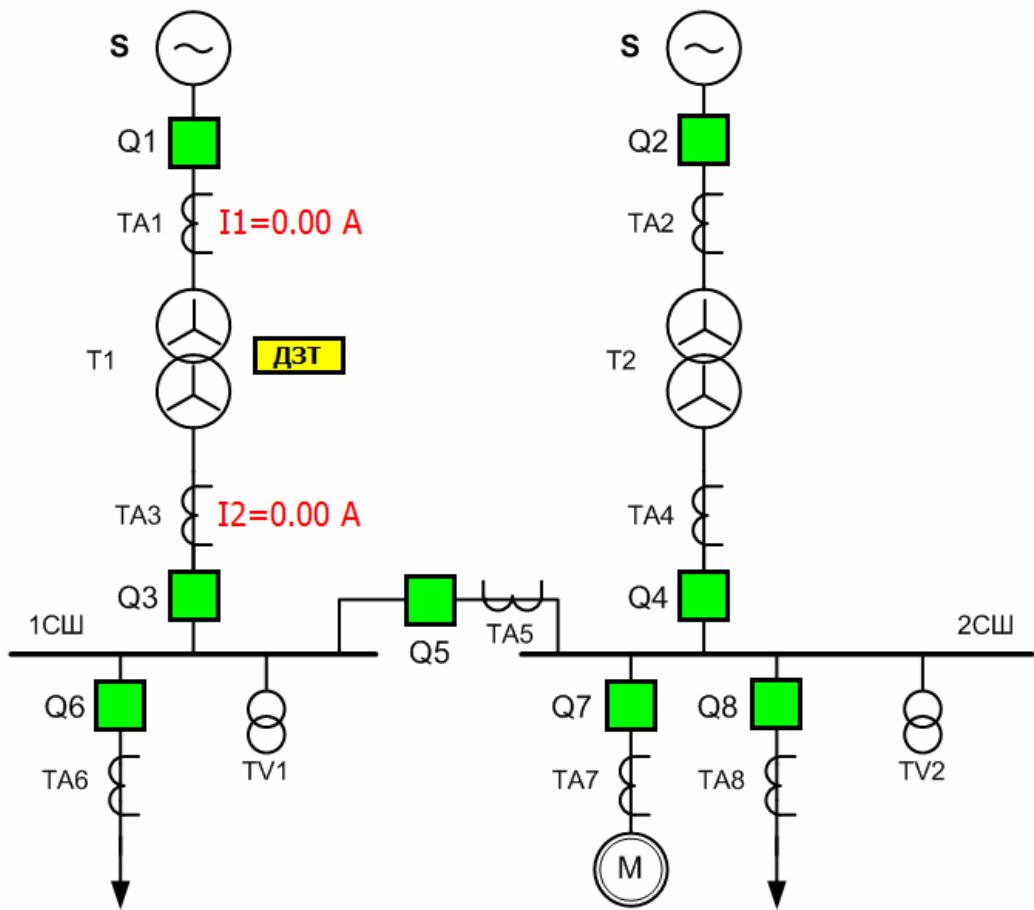
15) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

16) Сделать выводы о селективности действия защиты. Объяснить, почему защита не срабатывает при внешнем коротком замыкании несмотря на значительное увеличение тока. Оформить отчет по лабораторной работе.

Примечание: Для грубого выравнивания вторичных токов измерительных трансформаторов тока ТА1 и ТА3 можно использовать различные коэффициенты трансформации, значения которых доступны в окне настроек защиты. Это может потребоваться в случаях, когда неравенство токов плеч дифференциальной защиты невозможно компенсировать только выбором соответствующего числа витков уравнительных обмоток.



Дифференциальная защита трансформатора. Схема электромонтажная



Дифференциальная защита трансформатора. Мнемосхема

**Содержание отчета:**

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

**Контрольные вопросы:**

1. Объяснить принцип действия дифференциальной защиты.
2. Как осуществляется компенсация фазового сдвига между линейными вторичными токами групп измерительных трансформаторов тока сторон силового трансформатора при выполнении защиты силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда/треугольник» с помощью релейных элементов?

3. Как осуществляется компенсация неравенства величин токов со сторон высшего и низшего напряжений при выполнении дифференциальной защиты силового трансформатора?

4. Почему дифференциальная защита не реагирует на токи нагрузки, токи внешних коротких замыканий и токи асинхронных качаний в электросистеме?

5. В каком токовом режиме работы защищаемого объекта ток небаланса будет иметь максимальное значение?

6. Каково быстродействие дифференциальной защиты трансформаторов?

7. Из-за чего возникают составляющие тока небаланса, циркулирующего в измерительной части дифференциальной продольной защиты реальных современных трансформаторов?

8. В каких цепях и элементах измерительной части протекает ток небаланса дифференциальной защиты силовых трансформаторов?

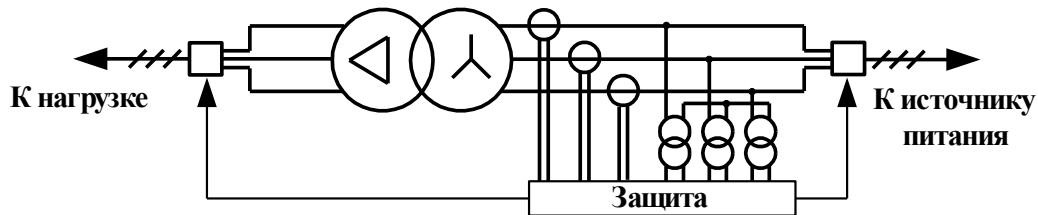
## Лабораторная работа №13. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Токовая защита трансформатора.

**Цель работы:** Изучить особенности расчета установок, селективности и зоны срабатывания токовой отсечки и максимальной токовой защиты трансформатора, изучить особенности расчета установок защиты от перегрузки силового трансформатора.

### Основы теории:

Защита от внешних коротких замыканий (КЗ) служит для отключения трансформатора при КЗ на сборных шинах или на отходящих от нее присоединениях, если защиты или выключатели этих элементов отказали в работе. Одновременно защита от внешних КЗ используется и для защиты от повреждения в трансформаторе.

Наиболее простой защитой от внешних КЗ является токовая максимальная защита. В тех случаях, когда ее чувствительность оказывается недостаточной, применяются более чувствительные токовые максимальные защиты с пуском по напряжению или же токовые защиты обратной и нулевой последовательности.



В данном эксперименте моделируется понизительный силовой трансформатор (см. рис), подключенный через трехполюсные выключатели одной своей стороной к источнику питания, а другой – к нагрузке. В цепь первичной обмотки трансформатора включены трансформаторы тока и напряжения. Имеется возможность устраивать короткое замыкание любого вида на выводах вторичной обмотки трансформатора.

С помощью специальной программы на компьютере моделируется максимальная токовая защита трансформатора, которая может иметь или не иметь блокировку по напряжению. Защита действует одновременно на оба выключателя.

При правильно собранной схеме и корректно выбранных уставках защита должна действовать на отключение при вышеуказанных коротких замыканиях.

### Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 5 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Для снижения токов короткого замыкания, между модулем трехфазной сети и модулем силового трансформатора необходимо включить модуль линейного ре-актора LR. Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения фазных токов со стороны высокого напряжения силового трансформатора на первой секции сбор-ных шин (канал A1 к фазе А, A2 к фазе С). Вход модуля выключателя короткозамыкателя QK3 подключить к модулю короткозамыкателя, а выход — к клеммам A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 вводного выключателя, выключателя кабельной ЛЭП, двига-тельной нагрузки и секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключа-тели SA3 модулей вводного выключателя и выключателя короткозамыкателя в верхнее по-ложение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля ко-роткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы — Лабораторный комплекс — DeltaProfi). Открыть лабораторную ра-боту командой «Работы — Релейная защита и автоматика - Работа №05 Токовая защита трансформатора».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиты ТО, МТ31, МТ32 в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольниках «ТО», «МТ31», «МТ32», в диалоговых окнах установить переключатель «Режим работы» в по-ложение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление — Пуск» или горячей клавишей F5.

**ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА БЕЗ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный - включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3, Q5, Q6 и Q8. При этом на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов во вторичных обмотках измерительных транс-форматоров тока.

6) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя.

Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{K3}$ , пропорциональное току короткого замыкания. Отключить короткое замыкание. Рассчитать ток срабатывания отсечки по формуле:

$$I_{C.3.} = I_{K3} \cdot k_{omc.}$$

Коэффициент отстройки принять равным  $k_{отс.} = 1,2$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ТО») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

7) Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{раб. max}$ , пропорциональное максимальному току нагрузки силового трансформатора. Рассчитать ток срабатывания защиты МТ31 по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h \cdot k_3}{k_e} \cdot I_{раб. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,2$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,95$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

8) Отключить выключатель Q5. Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{раб.}$ , пропорциональное току нагрузки силового трансформатора в нормальном режиме. Рассчитать ток срабатывания защиты МТ32 по формуле:

$$I_{C.3.} = I_{K3} \cdot k_{omc.}$$

Коэффициент отстройки принять равным  $k_{отс.} = 1,1$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ32») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

9) Перевести защиты «ТО» и «МТ31» в режим действия на отключение (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольниках «ТО» и «МТ31», в диалоговых окнах установить переключатель «Режим работы» в положение «отключение»). Включить выключатель Q5.

10) Создать короткое замыкание включением выключателя

короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает вторая ступень защиты - «МТ31», отключающая выключатель Q1 с выдержкой времени, заданной по условиям селективности. Сбросить состояние указательного реле «МТ31».

11) Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на стороне ВН силового трансформатора первой секции сборных шин (выводы А1, В1, С1 модуля силового трансформатора). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, и Q8.

12) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает первая ступень защиты - «ТО», отключающая выключатель Q1 без выдержки времени. Сбросить состояние указательного реле «ТО». Отключить выключатель короткозамыкателя. Включить выключатель Q1.

13) Перевести защиту «МТ32» в режим действия на отключение. При правильно выбранных уставках с выдержкой времени сработает третья ступень защиты — защита от перегрузки «МТ32».

Примечание: в опыте «Перегрузка трансформатора» ток  $I_{\text{раб. max}}$  считаем током перегрузки.

## ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА С ВКЛЮЧЕНИЕМ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

5.1.) Перевести защиты ТО, МТ31, МТ32 в режим работы «действие на сигнал». Дистанционно включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8. При этом на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока.

6.1.) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{K3}$ , пропорциональное току короткого замыкания. Отключить короткое замыкание. Рассчитать ток срабатывания отсечки по формуле:

$$I_{C.3.} = I_{K3} \cdot k_{omc.}$$

Коэффициент отстройки принять равным  $k_{\text{отс.}} = 1,2$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ТО») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

7.1.) Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{\text{раб. max}}$ , пропорциональное максимальному току нагрузки силового трансформатора. Рассчитать ток срабатывания защиты МТ31 по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_n \cdot k_3}{k_6} \cdot I_{\text{раб. max}}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_n = 1,2$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1,25$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_b = 0,95$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

8.1.) Отключить выключатель Q5. Определить значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора тока ТА1  $I_{\text{раб.}}$ , пропорциональное току нагрузки силового трансформатора в нормальном режиме. Рассчитать ток срабатывания защиты МТ32 по формуле:

$$I_{C.3.} = I_{K3} \cdot k_{omc.}$$

Коэффициент отстройки принять равным  $k_{\text{отс.}} = 1,1$ .

В настройках параметров защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ32») ввести рассчитанный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

9.1.) Перевести защиты «ТО» и «МТ31» в режим действия на отключение (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольниках «ТО» и «МТ31», в диалоговых окнах установить переключатель «Режим работы» в положение «отключение»). Включить выключатель Q5.

10.1.) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает вторая ступень защиты - «МТ31», отключающая выключатель Q1 с выдержкой времени, заданной по условиям селективности. Сбросить состояние указательного реле «МТ31».

11.1.) Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на стороне ВН силового трансформатора первой секции сборных шин (выводы A1, B1, C1 модуля силового трансформатора). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q5, Q6, Q7 и Q8.

12.1.) Создать короткое замыкание включением выключателя

короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, срабатывает первая ступень защиты - «ТО», отключающая выключатель Q1 без выдержки времени. Сбросить состояние указательного реле «ТО». Отключить выключатель короткозамыкателя. Включить выключатель Q1.

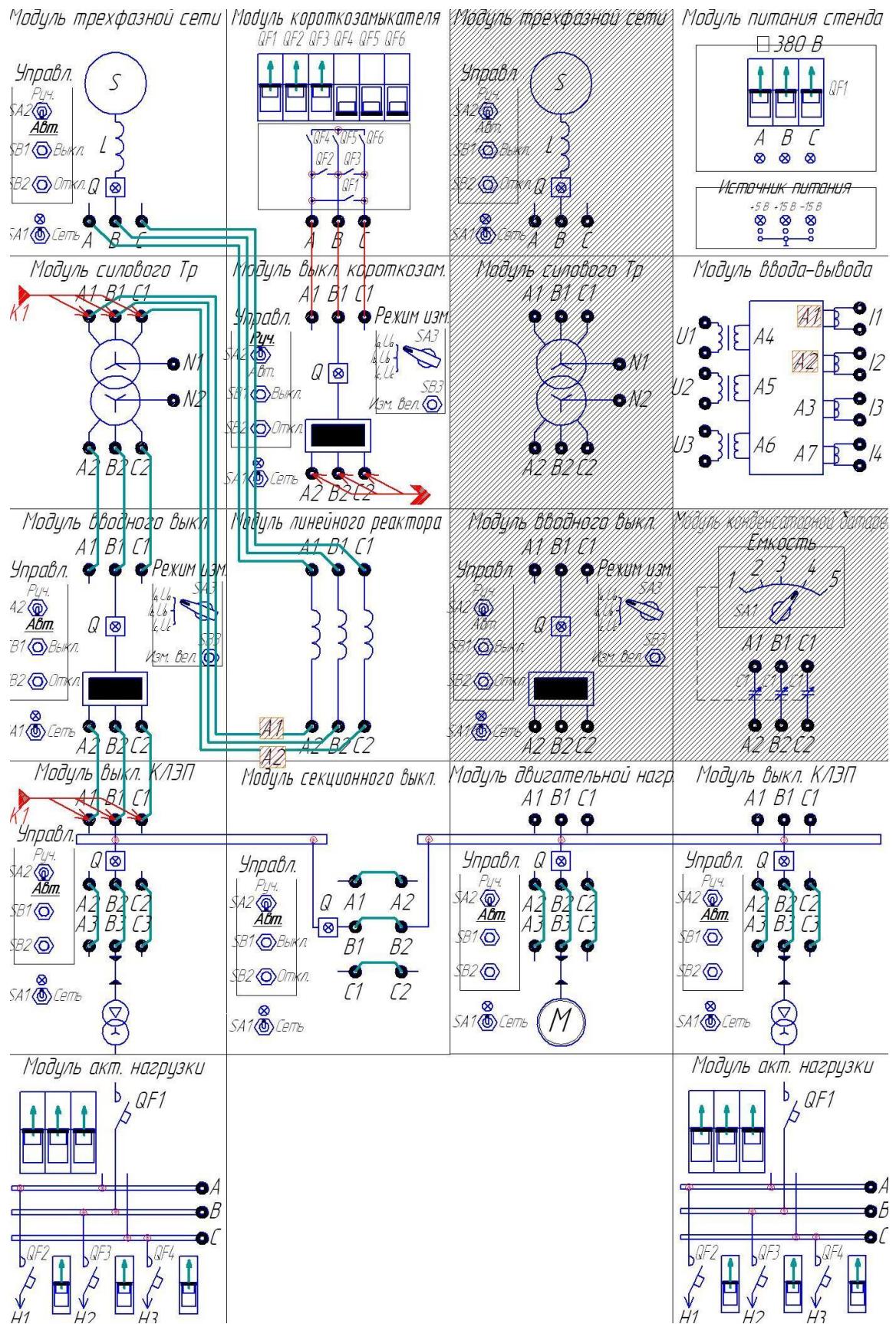
13.1.) После выхода электродвигателя на номинальный режим перевести защиту «МТ32» в режим действия на отключение (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольник «МТ32», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «отключение»).

При правильно выбранных уставках с выдержкой времени сработает третья ступень защиты — защита от перегрузки «МТ32».

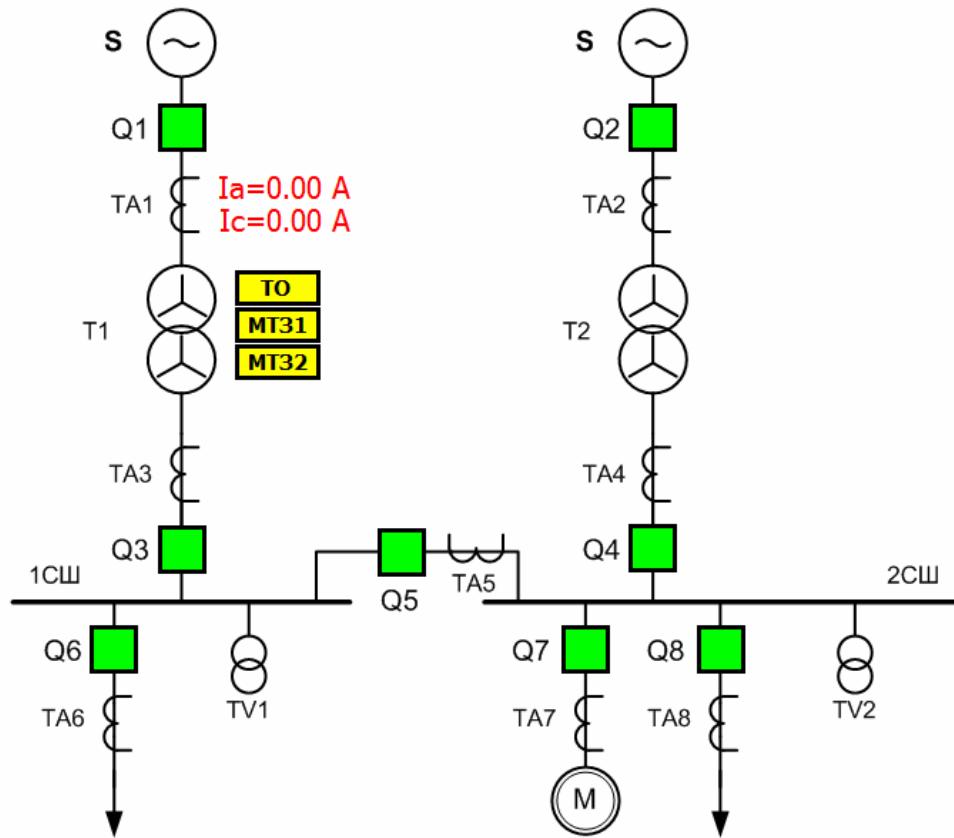
Примечание: в опыте «Перегрузка трансформатора» ток  $I_{\text{раб. max}}$  считаем током перегрузки.

14) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

15) Сделать выводы о селективности действия защит. Объяснить, почему при коротком замыкании на сборных шинах не срабатывает токовая отсечка. Оформить отчет по лабораторной работе.



## Токовая защита трансформатора. Схема электромонтажная



Токовая защита трансформатора. Мнемосхема

**Содержание отчета:**

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие требования предъявляются к трансформаторам тока в устройствах релейной защиты?
2. Как определить однополярные выводы обмоток трансформатора?
3. С какой целью снимаются вольт-амперные характеристики трансформаторов тока?

4. К чему может привести включение в схемы защиты трансформатора тока с неправильно обозначенной полярностью выводов обмоток?
5. Каково назначение нейтрального провода в схеме полной звезды?
6. Что такое коэффициент схемы и почему его нужно учитывать при определении тока срабатывания реле?
7. Какие схемы соединения обмоток трансформаторов тока используются в защитах от многофазных КЗ?

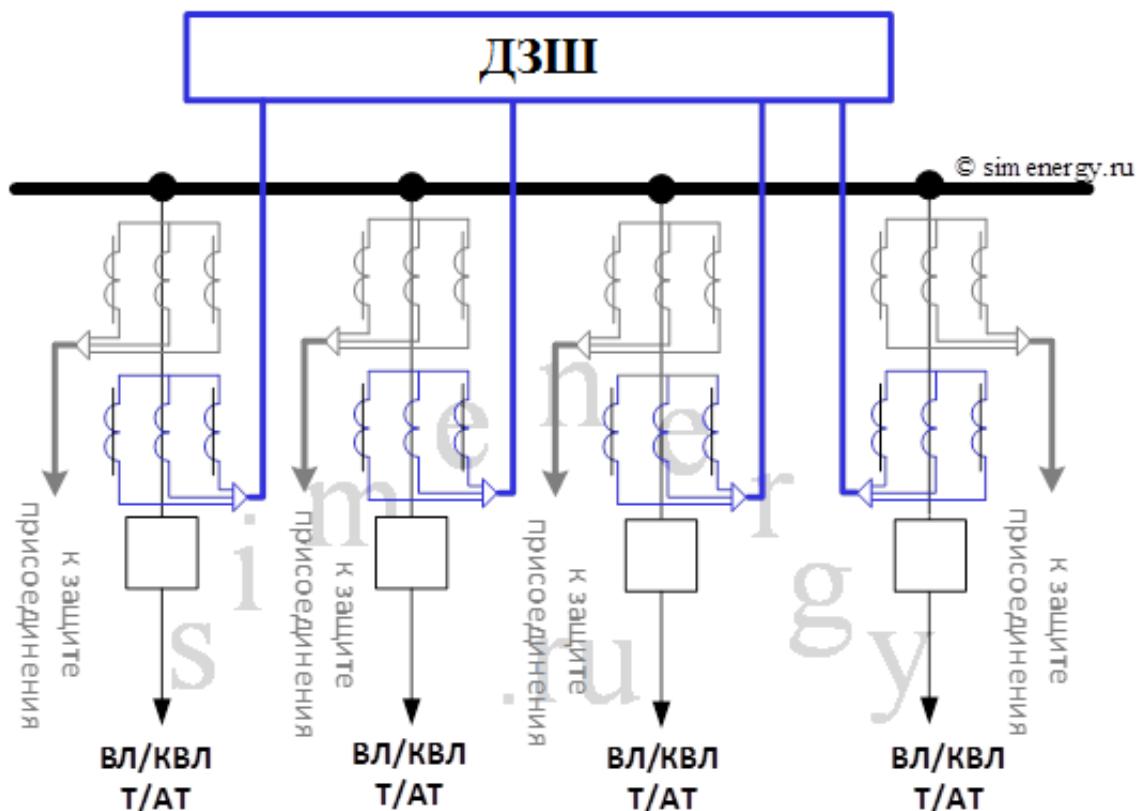
## Лабораторная работа №14. Цифровые реле. Цифровые системы управления и сбора информации. Дифференциальная защита сборных шин

**Цель работы:** Изучить принцип действия дифференциальной защиты шин, исследовать факторы, влияющие на селективность, зону действия и чувствительность защиты.

### Основы теории:

Дифференциальная токовая защита шин (ДЗШ) – это быстродействующая защита с абсолютной селективностью, которая используется для защиты шин классом напряжения 110 кВ и выше. В распределительных устройствах более низкого напряжения используются логическая защита шин и дуговая защита шин.

Дифференциальная токовая защита шин предназначена для быстрого отключения присоединений, подключенных на сборные шины, при коротких замыканиях на сборных



ДЗШ охватывает все элементы распределительного устройства, присоединенные к секции шин, и действует без замедления при всех видах коротких замыканий (КЗ) на отключение выключателей этих элементов с пуском их УРОВ и запретом их АПВ при неуспешном АПВ шин.

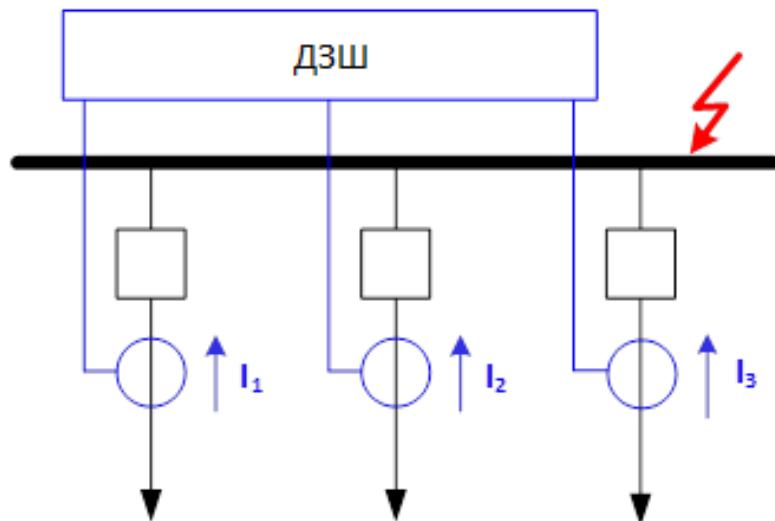
Токовые цепи ДЗШ всегда выполняются в трехфазном исполнении, а трансформаторы тока присоединений собираются по схеме полной звезды. Защита подключается к об-

моткам трансформаторов тока таким образом, что бы ее зона действия максимально перекрывалась с зонами действия защит присоединений. При подключении устройства защиты к ТТ присоединений за положительное направление токов принимают их направление в сторону защищаемого объекта («в шины»). Таким образом, зона действия защиты ДЗШ ограничивается трансформаторами тока, к которым подключена защита.

Каждое присоединение формирует так называемое «плечо» дифференциальной защиты. Для всех «плеч» дифференциальной защиты необходимо либо применять трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации, либо применять меры по выравниванию токов в «плечах» дифференциальной защиты: использовать промежуточные трансформаторы тока для выравнивания токов в «плечах» защиты. В современных микропроцессорных устройствах предусматривается программное выравнивание коэффициентов трансформации трансформаторов тока в «плечах» защиты.

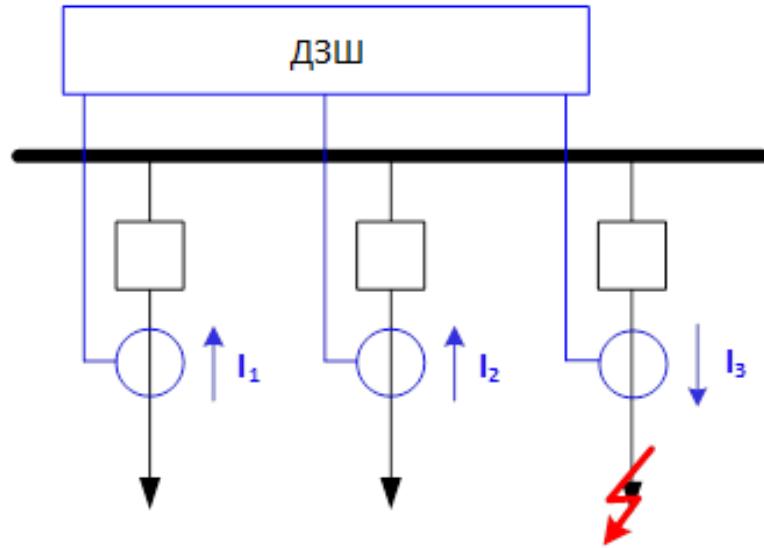
Принцип действия защиты ДЗШ основан на измерении дифференциального тока, который представляет собой геометрическую (векторную) сумму токов от трансформаторов тока всех присоединений, зафиксированных на данной системе шин (ошиновки).

При коротком замыкании в зоне действия защиты шин (или ошиновки) по всем присоединениям ток короткого замыкания направлен к месту короткого замыкания.



При достижении дифференциального тока уставки срабатывания происходит срабатывание защиты.

В нормальном режиме работы или при внешних коротких замыканиях величина дифференциального тока близка к нулю, но не равна нулю из-за погрешностей трансформаторов тока, различием характеристик намагничивания трансформаторов тока различных производителей и другими причинами.



Величина небаланса дифференциального тока минимальна в нормальном режиме работы и увеличивается при увеличении значения внешнего тока короткого замыкания. Ток небаланса может вызвать неправильную работу защиты ДЗШ, поэтому принимаются меры к ограничению его значения или загrubение уставки срабатывания. С целью ограничения тока небаланса необходимо:

- применять однотипные трансформаторы тока с высокими характеристиками намагничивания, у которых насыщение сердечника трансформатора тока происходит при больших токах короткого замыкания;
- уменьшать вторичные токи за счет увеличения коэффициента трансформации трансформаторов тока;
- уменьшать нагрузку на трансформаторы тока путем увеличения сечения и сокращения длины соединительных проводов токовых цепей.

Все представленные выше мероприятия позволяют уменьшить погрешность трансформаторов тока при преобразовании величины первичного тока присоединений во вторичные значения.

В настоящее время разработаны более совершенные схемы дифференциальных защит шин (или ошиновки) с применением торможения, которые имеют более улучшенные характеристики отстройки от тока небаланса при внешнем коротком замыкании.

#### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 6 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения токов фазы А со стороны вводного выключателя, секционного выключателя и выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. При подключении модуля ввода-вывода, необходимо учитывать полярность датчиков тока, таким образом, чтобы в нормальном режиме работы сумма токов была близка к нулю. Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП второй секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 модуля вводного выключателя, модулей выключателя кабельной ЛЭП, модуля двигательной нагрузки и модуля секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводных выключателей в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы - Лабораторный комплекс - DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №06 Дифференциальная защита сборных шин».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиту в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗШ», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный - включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8. При этом, на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов в обмотках измерительных трансформаторов тока.

6) Открыть окно настройки защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗШ»). В таблицу 1.6 записать величину тока небаланса в обмотке дифференциального реле (см. группу «Измерения» в окне параметров защиты) в режиме нагрузки  $I_{\text{неб.нагр.}}$ .

Таблица 1.6

Параметр	Значе-
Ток небаланса в режиме нагрузки $I_{\text{неб.нагр.}}$ , А	
Ток небаланса в режиме внешнего короткого замыкания $I_{\text{неб.внешн.}}$	
Ток небаланса в режиме короткого замыкания шин $I_{\text{неб. шин.}}$ , А	
Ток небаланса в режиме запуска электродвигателя $I_{\text{неб.зап.}}$ , А	
Ток срабатывания защиты $I_{\text{сз}}$ , А	

7) Создать внешнее короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. В таблицу 1.6 записать величину тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме внешнего короткого замыкания  $I_{\text{неб.внешн.}}$ . Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на кабельной ЛЭП первой секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

8) Создать короткое замыкание шин включением выключателя короткозамыкателя. В таблицу 1.6 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме короткого замыкания шин  $I_{\text{неб. шин.}}$ . Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

9) Определить значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме запуска электродвигателя. Для чего включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7, Q8 и в таблицу 1.6 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме запуска электродвигателя. Выключить все выключатели. Отключить питание стенда.

10) Рассчитать ток срабатывания защиты по формуле:  $I_{\text{с.з.}} = I_{\text{неб.внешн.}} \cdot k_{\text{н}}$ .

Коэффициент надежности принять равным  $k_{\text{н}} = 2,375$ .

Обратить внимание на то, что полученное значение тока срабатывания защиты должно быть больше значения тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме внешнего короткого замыкания и в режиме запуска электродвигателя, но, в то же время, меньше значения тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме короткого

замыкания шин. Ввести расчетный ток срабатывания защиты в диалоговом окне параметров защиты.

11) Перевести защиту в режим действия на отключение. При необходимости, сбросить состояние указательного реле защиты. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на кабельной ЛЭП второй секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

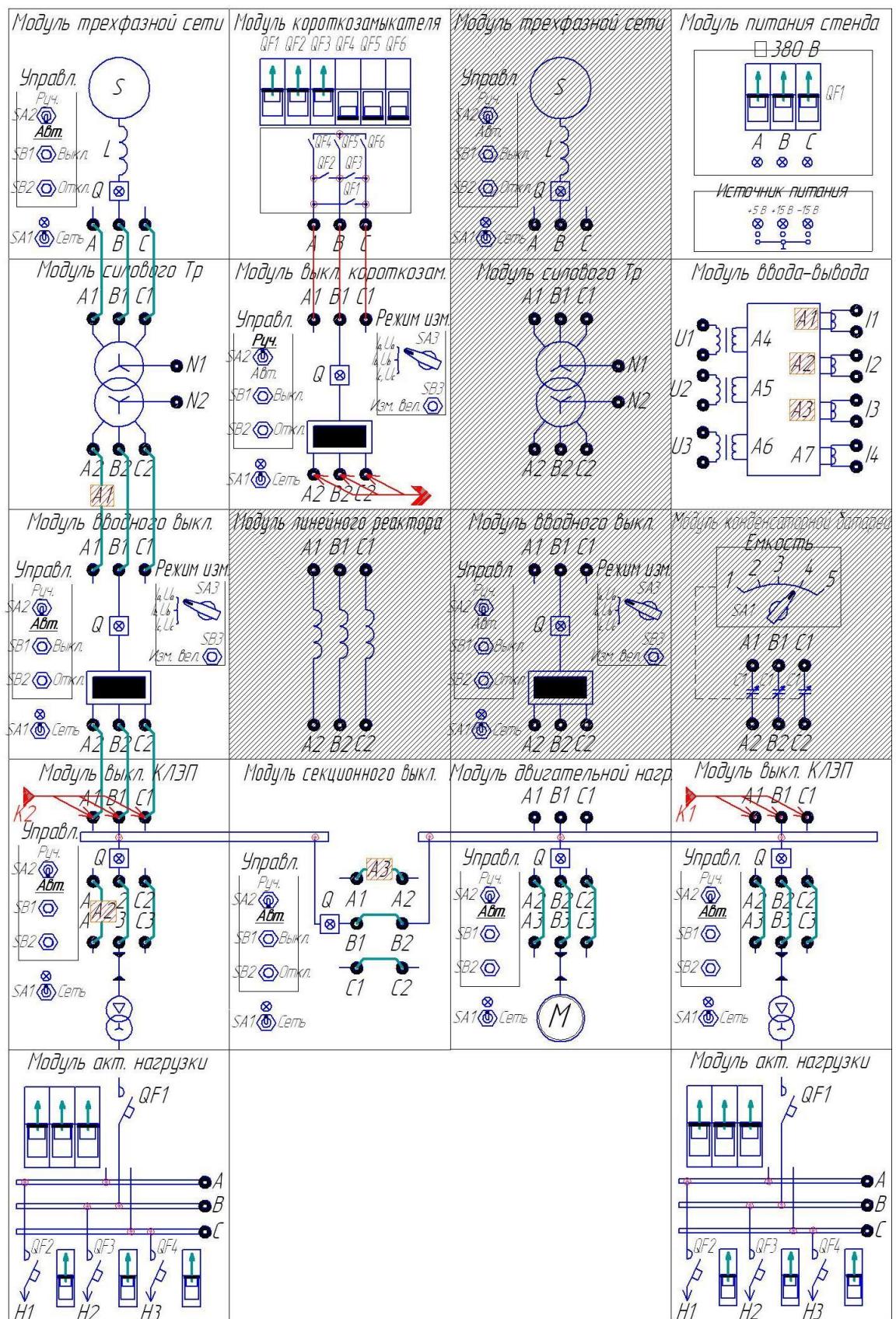
Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. Убедится в том, что защита не срабатывает при внешнем трехфазном коротком замыкании. Отключить короткое замыкание.

12) Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на первой секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

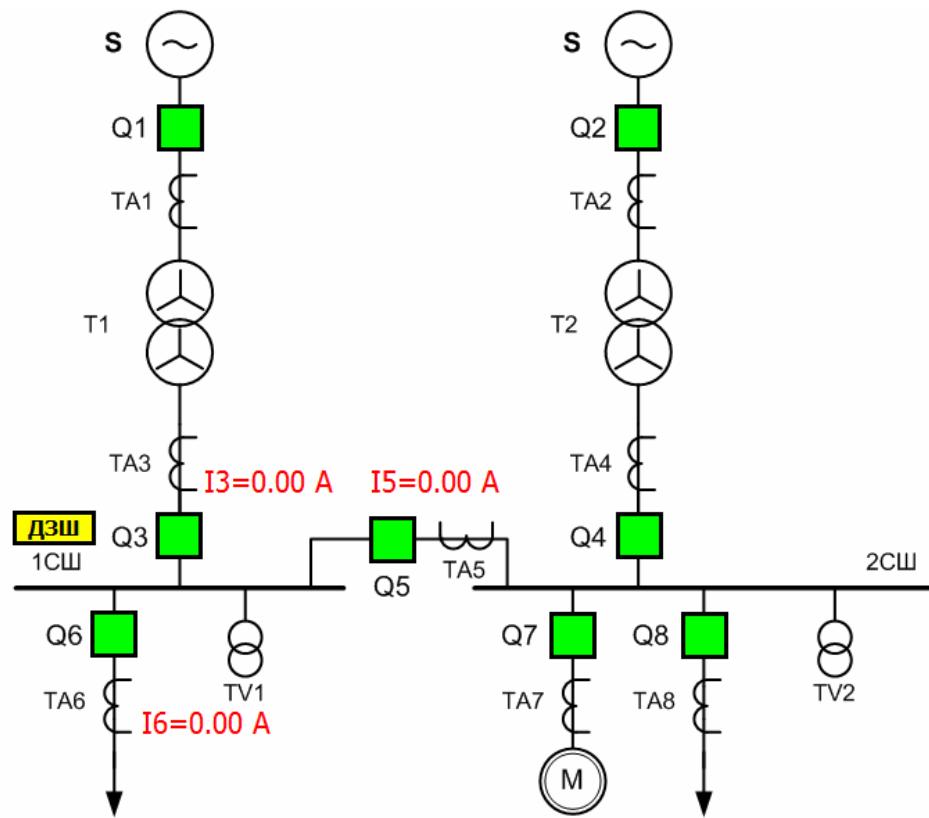
13) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках защита срабатывает без выдержки времени, отключая выключатели Q3, Q5 и Q6, их цвет становится зеленым, а прямоугольник «ДЗШ» красным, что свидетельствует о срабатывании указательного реле защиты. Щелчок левой кнопкой мыши по прямоугольнику «ДЗШ» сбрасывает состояние указательного реле (аналогичный эффект достигается нажатием кнопки «Сброс» в диалоговом окне параметров защиты). Отключить короткое замыкание.

14) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

15) Сделать выводы о селективности действия защиты. Оформить отчет по лабораторной работе.



Дифференциальная защита сборных шин. Схема электромонтажная



Дифференциальная защита сборных шин. Мнемосхема

#### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### *Контрольные вопросы:*

1. Назовите особенности выполнения дифференциальных защит шин?
2. Что входит в зону срабатывания дифференциальной защиты шин?
3. Как действует дифференциальная защита шин при возникновении обрыва?
4. Должна ли срабатывать дифференциальная защита шин при внешних коротких замыканиях?

5. Что необходимо использовать для повышения чувствительности дифференциальной защиты шин?

6. Назовите отличия между дифференциальной защитой шин на  $U = 35\text{kV}$  и дифференциальной защитой шин на  $U 6-10 \text{kV}$ .

7. В каких случаях происходит ускорение срабатывания дифференциальной защиты шин?

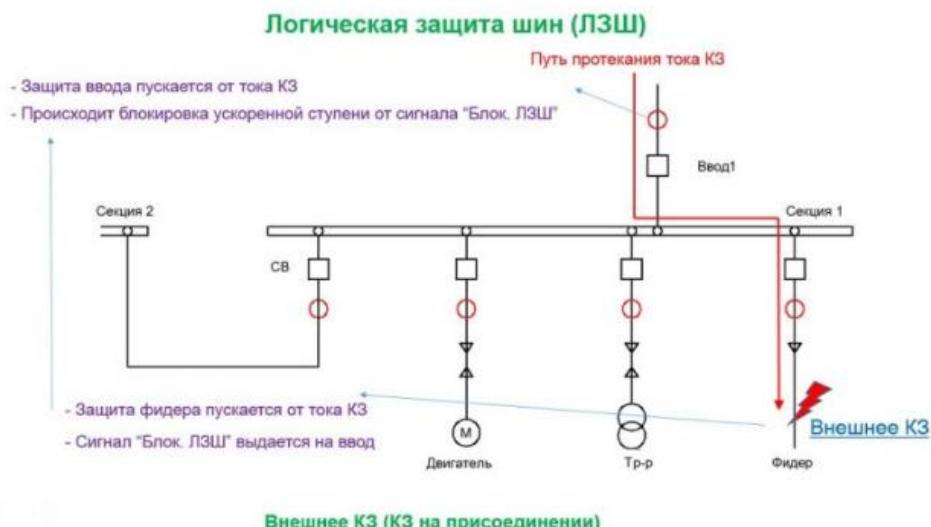
## Лабораторная работа №15. Релейная защита шин. Логическая защита сборных шин

**Цель работы:** Изучить принцип действия и область применения логической защиты сборных шин, исследовать факторы, влияющие на селективность и зону действия ЛЗШ.

### Основы теории:

Логическая защита шин в настоящее время входит в состав практически любого микропроцессорного терминала РЗА. Ее задача – отключить короткое замыкание на шинах РУ за минимально возможное время, ограничивающееся только собственным временем срабатывания электронной части терминала. Обычно это от 0,1 до 0,15 с.

Элементы логической защиты шин не сосредоточены в одном месте. Это система, объединяющая терминалы защит питающих и отходящих линий.



Отходящие линии при запуске собственных защит (обычно – МТЗ), формируют сигнал блокировки ЛЗШ. Для этого на каждом из них выделяется по одному дискретному выходу. Сигналы от всех отходящих линий секции поступают на дискретные входы терминалов фидеров питания. Для передачи используется система шин питания и управления, входящая в состав любого современного распределительного устройства. На этом, собственно, вся конструктивная часть и заканчивается. Остается выставить правильные настройки ЛЗШ на всех терминалах, задать назначение дискретных входов и выходов.

При внешнем коротком замыкании запускается МТЗ присоединения, на котором оно произошло. Естественно, отключение произойдет по истечении выдержки по времени, предусмотренной для данного тока замыкания.

Если короткое замыкание произошло на шинах РУ, сигнала блокировки от отходящих линий не поступит, так как ток КЗ через них не проходит. Запуск МТЗ питающих шины линий при отсутствии сигнала блокировки приведет к мгновенному действию ЛЗШ на отключение присоединений. Причем отключатся независимо друг от друга все выключатели, через которые в данный момент осуществляется питание. Если помимо ввода включен секционный выключатель, то ЛЗШ сработает и на нем.

В отличие от других защит, ЛЗШ редко срабатывает при проверках РЗА персоналом электролабораторий. При работе на отходящих присоединениях сигнал блокировки, хоть и поступает на входы терминалов линий питания, но вреда не приносит. Возможен только отказ в работе при совпадении фактора наличия проверочного тока на отходящем фидере и реальном КЗ на шинах, но вероятность такого казуса невелика.

При проверке РЗА питающей линии тем более ничего не произойдет. Если на шины приходит питание через секционный выключатель или другую линию питания, то их логические защиты работают независимо от проверяемой линии питания, достучаться до них оттуда нереально.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 7 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения токов фаз А и С со стороны вводного выключателя и выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам А3, В3, С3 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 вводного выключателя, выключателей кабельной ЛЭП, двигательной нагрузки и секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводных выключателей в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1..QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск — Программы - Лабораторный комплекс — DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №07 Логическая защита сборных шин».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиты MT31, MT32 в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «MT31», в появившемся диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный - включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3 и Q6. При этом, на мнемосхеме отображаются текущие значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока.

6) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТА6, пропорциональное току нагрузки  $I_{раб. max}$ . Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6.

7) Рассчитать ток срабатывания защиты MT32 по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_h \cdot k_3}{k_e} \cdot I_{раб. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_h = 1,15$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,95$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «MT32», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно можно закрыть.

8) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление — Пуск» или горячей клавишей F5. Включить выключатели Q5, Q7 и Q8. Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТА3, пропорциональное току нагрузки ввода №1  $I_{вв. max}$ . Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

9) Рассчитать ток срабатывания защиты MT31 по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_n \cdot k_3}{k_e} \cdot I_{\text{ев. max}}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_n = 1,15$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1,75$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_e = 0,95$ .

1. Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно можно закрыть.

10) Рассчитать выдержки времени срабатывания защит МТ31 и МТ32 в соответствии со ступенчатым принципом обеспечения селективности действия. Задать полученные выдержки времени в диалоговых окнах настройки параметров защит.

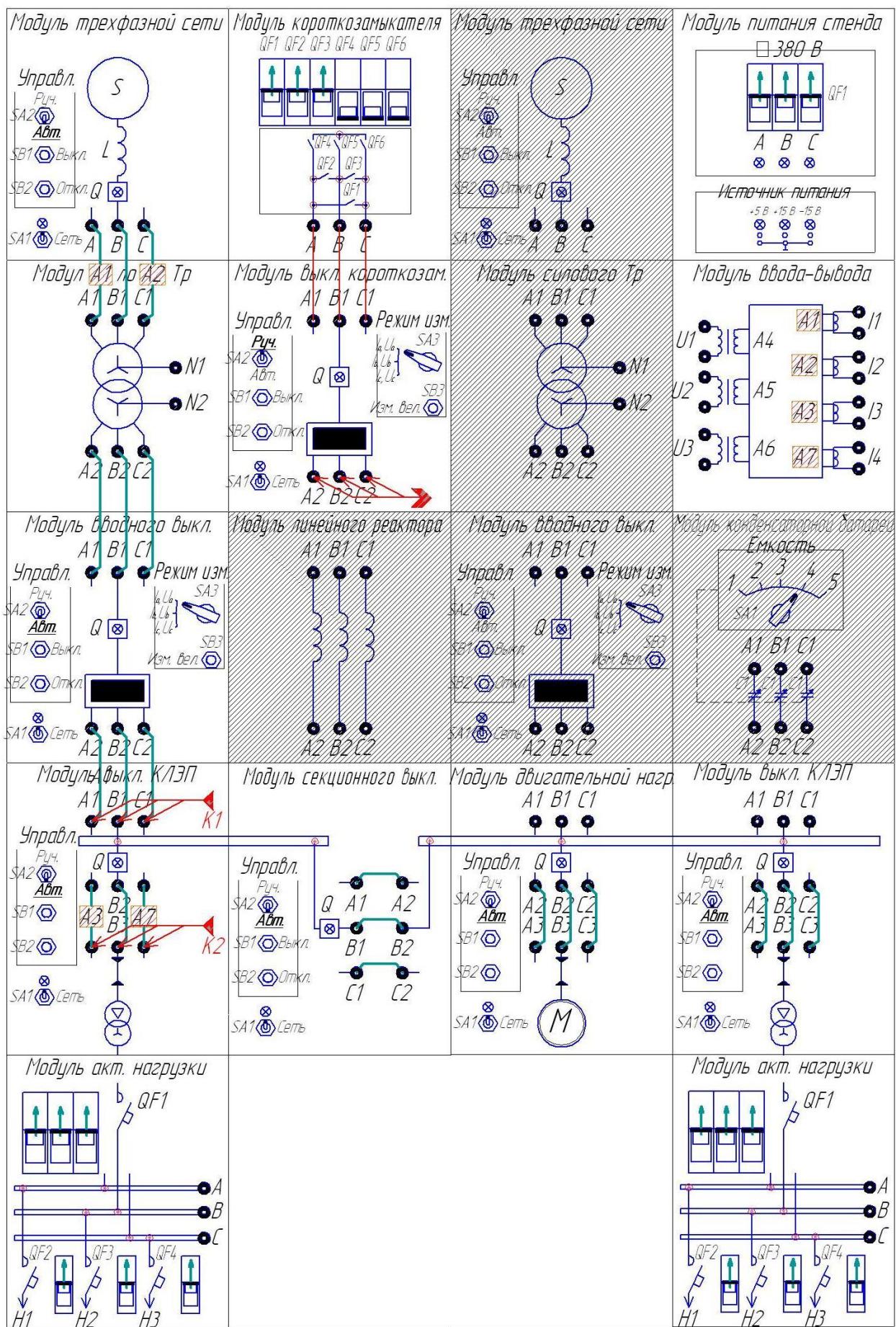
11) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление — Пуск» или горячей клавишей F5. Перевести защиты МТ31 и МТ32 в режим действия на отключение. Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, с выдержкой времени срабатывает защита МТ32, отключая выключатель Q6.

12) Отключить короткое замыкание. Сбросить указательное реле защиты МТ32. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на первой секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

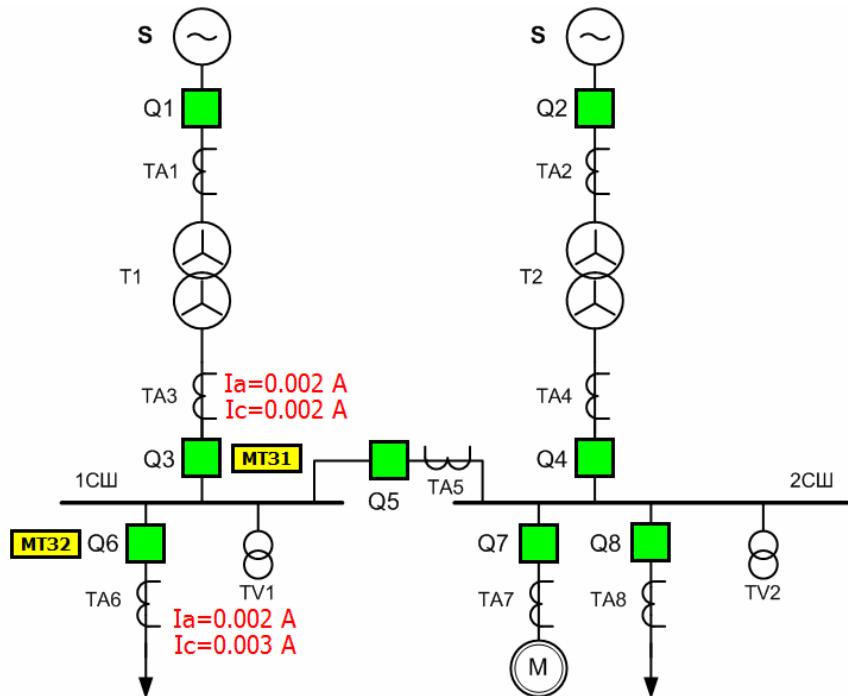
13) Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках, мгновенно по цепи ускорения срабатывает защита МТ31, отключая выключатель Q3.

14) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

15) Сделать выводы о селективности действия защиты, объяснить, почему время срабатывания защиты МТ31 зависит от места повреждения. Оформить отчет по лабораторной работе.



Логическая защита сборных шин. Схема электромонтажная



Логическая защита сборных шин. Мнемосхема

**Содержание отчета:**

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

**Контрольные вопросы:**

1. Схемы организации ЛЗШ?
2. Поведение ЛЗШ при внешнем КЗ?
3. Работа ЛЗШ при КЗ на шинах?
4. Надежность ЛЗШ?
5. Недостатки ЛЗШ?

**Лабораторная работа №16. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое повторное включение линии электропередачи.**

**Цель работы:** Изучить алгоритмы работы устройств АПВ на линиях с односторонним питанием, изучить особенности взаимодействия устройств АПВ и релейной защиты, изучить принципы расчета установок АПВ линий электропередач с односторонним питанием.

**Основы теории:**

Одним из признаков возникновения короткого замыкания является увеличение тока в линии. Этот признак используется для выполнения защит, называемых токовыми. Токовые защиты приходят в действие при увеличении тока в фазах линии сверх определенного значения.

Токовые защиты подразделяются на максимальные токовые защиты (МТЗ) и токовые отсечки. Главное различие между этими защитами заключается в способе обеспечения селективности.

Селективность действия максимальных токовых защит достигается с помощью выдержки времени.

В сетях с односторонним питанием максимальная защита должна устанавливаться в начале каждой линии со стороны источника питания. Тогда каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее подстанции.

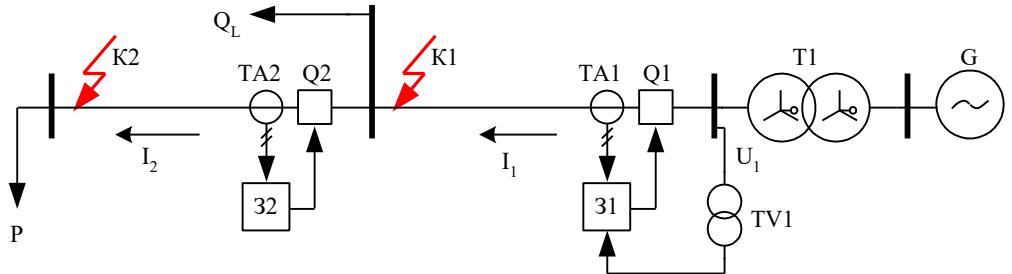
При коротком замыкании (КЗ) в какой-либо точке ток КЗ проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания и местом повреждения, в результате чего приходят в действие все защиты. Однако по условию селективности срабатывает на отключение только защита, установленная на поврежденной линии. Для обеспечения указанной селективности максимальные защиты выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания.

Токовая защита может быть с зависимой, независимой или ограниченно зависимой выдержкой времени.

Селективность действия токовых отсечек обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты при КЗ и улучшения ее отстройки от токов нагрузки применяется блокировка посредством реле

минимального напряжения. Защита может действовать на отключение только при условии понижения напряжения в сети ниже минимального уровня рабочего напряжения. В случае перегрузки линии и относительно небольшом понижении напряжения защита не сработает, даже если ток фаз увеличится выше значения уставки.



В данном эксперименте используются две последовательно соединенные линии (см. рис), подключенные к источнику  $G$  через трансформатор  $T1$  и выключатели  $Q1$  и  $Q2$ . От шин одной линии получает питание индуктивная нагрузка  $QL$ , от шин другой линии – активная нагрузка  $P$ . В начале первой линии установлены трансформаторы тока  $TA1$  и напряжения  $TV1$ , в начале второй – только трансформатор тока  $TA2$ . Короткие замыкания  $K1$  и  $K2$  устраиваются в конце каждой из линий.

Две защиты 31 и 32 моделируются на компьютере с помощью специальной программы. Защита 31 может работать с независимой или зависимой выдержкой времени, а также с блокировкой по напряжению или без нее. Защита 32 может работать только с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению.

В рамках рассматриваемой работы можно смоделировать, как минимум, 5 различных вариантов (комбинаций) защит:

31 с независимой выдержкой времени без блокировки по напряжению;

31 с зависимой выдержкой времени без блокировки по напряжению;

31 с независимой выдержкой времени с блокировкой по напряжению;

31 и 32 с независимыми выдержками времени без блокировок по напряжению;

31 или 32 в качестве токовой отсечки без выдержки времени.

Кроме перечисленных, можно выполнить и другие эксперименты, любым образом комбинируя уставки защит.

При использовании двух МТЗ линий полезно убедиться в том, что защита первой линии действительно резервирует защиту второй линии. Для этого нужно смоделировать отказ выключателя  $Q2$  (например, перевести его в ручной режим работы и включить), после чего провести эксперимент, устраивая короткое замыкание в конце второй линии, и убедиться, что срабатывает защита первой.

***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

- 1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 8 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения токов фаз А и С со стороны выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам А3, В3, С3 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 модуля вводного выключателя, модулей выключателя кабельной ЛЭП, модуля двигательной нагрузки и модуля секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводных выключателей в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».
- 2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы - Лабораторный комплекс — DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №08 АПВ линии электропередачи».
- 3) В программе «DeltaProfi» перевести защиту МТ31 в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»). Перевести АПВ в режим работы «отключено» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «АПВ», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «отключено»).
- 4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

- 5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный - включен). Аналогичным образом включить выключатель Q3. Включить выключатель Q6 переводом

ключа управления выключателем SB6 в положение «вкл.». При этом, на мнемосхеме отображаются текущие значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока и напряжения.

6) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТА6, пропорциональное току нагрузки линии электропередачи W1  $I_{раб. max}$ .

Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

7) Рассчитать ток срабатывания защиты MT31 по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_n \cdot k_3}{k_v} \cdot I_{раб. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_n = 1,2$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_v = 0,95$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «MT31», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть.

8) Открыть диалоговое окно настройки параметров АПВ (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «АПВ»). Установить переключатель «кратность действия» в положение «двуухкратное». Переключатель «Ускорение действия релейной защиты» в положение «отключено».

9) Перевести защиту MT31 в режим действия на отключение. Перевести АПВ в режим работы «включено». Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

10) Проверить работу АПВ при самоустраниющемся коротком замыкании. Создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках защита срабатывает с заданной выдержкой времени, отключая выключатель Q6, его цвет становится зеленым, а прямоугольник «MT31» красным, что свидетельствует о срабатывании указательного реле защиты. Щелчок левой кнопкой мыши по прямоугольнику «MT31» сбрасывает состояние указательного реле (аналогичный эффект достигается нажатием кнопки «Сброс» в диалоговом окне параметров защиты). СРАЗУ ПОСЛЕ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ отключить короткое замыкание! АПВ с выдержкой времени подает команду на включение выключателя Q6. Восстанавливается нормальный режим работы. Сбросить состояние указательного реле MT31 и АПВ.

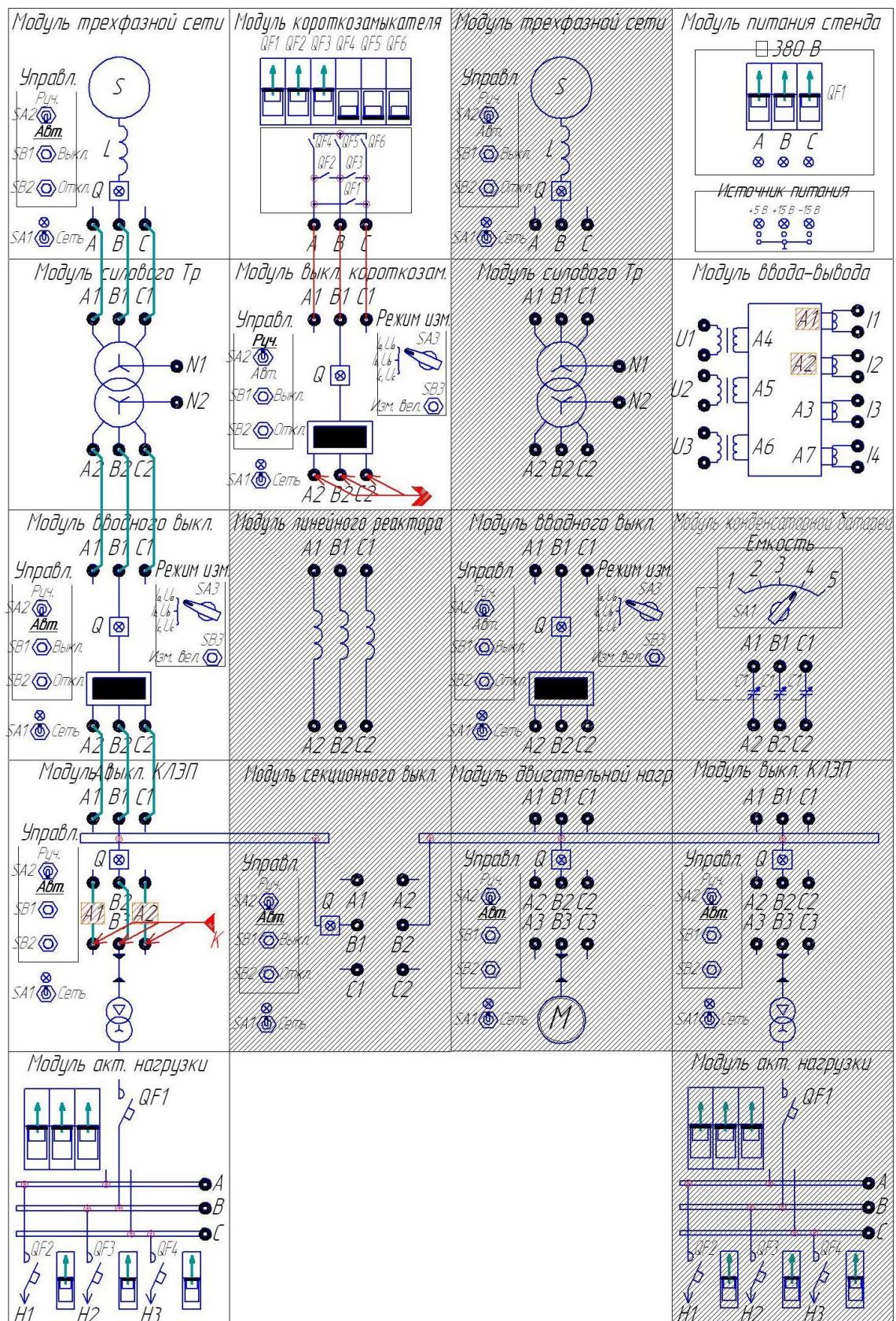
11) Проверить автоматический возврат АПВ. Для этого, повторить предыдущий пункт 3-4 раза. АПВ должно срабатывать в каждом случае.

12) Проверить работу АПВ при устойчивом коротком замыкании.

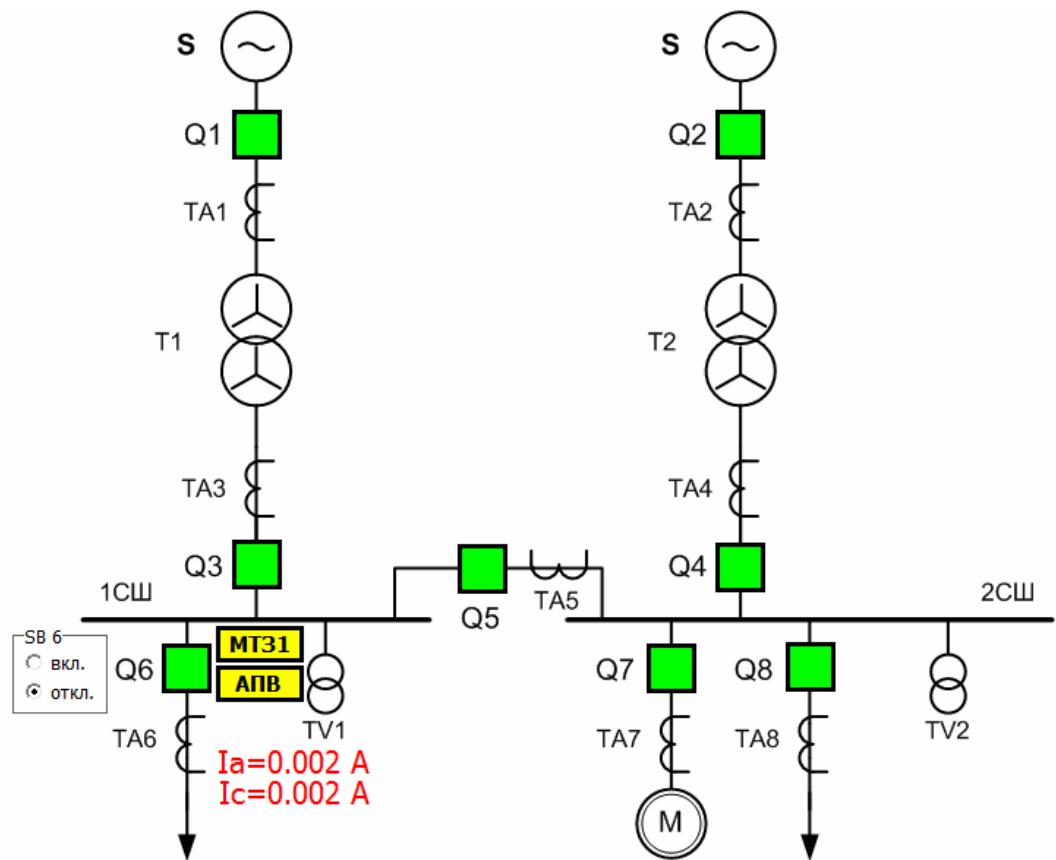
Для этого, создать короткое замыкание. МТЗ с заданной выдержкой времени, отключает выключатель Q6, его цвет становится зеленым, а прямоугольник «МТЗ» красным, что свидетельствует о срабатывании указательного реле защиты. АПВ с выдержкой времени 1 ступени включает выключатель Q6. МТЗ с заданной выдержкой времени снова отключает выключатель Q6. АПВ с выдержкой времени 2 ступени снова включает выключатель Q6. МТЗ с заданной выдержкой времени снова отключает выключатель Q6. Дальнейшая работа АПВ блокируется.

13) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

14) Оформить отчет по лабораторной работе.



Автоматическое повторное включение линии электропередачи. Схема электромонтажная



Автоматическое повторное включение линии электропередачи. Мнемосхема

#### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### *Контрольные вопросы:*

1. Какие требования предъявляются к устройствам АПВ?
2. Для чего АПВ выполняется с выдержкой времени?
3. Как выбираются уставки УАПВ?
4. Зачем в формуле расчета тока срабатывания измерительного органа защиты используется коэффициент схемы?
5. Какие параметры используются в качестве уставок УАПВ?

6. Для каких линий предпочтительно использовать устройства АПВ?
7. Сколько повторных включений обеспечивают устройства АПВ воздушных ЛЭП?
8. Что является логической посылкой для начала работы схемы АПВ в реальных схемах управления выключателями присоединений, обеспечиваемых этой автоматикой; по каким условиям состояния схемы

## ***Лабораторная работа №17. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое повторное включение сборных шин***

**Цель работы:** Изучить особенности работы устройств автоматического повторного включения шин, изучить особенности взаимодействия устройств АПВ шин и устройств релейной защиты.

### ***Основы теории:***

В соответствии с правилами эксплуатации, существуют определенные требования и условия, которые должны соблюдать АПВ автоматическое повторное включение, с целью обеспечения эффективной и безопасной работы электрооборудования. Все защитные устройства продолжают свою работу до и после повторного включения.

Срабатывание автоматики должно приводить объект или устройство в первоначальное готовое положение. Если возможность автоматического возврата отсутствует, данная операция выполняется вручную.

Запрещается использовать АПВ в случае срабатывания отдельных видов автоматической и релейной защиты трансформаторов. Если срабатывает защита, которой оборудованы силовые электродвигатели, в этом случае система АПВ должна находиться в отключенном состоянии. Ее отключение выполняется когда высоковольтный выключатель отключается вручную или дистанционно при наличии короткого замыкания.

В обязательном порядке должны блокироваться многократные включения АПВ во избежание устойчивых коротких замыканий. Блокировка осуществляется и в случае неисправностей в самих устройствах автоматического повторного включения.

При ремонте на воздушных и кабельных линиях, а также в случаях их планового и оперативного переключения АПВ отключается во избежание ложных срабатываний выключателя.

В случае повреждений на сборных шинах защита отключает все присоединения, которые питают эти шины. Основное назначение АПВ шин это повторная подача на шины напряжения с целью восстановления электроснабжения потребителей, которые получают от шин питание при нестойких повреждениях. Эта задача решается АПВ одного из питающих присоединений, которые отключились. Если АПВ успешное, то может ставится и вторая задача – автоматическое восстановление начальной схемы последовательным АПВ остальных питающих присоединений. Это целесообразно на подстанциях в районах значительного загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий химической и

металлургической отраслей, а также на нетелемеханизированных без постоянного дежурного персонала.

В общем успешными являются 64,8 % АПВ шин и 60 % АПВ силовых трансформаторов.

Устройства АПВ шин выполняют разные функции. Наиболее просто осуществляется автоматическое испытание изоляции шин после того, как они были обесточены. Достаточно сложно реализуются испытания шин и подача напряжения потребителям, отключенным одновременно с выключением шин. Ещё более сложным является выполнение автоматического восстановления нормальной схемы подстанции после того, как установлена неповреждённость шин.

#### ***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

#### ***Указания по выполнению лабораторной работы:***

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 9 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода-вывода для измерения токов фазы А со стороны вводного выключателя, секционного выключателя и выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП второй секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 модуля вводного выключателя, модулей выключателя кабельной ЛЭП, модуля двигательной нагрузки и модуля секционного выключателя в положение «Авт». Перевести переключатели SA3 модулей вводных выключателей в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы — Лабораторный комплекс - DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №09 АПВ сборных шин».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиту ДЗШ в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗШ», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»). Перевести АПВШ в режим работы «отключено» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «АПВШ», в диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «отключено»),

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный — включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8. При этом, на мнемосхеме отображаются мгновенные значения токов в обмотках измерительных трансформаторов тока.

6) Открыть окно настройки защиты (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «ДЗШ»), В таблицу 1.9 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле (см. группу «Измерения» в окне параметров защиты) в режиме нагрузки  $I_{\text{неб.нагр.}}$ .

Таблица 1.9.

Параметр	Значение
Ток небаланса в режиме нагрузки $I_{\text{неб.нагр.}}$ , А	
Ток небаланса в режиме внешнего короткого замыкания $I_{\text{неб.внешн.}}$ , А	
Ток небаланса в режиме короткого замыкания шин $I_{\text{неб.шин.}}$ , А	
Ток небаланса в режиме запуска электродвигателя $I_{\text{неб.зап.}}$ , А	
Ток срабатывания защиты $I_{\text{с3}}$ , А	

7) Создать внешнее короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. В таблицу 1.9 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме внешнего короткого замыкания  $I_{\text{неб.внешн.}}$ . Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на кабельной ЛЭП первой секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

8) Создать короткое замыкание шин включением выключателя короткозамыкателя. В таблицу 1.9 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме короткого замыкания шин  $I_{\text{неб. шин}}$ . Отключить выключатель короткозамыкателя. Отключить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

9) Определить значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме запуска электродвигателя. Для чего включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7, Q8 и в таблицу 1.9 записать значение тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме запуска электродвигателя. Выключить все выключатели. Отключить питание стенда.

10) Рассчитать ток срабатывания защиты по формуле:  $I_{\text{с.з.}} = I_{\text{неб.внешн.}} \cdot k_n$ .

Коэффициент надежности принять равным  $k_n = 2,375$ .

Обратить внимание на то, что полученное значение тока срабатывания защиты должно быть больше значения тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме внешнего короткого замыкания и в режиме запуска электродвигателя, но, в то же время, меньше значения тока небаланса в обмотке дифференциального реле в режиме короткого замыкания шин. Ввести расчетный ток срабатывания защиты в диалоговом окне параметров защиты.

11) Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

12) Перевести защиту в режим действия на отключение. При необходимости, сбросить состояние указательного реле защиты. Перевести АПВШ в режим работы «включено».

13) Провести испытания АПВ шин при самоустраниющемся коротком замыкании. Для этого создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя. При правильно выбранных уставках защита срабатывает без выдержки времени, отключая выключатели Q3, Q6 и Q5, их цвет становится зеленым, а прямоугольник «ДЗШ» красным, что свидетельствует о срабатывании указательного реле защиты. СРАЗУ ПОСЛЕ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

отключить короткое замыкание. АПВ с выдержкой времени включает выключатели всех присоединений. Щелчком левой кнопки мыши по прямоугольникам «ДЗШ» и «АПВШ» сбросить состояние указательных реле (аналогичный эффект достигается нажатием кнопки «Сброс» в диалоговом окне параметров защиты и автоматики).

14) Проверить учет положения ключей управления выключателями. Для этого, подать команду на отключение\* выключателя Q5. Создать короткое замыкание. При правильно выбранных уставках защита срабатывает без выдержки времени, отключая выключатели Q3 и Q6. СРАЗУ ПОСЛЕ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ отключить короткое замыкание. АПВ с выдержкой времени включает выключатели отключенные действием ДЗШ.

Обратить внимание, что выключатель Q5, находившийся в отключенном состоянии, не включается действием АПВ. Щелчком левой кнопки мыши по прямоугольникам «ДЗШ» и «АПВШ» сбросить состояние указательных реле (аналогичный эффект достигается нажатием кнопки «Сброс» в диалоговом окне параметров защиты и автоматики).

15) Провести испытания АПВ шин при устойчивом коротком замыкании. Для этого, создать короткое замыкание. При правильно выбранных уставках защита срабатывает без выдержки времени, отключая выключатели Q3 и Q6. АПВ с выдержкой времени включает выключатель Q3, при этом возникает ток короткого замыкания и выключатель Q3 отключается действием ДЗШ. Дальнейшая работа АПВ блокируется.

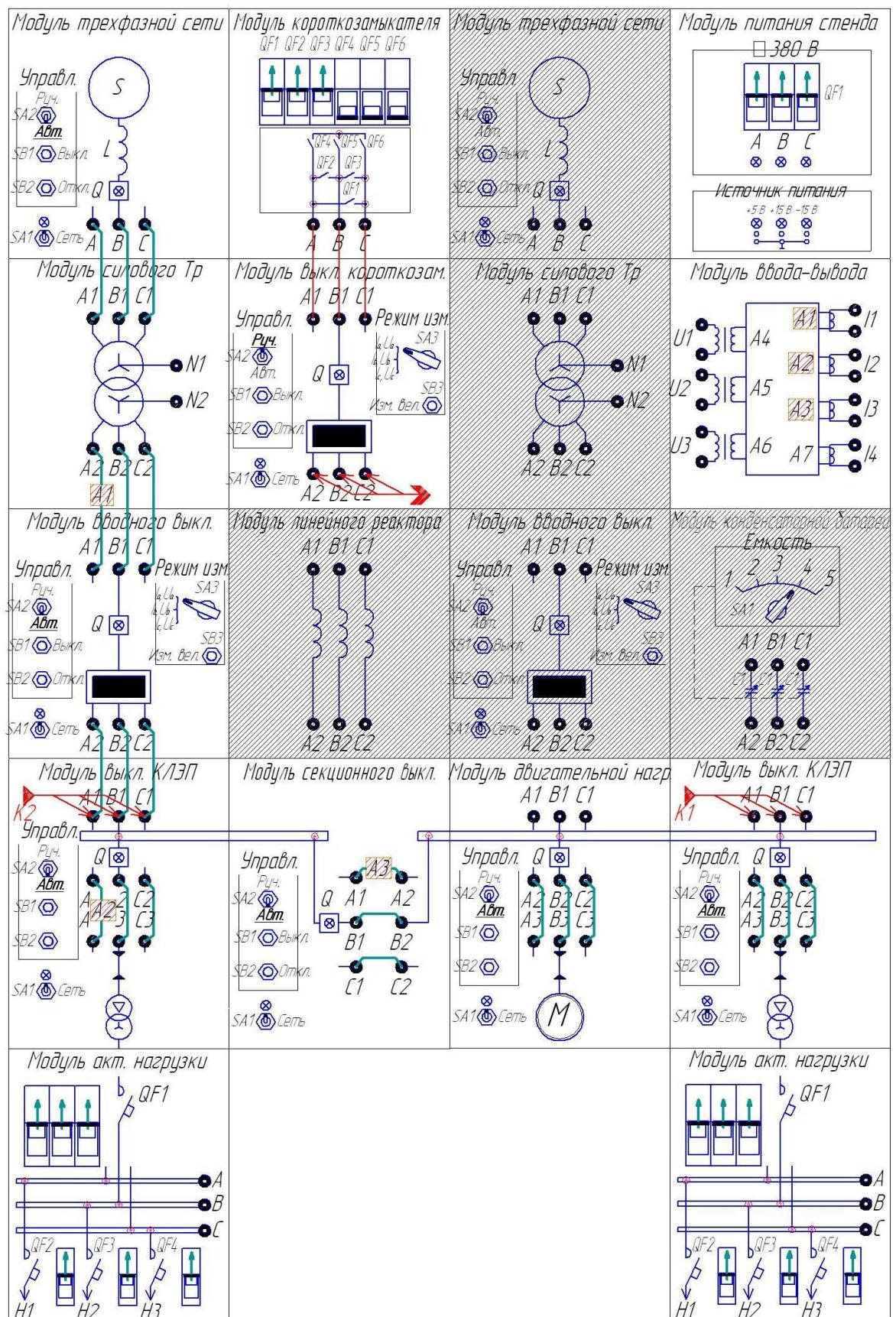
16) Отключить все выключатели. Отключить питание стенда. Изменить точку подключения выключателя короткозамыкателя для создания короткого замыкания на кабельной ЛЭП второй секции сборных шин (клеммы A1, B1, C1 модуля выключателя кабельной ЛЭП). Включить питание стенда. Включить выключатели Q1, Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8.

Создать короткое замыкание шин включением выключателя короткозамыкателя.

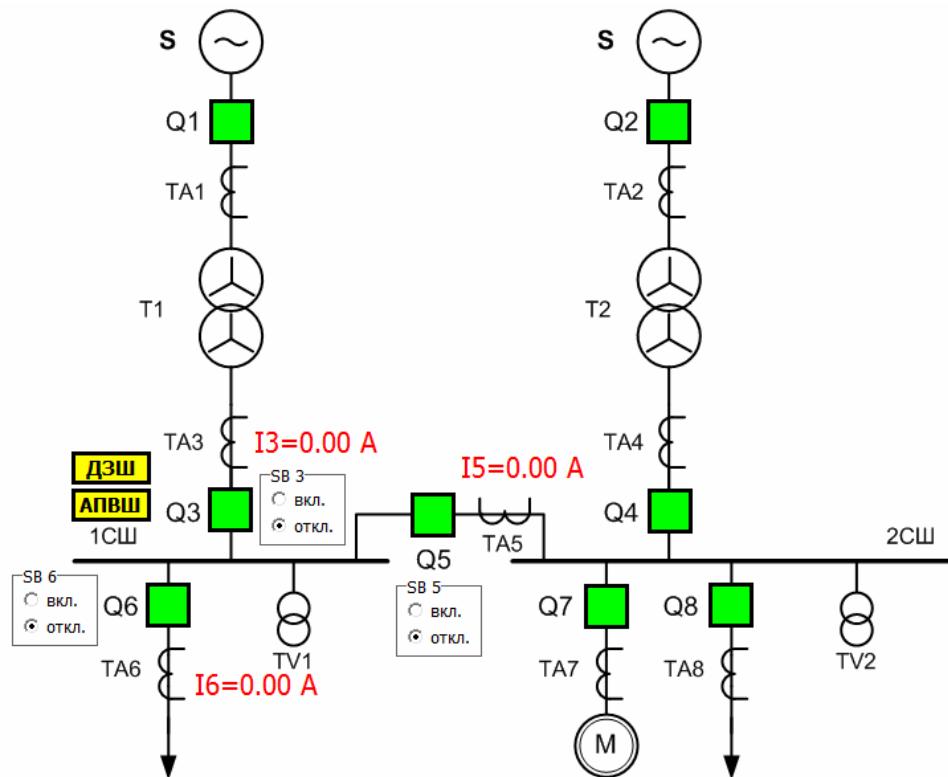
При правильно выбранных уставках защита не срабатывает.

17) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

18) Оформить отчет по лабораторной работе.



Автоматическое повторное включение сборных шин. Схема электромонтажная



Автоматическое повторное включение сборных шин. Мнемосхема

### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### *Контрольные вопросы:*

1. Какие требования предъявляются к устройствам АПВ сборных шин?
2. Почему УАПВ сборных шин должно предусматривать блокировку при срабатывании газовой защиты?
3. Почему на двухтрансформаторных подстанциях можно обойтись без АПВ сборных шин?
4. За счет чего достигается повышения быстродействия УАПВ шин по сравнению с УАПВ линий электропередачи, всегда ли может наблюдаться такое соотношение?

## ***Лабораторная работа №18. Характеристики и динамические свойства цифровой релейной защиты. Автоматическое включение резерва секционного выключателя.***

**Цель работы:** Изучить принцип действия и особенности работы устройств автоматического включения резерва секционного выключателя.

### ***Основы теории:***

Для надежного электроснабжения потребителей в энергосистемах и электроустановках создаются специальные схемы электрических соединений, обеспечивающие повышенную надежность.

Высокую степень надежности электроснабжения обеспечивают схемы питания подстанций одновременно от двух и более источников питания, поскольку при таких схемах аварийное отключение одного из источников не нарушает питания потребителей.

Несмотря на эти очевидные преимущества многостороннего питания потребителей, большое количество подстанций воздушных и кабельных сетей, имеющих два и более источников питания, работают по схеме одностороннего питания. Одностороннее питание имеют также секции собственных нужд электростанций.

Применение такой менее надежной, но более простой схемы электроснабжения во многих случаях оказывается целесообразным для снижения величин токов короткого замыкания, экономии потерь мощности в трансформаторах, упрощения релейной защиты, созданию необходимого режима по напряжению, перетокам мощности и т.п. При развитии сетей одностороннее питание часто является единственным возможным решением, так как ранее установленное оборудование и релейная защита не позволяют осуществить параллельную работу источников питания.

Недостатком одностороннего питания является то, что аварийное отключение рабочего источника приводит к прекращению питания потребителей, т.е. к аварии.

Этот недостаток может быть в значительной степени устранен быстрым автоматическим включением резервного источника или включением выключателя, на котором производится деление сети. Для выполнения этой операции широко используются специальные автоматические устройства, получившие наименование автоматов включения резерва (АВР).

В данном эксперименте моделируется схема понизительной подстанции (см. рис). В нормальном режиме работы выключатели Q1 и Q2 включены, секционный выключатель Q3 – отключен. При «аварийном» отключении выключателя Q1 (т.е. при исчезновении напряжения на шинах подстанции), сначала срабатывает защита минимального

напряжения, отключающая выключатель Q2, а затем – устройство АВР, которое включает выключатель Q3.

Зашита минимального напряжения и устройство АВР моделируются на компьютере с помощью специальной программы. Пуск устройства АВР происходит в случае исчезновения (снижения до значения уставки) напряжения на шинах подстанции.

***Указание по технике безопасности:***

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

***Указания по выполнению лабораторной работы:***

1) Собрать схему лабораторных испытаний рис. 10 (ВСЕ модули стенда должны быть ОТКЛЮЧЕНЫ!). Подключить аналоговые каналы модуля ввода- вывода для измерения токов фаз А и С со стороны вводных выключателей первой и второй секции сборных шин (каналы А1, А2 для измерения токов ввода первой секции сборных шин, каналы А3, А7 для измерения токов ввода второй секции сборных шин), а также измерения линейных напряжений первой и второй секций сборных шин (каналы А4 и А5 соответственно). Модуль выключателя короткозамыкателя QK3 с одной стороны подключить к модулю короткозамыкателя, а с другой стороны — к клеммам А1, В1, С1 модуля выключателя кабельной ЛЭП первой секции сборных шин. Перевести переключатели SA1 модуля трехфазной сети, SA2 модуля вводного выключателя, модулей выключателя кабельной ЛЭП, модуля двигательной нагрузки и модуля секционного выключателя в положение «Аvt». Перевести переключатели SA3 модулей вводных выключателей в верхнее положение. Включить автоматические выключатели QF1..QF3 на лицевой панели модуля короткозамыкателя. Включить автоматические выключатели QF1.. QF4 на модулях активной нагрузки. Включить питание стенда автоматическим выключателем QF1, расположенным на модуле питания стенда. Включить питание всех модулей, имеющих индивидуальный тумблер подачи питания SA1 «Сеть».

2) На персональном компьютере запустить программный комплекс «DeltaProfi» (Пуск - Программы - Лабораторный комплекс - DeltaProfi). Открыть лабораторную работу командой «Работы - Релейная защита и автоматика - Работа №10 АВР секционного выключателя».

3) В программе «DeltaProfi» перевести защиты МТ31, МТ32 в режим работы «действие на сигнал» (двойной щелчок левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31»,

в появившемся диалоговом окне установить переключатель «Режим работы» в положение «сигнал»).

4) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

5) Дистанционно включить выключатель Q1 одинарным щелчком левой кнопки мыши по зеленому прямоугольнику с всплывающей подсказкой «Q1». Программа всегда отображает текущее состояние выключателя (зеленый — отключен, красный — включен). Аналогичным образом включить выключатели Q3, Q6, Q5, Q7 и Q8. При этом, на мнемосхеме отображаются текущие значения токов во вторичных обмотках измерительных трансформаторов тока и напряжения.

6) Записать значение тока во вторичной обмотке измерительного трансформатора ТАЗ, пропорциональное току нагрузки ввода №1  $I_{раб. max}$ .

Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

7) Рассчитать ток срабатывания защиты по формуле:

$$I_{C.3.} = \frac{k_n \cdot k_3}{k_b} \cdot I_{раб. max}$$

Коэффициент надежности принять равным  $k_n = 1,1$ .

Коэффициент запуска двигательной нагрузки принять равным  $k_3 = 1,4$ . Коэффициент возврата реле тока принять равным  $k_b = 0,95$ .

Открыть диалоговое окно настройки параметров защиты двойным щелчком левой кнопкой мыши на прямоугольнике «МТ31», в появившемся диалоговом окне ввести расчетный ток срабатывания защиты. Диалоговое окно закрыть. Аналогичным образом, ввести ток срабатывания защиты МТ32.

8) Запустить программу в работу кнопкой «Пуск» или командой главного меню «Управление — Пуск» или горячей клавишей F5. Перевести защиты МТ31 и МТ32 в режим действия на отключение. Отключить выключатель Q5. Включить выключатели Q2 и Q4. Режим работы АВРСВ изменить на значение «включено».

9) Проверить действие АВР при исчезновении напряжения на первой секции шин. Для этого дистанционно отключить вводной выключатель Q3 щелчком левой кнопки мыши по изображению выключателя на мнемосхеме. АВР срабатывает и включает секционный выключатель Q5.

10) Восстановить нормальный режим работы. Для этого, сбросить состояние указательного реле АВРСВ (одинарный щелчок левой кнопкой мыши по прямоугольнику АВРСВ на мнемосхеме ПК), вывести АВР из работы (перевести переключатель «Режим

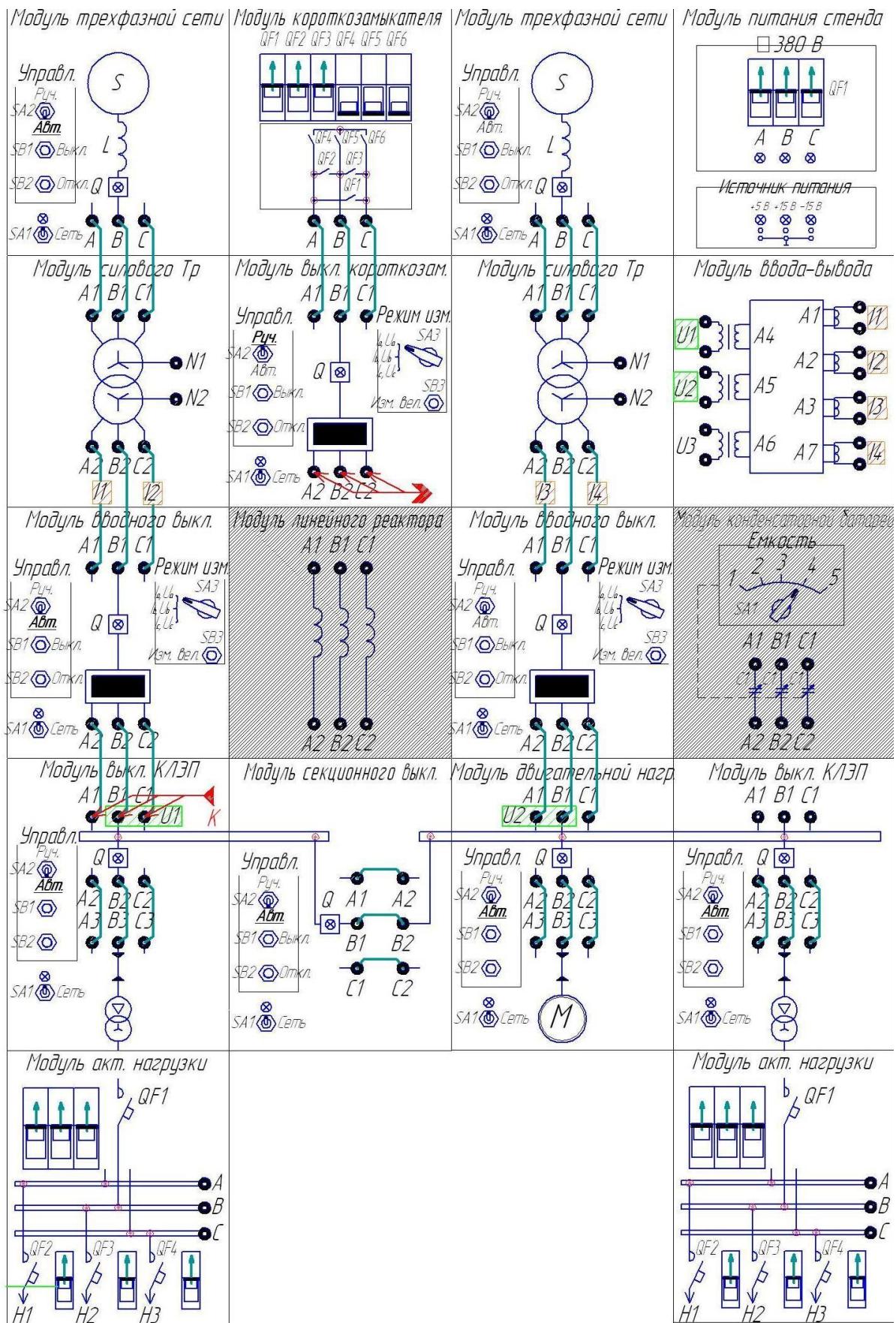
работы» в положение «отключено» в окне настройки параметров АВРСВ), дистанционно отключить выключатель Q5 и включить выключатель Q3, ввести АВР в работу (перевести переключатель «Режим работы» в положение «включено» в окне настройки параметров АВРСВ).

11) Проверить действие АВР при исчезновении напряжения на второй секции шин. Для этого дистанционно отключить вводной выключатель Q4 щелчком левой кнопки мыши по изображению выключателя на мнемосхеме. АВР срабатывает и включает секционный выключатель Q5. Восстановить нормальный режим работы в соответствии с рекомендациями п.10.

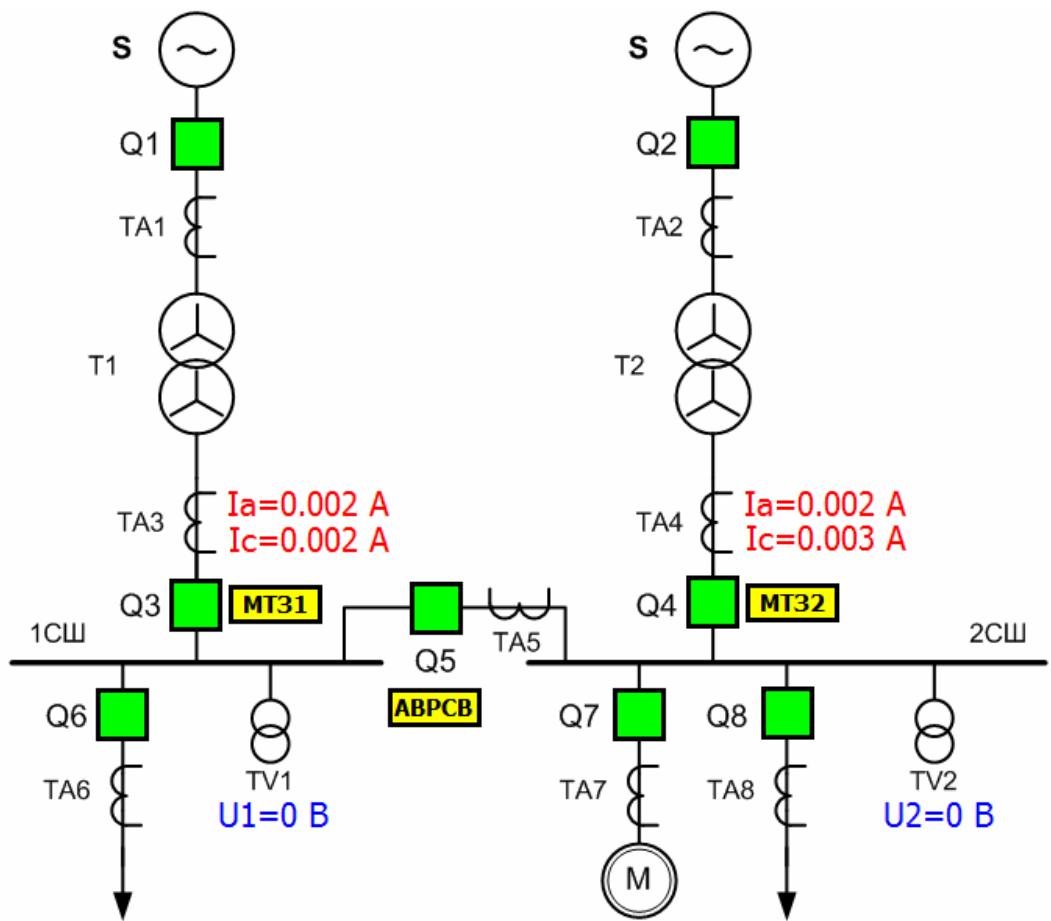
12) Проверить действие АВР при исчезновении напряжения на первой секции шин по причине короткого замыкания на первой секции шин. Для этого, создать короткое замыкание включением выключателя короткозамыкателя.

13) Отключить все выключатели. Остановить программу кнопкой «Стоп», командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6. Отключить питание стенда.

14) Оформить отчет по лабораторной работе.



## Автоматическое включение резерва секционного выключателя. Схема электромонтажная



Автоматическое включение резерва секционного выключателя. Мнемосхема

#### *Содержание отчета:*

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

#### *Контрольные вопросы:*

1. Какие требования предъявляются к устройствам АВР?
2. В чем преимущества и недостатки схем электроснабжения с радиальным питанием?
3. Почему включение питания по резервной цепи осуществляется только после отключения выключателя рабочей цепи?

4. Допускается ли срабатывание УАВР, запускающегося только по признаку исчезновения напряжения и имеющего простейшую схему, при возникновении короткого замыкания на отходящем присоединении ближайшего выключателя рабочей цепи ?

5. Объясните назначение блок-контактов выключателей в цепях данного УАВР и укажите, где они конструктивно расположены на стенде.

## ***5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины***

### ***5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины***

#### ***5.1.2 Перечень основной литературы:***

1. Куксин, А. В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие / А. В. Куксин. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 215 с. — ISBN 978-5-4497-0531-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/94929.html>

2. Горемыкин, С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : практикум / С. А. Горемыкин, Н. В. Ситников. — Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2021. — 71 с. — ISBN 978-5-7731-0933-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/111504.html>

3. Агафонов, А. И. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное пособие / А. И. Агафонов, Т. Ю. Бrostилова, Н. Б. Джазовский. — 2-е изд. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 300 с. — ISBN 978-5-9729-0505-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98355.html>

#### ***5.1.3 Перечень дополнительной литературы:***

1. Богданов, А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах : учебное пособие / А.В. Богданов, А.В. Бондарев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет, Кумертауский филиал ОГУ. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 82 с. : схем., табл., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 8-987-903550-43-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481747>

2. Соловьев, А. Л. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ : учебное пособие / А. Л. Соловьев, М. А. Шабад ; под редакцией А. В. Беляев. — Санкт-Петербург : Политехника, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7325-1100-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/59516.html>

## ***5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
3. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

## ***5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

## Приложение А

### ***Указание по технике безопасности***

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбиная схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**

. по выполнению практических работ  
по дисциплине «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕ-  
СКИХ СИСТЕМ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2025 г.

## Содержание

№ п/п	Стр.
<b>Введение</b>	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины
2.	Оборудование и материалы
3.	Наименование практических работ
4.	Содержание практических работ
4.1	Практическая работа №1. Принципы построения релейной защиты. Приведение именованных единиц к относительным, относительных единиц к именованным, относительных номинальных величин к относительным параметрам (э. д. с., напряжений, токов, мощностей и сопротивлений) элементов электрических цепей.
4.2	Практическая работа №2. Симметричные КЗ в сверхпереходном и устанавлившемся режимах. Определение начального сверхпереходного тока в генераторе и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах системы.
4.3.	Практическая работа №3. Максимальная токовая защита (МТЗ). Токовые и токовые направленные защиты линии электропередачи напряжением выше 1 кВ и их элементная база
4.4	Практическая работа №4. Дифференциальная токовая защита. Дифференциальная защита генераторов/двигателей
4.5	Практическая работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита. Релейная защита трансформаторов.
4.6	Практическая работа №6. Трансформаторы тока. Определение расчётных нагрузок на трансформаторы тока.
4.7	Практическая работа №7. Трансформаторы тока. Расчёт полной и токовой погрешностей трансформаторов тока по кривым 10%-й погрешности.
4.8	Практическая работа №8. Дистанционная защита. Дистанционные защиты линий.
4.9	Практическая работа №9. Максимальная токовая защита (МТЗ). Расчет установок максимальной токовой защиты.
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

- 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
- 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
- 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

## Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## ***1. Цель и задачи изучения дисциплины***

Целью изучения дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» является формирование знаний о принципах организации и технической реализации релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

Задачей изучения дисциплины является усвоение студентами основных принципов выполнения защит, как отдельных элементов, так и системы в целом, а также основных положений по расчету систем релейной защиты.

## ***2. Оборудование и материалы***

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

## ***3. Наименование практических работ***

Для очно-заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа №1. Реле дифференциальных защит серий РНТ и ДЗТ10– 2 часа;

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
6 семестр			
1	<b>Практическая работа №1. Принципы построения релейной защиты.</b> Приведение именованных единиц к относительным, относительным единицам к именованным, относительным номинальным величинам к относительным параметрам (э. д. с., напряжений, токов, мощностей и сопротивлений) элементов электрических цепей. Получить практические навыки приведения именованных единиц к относительным.	2	
2	<b>Практическая работа №2. Симметричные КЗ в сверхпереходном и установившемся режимах.</b> Определение начального сверхпереходного тока в генераторе и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах системы. Получить практические навыки расчета и построения векторных диаграмм при КЗ в системах ЭС.	2	
3	<b>Практическая работа №3. Максимальная токовая защита (МТЗ).</b> Токовые и токовые	2	

	направленные защиты линии электропередачи напряжением выше 1 кВ и их элементная база Изучить расчет МТЗ на оперативном токе и их элементную базу.		
4	<b>Практическая работа №4. Дифференциальная токовая защита.</b> Дифференциальная защита генераторов/двигателей Рассмотреть основные типы защит синхронных генераторов и асинхронных электродвигателей.	2	
5	<b>Практическая работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита.</b> Релейная защита трансформаторов. Изучить основные типы повреждений и способы предотвращения аварий на силовых трансформаторах.	2	
6	<b>Практическая работа №6. Трансформаторы тока.</b> Определение расчётных нагрузок на трансформаторы тока. Определение расчетных нагрузок на трансформаторы тока (ТТ).	2	
7	<b>Практическая работа №7. Трансформаторы тока.</b> Расчёт полной и токовой погрешностей трансформаторов тока по кривым 10%-й погрешности. Определение токовой и полной погрешностей, сечений жил контрольных кабелей по кривым 10%-ной погрешности, максимального вторичного тока ТТ.	2	
8	<b>Практическая работа №8. Дистанционная защита.</b> Дистанционные защиты линий. Изучить способы расчета дистанционных защит, которые сводятся к определению, сопротивлений срабатывания, выдержек времени и чувствительности отдельных дистанционных ступеней и пусковых органов защиты, параметры срабатывания и чувствительности защиты при качаниях.	2	
9	<b>Практическая работа №9. Максимальная токовая защита (МТЗ).</b> Расчет уставок максимальной токовой защиты. Изучить методы расчета установок МТЗ.	2	
	<b>Итого за 6 семестр:</b>	<b>18</b>	
	<b>Итого:</b>	<b>18</b>	

#### 4. Содержание практических работ

*Практическая работа №1. Принципы построения релейной защиты. Приведение именованных единиц к относительным, относительных единиц к именованным, относительных номинальных величин к относительным параметрам (э. д. с., напряжений, токов, мощностей и сопротивлений) элементов электрических цепей.*

**Цель:** Получить практические навыки приведения именованных единиц к относительным.

#### **Основы теории:**

Параметры различных элементов электроэнергетических систем, а также параметры режима (напряжения, тока, мощности и т.д.) как и других физических величин, могут быть выражены как в системе ИМЕНОВАННЫХ, так и в системе ОТНОСИТЕЛЬНЫХ единиц, т.е. в долях от определенных значений этих же величин, принятых за единицу измерения. При этом точность результатов расчетов не зависит от используемой системы единиц измерения. Применение системы относительных единиц упрощает расчеты. Чтобы получить относительные значения различных физических величин, необходимо предварительно выбрать значения соответствующих величин, принятые за БАЗИСНЫЕ, т.е. в качестве единиц измерения.

Так, чтобы выразить параметры различных элементов схемы замещения электрической цепи и параметры режима в системе относительных единиц, необходимо иметь 4 базисные единицы:

- базисное напряжение,  $U_B$ ;
- базисный ток,  $I_B$ ;
- базисную мощность (трехфазной системы),  $S_B$ ;
- базисное сопротивление,  $Z_B$ ;

Две из них выбираются произвольно, а две другие определяются из соотношения для мощности трехфазной системы:

$$S_B = \sqrt{3} \cdot I_B \cdot U_B$$

И формулы закона Ома:

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B}$$

Выбранные базисные единицы служат единицами измерения как полных величин, так и их составляющих. Иногда относительные значения величин выражают в %-х от соответствующих базисных единиц.

При выбранных базисных единицах относительные значения ЭДС, напряжения, тока, мощности и сопротивления определяют путем деления, значения соответствующей величины в именованных единицах на базисную единицу той же размерности:

$$E_{*} = \frac{E}{U_{\delta}} \quad U_{*} = \frac{U}{U_{\delta}} \quad I_{*} = \frac{I}{U_{\delta}} \quad S_{*} = \frac{S}{U_{\delta}} \quad Z_{*} = \frac{Z}{U_{\delta}}$$

Где: \* - указывает, что величина выражена в относительных единицах,  
б – указывает, что она приведена к базисным условиям.

Из [1.4] и [1.6] следует, что относительные фазные и междуфазные напряжения одинаковы; так же численно одинаковы относительная фазная мощность и мощность трех фаз.

Из [1.2] и [1.7] можно получить расчетные формулы для вычисления относительного сопротивления, приведенного к базисным условиям:

$$Z_{*} = \frac{Z}{Z_{\delta}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\delta}}{U_{\delta}}$$

Если [1.8] умножим на  $\frac{U_{\delta}}{U_{\delta}}$ , то

$$Z_{*} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} I_{\delta} \cdot U_{\delta}}{U_{\delta} \cdot U_{\delta}} = Z \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}$$

Где: Z – заданное сопротивление на фазу [Ом],

$I_{\delta}$  - базисный ток [А, кА],

$U_{\delta}$  - базисное напряжение [В, кВ],

$S_{\delta}$  - базисная мощность трех фаз [В·А, МВ·А].

Задача 1.1. Индуктивное сопротивление линии электропередачи 110 кВ,  $X_{\text{л}}=18$  Ом.

Выразить сопротивление линии  $X_{*}$  в относительных единицах, приняв за базисные трехфазную мощность  $S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  и междуфазное напряжение  $U_{\delta} = 115 \text{ кВ}$ .

$$x_{*} = x_{\text{л}} \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = 18 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,136.$$

Часто параметры элементов электроэнергетических схем, вводимых в расчетную схему, заданы не в именованных единицах, а в %-х или относительных единицах при номи-

нальных условиях. Это означает, что при выражении их в %-х или в относительных единицах в качестве базисных единиц были приняты номинальное напряжение  $U_{HOM}$  и номинальный ток  $I_{HOM}$  или номинальная мощность  $S_{HOM}$ , т.е.

$$I_{\delta} = I_{HOM}, U_{\delta} = U_{HOM}, S_{\delta} = S_{HOM}.$$

Подставляя в [1.8] и [1.9] вместо базисных величин номинальные данные элемента согласно [1.10], получим расчетные формулы номинальных относительных сопротивлений:

$$Z_{*_{HOM}} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{HOM}}{U_{HOM}},$$

$$Z_{*_{HOM}} = Z \cdot \frac{S_{HOM}}{U_{HOM}^2}.$$

Т.к. полное сопротивление трансформаторов численно равно  $U_k$ , трансформатора, то выражение его в %-х:

$$Z\% = 100 \cdot \frac{Z}{*}$$

По формулам [1.11].....[1.13] можно определить сопротивления элементов в именованных единицах по известным сопротивлениям в относительных единицах:

$$Z = \frac{Z_{*_{HOM}} \cdot U_{HOM}}{\sqrt{3} \cdot I_{HOM}} = \frac{Z\% \cdot U_{HOM}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{HOM}} [Om],$$

$$Z = Z_{*_{HOM}} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}} = \frac{Z\% \cdot U_{HOM}^2}{100 \cdot S_{HOM}} [Om].$$

Для расчетов различных режимов электроэнергетических систем и токов К.3. прежде всего необходимо привести ЭДС и сопротивления всех элементов исходной расчетной схемы к одним базисным условиям.

Для приведения относительного сопротивления любого элемента, заданного при номинальных условиях, к базисным в [1.8] и [1.9] подставляем значение  $Z$  соответственно из [1.14] и [1.15]

$$Z_{*_{\delta}} = Z_{*_{HOM}} \cdot \frac{I_{\delta} \cdot U_{HOM}}{I_{HOM} \cdot U_{\delta}},$$

$$Z_{*_{\delta}} = Z_{*_{HOM}} \cdot \frac{S_{\delta} \cdot U_{HOM}^2}{S_{HOM} \cdot U_{\delta}^2}.$$

Для приведения напряжения, заданного в относительных единицах при номинальных условиях, к базисным условиям воспользуемся определением относительного номинального напряжения:

$$U_{*_{\text{ном}}} = \frac{U}{U_{\text{ном}}}$$

Значение  $U$  из [1.18] подставляем в [1.4] и получим формулу пересчета к базисным условиям.

$$U_{*_{\delta}} = U_{*_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\delta}}.$$

Аналогично

$$E_{*_{\delta}} = E_{*_{\text{ном}}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\delta}}.$$

**Задания:**

**Задание №1**

Индуктивное сопротивление линии электропередачи 110 кВ  $X_{\text{л}} = 18$  Ом. Выразить сопротивление линии  $X_{*_{\delta}}$  в относительных единицах, приняв за базисную трехфазную мощность  $S_{\delta} = 100$  МВ•А и междуфазное напряжение  $U_{\delta} = 115$  кВ.

**Задание №2**

Определить полное сопротивление трехфазного двухобмоточного трансформатора в именованных единицах, приведенное к сторонам высшего и низшего напряжения (ВН и НН), а также в относительных единицах к базисным условиям, по исходным данным: номинальная мощность трансформатора  $S_{m.\text{ном}} = 16$  МВ•А, номинальный коэффициент трансформации, т. е. отношение междуфазных напряжений на зажимах ВН и НН при холостом ходе,  $k = U_{\text{ном.вн}}/U_{\text{ном.нн}} = 115/6,6$  кВ; напряжение короткого замыкания (к. з.)  $U_{\text{к.з.}} = 10,5\%$ ; базисные единицы  $S_{\delta} = 100$  МВ•А,  $V_{\delta} = 6,3$  кВ.

**Задание №3**

Определить реактивное (индуктивное) сопротивление  $X_p$  и индуктивность  $L_p$  двух реакторов по исходным данным: номинальный ток каждого  $I_{p.\text{ном}} = 0,4$  кА, номинальное напряжение первого  $U_{p1\text{ном}} = 6$  кВ, второго  $U_{p2\text{ном}} = 1$  О кВ, относительное реактивное сопротивление, приведенное к номинальным данным каждого из них,  $X_{1\text{ном}} = X_{p2\text{ном}} = 5\%$ .

**Задание №4**

Исходные данные реактора:  $U_{p.\text{ном}} = 10$  кВ;  $I_{p.\text{ном}} = 600$  А;  $X_{p.\text{ном}} = 4\%$  Вычислить относительное сопротивление реактора, приведенное к базисным условиям:  $U_{\delta} = 10,5$  кВ;  $S_{\delta} = 100$  МВ•А.

### **Задание №5**

Вычислить реактивное  $X_p$  (индуктивное), активное  $R_p$  и относительное номинальное реактивное сопротивление  $x^*_{p, \text{ном}}$  реактора по исходным данным:  $I_{\text{ном}} = 400 \text{ А}$ ;  $U_{p, \text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ ; номинальные активные  $p$  потери на фазу  $P_{p, \text{ном}} = 4,61 \text{ кВт}$ .

**Практическая работа №2. Симметричные КЗ в сверхпереходном и установившемся режимах. Определение начального сверхпереходного тока в генераторе и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах системы.**

**Цель:** Получить практические навыки расчета и построения векторных диаграмм при КЗ в системах ЭС.

**Основы теории:**

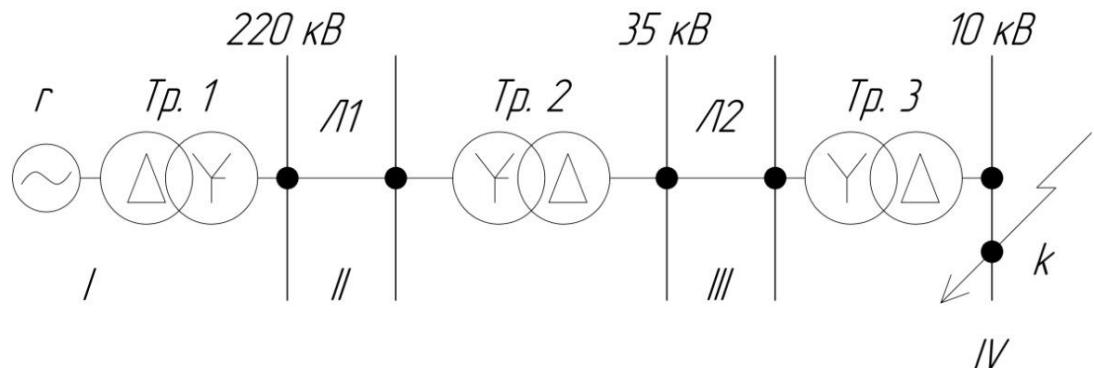
Под начальным сверхпереходным током понимают действующее значение периодической составляющей тока в начальный момент К.З.

Для вычисления токов К.З. при наличии в схеме трансформаторов и автотрансформаторов такую цепь представляют схемой замещения. В схеме замещения все магнито-связанные электрические цепи замещают одной эквивалентной электрически связанный цепью.

Составление такой схемы сводится к приведению параметров всех элементов и ЭДС различных ступеней трансформации заданной схемы к какой-либо одной ступени, которую принимают за основную. Само приведение осуществляется на основе соотношений, вытекающих из общих теории трансформаторов. В Р.З. расчет токов К.З. выполняют с учетом действительных коэффициентов трансформации.

При вычислении сверхпереходных токов генератор в схеме замещения представляют сверхпереходный ЭДС  $E_d''$  и сверхпереходным индуктивным сопротивлением  $x_d''$ .

Задача 2.1. Определить начальный сверхпереходной ток в генераторе Г (Рис. 2.1.) и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном К.З. на шинах IV (точка К).



Рассчитываемая схема с трансформаторными связями.

Исходные данные:

- Генератор Г:

$$S = 117,5 \text{ MVA}; U = 13,8 \text{ kV}; x_{*d}'' = 0,138; \cos\varphi = 0,85;$$

- Трансформатор Тр 1:

$$- S = 125 \text{ MVA}; k = 242 / 13,8 \text{ kV/kV}; U_{k.} = 11\%;$$

- Линия Л1:

$$\ell = 140 \text{ km}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ohm/km}.$$

- Трансформатор Тр 2:

$$S = 100 \text{ MVA}; k = 230 / 38,5 \text{ kV/kV}; U_{k.} = 12\%;$$

- Линия Л2:

$$\ell = 20 \text{ km}; x_{y\partial} = 0,4 \text{ Ohm/km}.$$

- Трансформатор Тр 3

$$S = 6,3 \text{ MVA}; k = 35 / 11 \text{ kV/kV}; U_{k.} = 7,5\%.$$

На основании вышеизложенного составляем схему замещения

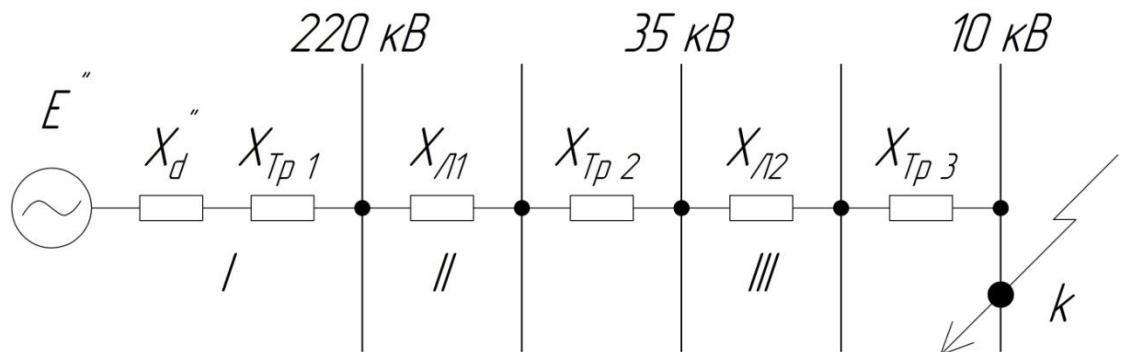


Схема замещения без трансформаторных связей и рассчитываем параметры отдельных элементов этой схемы.

За основную ступень принимаем ступень напряжения  $I$ , т.е. напряжение генератора

$U_I = U_{och.} = U_{\Gamma, nom} = 13 \text{ kV}$ ; и к этому напряжению приводим все элементы схемы. При этом:

- во всех случаях трансформаторы с соединением обмоток  $Y - \Delta$  учитываются по схеме  $Y - Y$ ;
- коэффициенты трансформации трансформаторов определяются в направлении от основной ступени напряжения.

Сверхпереходное сопротивления генератора определяем по формуле [1.15]

$$x_d'' = x_{*d}'' \cdot \frac{U_{\Gamma, nom}^2}{S_{\Gamma, nom}} = 0,138 \cdot \frac{13,8^2}{117,5} = 0,224 \text{ [Ohm]}.$$

По этой же формуле определяем сопротивление трансформатора Тр 1, приведенное к его НН

$$x_{Tp1} = \frac{U_{Tp2,\kappa} \cdot \% \cdot U_{Tp1,nom}^2}{100 \cdot S_{Tp1,nom}} = \frac{11 \cdot 13,8^2}{100 \cdot 125} = 0,167 [Om].$$

Приведенное сопротивление линии Л1 определяем по формуле:

$$x_{\text{Л1,приб.}} = \ell_{\text{Л1}} \cdot x_{\text{Л1,у\o.}} \cdot k_{Tp1}^2.$$

$$x_{\text{Л1,приб.}} = 140 \cdot 0,4 \cdot \left( \frac{13,8}{242} \right)^2 = 0,182 [Om].$$

Приведенное сопротивление трансформатора Тр2 определяем по формулам [1.15] и [2.1]

$$x_{Tp2,\text{приб.}} = \frac{U_{Tp2,\kappa} \cdot \% \cdot U_{Tp2BH}^2}{100 \cdot S_{Tp2nom}} \cdot k_{Tp1}^2 = \frac{12 \cdot 230^2}{100 \cdot 100} \cdot \left( \frac{13,8}{242} \right)^2 = 0,207 [Om].$$

Приведенное сопротивление линии Л2 определяем по формуле:

$$x_{\text{Л2,приб.}} = \ell_{\text{Л2}} \cdot x_{\text{Л2,у\o.}} \cdot k_{Tp1}^2 \cdot k_{Tp2}^2.$$

$$x_{\text{Л2,приб.}} = 20 \cdot 0,4 \cdot \left( \frac{13,8}{242} \right)^2 \cdot \left( \frac{230}{38,5} \right)^2 = 0,93 [Om].$$

Приведенное сопротивление трансформатора Тр3 определяем по [1.15] и [2.2]

$$x_{Tp3,\text{приб.}} = \frac{U_{Tp3,\kappa} \cdot U_{Tp3BH}^2}{100 \cdot S_{Tp3nom}} \cdot k_{Tp1}^2 \cdot k_{Tp2}^2 = \frac{7,5 \cdot 35^2}{100 \cdot 6,3} \cdot \left( \frac{13,8}{242} \right)^2 \cdot \left( \frac{230}{38,5} \right)^2 = 1,69 [Om].$$

Сверхпереходная ЭДС генератора в относительных единицах, отнесенных к его номинальным параметрам, определяется по формуле:

$$E''_{\Gamma,nom} = \sqrt{(U_{\Gamma,nom} \cdot \cos \varphi_{\Gamma,nom})^2 + (U_{\Gamma,nom} \cdot \sin \varphi_{\Gamma,nom} + I_{\Gamma,nom} \cdot X_d'')^2} \quad [2.3]$$

$$E''_{\Gamma,nom} = \sqrt{(1 \cdot 0,85)^2 + (1 \cdot 0,53 + 1 \cdot 0,138)^2} = 1,08.$$

Тогда сверхпереходная междуфазная ЭДС не основной ступени

$$E'' = E''_{\Gamma,nom} \cdot U_{\Gamma,nom} = 1,08 \cdot 13,8 = 14,9 \kappa B.$$

Приведенное к I ступени начальное значение сверхпереходного тока в генераторе при металлическом трехфазном К.З. на шинах IV(точка К) определяется по формуле:

$$I_I''^{(3)} = I_K''^{(3)} = I_{\Gamma}''^{(3)} = \frac{E''}{\sqrt{3} \cdot x_{\Sigma\text{приб.}}},$$

$$x_{\Sigma\text{приб.}} = x_d'' + x_{Tp1} + x_{\text{Л1приб.}} + x_{Tp2\text{приб.}} + x_{\text{Л2приб.}} + x_{Tp3\text{приб.}}.$$

$$x_{\Sigma\text{приб.}} = 0,224 + 0,167 + 0,182 + 0,207 + 0,93 + 1,69 = 3,4 [Om].$$

$$I_I''^{(3)} = I_K''^{(3)} = I_{\Gamma}''^{(3)} = \frac{14,9}{\sqrt{3} \cdot 3,4} = 2,53 [kA].$$

Этот ток на основной ступени  $I$  генераторного напряжения является действительным током, протекающий через генератор.

Действительный (НЕ ПРЕВИДЕННЫЙ) ток в линии Л1, т.е. на II ступени напряжения, определяется по формуле:

$$I_{II}^{''(3)} = I_{Tp1}^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Tp1}.$$

$$I_{Tp1}^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} = 0,144[\text{kA}].$$

Действительный ток в линии Л2 т.е. на III ступени напряжения, определяется по формуле:

$$I_{III}^{''(3)} = I_{Tp2}^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Tp1} \cdot k_{Tp2}$$

$$I_{Tp2}^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5} = 0,862[\text{kA}].$$

Действительный ток на шинах IV, т.е. в месте К.З. определяется по формуле:

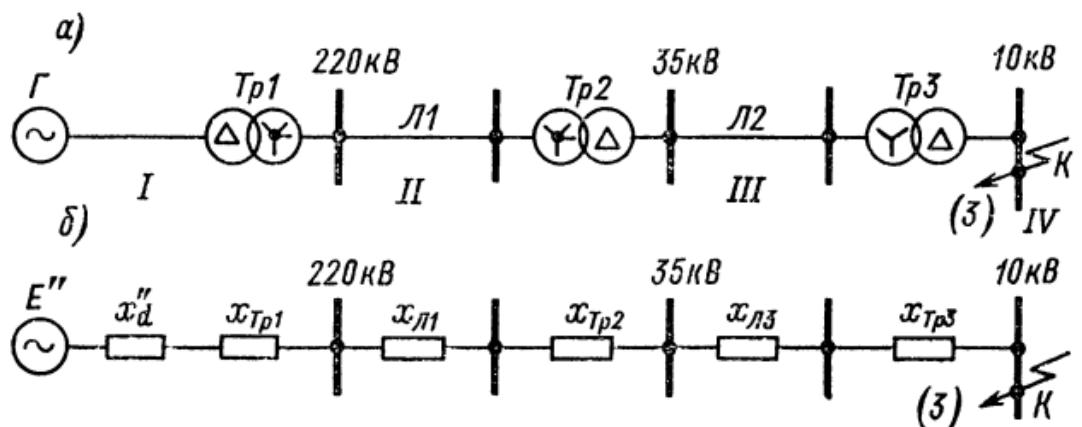
$$I_{IV}^{''(3)} = I_k^{''(3)} = I_I^{''(3)} \cdot k_{Tp1} \cdot k_{Tp2} \cdot k_{Tp3}$$

$$I_k^{''(3)} = 2,53 \cdot \frac{13,8}{242} \cdot \frac{230}{38,5} \cdot \frac{35}{11} = 2,75[\text{kA}].$$

**Задания:**

**Задание №1**

Определить начальный сверхпереходный ток в генераторе Г и на всех элементах схемы при металлическом трехфазном к. з. на шинах IV (точка К).

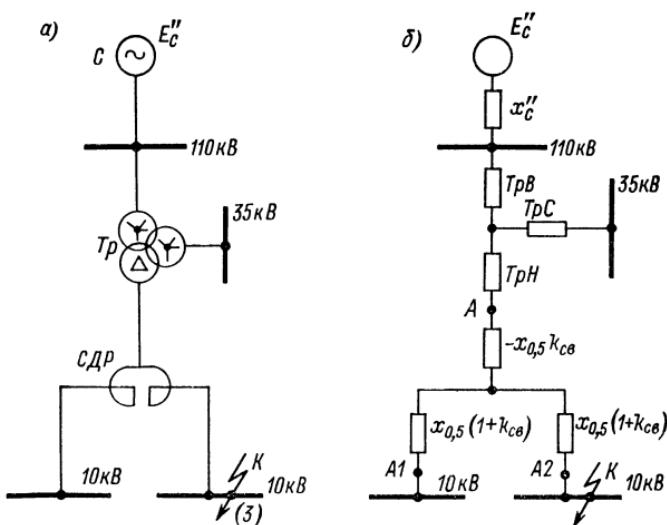


Исходные данные элементов схемы, следующие: генератор Г 117,5 МВ-А; 13,8 кВ;  $x''*d = 0,138$ ;  $\cos\phi = 0,85$ ; до момента к. з. нагрузка генератора соответствовала его номинальным параметрам; трансформатор Tp1 125 МВ-А; 242/13,8 кВ;  $\text{ик}=11\%$ ; длина линии Л1 — 140 км;  $\%_d = 0,4 \text{ Ом/км}$ ; трансформатор Tp2 100 МВ-А; 230/38,5 кВ;  $\text{ик}=12\%$ ; длина линии Л2 — 20 км;  $\%_d = 0,4 \text{ Ом/км}$ ; трансформатор Tp3 6,3 МВ-А; 35/11 кВ;  $\text{ик} = 7,5\%$ .

Расчет выполнить в именованных единицах. Активным сопротивлением пренебречь, так как в этой схеме  $R < 0,33x$ .

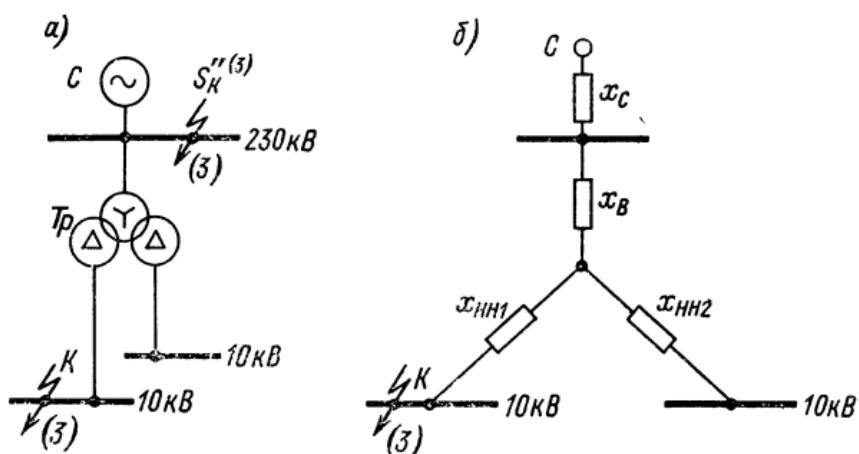
### Задание №2

Произвести расчет начального сверхпереходного тока при трехфазном металлическом к. з. на шинах секции 10 кВ (точка К, рис. 1-3, а) по исходным данным: система 121 кВ;  $x_C = 5,3$  Ом; трансформатор Тр 80 МВ-А; 115/38,5/11 кВ; ик.вн-чн=10,5%; ик.вн-нн=17%, ик= 6%, сдвоенный реактор — ток каждой ветви 3000 А, напряжение 10 кВ, номинальная реактивность одной ветви катушки при отсутствии тока в другой ветви  $X_0=12\%$ , коэффициент связи между двумя ветвями 0,47 [6].



### Задание №3

Вычислить начальный сверхпереходный ток и остаточное напряжение на шинах не поврежденной секции 10 кВ при металлическом трехфазном к. з. на шинах другой секции 10 кВ по следующим данным: система — трехфазная мощность к. з. на шинах 230 кВ  $SK''(3)$  = 2000 МВ-А; трансформатор Тр — тип ТРДЦН 63 МВ-А, 230/11/11 кВ; ик.вн-нн=12% (данные по ГОСТ 15957—70).



**Практическая работа №3. Максимальная токовая защита (МТЗ). Токовые и токовые направленные защиты линии электропередачи напряжением выше 1 кВ и их элементная база**

**Цель:** Изучить расчет МТЗ на оперативном токе и их элементную базу.

**Основы теории:**

Максимальная токовая защита является одной из основных защит в радиальных сетях напряжением до 35 кВ.

В радиальных сетях с односторонним питанием максимальная токовая защита должна устанавливаться в начале каждой линии со стороны источника питания. При таком расположении защит каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее подстанции.

По характеру зависимости времени действия максимальной токовой защиты от тока они подразделяются на защиты с независимой характеристикой и зависимой.

По способу питания оперативных цепей максимальные токовые защиты делятся на защиты с постоянным и переменным оперативным током.

Максимальные токовые защиты могут выполняться по двухфазным и трехфазным схемам.

Наиболее распространенные схемы максимальных токовых защит для сетей с изолированной нейтралью приведены на рисунках 17-18. Особенностью этих сетей является отсутствие однофазных КЗ, что дает возможность применять для защиты от междуфазных КЗ двухфазные схемы максимальных токовых защит. Эти же схемы могут применяться и для защиты сетей с заземленной нейтралью, если для защиты от однофазных КЗ применяется дополнительная защита, включенная на ток нулевой последовательности.

Для расширения зоны действия максимальной токовой защиты ее токовые реле подключаются к трансформаторам тока, установленным ближе к шинам. Если выключатель имеет встроенные трансформаторы тока, то защита подключается к ним со стороны шин.

На рис. 2 приведена схема максимальной токовой защиты с независимой характеристикой времени срабатывания на постоянном оперативном токе.

Схема включает два пусковых токовых реле мгновенного действия КА1 и КА2 (типа РТ-40), одно реле времени КТ (типа ЭВ-121 или ЭВ-131) и одно указательное реле КН (типа РУ-21). Контакты токовых реле соединены параллельно, поэтому при срабатывании любого из них по ним одновременно подается плюс на обмотку реле времени, ко второму выводу которой постоянно подведен минус оперативного тока. Реле времени, сработав с

установленной выдержкой времени, подает своим контактом плюс оперативного тока на отключающую катушку YAT привода выключателя через указательное реле KH и вспомогательный контакт SQ, связанный с приводом выключателя. Указательное реле фиксирует срабатывание защиты и прохождение тока через YAT.

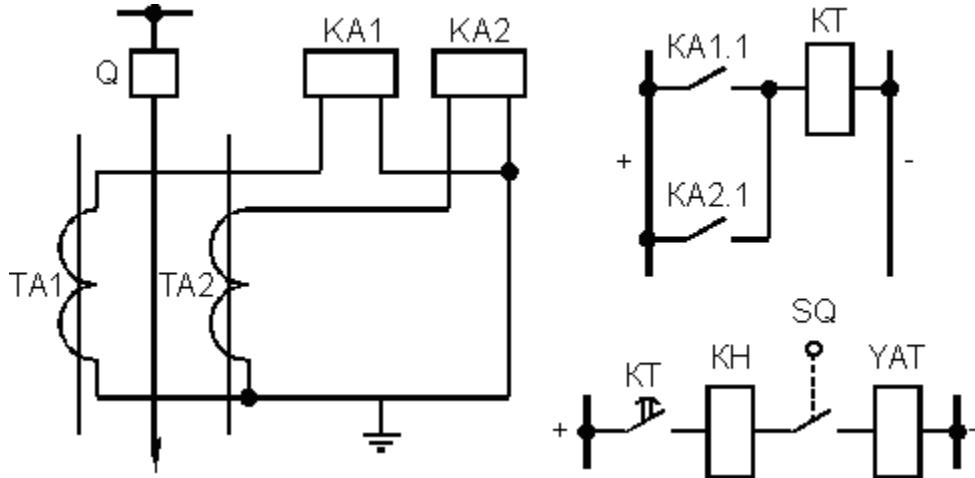


Рисунок 2 – Схема двухфазной максимальной токовой защиты с независимой характеристикой времени срабатывания на постоянном оперативном токе.

Вспомогательный контакт SQ, замыкающийся при включении и размыкающийся при отключении выключателя, имеет два назначения. При отключении выключателя прекращается прохождение тока КЗ, вследствие чего происходит возврат в исходное положение в начале токовых реле, а затем реле времени. Так как контакты реле времени не рассчитаны на размыкание цепи катушек отключения, которые имеют большое потребление (2,5–10 A), то размыкание этой цепи производится вспомогательным контактом до того, как начнут размыкаться контакты реле времени. Таким образом, первым назначением вспомогательного контакта является предотвращение повреждение контактов реле времени при возврате защиты после отключения выключателя.

Если после отключения выключателя контакты реле времени останутся в замкнутом состоянии (например, из-за неисправности реле), то по отключающей катушке будет длительно протекать ток, который может привести к повреждению, так как она рассчитана только на кратковременное прохождение тока. Вспомогательный контакт, размыкая цепь отключения, защищает отключающую катушку от повреждения, что и является его вторым назначением.

На рис.18 приведена также двухфазная схема максимальной токовой защиты с независимой характеристикой времени срабатывания, но на оперативном переменном токе. Схема включает в себя два пусковых токовых реле мгновенного действия KA1 и KA2 (типа РТ-40), одно токовое реле времени KT (типа РВМ-12 или РВМ-13), одно указательное реле

КН и два промежуточных реле  $KL1$  и  $KL2$  (типа РП-341). Токовые реле при срабатывании замыкают цепь вторичных обмоток промежуточных трансформаторов реле времени  $TL_A$  и  $TL_C$  на обмотку электродвигателя реле времени  $KT$ . При этом во избежание отказа реле времени при двухфазном КЗ между фазами А и С цепь обмотки  $TL_C$  разрывается размыкающим контактом  $KA1.2$ .

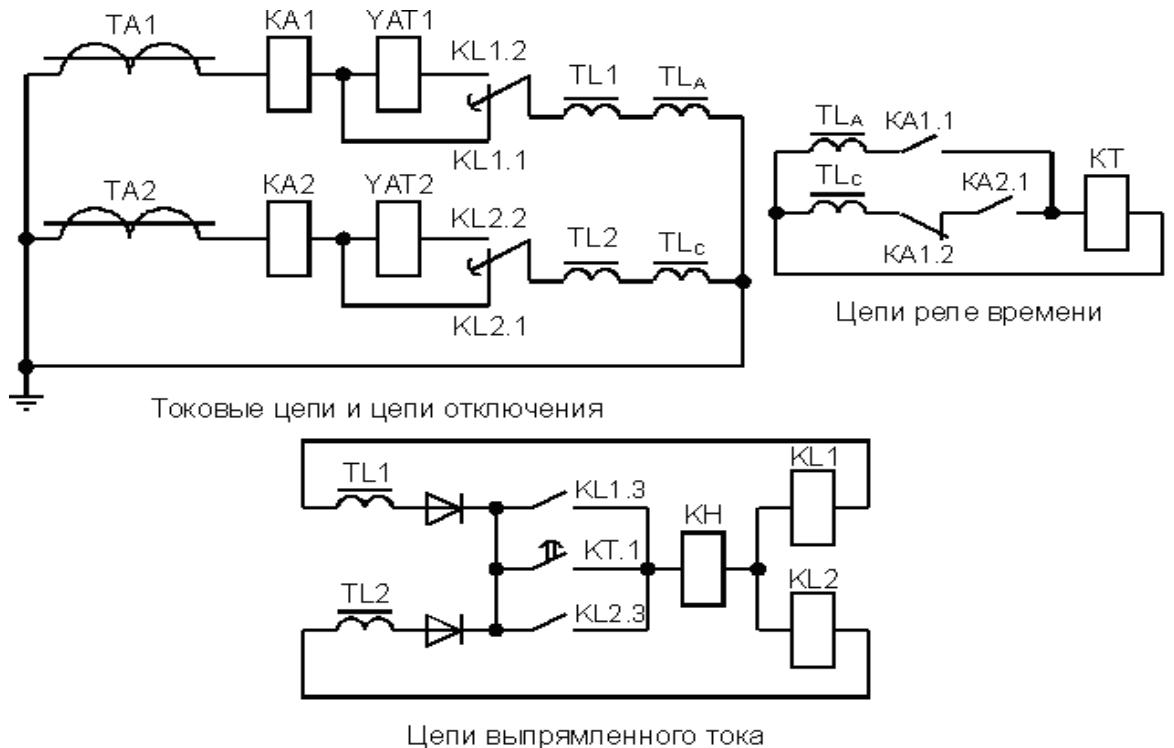


Рисунок 3 – Принципиальная схема двухфазной максимальной токовой защиты с независимой характеристикой срабатывания на переменном оперативном токе

Реле времени, сработав, своим контактом  $KT.1$  замыкает цепи вторичных обмоток промежуточных трансформаторов на обмотки промежуточных реле  $KL1$  и  $KL2$ . Промежуточные реле, сработав, производят следующие действия: мощными переключающими контактами  $KL1.1$ ,  $KL1.2$ ,  $KL2.1$  и  $KL2.2$  включают соответствующие отключающие катушки  $YAT1$  и  $YAT2$  в цепи  $TA1$  и  $TA2$ , а контактами  $KL1.3$  и  $KL2.3$  шунтируют контакт реле времени  $KT.1$ .

Шунтирование контактов реле времени необходимо потому, что после включения отключающих катушек ток от трансформаторов тока может настолько снизиться, что пусковые токовые реле и реле времени разомкнут свои контакты и произойдет преждевременный возврат промежуточных реле. Шунтирование контактов реле времени обеспечивает в этих случаях надежное действие защиты независимо от состояния контактов пусковых реле и реле времени.

При использовании такой схемы погрешность трансформаторов тока не должна превышать 10% только до момента срабатывания промежуточных реле. После их срабатывания и подключения отключающих катушек трансформаторы тока должны давать ток, обеспечивающий надежное действие (срабатывание) отключающих катушек. Погрешность трансформатора тока при этом значения не имеет.

После срабатывания отключающих катушек и отключения выключателя ток в цепи трансформатора тока прекращается и все реле возвращаются в исходное положение при отсутствии оперативного тока. Поэтому при питании защиты оперативным переменным током вспомогательный контакт в цепи катушки отключения выключателя становится ненужным.

Исходным для выбора тока срабатывания максимальной токовой защиты от КЗ является требование, чтобы она надежно работала при повреждениях, но в то же время не действовала при максимальных токах нагрузки, кратковременном увеличении тока, вызванном пуском и самозапуском двигателей, колебанием нагрузки.

Условия выбора тока срабатывания:

1. Токовые реле защиты не должны приходить в действие при максимальном рабочем токе нагрузки  $I_{раб. max}$ .
2. Токовые реле, сработавшие при внешнем КЗ должны надежно возвращаться в исходное положение после отключения КЗ и снижения тока до максимального тока нагрузки. Например, при КЗ в точке К2 (рис.19) после отключения повреждения защитой МТЗ2, прохождение тока КЗ прекращается и пришедшее в действие токовое реле защиты МТЗ1 должно возвратиться в начальное положение, так как иначе произойдет неселективное отключение неповрежденной линии W1. Поэтому ток возврата защиты  $I_{в.3}$  должен быть больше тока нагрузки линии, проходящего через защиту МТЗ1 после отключения КЗ:

$$I_{в.3} > I_{раб. max}$$

Так как  $k_в = I_{в.3} / I_{с.3}$ , то ток срабатывания защиты по второму условию:

$$I_{с.3} > I_{раб. max} / k_в$$

3. В первый момент времени после отключения КЗ ток, проходящий через защиту МТЗ1 (рис.4) имеет повышенное значение из-за пусковых токов электродвигателей. Асинхронные электродвигатели, составляющие значительную часть нагрузки, вовремя КЗ тормозятся вследствие возникающего при этом понижения напряжения. После отключения КЗ

напряжение восстанавливается и все оставшиеся в работе двигатели самозапускаются, потребляя повышенный пусковой ток. Этот ток постепенно затухает и в линии устанавливается рабочий ток, который не превышает  $I_{раб. max}$ .

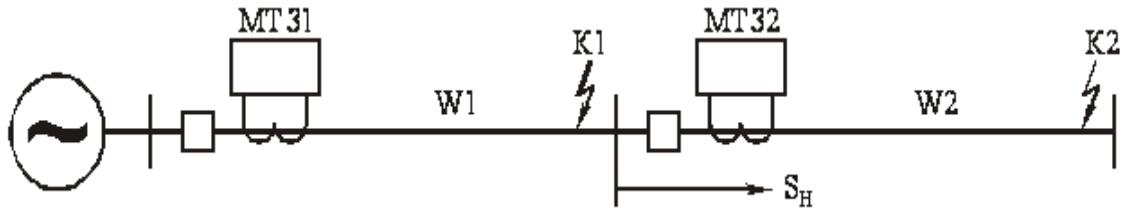


Рисунок 4 – Схема защиты линии

Увеличение  $I_{раб. max}$ , вызванное самозапуском двигателей, оценивается коэффициентом запуска  $k_3$ :

$$I_{c.3} > k_3 \cdot I_{раб. max}$$

С учетом всех трех условий ток срабатывания максимальных токовых защит определяется по формуле:

$$I_{c.3} = k_{omc} \cdot k_3 \cdot I_{раб. max} / k_e,$$

где  $k_{omc}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности расчета и работы реле, принимаемый равным  $k_{omc} = 1,1-1,2$ .

Вторичный ток срабатывания реле  $I_{c.p}$  находится с учетом коэффициента трансформации трансформаторов тока  $k_I$  и коэффициента схемы включения реле  $k_{cx}$ :

$$I_{c.p} = k_{cx} \cdot I_{c.3} / k_I$$

Чувствительность защиты проверяется по минимальному значению тока  $I_{kz.min}$  при повреждении в конце зоны защиты (точка K1). Коэффициент чувствительности для МТ31 должен быть не менее 1,5:

$$k_{u1} = \frac{I_{kz.min(\kappa1)}}{I_{c.3}} > 1,5$$

При КЗ на резервируемом участке (линия W2) допускается коэффициент чувствительности больший или равный 1,2:

$$k_{u2} = \frac{I_{kz.min(\kappa2)}}{I_{c.3}} > 1,2$$

где  $I_{k3,min(\kappa2)}$  – минимальный ток КЗ в конце резервируемого участка (линия W2).

Выдержки времени максимальной токовой защиты с независимой характеристикой времени срабатывания выбираются по ступенчатому принципу, который состоит в том, что каждая последующая защита в направлении от потребителей к источнику питания имеет выдержку времени больше предыдущей. Выбор выдержек времени должен начинаться с самых удаленных от источника питания потребителей (рис.20).

Для того чтобы при повреждении на нагрузке ( $S_h$ ) не отключилась линия W3, ее защита должна иметь выдержку времени  $t_{c.33}$  большую, чем  $t_{c.34}$  на величину  $\Delta t$  называемую ступенью селективности:

$$t_{c.33} = t_{c.34} + \Delta t.$$

Ступень селективности  $\Delta t$  должна быть такой, чтобы успели сработать защита и отключиться выключатель на поврежденном участке, прежде чем истечет выдержка времени защиты на следующем неповрежденном участке:

$$\Delta t = t_{вык} + \Delta t_{km1} + \Delta t_{km2} + t_{зап},$$

где  $t_{вык}$  – время отключения выключателя;  $\Delta t_{km1}$  и  $\Delta t_{km2}$  – погрешности реле времени защит поврежденного участка и следующего к источнику питания соответственно;  $t_{зап}$  – время запаса.

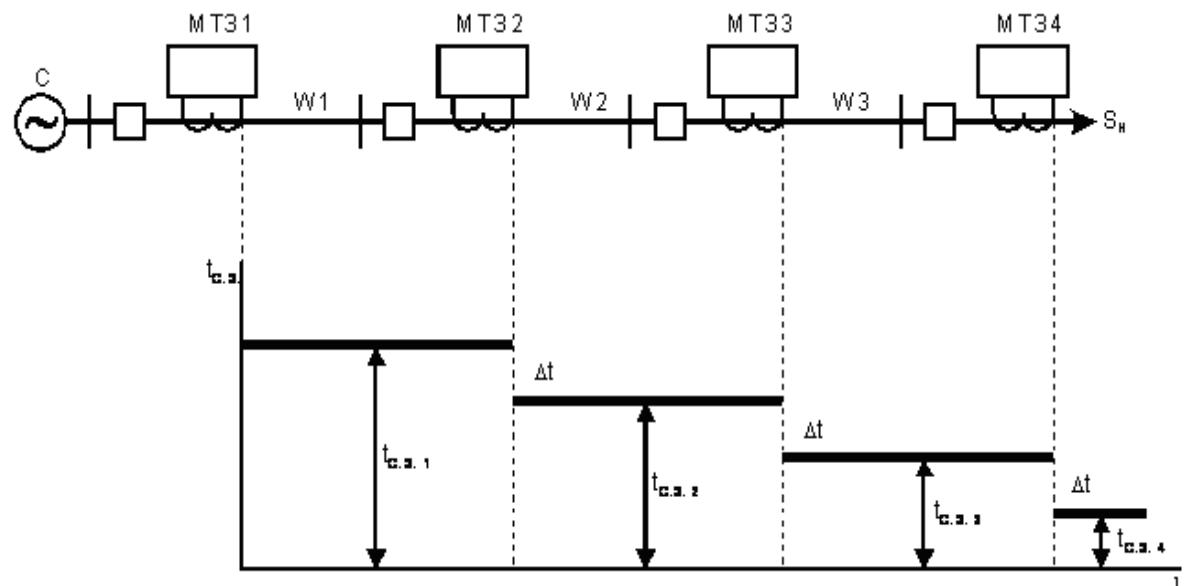


Рисунок 5 – Выбор времени срабатывания максимальных токовых защит с независимой характеристикой времени срабатывания

Ступень селективности должна вычисляться с учетом типов установленных выключателей и типов реле времени и обычно составляет:

$$\Delta t = 0,4-0,6 \text{ с.}$$

При выборе выдержки времени максимальной токовой защиты с зависимой характеристикой времени срабатывания действует тот же принцип, что и у максимальных токовых защит с независимой характеристикой – наиболее удаленная от источника питания защита должна иметь меньшую выдержку времени срабатывания. С учетом того, что время срабатывания максимальной токовой защиты с зависимой характеристикой времени срабатывания определяется величиной тока протекающего через защиту, согласование следует производить при строго определенных значениях токов КЗ. В качестве расчетной точки принимается начало следующего элемента.

Выдержки времени защит с зависимой характеристикой определяются по условию селективности:

$$t_{c.33} = t_{c.34} + \Delta t.$$

Но поскольку время действия этих реле зависит от тока, необходимо задавать пределы тока, при которых это условие должно выполняться.

Пусть линии W1 и W2 оборудованы максимальными токовыми защитами с зависимой характеристикой и требуется выбрать характеристику защиты линии W1 (MT31) (рис.21) и согласовать ее с характеристикой защиты линии W2 (MT32), которая известна.

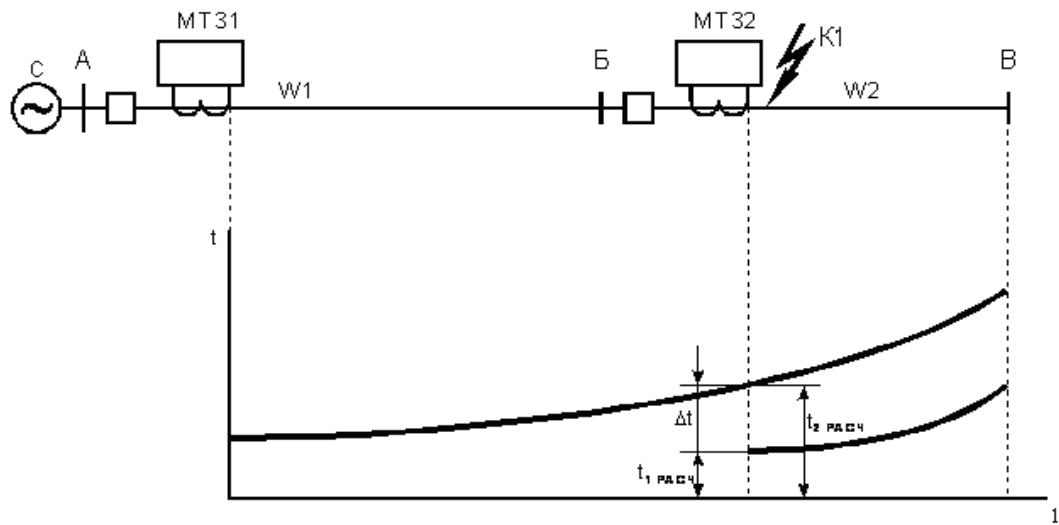


Рисунок 6 – Согласование максимальных токовых защит с зависимой характеристикой

Защита линии W1 должна иметь время срабатывания на ступень селективности больше защиты линии W2 при всех КЗ в пределах совместного действия МТ31 и МТ32, то есть на линии W2. Если при КЗ в точке К1 (начало линии W2) ток, проходящий через защиту равен  $I_{k3(k1)max}$ , то при всех КЗ за точкой К1, то есть в зоне работы защиты МТ32 токи будут меньше. Следовательно, если выполнить условие селективности в точке К1, то защита МТ31 будет действовать селективно и при КЗ в других точках W2.

Порядок выбора зависимых характеристик:

1. Строится исходная характеристика защиты МТ32  $t=f(I)$  (рис.22);
2. Определяется максимальное значение тока КЗ  $I_{k3(k1)max}$  при повреждении в начале линии W2 (точка К1 рис. 7);

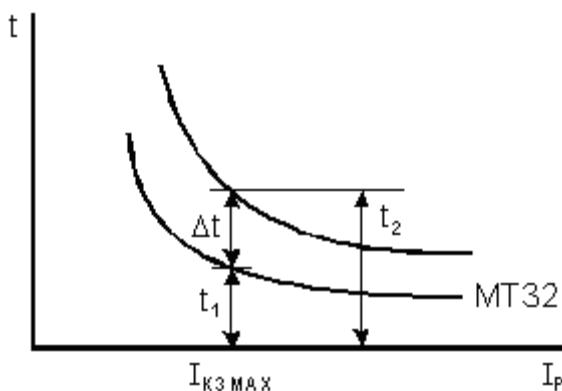


Рисунок 7 – График селективности срабатывания МТ3

3. Пользуясь заданной характеристикой защиты МТ32, находят ее выдержку  $t_1$  при токе  $I_{k3(k1)max}$ ;

4. По условию селективности выбирается время срабатывания защиты МТ31 при КЗ в точке К1:

$$t_2 \geq t_1 + \Delta t$$

5. По точке с координатами  $(I_{k3(k1)max}, t_2)$  строят характеристику защиты МТ31.

Достоинствами максимальных токовых защит являются: простота, надежность, небольшая стоимость.

Недостатки максимальных токовых защит:

- - большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания, в то время как именно вблизи шин станций по условию устойчивости необходимо быстрое отключение КЗ;

- недостаточная чувствительность при КЗ в разветвленных сетях с большим числом параллельных цепей и значительными токами нагрузки;
- селективность соблюдается, как правило, только в радиальных сетях с односторонним питанием.

Максимальные токовые защиты получили наиболее широкое распространение в радиальных сетях всех напряжений. В сетях 10 кВ и ниже они являются основными защитами.

Отсечка является разновидностью токовой защиты, позволяющей обеспечить быстрое отключение КЗ. Токовые отсечки подразделяются на отсечки мгновенного действия и отсечки с выдержкой времени (порядка 0,3-0,6 с).

Селективность действия мгновенных токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы так, чтобы они не действовали при КЗ на смежных участках сети, защита которых имеет равную или большую выдержку времени. Для этого ток срабатывания отсечки должен быть больше максимального тока КЗ, проходящего через защиту при повреждении в конце выбранной зоны действия.

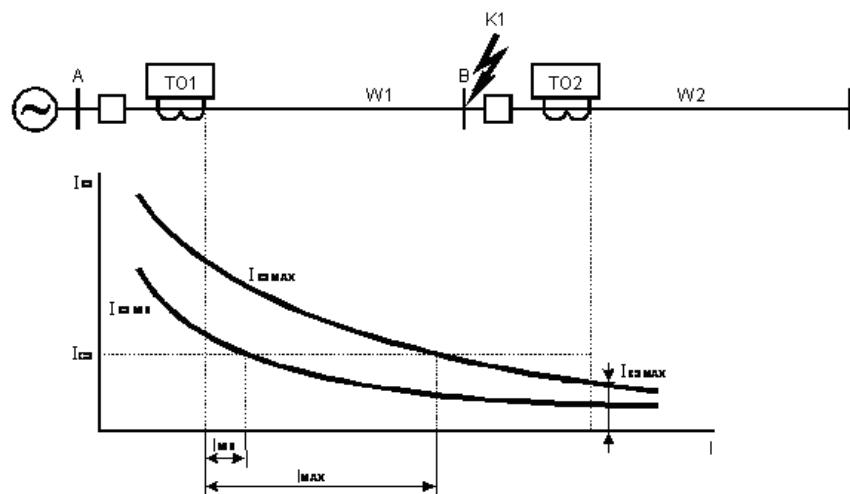


Рисунок 8 – Определение защищаемой зоны токовой отсечки

Выбор тока срабатывания токовой отсечки ТО1 производится из условия несрабатывания при КЗ в точке К1:

$$I_{c.3} = k_{omc} \cdot I_{kz(k1) \max}^{(3)},$$

где  $k_{omc} = 1,2-1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность в расчете тока КЗ и погрешность в токе срабатывания реле;  $I_{kz(k1) \max}^{(3)}$  – максимальное значение тока КЗ в точке К1.

Зона действия токовой отсечки определяется графически. Обычно строятся кривые тока КЗ  $I_{kz} = f(\ell)$  (рис. 8) для минимального и максимального режимов.

Зона действия отсечки зависит от крутизны кривой спада тока по длине линии. Чем больше различаются токи КЗ в начале и конце линии, тем больше получается зона, охватываемая отсечкой.

Согласно ПУЭ рекомендуется применять токовую отсечку, если ее зона действия ( $\ell_{\min}$ ) охватывает не меньше 20% защищаемой линии.

При схеме работы линии блоком с трансформатором (рис.9) отсечку отстраивают от тока КЗ за трансформатором в точке К1. В этом случае отсечка защищает всю линию и оказывается весьма эффективной.

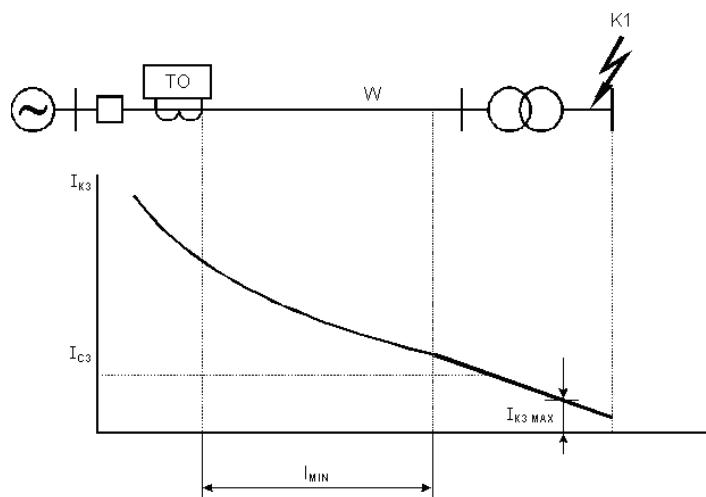


Рисунок 9 – Применение токовой отсечки для защиты блока линия-трансформатор

Токовые отсечки могут использоваться на линиях с двухсторонним питанием. В этом случае отсечки устанавливаются с обеих сторон защищаемой линии (защиты  $TO1$  и  $TO2$  рис. 25). Кривые 1 и 2 показывают изменение максимальных токов КЗ от источников А и Б соответственно при перемещении точки КЗ вдоль защищаемой линии. Токи срабатывания отсечек должны быть выбраны таким образом, чтобы при внешних КЗ (точки К1 и К2) защиты не действовали.

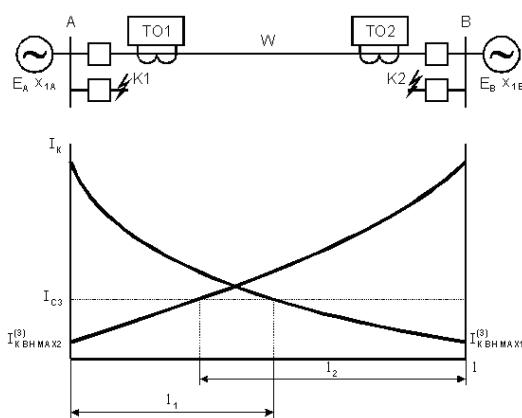


Рисунок 10 – Применение токовой отсечки в сети с двусторонним питанием

Время действия токовой отсечки  $t_{c.3} = 0,04 \square 0,06$  с.

Отстройка от большего из двух значений токов  $I_{k3(k1)\max}^{(3)}$  и  $I_{k3(k2)\max}^{(3)}$  является первым условием выбора параметров срабатывания защиты:

$$I_{c.31} = I_{c.32} = k_{omc} \cdot I_{k3.vn.\max}^{(3)},$$

где  $k_{omc} = 1,2 \square 1,3$ ;  $I_{k3.vn.\max}^{(3)}$  - больший из двух токов  $I_{k3(k1)\max}^{(3)}$  и  $I_{k3(k2)\max}^{(3)}$ .

В эксплуатации возможны случаи качаний генераторов источника А относительно генераторов источника Б и выхода их из синхронизма. При этом по линии W могут протекать большие уравнительные токи. Отсечки в этом случае не должны действовать:

$$I_{c31} = I_{c32} = k_{omc1} \cdot I_{yp.\max},$$

где  $I_{yp.\max}$  – максимальный уравнительный ток, при смещении векторов эквивалентных ЭДС  $E_A$  и  $E_B$  на угол  $\square$ .

Принимая  $E_A = E_B = E$ , ток  $I_{yp.\max}$  можно определить по выражению:

$$I_{yp.\max} = 2 \cdot E \cdot (x_{1A} + x_{y\partial} \cdot \ell + x_{1B}),$$

где  $x_{1A}$  и  $x_{1B}$  – сопротивления прямых последовательностей систем А и Б;  $x_{y\partial}$  – удельное сопротивление линии W.

Ток срабатывания выбирается большим из значений, полученных по двум условиям.

Для защиты всей линии с минимальным временем действия, применяется токовая отсечка с выдержкой времени.

Зона действия токовой отсечки с выдержкой времени ТОВ1 согласуется с зоной и временем мгновенной отсечки ТО2 (рис.26) исходя из требования обеспечения селективности. Для выполнения этого времени действия отсечки ТОВ1 ( $t_{TOB1}$ ) выбирается на ступень  $\Delta t$  больше времени срабатывания отсечки ТО2 ( $t_{TO2}$ ):

$$t_{TOB1} = t_{TO2} + \Delta t.$$

Ступень селективности  $\Delta t = 0,3 \square 0,6$  с, поэтому выдержка времени отсечки ТОВ1 не превышает 0,6 с.

Тока срабатывания токовой отсечки с выдержкой времени выбирается по условию:

$$I_{c.3.TOB1} = k_{omc2} \cdot I_{c.3.TO2},$$

где  $k_{omc2} = 1,05 \square 1,1$ ;  $I_{c.z.TO2}$  – ток срабатывания токовой отсечки TO2 (рис. 26).

При таком выборе тока срабатывания защиты TOB1 в зону ее действия входит участок линии W1 – ( $\ell_{TOB1} - \ell_{TO1}$ ). Кроме того, она обеспечивает дальнее резервирование в случае отказа отсечки TO2 при КЗ в начале линии W2 и ближнее резервирование в случае отказа защиты TO1 на участке  $\ell_{TO1}$ .

Защищаемая зона токовой отсечки с выдержкой времени определяется графически (рис.11).

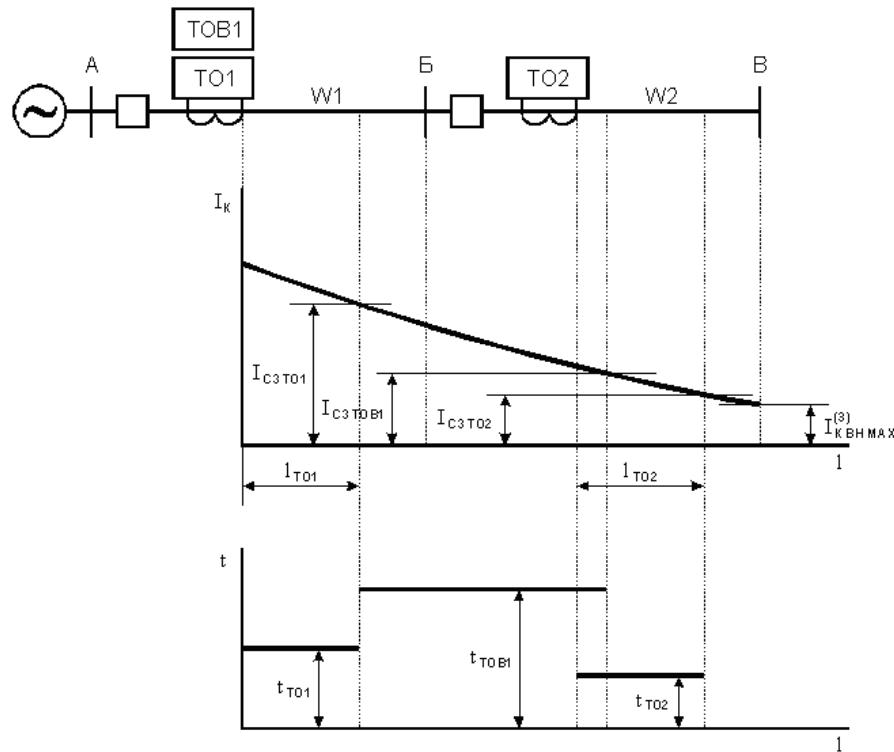


Рисунок 11 – К определению тока срабатывания токовой отсечки с выдержкой времени

Минимальная длина зоны  $\ell_{TOB}$  должна быть не менее 40% длины линии.

Достоинствами токовых отсечек являются: простота, экономичность и быстродействие.

Недостатками токовых отсечек являются: неполный охват зоной действия защищаемой линии и непостоянство зоны действия под влиянием сопротивления в месте повреждения.

Токовые отсечки без выдержки и с выдержкой времени и максимальная токовая защита образуют первую, вторую и третью ступени трехступенчатой токовой защиты. Вместе с тем каждая из них может использоваться и как отдельная защита.

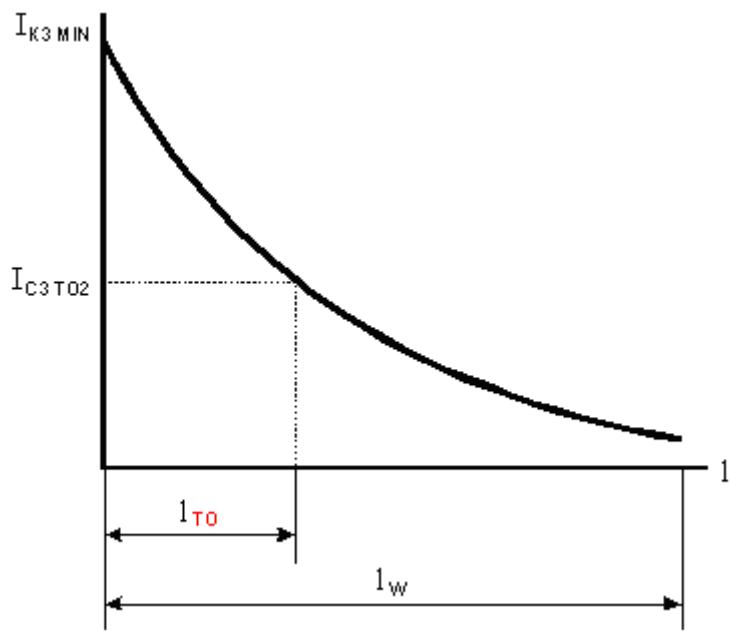


Рисунок 12 – Определение защищаемой зоны токовой отсечки с выдержкой времени

**Задания:**

**Задание №1**

Для выбора тока срабатывания реле  $I_{c.p}$  токовых защит и проверки их чувствительности необходимо знать коэффициент схемы, под которым понимают отношение тока в реле  $I_p$  ко вторичному фазному току  $I_{2\phi}$  трансформатора тока, т.е.  $k_{cx}^{(m)} = I_p / I_{2\phi}$ . Можно коэффициент схемы выразить и через первичный ток  $I_{1\phi}$  и коэффициент трансформации  $K_1$  трансформатора тока  $k_{cx}^{(m)} = K_1 I_p / I_{1\phi}$ .

Он зависит от режима работы защищаемого элемента и от схемы соединения трансформаторов тока в реле. Необходимо определить  $k_{cx}^{(m)}$  защиты А для нормального режима и различных КЗ в точках  $K_1^{(m)}$  и  $K_2^{(m)}$  (рис.13.).

В защите использовать:

- трехфазную схему соединения в полную звезду;
- двухфазную двухрелейную и трехрелейную схему соединения в неполную звезду;
- трехфазную схему соединения ТА в полный треугольник, а реле в полную звезду;
- двухфазную однорелейную схему соединения ТА в неполный треугольник (на разность токов).

В схеме блока (рис.1.12) трансформатор Т может иметь следующие схемы и группы соединения обмоток У/Д-11; Д/Ун-11; У/У-0.

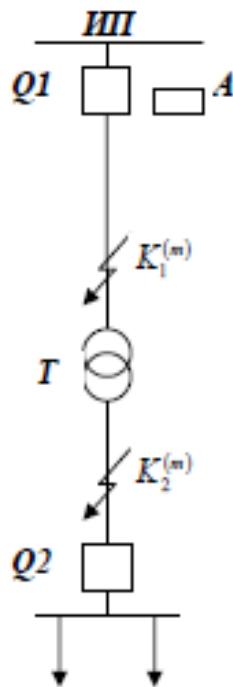


Рисунок 13 – Схема блока линия – трансформатор

### Задание №2

Полная погрешность трансформаторов тока  $\varepsilon$  в схемах релейной защиты не должна превышать 10 %. Это обеспечивается, если расчетная нагрузка трансформатора  $Z_{h,psc}$  не превышает допустимой  $Z_{h,don}$ , которая определяется из характеристики предельной кратности тока трансформатора  $k_{10} = f(Z_{h,don})$  при 10-процентной погрешности.

Для выбора трансформатора тока требуется также знание его расчетной нагрузки  $Z_{h,psc}$ . Она складывается из сопротивления токовой обмотки реле  $Z_p$ , сопротивления проводов  $R_{np}$  и переходного сопротивления контактов.  $R_{конт}=0,1$  Ом. В зависимости от вида и места КЗ в общем случае  $Z_{h,psc}$  будет различным. Оно зависит от схемы соединения трансформаторов тока и обмоток реле. Необходимо получить расчетные формулы максимального  $Z_{h,psc}$  для следующих схем:

- трехфазная схема соединения в полную звезду;
- двухфазная двухрелейная схема соединения в неполную звезду;
- двухфазная трехрелейная схема соединения в неполную звезду;
- трехфазная схема соединения ТА в полный треугольник, а реле в полную звезду;
- двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз).

### Задание №3

На линиях электрической сети 35 кВ (рис.14) установлены максимальные токовые защиты с независимой характеристикой выдержки времени. Время срабатывания защит в секундах.  $t_1 \dots t_{12}$  отходящих линий I...XII указано в табл. 1. Необходимо выбрать выдержки времени  $t_1 \dots t_5$  защит A1...A5. Принять ступень селективности  $\Delta t=0,5$  с

	$t_I$	$t_{II}$	$t_{III}$	$t_{IV}$	$t_V$	$t_{VI}$	$t_{VII}$	$t_{VIII}$	$t_{IX}$	$t_{X}$	$t_{XI}$	$t_{XII}$
а	1	1	0,5	2,5	0,	1	0	0	1	1,5	0,5	1
б	1,5	2	2	1,5	1	2,5	1	1,5	1	1,5	1	1,5
в	4	1	3	1,5	2	1	1	1,5	1,5	2	1	1

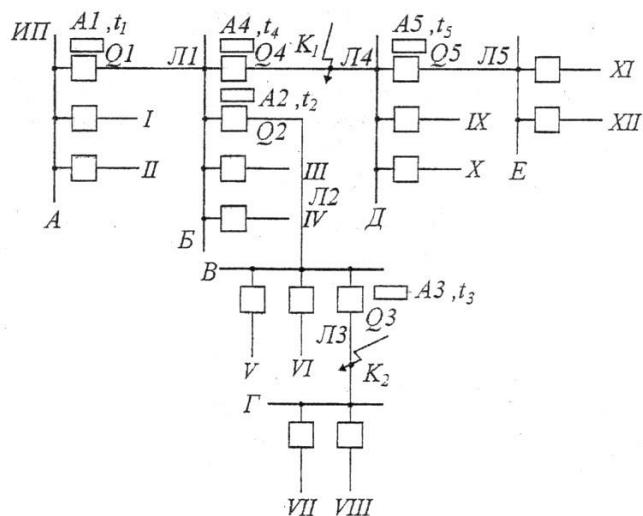


Рисунок 14 – Электрическая сеть напряжением 35 кВ

### Задание №4

В системе электроснабжения (см. рис.14) максимальная токовая защита A1 выполнена по схеме неполной звезды с независимой характеристикой выдержки времени на постоянном оперативном токе (рис. 15).

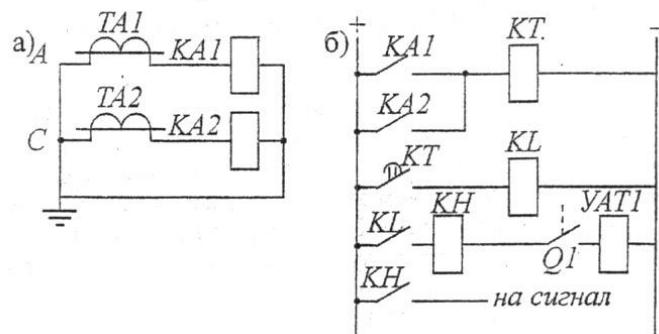


Рисунок 15 – Цепи максимальной токовой защиты

### Задание №5

Объяснить действие этой защиты при коротком замыкании:

1. Фаз АС на защищаемой линии.

2. Фаз АВ в точке  $K_1$ .

При этом необходимо указать:

а) пути циркуляции тока в цепях тока и в оперативных цепях защиты;

б) последовательность срабатывания и возврата отдельных реле и аппаратов от момента возникновения повреждения до момента его ликвидации;

в) к чему может привести отказ вспомогательного контакта выключателя  $Q_1$  (при отключении выключателя контакт не разомкнулся).

В соответствии со стандартом схема релейной защиты изображена при невозбужденных реле и отключенном выключателе.

### Задание №6

На линиях  $L_1, L_2, L_3$  установлены максимальные токовые защиты  $A_1, A_2, A_3$  соответственно (рис.). Защиты выполнены по схеме неполной звезды. Токи срабатывания защит и значения токов двухфазного КЗ в точках  $K_1, K_2, K_3$  даны в таблице.

Токи срабатывания защит, А			Токи двухфазного КЗ при повреждениях в точках, А		
$A_1$	$A_2$	$A_3$	$K_1$	$K_2$	$K_3$
800	500	300	1500	1000	600

Необходимо определить коэффициенты чувствительности защит

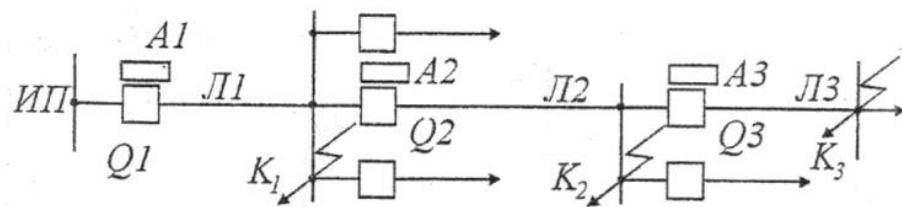


Рисунок 16 – Схема электрической сети,

### Задание №7

Для защиты линии в сети напряжением 10 кВ предусмотрены максимальная токовая защита и токовая отсечка без выдержки времени. В защите использованы реле РТ-40 и постоянный оперативный ток. Максимальный рабочий ток в линии  $I_{рабmax}=80$  А. Ток срабатывания максимальной токовой защиты  $I_{c,3}^{III}=191$  А, ток срабатывания токовой отсечки  $I_{c,3}^I=$

545 А. Реле и трансформаторы тока соединены по схеме неполной звезды. Расстояние между трансформаторами тока и щитом релейной защиты равно  $l=200$  м. Для присоединения реле к трансформаторам тока могут быть использованы либо медные, либо алюминиевые провода. Необходимо выбрать трансформаторы тока и сечение этих проводов так, чтобы полная погрешность трансформаторов тока  $\epsilon$  не превышала 10%.

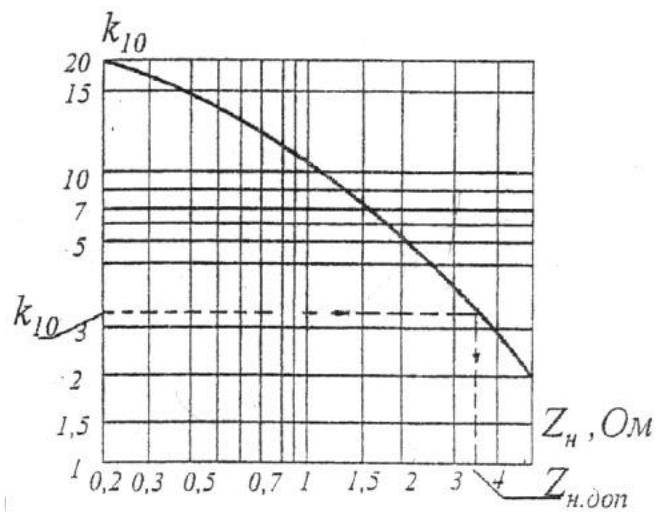


Рисунок 17– Кривая предельной кратности трансформатора тока ТЛМ для  $K_1 = 50/5 \dots 300/5$ , класса Р

## **Практическая работа №4. Дифференциальная токовая защита. Дифференциальная защита генераторов/двигателей**

**Цель:** Рассмотреть основные типы защит синхронных генераторов и асинхронных электродвигателей.

### **Основы теории:**

Продольная дифференциальная защита – для защиты от междуфазных повреждений внутри генератора.

Поперечная дифференциальная защита – для защиты от межвитковых КЗ при наличии выведенных параллельных ветвей обмоток и их соединении в звезду.

Задача нулевой последовательности – для защиты от однофазных замыканий на землю.

Токовая отсечка и максимальная токовая защита – для защиты от внешних КЗ (и от внутренних у генераторов малой мощности).

Токовая защита с четырехплечным мостом – для защиты от замыканий в двух точках обмотки возбуждения.

Задача от максимального напряжения – применяется на гидрогенераторах.

Задача от перегрузки – применяется на генераторах всех мощностей.

Токовая защита обратной последовательности.

Для защиты генератора от междуфазных повреждений применяется продольная дифференциальная защита. Принцип ее действия основан на сравнении токов с обеих сторон защищаемого объекта. Для этого защита подключается к трансформаторам тока, установленным со стороны главных и нулевых выводов генератора. Вторичные обмотки трансформаторов тока одноименных фаз и реле соединяют между собой таким образом, чтобы при КЗ вне защищаемой зоны, ограниченной измерительными трансформаторами, ток в реле отсутствовал или был близок к нулю, а при повреждении внутри генератора был больше уставки срабатывания реле.

В нормальном режиме работы и при внешнем КЗ ток, протекающий по обмоткам реле  $I_P$ , равен току небаланса  $I_{нб}$

$$I_P = I_1 - I_2 = I_{нб} \approx 0,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – токи в плечах защиты.

При КЗ в зоне действия защиты

$$I_p = I_1 + I_2$$

Продольная дифференциальная защита действует на отключение всех выключателей генератора, гашение поля и останов турбины.

Поскольку генераторы работают в сетях с незаземленной или резонансно-заземленной нейтралью, то при мощности генератора Рј30 МВт дифференциальная защита выполняется по двухфазной схеме. Недостатком этой схемы является то, что она не реагирует на двойные замыкания (когда одно произошло в сети, а другое в генераторе, на фазе где нет трансформатора тока). Поэтому необходима дополнительная установка защиты от двойных замыканий на землю.

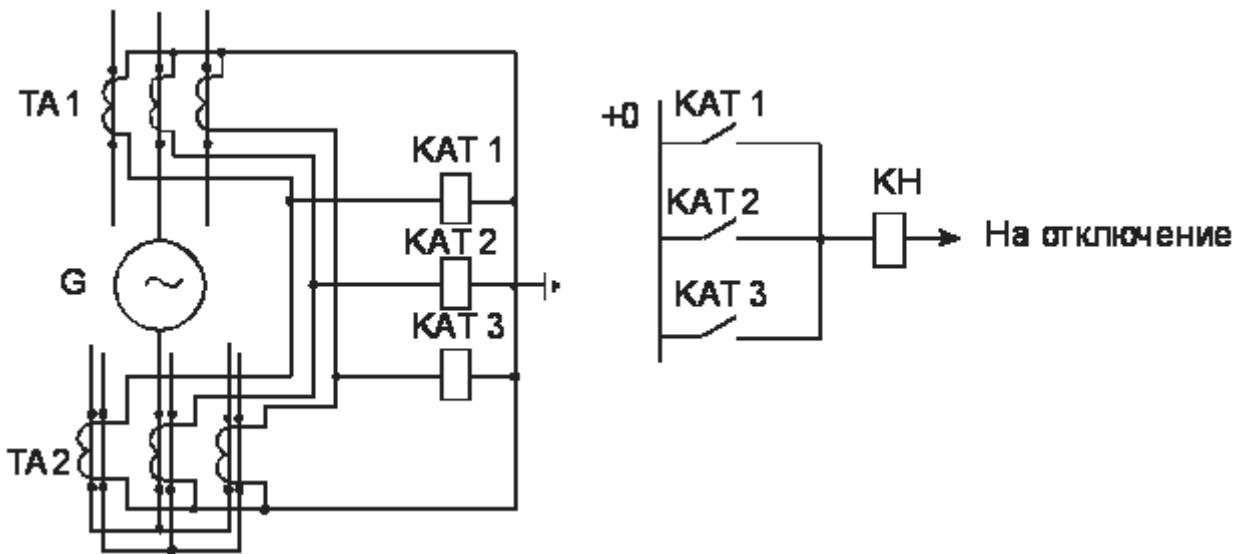


Рисунок 18 – Схема продольной дифференциальной защиты генератора

На мощных генераторах защиту выполняют в трехфазном варианте, чтобы обеспечить срабатывание и при двойных замыканиях на землю, когда одно из мест пробоя находится вне защищаемой зоны.

Токи небаланса в дифференциальной защите генераторов могут достигать значительной величины. Причины их появления – не идентичность кривых намагничивания, неодинаковая вторичная нагрузка и погрешность трансформаторов тока.

Для исключения ложного срабатывания защиты в режиме внешнего КЗ от токов небаланса применяются два способа:

1. Уменьшают величину и длительность броска тока небаланса неустановившегося режима с помощью сопротивления, включенного последовательно с обмоткой токовых реле. Способ используется на генераторах малой мощности.

2. Для защиты мощных генераторов (более 25 МВт) применяются реле типа РНТ-565 и ДЗТ-11/5, не реагирующие на броски тока небаланса.

Ток срабатывания для дифференциальной защиты генератора выбирается из условия отстройки от токов небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{cz} = k_h \cdot I_{\text{нб расч}},$$

где  $k_h$  - коэффициент надежности,  $k_h = 1,3$ ;

$$I_{\text{нб расч}} = k_{an} \cdot k_{одн} \cdot \varepsilon \cdot I_{K3\text{max}}$$

где  $k_{an}$  - учитывает наличие апериодической составляющей в токе КЗ, для реле типа РНТ и ДЗТ  $k_{an} = 1$ ;  $k_{одн}$  - коэффициент однотипности трансформаторов тока, при однотипных трансформаторах тока принимается  $k_{одн} = 0,5$ ;  $\varepsilon$  – величина допустимой погрешности трансформаторов тока;  $I_{K3\text{max}}$  – ток трехфазного КЗ на выводах генератора.

Если ток максимальный ток асинхронного хода  $I_{yp\text{max}}$  больше тока трехфазного КЗ на выводах генератора, то при расчете тока небаланса необходимо подставлять его величину.

Чувствительность защиты проверяется при двухфазном КЗ на выводах генератора:

$$k_u = \frac{I_{K3\text{min}}}{I_{cz}} \geq 2$$

Устанавливается на генераторах, имеющих несколько параллельных ветвей, выведенных наружу и соединенных в звезду. Используется для защиты от межвитковых КЗ одной фазы обмотки статора. Действует без выдержки времени на отключение всех выключателей генератора, гашение поля и останов турбины.

Возможно трехсистемное и односистемное исполнение защиты. В односистемной схеме (рис.73) производится сравнение суммы токов трех фаз одной группы ветвей с суммой токов трех фаз другой параллельной группы ветвей. Реле тока KAZ (применяется реле серии РТ-40/Ф с фильтром высших гармоник ZF) подключается к трансформатору тока ТА, установленному в нулевом проводе, соединяющем нейтрали. В трехсистемной схеме производится сравнение токов параллельных ветвей каждой фазы.

В настоящее время используются только односистемные схемы, так как они отличаются простотой, экономичностью, надежностью и большей чувствительностью.

В нормальном режиме в параллельных ветвях каждой фазы наводятся одинаковые ЭДС. Сопротивления параллельных ветвей равны. Поэтому равны и токи параллельных

ветвей  $I_1^c$  и  $I_2^c$ . Сумма токов параллельных ветвей трех фаз (ток в реле  $I_p$ ) равна току небаланса  $I_{нб}$ :

$$I_p = I_{1\Sigma} + I_{2\Sigma} = I_{\hbar\sigma},$$

где  $I_{1\Sigma}$  и  $I_{2\Sigma}$  - суммы токов в первых и вторых параллельных ветвей.

Ток небаланса определяется наличием токов высших гармоник, кратных трем, и токов нулевой последовательности, вызванных несимметрией ЭДС фаз. Для отстройки от токов небаланса высших гармоник реле включают через фильтр ZF, что дает возможность уменьшить ток срабатывания защиты примерно в 10 раз.

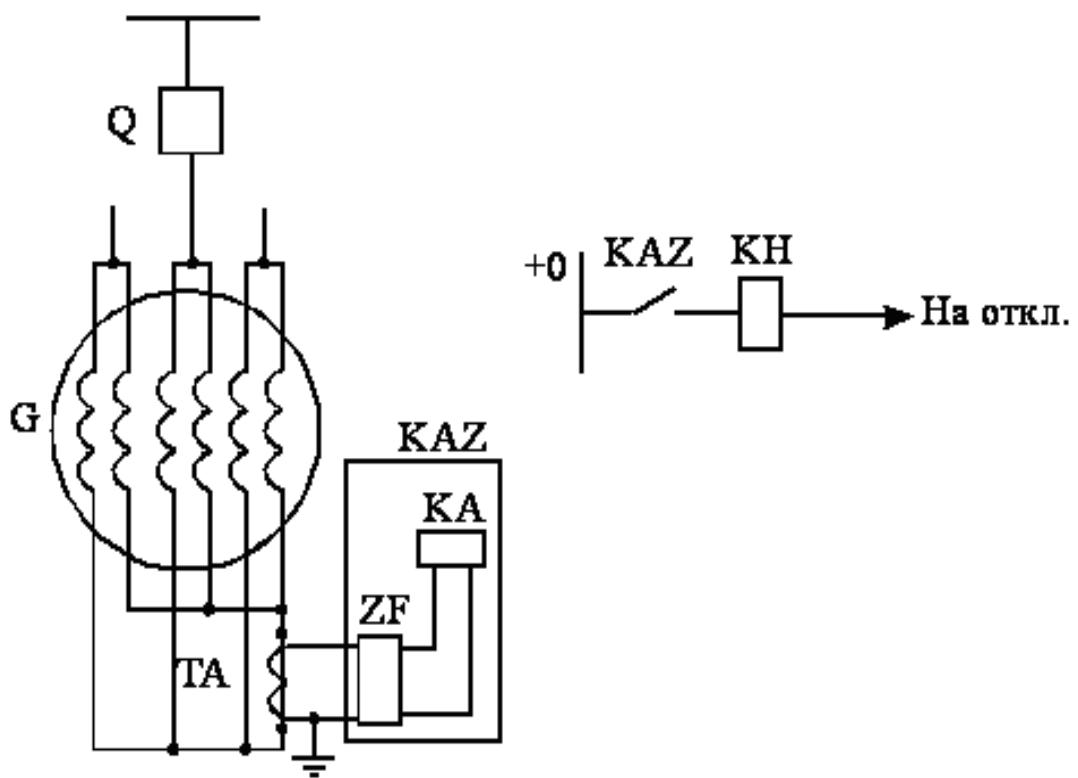


Рисунок 19 – Схема исполнения односистемной поперечной дифференциальной защиты

В случае замыкания между витками одной фазы сопротивления параллельных ветвей становятся различными и равенство токов нарушается. В перемычке между нейтралями параллельных обмоток статора протекает ток, вызывающий срабатывание защиты.

По своему принципу работы защита не требует выдержки времени. Ток срабатывания выбирается из условия отстройки от тока небаланса:

$$I_{c3} = k_h \cdot I_{h6\max}$$

На практике ток срабатывания выбирается:

$$I_{cz} = (0,2 \div 0,3) I_{nom.2}$$

где  $I_{nom.2}$  - номинальный ток генератора.

При наладке ток срабатывания уточняется по результатам измерений, и величина его может быть существенно снижена.

Поперечной дифференциальной защиты отличается простотой, экономичностью, быстрой действия и высокой чувствительностью.

Недостатками поперечной дифференциальной защиты являются: возможность ложного срабатывания и наличие мертвых зон, при малом количестве замкнувшихся витков, когда ток протекающий в перемычке между нейтралями невелик.

Поперечная дифференциальная защита в некоторых случаях может сработать и при многофазном КЗ, резервируя продольную дифференциальную защиту.

1) Замыкания на землю. Защита от замыкания на землю устанавливается на них при токе замыкания более 10 А ( $P < 2000$  Вт), при мощности более 2000 Вт и при токе замыкания на землю более 5 А. Защита действует на отключение.

2) Междуфазные КЗ. В качестве защиты используют токовую отсечку или продольную дифференциальную защиту, действующую на отключение.

Защита от витковых замыканий на электродвигателях не устанавливается. Ликвидация повреждения этого вида осуществляется другими защитами электродвигателей, поскольку витковые замыкания в большинстве случаев сопровождаются замыканием на землю или переходят в междуфазные.

Электродвигатели напряжением до 500 В защищаются от КЗ всех видов (в том числе и от однофазных) с помощью плавких предохранителей или быстродействующих автоматических выключателей.

Ненормальные режимы работы:

- 1) перегрузка током больше номинального;
- 2) неполнофазный режим;
- 3) самозапуск .

При мощности до 500 кВт используется токовая отсечка. Наиболее просто выполняется токовая отсечка с помощью реле прямого действия, встроенного в привод выключателя.

Ток срабатывания отсечки выбирается

$$I_{cz} = k_H \cdot k_{cx} \cdot I_{пуск},$$

Токовую отсечку двигателей до 2000 кВт следует выполнять, как правило, по более простой и дешевой однорелейной схеме (рис.84а). Недостатком этой схемы является более низкая чувствительность, по сравнению с отсечкой на двух реле (рис.84б), к двухфазным КЗ (фазы А и С) в  $\sqrt{3}$  раз.

Поэтому на электродвигателях мощностью 2000...5000 кВт токовая отсечка для повышения чувствительности выполняется двухрелейной. Двухрелейную схему токовой отсечки следует применять на электродвигателях мощностью до 2000 кВт, если коэффициент чувствительности однорелейной схемы при двухфазном КЗ на выводах электродвигателя менее 2.

На электродвигателях мощностью 5000 кВт и более устанавливается продольная дифференциальная защита. Эта защита выполняется в двухфазном или трехфазном исполнении с реле типа РНТ-567. Ток срабатывания реле принимается 2·Ином.

При двухфазном исполнении дополнительно устанавливается защита от двойных замыканий.

Ток срабатывания выбирается

$$I_{cz} = k_{omc} \cdot I_{нб.расч},$$

$$I_{нб.расч} = k_{одн} \cdot k_{cx} \cdot \Sigma I_{пуск}.$$

Выполняется с помощью одного токового реле РТЗ-51, которое подключается к трансформатору тока нулевой последовательности (рис.85).

Ток срабатывания

$$I_{cz} \geq k_h \cdot k_{\delta} \cdot I_c,$$

где  $I_c$  – емкостной ток двигателя;  $k_h = 1,2 \dots 1,3$ ;  $k_{\delta}$  – коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока электродвигателя при внешних перемежающихся замыканий на землю. Для защиты, действующей без выдержки времени  $k_{\delta} = 3 \dots 4$ .

Ток срабатывания не должен превышать 10 А для электродвигателей до 2000 кВт, и 5 А для электродвигателей до 5000 кВт и более. Если расчетная величина тока срабатывания получается большей, то необходимо время срабатывания принять  $t = 1 \dots 2$  с и  $k_{\delta} = 1,5 \dots 2$ .

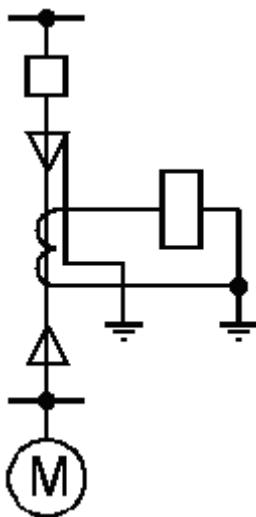


Рисунок 20 – Схема подключения реле защиты

Если питание электродвигателя подается по двум параллельным кабелям, то трансформаторы тока, надетые на каждый кабель, соединяются последовательно и подключаются к одному общему реле. На электродвигателях большой мощности, для питания которых используется больше двух кабелей, защиту от замыканий на землю выполняют одним общим трансформатором тока нулевой последовательности типа ТНП аналогично защите генераторов.

Для защиты от двойных замыканий на землю на электродвигателях, оснащенных продольной дифференциальной защитой в двухфазном исполнении к вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности подключается второе токовое реле, имеющее уставку срабатывания 100-200 А (первичный ток), как и в защите генераторов.

Ток срабатывания при двойных замыканиях на землю

$$I_{cz} = k_{omc} \cdot I_{нб.расч},$$

$$I_{нб.расч} = k_{одн} \cdot k_{an} \cdot \Sigma I_{пуск}.$$

Предусматривается на электродвигателях, подверженным перегрузкам по технологическим причинам (вентиляторы, дымососы, мельницы, дробилки и т. д.), а также на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска длительностью более 20 с. Перегрузка – симметричный режим, поэтому защита от нее может быть выполнена одним реле, включенным в любую фазу электродвигателя. Выдержка времени защиты отстраивается от длительности пуска электродвигателя в нормальном режиме и самозапуска после действия УАВР и УАПВ. Обычно осуществляется индукционными элементами реле РТ-80, электромагнитные элементы которых используются для выполнения токовой отсечки (токовая отсечка осуществляется двухступенчатой защитой).

Действует защита на отключение допускается на электродвигателях с тяжелыми условиями пуска или самозапуска, а также в тех случаях, когда отсутствует возможность своевременной разгрузки без остановки электродвигателей или если нет постоянного дежурного персонала.

Ток срабатывания защиты

$$I_{cz} = \frac{k_h}{k_e} \cdot I_{nom}$$

где  $k_h = 1,1 \dots 1,2$ .

Время срабатывания составляет  $t_{cz} = (10 \dots 15)$  с.

**Задания:**

**Задание №1**

Блок генератор-трансформатор, без генераторного выключателя

Генератор 100 МВА, 6 кВ

- Сверхпереходное реактивное сопротивление КЗ:  $X_d'' = 10\%$ ,
- Активное сопротивление (определение постоянной времени затухания апериодической сост.)  $R_G = 0,13\%$  ( $T_G = 318$  мс)

Силовой трансформатор блока 6/230 кВ, 120 МВА

- Напряжение КЗ:  $u_{x-t} = 15\%$

- Омическое напряжение КЗ:  $u_{R-t} = 0,3\%$  ( $T_T = 159$  мс)

Вторичная нагрузка ТТ (защита + контрольный кабель):  $R_B < 1$  ВА

Определить номинальную предельную кратность ТТ, при которой обеспечивается устойчивость функционирования защиты генератора при возникновении внешних КЗ.

Предполагается, что близкие КЗ в системе ликвидируются в течение 150 мс.

**Задание №2**

Группа асинхронных электродвигателей напряжением 6 кВ питается от системы бесконечной мощности через трансформатор.

Проверить наличие условия самозапуска электродвигателей после отключения токовой отсечкой наиболее мощного электродвигателя и есть ли необходимость в минимальной защите напряжения. Самозапуск обеспечивается при  $U_{ocm} = 0,6 U_{nom}$ . При определении сопротивления электродвигателя в режиме самозапуска принять скольжение  $s = 1$ .

### **Задание №3**

На асинхронном электродвигателе напряжением  $U=6 \text{ кВ}$ , подключенном к шинам системы бесконечной мощности, имеется защита от перегрузки, которая выполнена одним реле, включенным на разность токов двух фаз А и С. При определении тока срабатывания защиты принимались коэффициент отстройки  $k_{omc}^{III} = 1,1$ , коэффициент возврата в  $k=0,8$

Выяснить, будет ли срабатывать эта защита при разрыве фазы электродвигателя, в которую:

- а) включен трансформатор тока;
- б) не включен трансформатор тока.

Скольжение после разрыва продолжает оставаться номинальным. Сопротивления электродвигателя в относительных единицах, отнесенные к его номинальным параметрам:

- прямой последовательности  $X_{*1} = 1,2$ ;
- обратной последовательности  $X_{*2} = 0,2$ .

## **Практическая работа №5. Релейная защита силовых трансформаторов. Дифференциальная защита. Релейная защита трансформаторов.**

**Цель:** Изучить основные типы повреждений и способы предотвращения аварий на силовых трансформаторах.

### **Основы теории:**

Для групп однофазных трансформаторов они вообще исключены. Защита от коротких замыканий выполняется с действием на отключение поврежденного трансформатора. Для ограничения размеров разрушений ее выполняют быстродействующей.

Замыкание одной фазы на землю опасно для обмоток, присоединенных к сетям с глухозаземленными нейтралями. В этом случае защита должна отключать трансформатор и при однофазных коротких замыканиях в его обмотках на землю. В сетях с нейтралями, изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы, защита от однофазных замыканий на землю с действием на отключение устанавливается на трансформаторе в том случае, если такая защита имеется в сети. При витковых замыканиях в замкнувшихся витках возникает значительный ток, разрушающий изоляцию и магнитопровод трансформатора, потому такие повреждения должны отключаться быстродействующей защитой. Но использовать для этого токовые, дифференциальные или дистанционные защиты не представляется возможным. При малом числе замкнувшихся витков ток в поврежденной фазе со стороны питания может оказаться даже меньше значения номинального тока, а напряжение на выводах трансформатора практически не изменится.

Опасным внутренним повреждением является также «пожар стали» магнитопровода, который возникает при нарушении изоляции между листами магнитопровода, что ведет к увеличению потерь на перемагничивание и вихревые токи. Потери вызывают местный нагрев стали, ведущий к дальнейшему разрушению изоляции. Защиты, основанные на использовании электрических величин, на этот вид повреждения тоже не реагируют, поэтому возникает необходимость в применении специальной защиты от витковых замыканий и от «пожара стали». Для маслонаполненных трансформаторов такой защитой является газовая, основанная на использовании явлений газообразования. Образование газа является следствием разложения масла и других изолирующих материалов под действием электрической дуги при витковых замыканиях или недопустимого нагрева при «пожаре стали». Электрическая дуга возникает и при многофазных коротких замыканиях в обмотках. Поэтому газовая защита является универсальной защитой от всех внутренних повреждений трансформатора.

Ненормальные режимы работы трансформаторов обусловлены внешними короткими замыканиями и перегрузками. В этих случаях в обмотках трансформатора появляются большие токи (сверхтоки). Особенно опасны токи, проходящие при внешних коротких замыканиях; эти токи могут значительно превышать номинальный ток трансформатора. В случае длительного прохождения тока (что может быть при коротких замыканиях на шинах или при не отключившемся повреждении на отходящем от шин присоединении) возможны интенсивный нагрев изоляции обмоток и ее повреждение. Вместе с этим при коротком замыкании понижается напряжение в сети. Поэтому на трансформаторе должна предусматриваться защита, отключающая его при появлении сверхтоков, обусловленных не отключившимся внешним коротким замыканием.

Перегрузка трансформаторов не влияет на работу системы электроснабжения в целом, так как она обычно не сопровождается видением напряжения. Кроме того, сверхтоки перегрузки относительно невелики и их прохождение допустимо в течение некоторого времени, достаточного для того, чтобы персонал принял меры к разгрузке. Так, согласно нормам, перегрузку током  $I_{\text{пер}} = 1,6I_{\text{т.ном}}$  можно допускать в течение  $t = 45$  мин. В связи с этим защита трансформатора от перегрузки при наличии дежурного персонала должна выполняться с действием на сигнал. На подстанциях без дежурного персонала защита от перегрузки должна действовать на разгрузку или отключение.

К ненормальным режимам работы трансформаторов относите также недопустимое понижение уровня масла, которое может произойти, например, вследствие повреждения бака.

Служит для отключения трансформатора от источника питания в случае КЗ на выводах или внутри трансформатора, а также на сборных шинах или линиях со стороны потребителя.

В качестве основной максимальная токовая защита применяется лишь на трансформаторах малой мощности, так как по условиям селективности она имеет недопустимо большую выдержку времени. На трансформаторах, имеющих отдельную защиту от повреждений в самом трансформаторе и на его выводах максимальная токовая защита применяется в качестве дополнительной.

На понижающих трансформаторах применяется простая максимальная токовая защита. На повышающих она имеет недостаточную чувствительность к повреждениям на высшей стороне. Чувствительность максимальной токовой защиты повышают применением блокировки по напряжению или включением токового реле через фильтр токов нулевой последовательности.

Защита трансформаторов и автотрансформаторов от сверхтоков является резервной, предназначенной для отключения их от источника питания как при повреждениях самих трансформаторов (автотрансформаторов) и отказе основных защит, так и при повреждении смежного оборудования и отказах его защиты или выключателей. При отсутствии специальной защиты шин защита трансформаторов от сверхтоков осуществляет также защиту этих шин.

В качестве защиты от сверхтоков при междуфазных КЗ используется максимальная токовая защита, максимальная токовая защита с пуском по напряжению, максимальная направленная защита, максимальная токовая защита обратной последовательности. Защита устанавливается со стороны источника питания, а при наличии нескольких источников – со стороны главного источника.

Для защиты от сверхтоков при однофазном КЗ используется максимальная токовая защита и максимальная направленная защита нулевой последовательности. Защита устанавливается со стороны обмоток, соединенных по схеме звезды с заземленной нулевой точкой.

На рис.53 изображена схема максимальной токовой защиты двухобмоточного понижающего трансформатора.

Защита устанавливается только со стороны источника питания. Действует на отключение одного выключателя в случае одностороннего питания, и двух выключателей при двухстороннем питании. Наиболее широкое распространение получила схема включения пусковых органов в неполную звезду.

Ток срабатывания защиты выбирается по двум условиям:

1. Максимальная токовая защита не должна работать при перегрузках трансформатора.
2. Максимальная токовая защита не должна работать при самозапуске.

С учетом этих условий:

$$I_{c.3} = k_{omc} \cdot k_3 \cdot I_{раб.\max} / k_6,$$

где  $k_{omc}$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности расчета и работы реле, принимаемый равным  $k_{omc} = 1,1 \text{--} 1,2$ ;  $k_3$  – коэффициентом запуска;  $I_{раб.\max}$  – максимальный рабочий ток нагрузки.

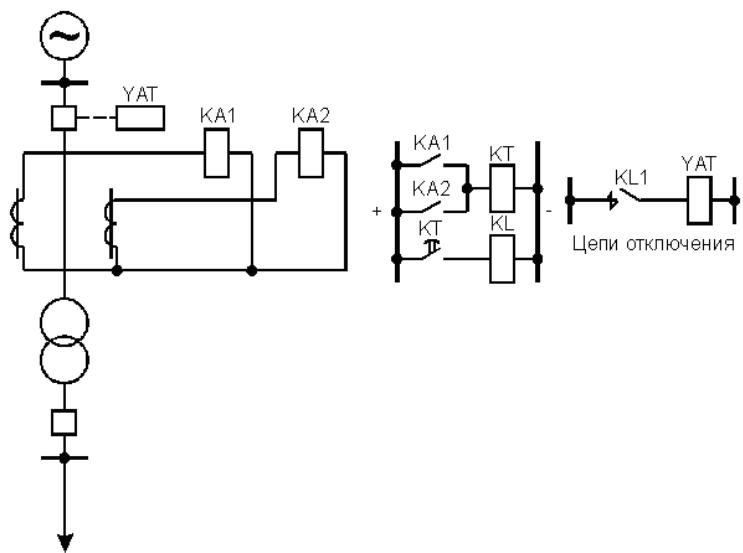


Рисунок 21 – МТЗ двухобмоточного трансформатора

Чувствительность защиты проверяется при КЗ в конце линий, отходящих от шин низшего напряжения:

$$k_u = \frac{I_{K3,min}}{I_{c,3}} > 1,3$$

Выдержка времени максимальной токовой защиты выбирается по условию селективности действия, на  $Dt$  больше выдержки времени присоединений, питающих от шин низшего напряжения.

На рис.21 изображена схема максимальной токовой защиты трехобмоточного трансформатора.

В этом случае максимальная токовая защита должна:

1. При повреждении внутри трансформатора отключить его со всех сторон, откуда возможна подпитка места КЗ;
2. При внешнем КЗ селективно отключить лишь ту сторону, на которой произошло повреждение.

При одностороннем питании устанавливается два комплекта максимальных токовых защит. Один комплект со стороны обмотки низшего напряжения действует на отключение выключателей этой обмотки. Другой комплект со стороны обмотки высшего напряжения действует с двумя выдержками времени, с меньшей – на отключение выключателей обмотки среднего напряжения и с большей на выключение всех выключателей трансформатора (рис.22).

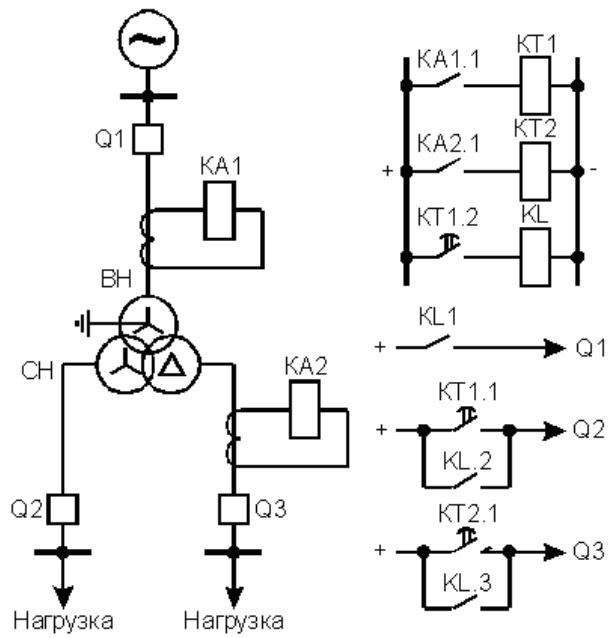


Рисунок 22 – МТЗ трехобмоточного трансформатора

В целях упрощения допускается не устанавливать защиты на одной из питаемых сторон, например среднего напряжения, при этом со стороны питания защиты имеет две выдержки времени: с меньшей из них она действует на отключение той стороны, где защиты отсутствуют, а с большей – на выходное реле.

На трехобмоточных трансформаторах с двух- или трехсторонним питанием для обеспечения селективности действия максимальная токовая защита дополняется органами направления мощности.

На неответственных трансформаторах, имеющих АПВ и АВР допускается, применять ненаправленную максимальную токовую защиту. Неселективное действие защиты в этом случае исправляет действие автоматики.

На повышающих трансформаторах простая максимальная токовая защита не удовлетворяет по чувствительности, поэтому применяется максимальная токовая защита с пуском по напряжению.

Задача устанавливается на ту сторону трансформатора, откуда подается питание. Наличие реле напряжения позволяет выбрать ток срабатывания защиты без учета тока перегрузки

$$I_{c.3} = \frac{k_h}{k_b} \cdot I_{nom}$$

где  $I_{nom}$  – номинальный ток трансформатора.

Блокировка по напряжению может быть выполнена или на базе двух реле минимального напряжения, включенных на междуфазные напряжения

(рис.23 а), или (для трансформаторов мощностью 16 МВЧА и более) на базе одного реле минимального напряжения, включенного на выход фильтра напряжения обратной последовательности (рис.23 б).

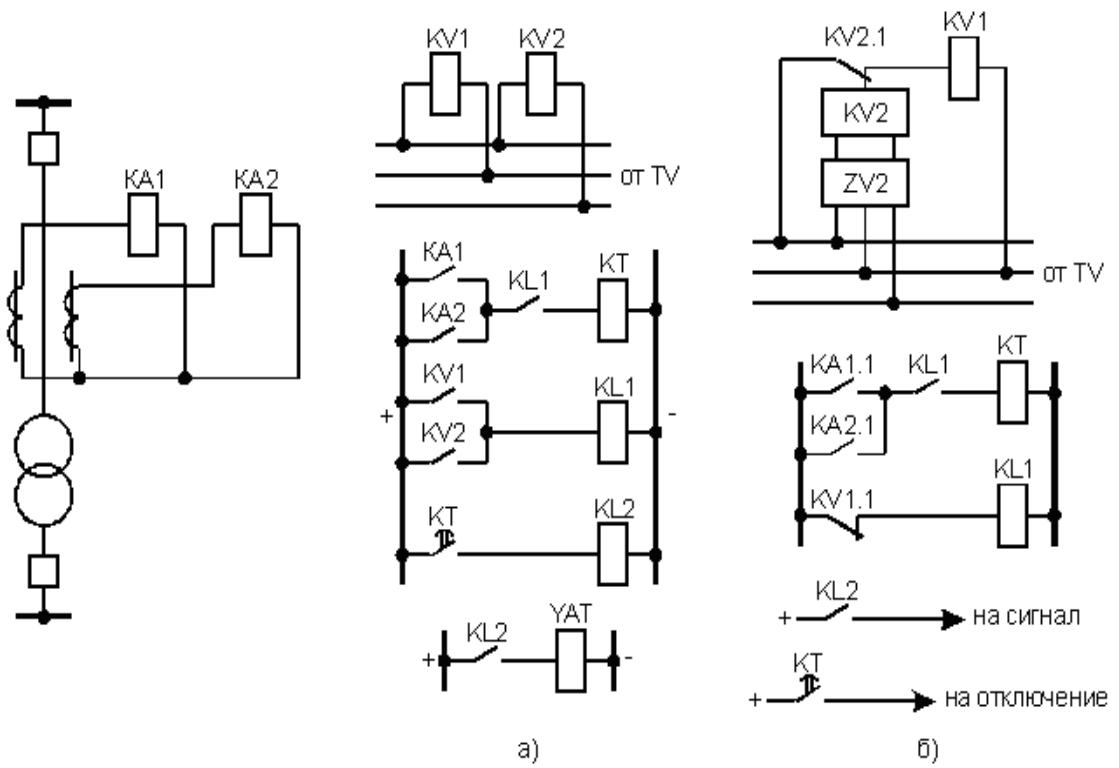


Рисунок 23 – Схемы МТЗ с пуском по напряжению

Напряжение срабатывания принимается равным:

$$U_{c.3} = \frac{U_{pa\delta.\min}}{k_\delta \cdot k_h},$$

где  $k_n$  - коэффициент надежности, равен 1,1 ;  $U_{раб.\min}$  - минимальное рабочее напряжение;  $U_{раб.\min} = (0,9...0,95) \cdot U_{ном}$ .

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения, включенного на выход фильтра напряжения обратной последовательности:

$$U_{2c.3} = 0,06 \cdot U_{nom}.$$

При недостаточной чувствительности максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения применяют максимальную токовую защиту обратной последовательности.

Защита имеет пусковой орган – токовое реле, включенный через фильтр нулевой последовательности. Защита приходит в действие при протекании через трансформатор токов обратной последовательности, вызванных несимметричными внешними КЗ или внутри трансформатора.

Ток срабатывания защиты выбирается по условиям: отстройки от токов небаланса фильтра токов обратной последовательности в режиме максимальной нагрузки и согласованию по чувствительности с защитами присоединений со стороны высшего напряжения.

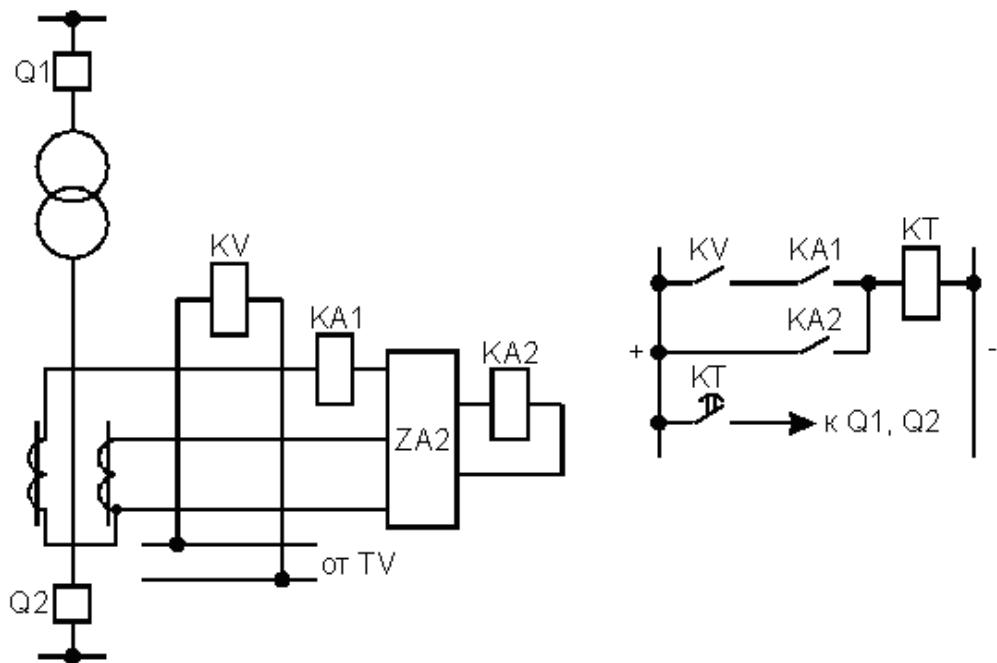


Рисунок 24 – Схема МТЗ обратной последовательности

Практика показала, что эти условия выполняются при  $I_{c,3} = (0,5...0,7) \cdot I_{nom}$ . Однако защита обратной последовательности не действует при симметричных КЗ. Поэтому она дополняется приставкой, реагирующей на симметричные КЗ. Приставка представляет собой максимальную токовую защиту с пуском минимального напряжения в однофазном исполнении (рис.24).

На двухобмоточных трансформаторах защита от перегрузки устанавливается со стороны питания. На трехобмоточных трансформаторах при двухстороннем питании защиты устанавливаются с двух сторон, а при трехстороннем – с трех сторон (рис.25).

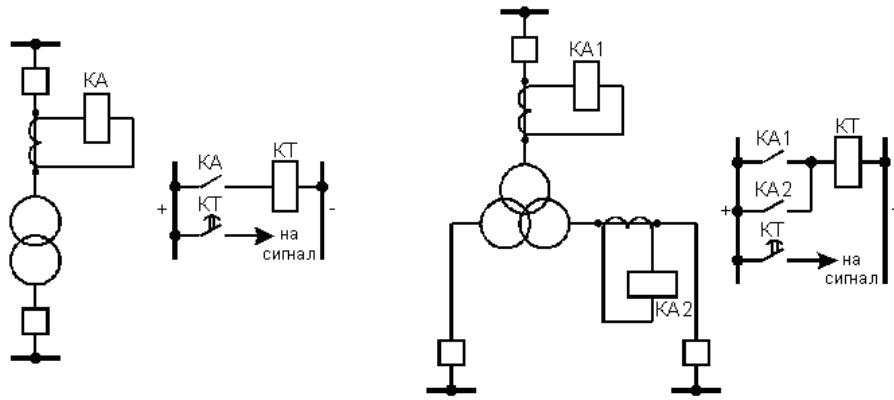


Рисунок 25 – Схема МТЗ от перегрузок

Так как перегрузка обычно симметрична, то защиту выполняют в однофазном исполнении. Защита действует с выдержкой времени на сигнал. На подстанции без сопровождающего персонала защита от перегрузки выбирается с тремя выдержками времени. Время действия первой ступени на  $Dt$  больше, чем у максимальной токовой защиты от внешних КЗ. Вторая ступень действует на разгрузку трансформатора, третья ступень – на его отключение.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты от перегрузки выбирается из условия:

$$I_{c.3} = \frac{k_h}{k_e} \cdot I_{nom}$$

Токовая отсечка применяется на трансформаторах мощностью ниже 6300 кВА, работающих одиночно и 4000 кВА, работающих параллельно. В зону действия токовой отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны питания. Токовые отсечки предназначены для защиты от междуфазных КЗ и действуют без выдержки времени.

Токовая отсечка устанавливается со стороны питания (рис.58).

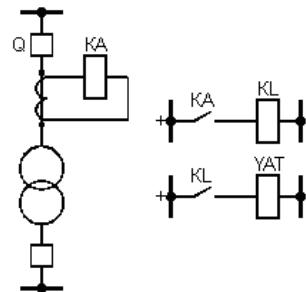


Рисунок 26 – Схема токовой отсечки

Ток срабатывания токовой отсечки выбирается по двум условиям:

1. Токовая отсечка не должна работать при КЗ за трансформатором

$$I_{c.3} = k_h \cdot I_{k.\max},$$

где  $k_h = 1,25 \dots 1,5$ ;  $I_{k.\max}$  – максимальное значение тока повреждения, протекающего через защиту при КЗ за трансформатором.

2. Токовая отсечка должна отстраиваться от броска тока намагничивания  $I_{\text{нам}}$ , возникающего при включении трансформатора под напряжение:

$$I_{c.3} > I_{\text{нам}}.$$

Оба эти требования выполняются, если ток срабатывания выбрать

$$I_{c.3} = (3 \dots 5) \cdot I_{\text{ном}}.$$

Чувствительность отсечки характеризуется коэффициентом чувствительности:

$$k_u = \frac{I_{k3.\min}}{I_{c.3}},$$

где  $I_{k3.\min}$  – минимальный ток, проходящий через защиту, при двухфазном КЗ на выводах трансформатора со стороны источника питания.

Чувствительность защиты считается достаточной если

$$k_u \geq 2.$$

### Задания:

#### Задание №1

Силовой трансформатор Yd5 (в соответствии с рис.)

Определить последовательность производимых цифровым устройством дифференциальной защиты вычислений при внешнем КЗ (см. Рис. 27). Доказать, что срабатывания защиты при данных условиях не происходит.

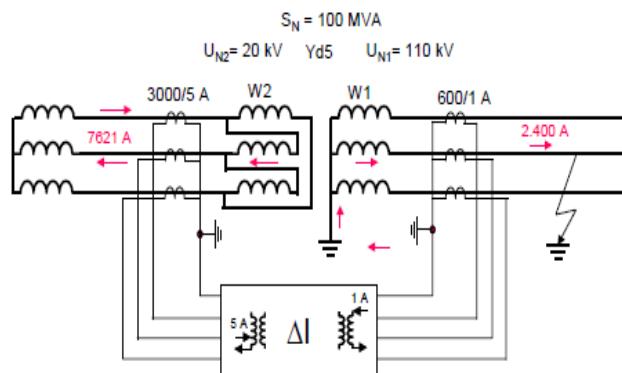


Рисунок 27 – Расчетная схема электроснабжения

### Задание №2

Трехобмоточный трансформатор (в соответствии с рис.28).

Определить конфигурацию и значение уставки функции выравнивания измеряемых величин.

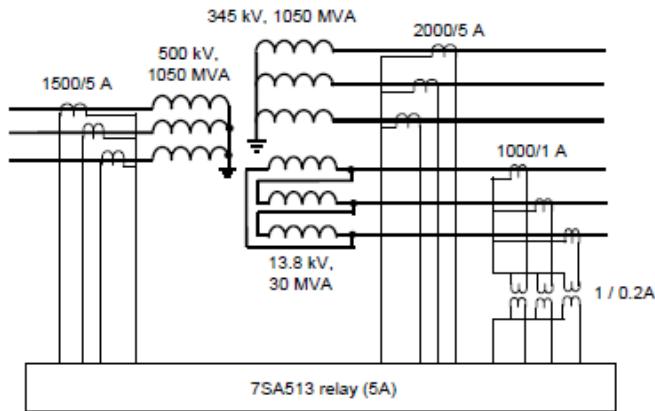


Рисунок 28 – Схема соединений трехобмоточных трансформаторов

### Задание №3

В сети, конфигурация которой представлена далее (рис.29 ), происходит однофазное КЗ.

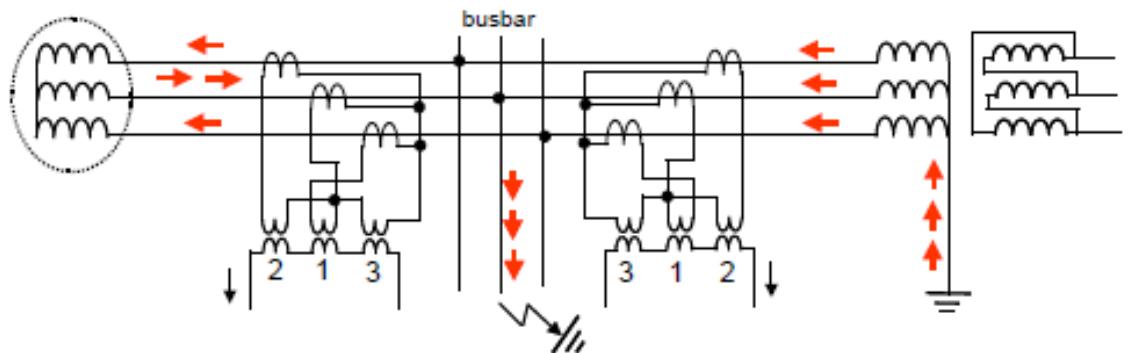


Рисунок 29 – Схема сети

Будет ли происходить срабатывание модификации защиты 7SS600 с суммирующим ТТ?

### Задание №4

Необходимо выбрать ТТ, предназначенные для использования цифровыми устройствами защиты участка сети, представленного на рис

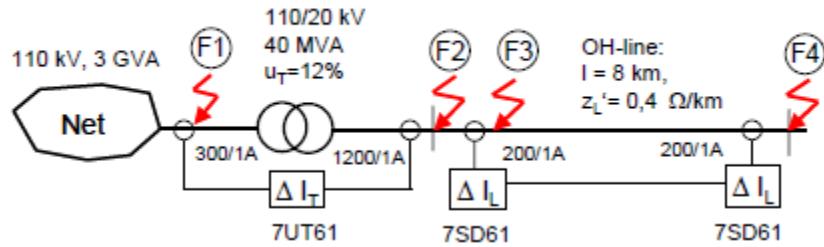


Рисунок 30 – Схема сети

### Задание №5

Коэффициент трансформации ТТ присоединения должен быть скорректирован с 600/1 на 400/1 для дифференциальной защиты.

При этом должен быть использован промежуточный ТТ 4AM5170-7AA (данные приведены на рис.). Нагрузка устройства защиты и подключенных контрольных кабелей составляет 1 ВА.

Использование какого промежуточного ТТ предпочтительней? (обеспечение гальванической развязки необязательно) На рис. 31 приведено две возможных схемы подключения

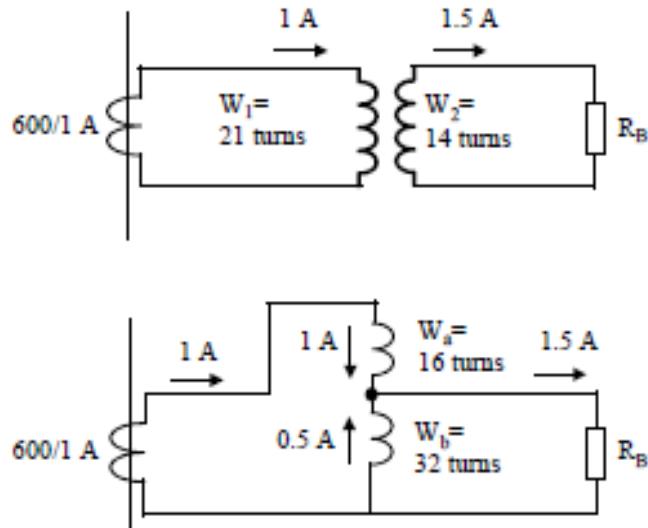


Рисунок 31 – Схема соединений трансформаторов тока

**Практическая работа №6. Трансформаторы тока. Определение расчётных нагрузок на трансформаторы тока.**

**Цель:** Определение расчетных нагрузок на трансформаторы тока (ТТ).

**Основы теории:**

Нагрузка на ТТ зависит от схемы соединений ТТ, от вида К.З., величины внешних сопротивлений проводов  $R_{np}$ , сопротивлений реле  $Z_p$  и других аппаратов, включенных последовательно в цепи тока каждой фазы и нулевой провод.

В целях упрощения вычислений все внешние сопротивления складываются арифметически (а не геометрически), чем создается некоторый расчетный запас.

Расчетной нагрузкой на ТТ называют наибольшее сопротивление  $Z_H$ , вычисляемое по формуле:

$$Z_H = \frac{U_T}{I_T},$$

Т.е. отношение напряжения  $U_T$  на зажимах вторичной обмотке ТТ к вторичному току  $I_T$  в этой обмотке и составляет нагрузку на ТТ.

Из схемы Рис. 3.1. видим:

- при трехфазной К.З. ток в нулевом проводе равен нулю (токами небаланса пренебрегаем);
- вторичные токи равны по величине и сдвинуты по фазе по отношению друг к другу  $120^\circ$ ;
- напряжение на вторичной обмотке каждого ТТ:

$$U_T^{(3)} = I_T^{(3)}(R_{np} + Z_p);$$

$$Z_H = \frac{U_T^{(3)}}{I_T^{(3)}} = R_{np} + Z_{np}$$

Расчетное значение  $Z_{H,расч.}$  следует принять для того ТТ, у которого сопротивления реле в фазном проводе наибольшие.

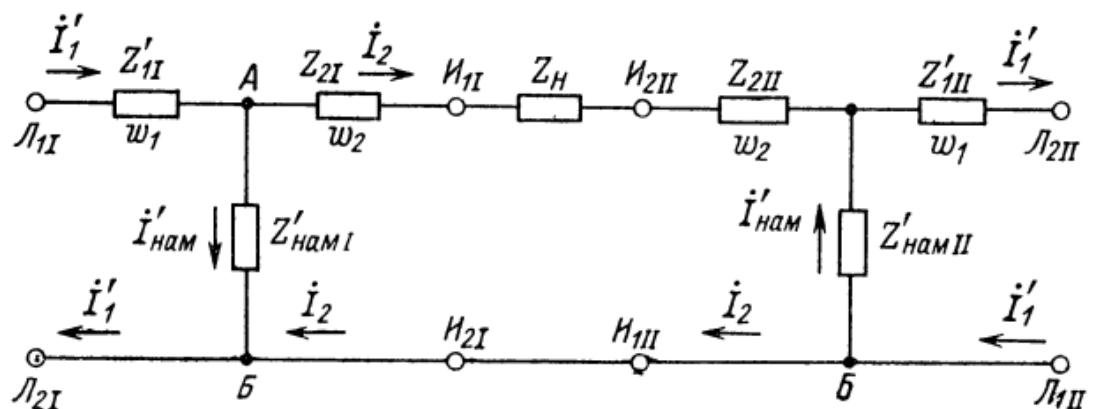
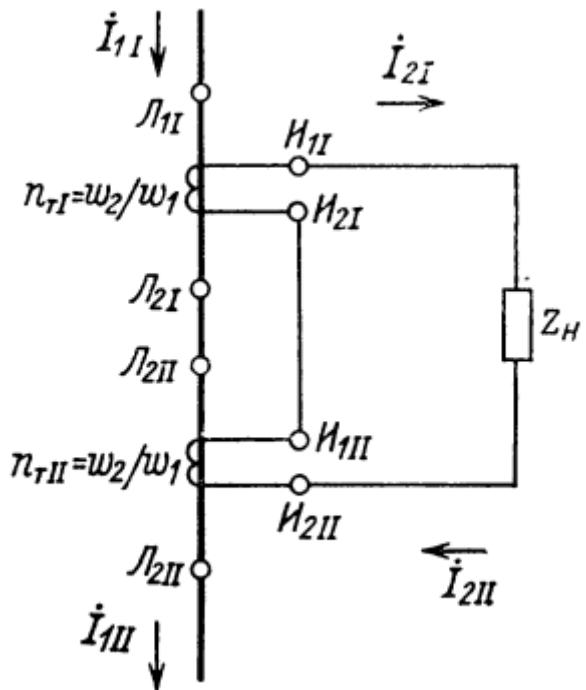
**Задания:**

**Задание №1**

В данном примере определим кривую предельной кратности, т. е. 10%-ную кривую полной погрешности двух последовательно соединенных вторичных обмоток ТТ разных классов точности, но с одинаковыми витковыми коэффициентами трансформации.

### Задание №2

Определить характеристику холостого хода:  $f_2=f(I_{\text{нам}})$  двух последовательно соединенных ТТ класса 0,5 и Д типа ТФНДНОМ-Д/Д/0,5 600/5. Характеристики холостого хода ТТ 0,5 и Д. Схемы соединения и замещения такой группы приведены на рис.



**Практическая работа №7. Трансформаторы тока. Расчёт полной и токовой погрешностей трансформаторов тока по кривым 10%-й погрешности.**

**Цель:** Определение токовой и полной погрешностей, сечений жил контрольных кабелей по кривым 10%-ной погрешности, максимального вторичного тока ТТ.

**Основы теории:**

Реле -  $Z_p$ , приборов -  $Z_{np}$ , жил контрольного кабеля -  $Z_{каб}$ , переходного сопротивления в местах контактных соединений -  $R_k$  :

$$Z_H = Z_p + Z_{np} + Z_{каб} + R_k.$$

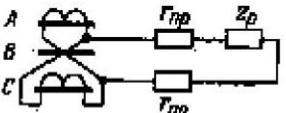
Нагрузка вторичной обмотки ТТ зависит так же от схемы их соединения и вида К.З.

В задаче 3.2. были выведены формулы для определения сопротивлений нагрузки при соединении вторичных обмоток в ТТ  $\Delta$ , реле в Y для трехфазного, двухфазного и однофазного К.З.

Расчетные формулы для определения сопротивления нагрузки для наиболее распространенных схем соединения вторичных обмоток ТТ и при различных видах К.З. приведены:

Расчетные формулы для определения сопротивления нагрузки в зависимости от схемы соединения ТТ

Схема соединения ТТ и реле.	Вид короткого замыкания	Формулы для определения нагрузки на зажимах вторичных обмоток
1. Полная звезда $K_{сх}=1.0$ 	Трехфазное и двухфазное	$Z_{H\cdot\text{расч}} = R_{\text{пр}} + Z_p + R_{\text{пер}}$ Величина $R_{\text{пер}}$ во всех случаях принимается равной 0.1Ом.
	Однофазное	$Z_{H\cdot\text{расч}} = 2R_{\text{пр}} + Z_{p.\phi} + Z_{p.0} + R_{\text{пер}}$
2. Неполная звезда $K_{сх}=1.0$	Трехфазное	$Z_{H\cdot\text{расч}} = \sqrt{3}R_{\text{пр}} + Z_{p.\phi} + Z_{p.\text{обр}} + R_{\text{пер}}$
	Двухфазное АВ или ВС	$Z_{H\cdot\text{расч}} = 2R_{\text{пр}} + Z_{p.\phi} + Z_{p.\text{обр}} + R_{\text{пер}}$

	Двухфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{H,расч} = 2R_{np} + Z_{p,φ} + Z_{p,обр} + R_{пер}$
3. На разность токов двух фаз $K_{cx}=1.73$ 	Трехфазное	$Z_{H,расч} = \sqrt{3}(2R_{np} + Z_p) + R_{пер}$
	Двухфазное AC	$Z_{H,расч} = 4R_{np} + 2Z_p + R_{пер}$
	Двухфазное AB или BC	$Z_{H,расч} = 2R_{np} + Z_p + R_{пер}$
4. Треугольник $K_{cx}=1.73$ 	Трехфазное или двухфазное, трехфазное за трансформатором Y/Δ-11	$Z_{H,расч} = 3R_{np} + 3Z_p + R_{пер}$
	Однофазное	$Z_{H,расч} = 2R_{np} + 2Z_p + R_{пер}$

Допустимая нагрузка на ТТ определяется исходя из обеспечения точности измерительных органов релейной защиты при К.З. в расчетных точках электрической сети. Полная погрешность ТТ  $\xi$  не должна превышать 10%.

Проверка ТТ по действительным характеристикам намагничивания производится в следующем порядке:

1. Определяется фактическая нагрузка  $Z_H$ , подключенная к вторичной обмотке с учетом формул, приведенных в таблице 4.1;
2. Определяется расчетный первичный и вторичный токи К.З., которые равны максимальному току К.З. в конце защищаемой зоны.
3. Определяется расчетный ток намагничивания:
$$I_{2нам,расч.} = 0,1 \cdot I_{2K.Z.,расч.}$$
4. Строится наиболее низкая характеристика намагничивания проверяемых ТТ и по этой характеристике и по полученному выше току намагничивания определяется соответствующее ему значения напряжения  $U_2 = f(I_{нам})$
5. Определяется допустимое сопротивление нагрузки, при по которой погрешность ТТ не будет превышать 10% по формуле:

$$Z_{H,дон} = \frac{U_2 - I_{2расч} \cdot Z_1}{0,9 \cdot I_{2расч}}$$

Для того, чтобы погрешность ТТ не превышала допустимых 10%, рассчитанная в п.1. нагрузка на его вторичную обмотку не должна превышать значения  $Z_{H, \text{don.}}$ , определенного в п.5.

**Задания:**

**Задание №1**

Определить погрешности ТТ типа ТПФ-1/3, 200/5 при одинаковой нагрузке на его вторичные обмотки  $Z_H = 1\Omega$ . Сопротивление вторичных обмоток  $Z_2 = 0,3\Omega$  для обмотки класса I и  $Z_2 = 0,4\Omega$  для обмотки класса III.

## **Практическая работа №8. Дистанционная защита. Дистанционные защиты линий.**

**Цель:** Изучить способы расчета дистанционных защит, которые сводятся к определению, сопротивлений срабатывания, выдержек времени и чувствительности отдельных дистанционных ступеней и пусковых органов защиты, параметры срабатывания и чувствительности защиты при качаниях.

### *Основы теории:*

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания максимальные токовые направленные защиты и тем более простые максимальные токовые защиты не могут обеспечить селективности отключения к.з. В этом легко убедиться на примере кольцевой сети с двумя источниками питания, представленной на рис. 5-1.

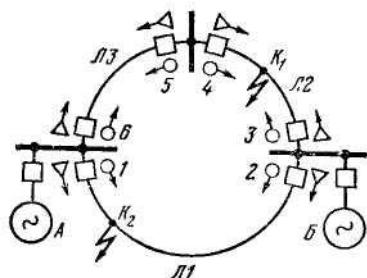


Рис.5-1. Схема кольцевой сети с двумя источниками

При к.з. в точке К1 защита 3 должна работать быстрее защиты 1, а при к.з. в точке К2 наоборот защита 1 должна работать быстрее защиты 3.

Кроме того, максимальные токовые защиты часто не удовлетворяют требованиям быстродействия и чувствительности. Поэтому, для защиты сетей со сложной схемой и с несколькими источниками питания применяются более сложные дистанционные защиты (ДЗ), которые обеспечивают необходимую селективность, быстродействие и чувствительность.

Дистанционной защитой называется защита, выдержка времени которой автоматически изменяется в зависимости от удалённости (от расстояния или дистанции) места к.з. от места установки защиты.

Например, при к.з. в точке К1 (рис. 5-2) защита 2, расположенная ближе к месту повреждения должна работать с меньшей выдержкой времени, чем более удалённая защита 1. Если же к.з. возникнет в точке К2, то выдержка времени защиты 2 автоматически должна увеличиться т.к. расстояние (дистанция) от защиты 2 до места к.з. К2 больше чем при к.з.

К1. В последнем случае к.з. будет селективно отключено защитой 3, расположенной ближе к месту повреждения и, следовательно, имеющей меньшую выдержку времени.

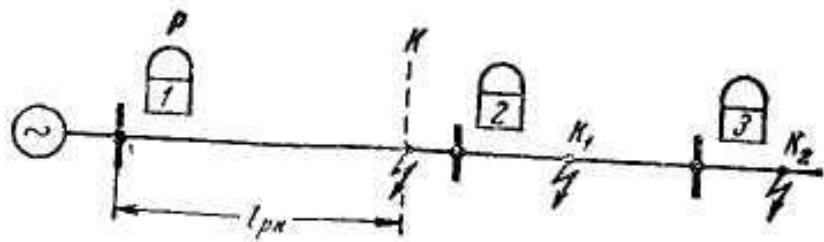


Рис.5-2. Зависимость выдержки времени дистанционной защиты от расстояния до места к.з.

Таким образом, при к.з. на линии по защищаемой линии проходит ток  $I_{\text{к.з.}} > I_{\text{норм.}}$ , а напряжение на шинах подстанции, питающей линию, снижается  $U_{\text{ш}} < U_{\text{норм.}}$  и равно падению напряжения в сопротивлении участка линии  $Z_{\text{к.з.}}$  от шин подстанции до точки к.з.

$$U_{\text{ш}} = I_{\text{к.з.}} Z_{\text{к.з.}}$$

Нетрудно видеть, что отношение остаточного напряжения на шинах к току к.з. равно сопротивлению участка линии до места к.з.:

$$Z_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\text{ш}}}{I_{\text{к.з.}}} < Z_{\text{л.норм.}}$$

Сопротивление линии или её участка можно выразить через удельное сопротивление  $Z_{\text{уд.}}$  и расстояние до места к.з.  $L_{\text{к.з.}}$ :

$$Z_{\text{к.з.}} = Z_{\text{уд.}} L_{\text{к.з.}}$$

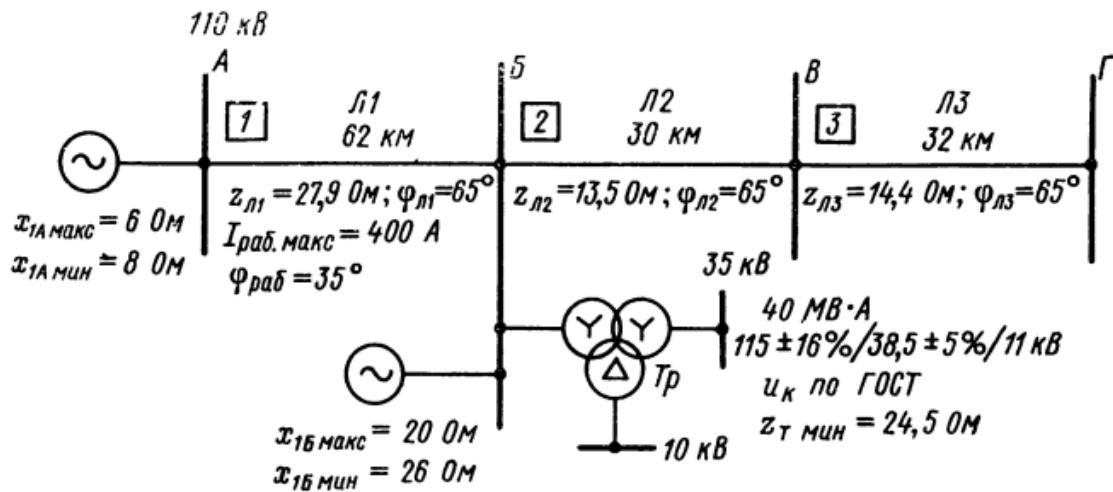
Следовательно, отношение остаточного напряжения на шинах к току к.з., проходящему по защищаемой линии пропорционально расстоянию (дистанции)  $L_{\text{к.з.}}$  от места установки защиты до места к.з.

Для защиты сетей напряжением 110 кВ и выше со сложной конфигурацией и с несколькими источниками питания применяются дистанционные защиты (ДЗ) выдержка времени которых автоматически изменяется в зависимости от расстояния (дистанции) места к.з. до места установки защиты.

### Задания:

#### Задание №1

По данным, приведенным, на рис, определить для всех ступеней трехступенчатой дистанционной защиты 1 типа П32 первичные сопротивления срабатывания и выдержки времени.



### Задание №2

Определить первичное сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 типа П34 если длина линии Л2 12 км и ее сопротивление 5,4 Ом.

### Задание №3

Показать, что при включении реле минимального сопротивления на разность токов двух фаз и разность одноименных фазных напряжений к нему подводится при двухфазном к. з. на землю такое же сопротивление, как и при двухфазном и трехфазном к. з., т. е.

$$z_p^{(1,1)} = z_p^{(2)} = z_p^{(3)} = z_{1\text{уд}} l.$$

**Практическая работа №9. Максимальная токовая защита (МТЗ). Расчет уставок максимальной токовой защиты.**

**Цель:** Изучить методы расчета установок МТЗ.

**Основы теории:**

Выбор уставок максимальных токовых защит заключается в определении первичных и вторичных токов срабатывания, времени срабатывания, типов реле, минимальных коэффициентов чувствительности при металлических К.З. в конце защищаемых зон, когда эти защиты действуют в качестве основных и резервных. Кроме того защиты двух и более последовательно соединенных элементов (например трансформатор-линии-двигатели) должны быть согласованы по чувствительности и по времени, т.е. оны должны действовать селективно: отключать место повреждения ближайшим выключателем.

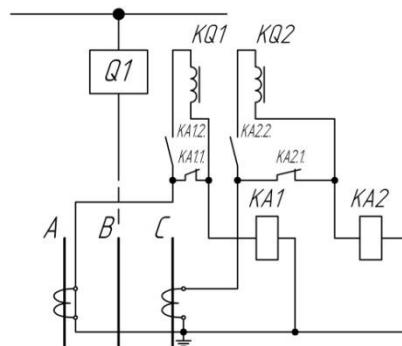


Рис.6.2. Схема двухфазной релейной защиты с дешунтированием катушек дешунтирования выключателя.

Первичный ток срабатывания МТЗ должен быть отстроен, от токов самозапуска полностью заторможенных электродвигателей и другой нагрузки при включении защищаемого элемента после ликвидации К.З. Кроме того, защиты не должны приходить в действие при максимально возможном токе нагрузки. Исходя из этих условий первичный ток срабатывания защиты в симметричном нормальном режиме вычисляется по формуле:

$$I_{c.s} = \frac{k_h \cdot k_3 \cdot I_{p.\max}}{k_B}, [6.1]$$

Где  $k_h = 1,2 \dots 1,3$  - коэффициент надежности;

$k_3$  - коэффициент самозапуска нагрузки;

$k_B$  - коэффициент возврата реле;

Ток срабатывания реле вычисляют по формуле:

$$I_{c.p.} = \frac{k_{cx}^{(3)} \cdot k_h \cdot k_3 \cdot I_{p.\max}}{k_B \cdot k_{TT}}, \quad [6.2]$$

где  $k_{cx}^{(3)}$  - коэффициент схемы – отношение тока в реле к вторичному току ТТ в симметричном нормальном режиме и при трехфазном К.З. Так при соединении ТТ в  $\Delta$  или на разность токов двух фаз  $k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}$ ; при соединении ТТ в полную или неполную  $k_{cx}^{(3)} = 1$ .

В тех случаях, когда  $I_{p.\max}$  (максимальный рабочий ток) неизвестен, его принимают равным длительному допустимому току нагрузки согласно ПУЭ, т.е.

$$I_{p.\max} = I_{\text{дл.доп}} \quad [6.3.]$$

Коэффициент чувствительности определяют при минимальных токах К.З. по формуле

$$k_4 = \frac{I_p}{I_{c.p.}} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot \frac{I_{\text{к.з.мин}}}{k_{TT}}}{k_{cx}^{(3)} \cdot \frac{I_{c.3}}{k_{TT}}} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{\text{к.з.мин}}}{k_{cx}^{(3)} \cdot I_{c.3}} \quad [6.4]$$

На основании вышеизложенного

Определяем установки МТЗ 2

Т.к. согласно исходным данным  $I_{p.\max}$  и  $k_3$  не заданы, принимаем для всех кабелей ток кабеля  $I_{\text{каб.ном}} = I_{p.\max} = I_{\text{дл.доп}}$  и в соответствии с требованиями, приведенными в «Сборнике директивных материалов. Электрическая часть»

$$I_{c.3MT32} = 4I_{\text{ном}} = 4I_{\text{дл.доп}} \quad [6.5]$$

Согласно ПУЭ для алюминиевого кабеля сечением 3х70  $\text{мм}^2$

$$I_{\text{дл.доп}} = 190 \text{ A, тогда}$$

$$I_{c.3MT32} = 4 \times 190 = 760 \text{ A}$$

Ток срабатывания реле согласно [6.2]

$$I_{c.p.} = 1 \cdot \frac{760}{400} = 9,5 \text{ [A]}$$

Выдержку времени в независимой части характеристики реле защиты 2 отстраиваемой от быстродействующей защиты элементов, присоединённых к шинам IV согласно [5.2] без учета  $\Delta t_{MT31}$  (токовая отсечка согласно исходным данным).

$$\Delta t_{\text{заб.}MT32} = \Delta t_{MT32} + \Delta t_{O.B.} + \Delta t_{P.O} + t_{\text{заб}} = 0,1 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,45 \text{ [с]}$$

Принимаем минимально возможную уставку в независимой части характеристики времени срабатывания реле РТ-85/1

$$t_{MT32U} = 0,5 \text{ C.}$$

Коэффициент чувствительности вычисляем при двухфазном К.З. на шинах IV согласно [6.4], учитывая, что

$$k_{cx}^{(2)} = k_{cx}^{(3)} = 1$$

$$k_{cx}^{(2)} = \frac{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{\kappa.3.\min}}{k_{cx}^{(2)} \cdot I_{c.3.MT32}} = \frac{1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4300}{1 \cdot 760} = 4,9;$$

$k_{c.3.MT32} = 4,9 > 1,5$ , что удовлетворяет требованию ПУЭ. Далее определяем уставки МТЗ 3.

Ток срабатывания защиты вычисляем согласно [6.5]

$$I_{c.3.MT33} = 4I_{\partial.\partial.on.} = 4 \cdot 275 = 1100 [A]$$

Эта защита должна быть согласована по чувствительности с МТЗ 2: ее ток срабатывания выбирается на 30%...40% больше, чем ток срабатывания МТЗ 2.

$$I_{c.3.MT33} = k_{h.c} \cdot I_{c.3.MT32}, \quad [6.6]$$

Где  $k_{h.c} = 1,3 \dots 1,4$  - коэффициент надежности согласования РТ-80 и РТ-90, установленных на линиях 6, 10 и 35кВ; для реле РТ-40 и РТВ соответственно  $k_{h.c} = 1,25$  и  $1,5$ ; а, скажем, для реле РТ-40, установленных на линиях 110кВ и выше  $k_{h.c} = 1,1 \dots 1,2$ .

Для МТЗ 3  $I_{c.3.MT33} = 1,4 \times 760 = 1064 [A]$ .

Как видим, условие согласования близко к условию отстройки от токов самозапуска нагрузки

$$1064 A \xrightarrow{\leftarrow} 1100 A.$$

Ток срабатывания реле

$$I_{c.p.} = \frac{k_{c.x.}^{(3)} \cdot I_{c.3.MT33}}{k_{TT}} = \frac{1 \cdot 1100}{\frac{600}{5}} = 9,15 [A]$$

Далее вычисляем  $k_q$  защиты при ее действии в качестве основной при К.З. на шинах III:

$$k_{q.ocn}^{(2)} = \frac{I_{\kappa.3.III}^{(2)}}{I_{c.3.MT33}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8400}{1100} = 6,61 > 1,5.$$

И, в завершении, вычисляем  $k_q$  защиты при ее действии в качестве резервной при К.З на шинах IV:

$$k_{q.pe3}^{(2)} = \frac{I_{\kappa.3.IV}^{(2)}}{I_{c.3.MT33}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4300}{1100} = 3,36 > 1,2.$$

Как видим, коэффициент чувствительности МТЗ 3 удовлетворяет требования ПУЭ, при ее действии как в качестве основной – при К.З. на шинах III, так как в качестве резервной – при К.З. на шинах IV.

Ступень селективности вычисляем согласно [5.2], учитывая, что при уставке реле РТ-85/1  $t_y = 0,5C$  погрешность  $\Delta t_{p \cdot MT32} = \pm 0,1C$ :

$$\begin{aligned}\Delta t &= \Delta t_{p \cdot MT32} + \Delta t_{p \cdot MT33} + t_{O.B.} + t_{I.I.O.} + t_{3an.} = \\ &= 0,1 + 0,15 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,6[C].\end{aligned}$$

Для обеспечения селективности при любых значениях тока принимаем  $t_{3an.} = 0,6C$  в независимой части характеристики. При этом уставка реле составит

$$t_{y \cdot MT33} = t_{y \cdot MT32} + \Delta t_{3an.} = 0,5 + 0,6 = 0,1[C]$$

Определяем уставки МТЗ 4

Аналогично МТЗ 3 определяем ток срабатывания защиты

$$t_{c.3 \cdot MT34} = 4 \cdot I_{\text{дел.дел}} = 4 \cdot 355 = 1420[A].$$

Ток срабатывания МТЗ 4 в результате согласования ее с МТЗ 3:

$$I_{c.3 \cdot MT34} = k_{h.c.} \cdot I_{c.3 \cdot MT33.} = 1,3 \cdot 1100 = 1430[A]$$

$$1420A \xrightarrow{\leftarrow} 1430A$$

Ток срабатывания реле

$$I_{c.p.} = \frac{1420}{\frac{800}{5}} = 8,87[A]$$

$$k_{u.ochn.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{10500}{1420} = 6,40;$$

$$k_{u.pez.} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{8400}{1420} = 5,12;$$

$$\Delta t_{3an.} = 0,15 + 0,15 + 0,1 + 0,15 + 0,1 = 0,65[C];$$

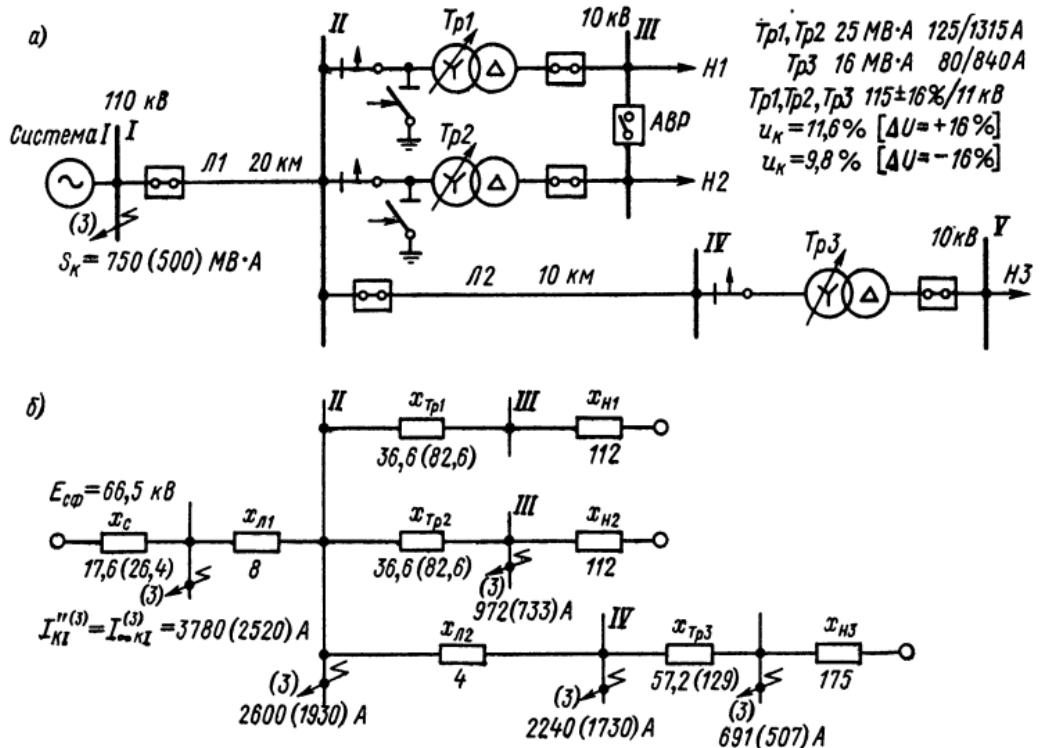
Установка выдержки времени в независимой части характеристики МТЗ4

$$t_{y \cdot MT34} = t_{y \cdot MT33} + \Delta t_{3an.} = 1,1 + 0,65 = 1,75[C]$$

**Задания:**

**Задание №1**

В данном примере рассмотрим защиту линий 110 кВ Л1 и Л2 (рис. 4-11), по которой осуществляется питание двух подстанций. Для схемы, показанной на рис. а, известны мощности трехфазного к. з. К(3) на шинах /, длины линий Л1 и Л2 и данные трансформаторов Тр1, Тр2 и Тр3.

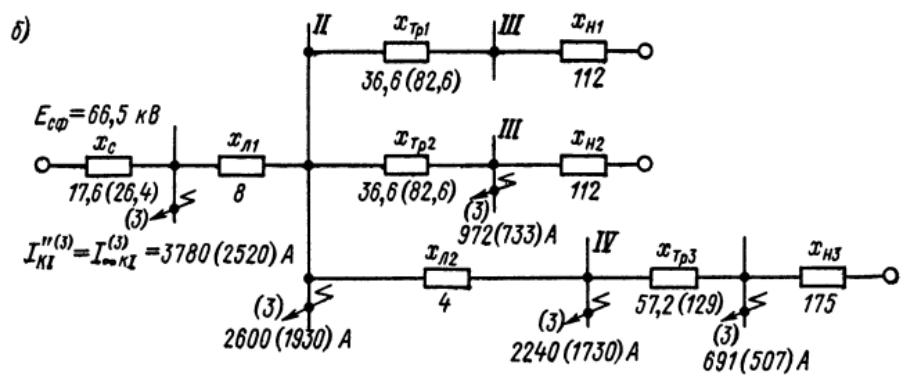


### Задание №2

Для линии 220 кВ I—II, приведенной на рис. 4-14, а, и по данным расчета фазной отсечки линии II—III, определить уставки отсечки / с выдержкой времени и зоны ее действия.

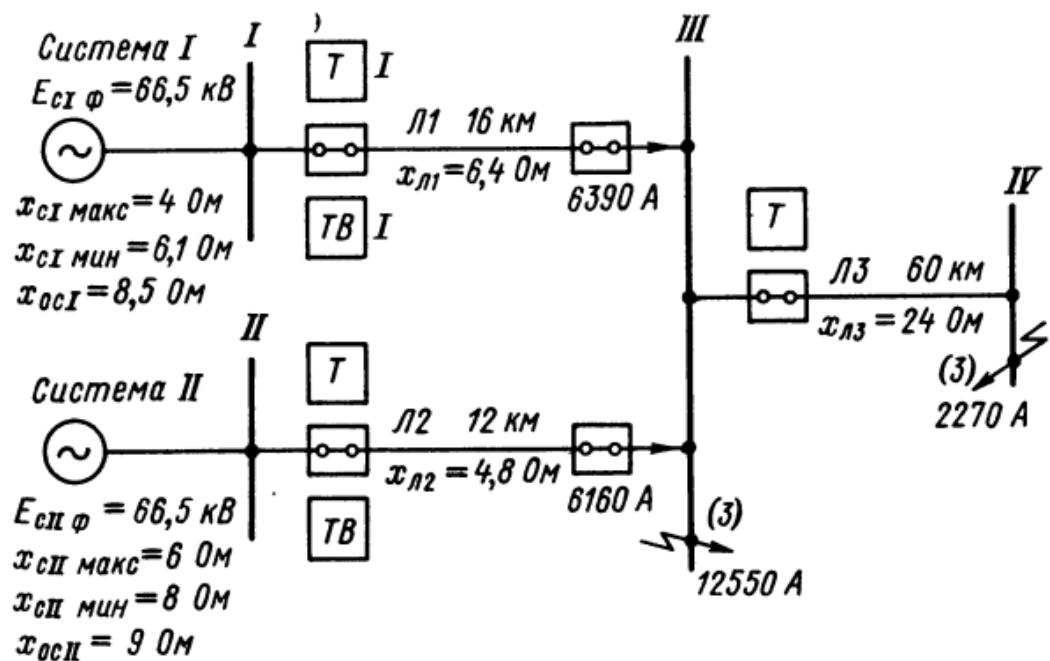
### Задание №3

Для линии 330 кВ с двусторонним питанием, вычислить токи срабатывания и зоны действия максимальных фазных отсечек I к II без выдержки времени, установленных на обоих концах I и II. При расчете токов срабатывания учесть, что в любой точке к. з. на землю на линии полные токи в поврежденных фазах с обеих сторон линии меньше токов при трехфазных к. з. на линии.



### Задание №4

Для линии Л1 и линии Л3 по данным, приведенным на рис., вычислить токи срабатывания максимальных фазных отсечек без выдержки времени и для линии Л1 с выдержкой времени и аналитическим методом определить зоны их действия. Для одного случая к. з. выполнить расчет графо-аналитическим методом.



## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Куксин, А. В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие / А. В. Куксин. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 215 с. — ISBN 978-5-4497-0531-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/94929.html>

2. Горемыкин, С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : практикум / С. А. Горемыкин, Н. В. Ситников. — Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2021. — 71 с. — ISBN 978-5-7731-0933-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/111504.html>

3. Агафонов, А. И. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное пособие / А. И. Агафонов, Т. Ю. Бrostилова, Н. Б. Джазовский. — 2-е изд. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 300 с. — ISBN 978-5-9729-0505-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98355.html>

#### **5.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Богданов, А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах : учебное пособие / А.В. Богданов, А.В. Бондарев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет, Кумертауский филиал ОГУ. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 82 с. : схем., табл., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 8-987-903550-43-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481747>

2. Соловьев, А. Л. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ : учебное пособие / А. Л. Соловьев, М. А. Шабад ; под редакцией А. В. Беляев. — Санкт-Петербург : Политехника, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7325-1100-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/59516.html>

**5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
3. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

**5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины**

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**

по организации и проведению самостоятельной работы  
по дисциплине «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕ-  
СКИХ СИСТЕМ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2025 г.

## Содержание

### Введение

- 1   Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»
- 2   План-график выполнения самостоятельной работы
- 3   Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4   Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5   Методические указания по подготовке к экзамену.
- 6   Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

## **Введение**

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становится формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

## **Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»**

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становится формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение курсового проекта.

**Цель самостоятельного изучения литературы** – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

**Задачами** самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

**Цель самостоятельного решения задач** - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

**Задачами** самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

**Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы** по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

**Задачами** данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения.	ИД-2 <sub>ПК-1</sub> Выбирает типовые проектные решения систем электроснабжения.	Знает основы релейной защиты и автоматики линий электропередач, трансформаторов, двигателей. Умеет сопоставлять и анализировать особенности функционирования существующих схем релейной защиты и автоматики. Владеет навыками составления схем для защиты от аварийных режимов трансформаторов, двигателей, линий электропередач.
ПК-2 Способен анализировать режимы работы систем электроснабжения.	ИД-1 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает параметры электрооборудования систем электроснабжения.	Знает принципы действия современных устройств релейной защиты и автоматики, современную элементную базу релейной защиты и автоматики.
	ИД-2 <sub>ПК-2</sub> Рассчитывает режимы работы систем электроснабжения.	Умеет проводить усовершенствование существующих схем релейной защиты и автоматики, проверять и настраивать основные типы релейных защит.
	ИД-3 <sub>ПК-2</sub> Обеспечивает заданные параметры режима систем электроснабжения.	Владеет навыками расчёта установок релейной защиты.

### План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе				
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего		
<b>Очная форма обучения</b>							
<b>6 семестр</b>							
ПК-1 ИД-2ПК-1 ПК-2 ИД-1ПК-2 ИД-2ПК-2 ИД-3ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	40,095	4,455	44,55		
	Подготовка к лекциям	Собеседование	2,43	0,27	2,7		
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	2,43	0,27	2,7		
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	3,645	0,405	4,05		
<b>Итого за 6 семестр:</b>			<b>48,6</b>	<b>5,4</b>	<b>54</b>		
<b>7 семестр</b>							
ПК-1 ИД-2ПК-1 ПК-2 ИД-1ПК-2 ИД-2ПК-2 ИД-3ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №19-27	Собеседование	25,92	2,88	28,8		
	Подготовка к лекциям	Собеседование	1,62	0,18	1,8		
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4		
<b>Итого за 7 семестр:</b>			<b>32,4</b>	<b>3,6</b>	<b>36</b>		
<b>Итого:</b>			<b>81</b>	<b>9</b>	<b>90</b>		
<b>Очно-заочная форма обучения</b>							
<b>6 семестр</b>							
ПК-1 ИД-2ПК-1 ПК-2 ИД-1ПК-2 ИД-2ПК-2 ИД-3ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	114,66	14,74	129,4		
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,54	0,06	0,6		
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	0,72	0,08	0,8		
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2		
<b>Итого за 6 семестр:</b>			<b>117</b>	<b>15</b>	<b>132</b>		
<b>7 семестр</b>							
ПК-1 ИД-2ПК-1 ПК-2 ИД-1ПК-2 ИД-2ПК-2	Самостоятельное изучение литературы по темам №19-27	Собеседование	47,46	8,94	56,4		

ИД-3ПК-2	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,36	0,04	0,4
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2
<b>Итого за 7 семестр:</b>		<b>48,9</b>		<b>9,1</b>	<b>58</b>
<b>Итого:</b>		<b>165,9</b>		<b>24,1</b>	<b>190</b>

## Контрольные точки и виды отчетности по ним

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
<b>6 семестр</b>			
1.	Практическое занятие № 3	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 4	10 неделя	15
3.	Практическое занятие № 7	16 неделя	15
	<b>Итого за 6 семестр</b>		<b>55</b>
	<b>Итого</b>		<b>55</b>
<b>7 семестр</b>			
4.	Лабораторное занятие № 12	6 неделя	25
5.	Лабораторное занятие № 15	10 неделя	15
6.	Лабораторное занятие № 17	16 неделя	15
	<b>Итого за 7 семестр</b>		<b>55</b>
	<b>Итого</b>		<b>55</b>

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	<b>100</b>
Хороший	<b>80</b>
Удовлетворительный	<b>60</b>
Неудовлетворительный	<b>0</b>

Рейтинговая система успеваемости студентов не предусмотрена для заочной формы обучения.

## **Методические рекомендации по изучению теоретического материала**

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

#### Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Типовые контрольные задания и иные материалы, характеризующие этапы формирования компетенций

#### Вопросы для собеседования

1. Что такое максимальная токовая защита (МТЗ) и как она выполняется?
2. Какие достоинства и недостатки максимальных токовых защит?
3. Какая область применения МТЗ?
4. Как определяется относительный коэффициент чувствительности максимальной токовой защиты?
5. Как выбирают ток срабатывания МТЗ?
6. Что такое коэффициент запуска, коэффициент отстройки?
7. Что такое максимальные токовые направленные защиты?
8. Как выполняют МТЗ с зависимыми характеристиками выдержки времени?
9. Каковы принцип действия и область применения ТО линии электропередачи?
10. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
11. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемой ЛЭП?
12. Виды токовых защит, их краткая характеристика и отличие друг от друга.
13. Принцип действия и селективность МТЗ.
14. Выбор тока срабатывания МТЗ.

15. Выбор выдержки времени МТЗ.
16. Схема двухфазной двухрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
17. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с независимой выдержкой времени.
18. Схема двухфазной трехрелейной МТЗ с зависимой выдержкой времени.
19. Согласование защит по чувствительности.
20. Принцип действия ТО.
21. Мгновенные ТО на линиях с односторонним питанием.
22. ТО с выдержкой времени.
23. ТО с блокировкой по напряжению.
24. Каковы принцип действия и область применения дифференциальной токовой защиты линии электропередачи?
25. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
26. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемой ЛЭП?
27. Каковы принцип действия и область применения дифференциальной защиты трансформатора?
28. Каково назначение элементов релейной частей защиты?
29. Алгоритм работы защиты при к.з. на защищаемом трансформаторе?
30. Когда применяется МТНЗ?
31. Когда имеет место мертвая зона МТНЗ?
32. Укажите достоинства и недостатки 90о схемы включения реле мощности.
33. Назовите основные типы реле мощности.
34. Как выбирается ток срабатывания МТНЗ?
35. Как выбирается время срабатывания МТНЗ?
36. Что такое каскадное действие защит?
37. В каких сетях имеет место каскадное действие защит?
38. Объяснить принцип действия продольной дифференциальной защиты.
39. Почему дифференциальная защита не реагирует на токи нагрузки, токи внешних коротких замыканий и токи качаний генераторов частей электроэнергетической системы?
40. В каком токовом режиме работы защищаемого объекта ток небаланса будет иметь максимальное значение?
41. С каких трансформаторов тока в реальной трехфазной цепи подаются вторичные токи на входы измерительных органов защиты? Привести примеры.
42. Чем объяснить наличие тока небаланса в цепях измерительной части защиты?
43. Сколько трансформаторов тока необходимо использовать на каждом конце защищаемой трехфазной линии электропередачи напряжением 35 кВ?

44. Сколько трансформаторов тока необходимо использовать на каждом конце защищаемой трехфазной линии электропередачи напряжением 220 кВ? Напряжением 110 кВ?

45. Изобразить простейшую электрическую принципиальную схему измерительной части продольной дифференциальной защиты линии электропередачи напряжением 35 кВ, выполненную на релейных элементах; сделать то же для линии напряжением выше 69 кВ.

46. Какой наиболее существенный недостаток имеют дифференциальные защиты линий электропередачи? В чем заключается наибольшая трудность при выполнении таких защит?

47. Где располагаются устройства (комплекты) продольных дифференциальных защит линий? В каких электроустановках? В каких частях этих электроустановок?

48. Каковы причины возникновения погрешностей в работе продольных дифференциальных защит линий электропередачи, за счет чего устраняется их отрицательное воздействие на работу защиты?

49. В чем количественно выражаются, состоят погрешности в работе рассматриваемой защиты?

50. Каким видом селективности обладает изучаемая в этой работе защита?

51. Каково быстродействие изучаемой в работе защиты?

52. Почему дифференциальная защита выполняется без выдержки времени?

53. Чем опасен обрыв соединительного провода в плече дифференциальной защиты?

54. Каковы причины, вызывающие ток небаланса в реле в нормальном режиме и при внешнем КЗ?

55. Как выполнить схему направленной поперечной дифференциальной защиты при отсутствии специального реле направления мощности двустороннего действия?

56. В чем недостаток каскадного действия защиты?

57. Почему наличие блокировки по напряжению повышает чувствительность направленной поперечной дифференциальной защиты?

58. В каких случаях применяется дистанционная защита линий?

59. Назовите параметр на который срабатывает линия.

60. Какие бывают характеристики выдержек времени дистанционной защиты?

61. Каким образом согласовывают дистанционные защиты между собой?

62. Из каких функциональных частей состоит ДЗ, поясните их?

63. Какие бывают характеристики срабатывания дистанционной защиты?

64. Какими достоинствами и недостатками обладает ДЗ?

65. Как выбирается уставка по току для максимальной токовой защиты (МТЗ) с независимой выдержкой времени?

66. Что такое коэффициент схемы, используемый при определении  $I_{cp}$ ?

67. Назовите основной недостаток применения максимальной токовой защиты.

68. В каких случаях и зачем при определении тока срабатывания измерительного органа защиты используется коэффициент схемы?

69. Как выставить уставку тока на реле КА?

70. Почему при выборе уставки по току для максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению не учитывают коэффициент самозапуска двигательной нагрузки?

71. Как влияет наличие пусковых органов напряжения в схеме защиты на ее чувствительность?

72. Назовите основные достоинства и недостатки максимальной токовой защиты с блокировкой по напряжению.

73. Как повлияет обрыв в измерительных цепях напряжения на селективность действия защиты?

74. Как производится оценка чувствительности изучаемой защиты?

75. Зачем на реле тока, напряжения, времени, используемые в данной работе, подается дополнительное питание?

76. Объяснить принцип действия дифференциальной защиты.

77. Как осуществляется компенсация фазового сдвига между линейными вторичными токами групп измерительных трансформаторов тока сторон силового трансформатора при выполнении защиты силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда/треугольник» с помощью релейных элементов?

78. Как осуществляется компенсация неравенства величин токов со сторон высшего и низшего напряжений при выполнении дифференциальной защиты силового трансформатора?

79. Почему дифференциальная защита не реагирует на токи нагрузки, токи внешних коротких замыканий и токи асинхронных качаний в электросистеме?

80. В каком токовом режиме работы защищаемого объекта ток небаланса будет иметь максимальное значение?

81. Каково быстродействие дифференциальной защиты трансформаторов?

82. Из-за чего возникают составляющие тока небаланса, циркулирующего в измерительной части дифференциальной продольной защиты реальных современных трансформаторов?

83. В каких цепях и элементах измерительной части протекает ток небаланса дифференциальной защиты силовых трансформаторов?

84. Какие требования предъявляются к трансформаторам тока в устройствах релейной защиты?

85. Как определить однополярные выводы обмоток трансформатора?

86. С какой целью снимаются вольт-амперные характеристики трансформаторов тока?

87. К чему может привести включение в схемы защиты трансформатора тока с неправильно обозначенной полярностью выводов обмоток?

88. Каково назначение нейтрального провода в схеме полной звезды?

89. Что такое коэффициент схемы и почему его нужно учитывать при определении тока срабатывания реле?

90. Какие схемы соединения обмоток трансформаторов тока используются в защите от многофазных КЗ?

91. Назовите особенности выполнения дифференциальных защит шин?

92. Что входит в зону срабатывания дифференциальной защиты шин?

93. Как действует дифференциальная защита шин при возникновении обрыва?

94. Должна ли срабатывать дифференциальная защита шин при внешних коротких замыканиях?

95. Что необходимо использовать для повышения чувствительности дифференциальной защиты шин?

96. Назовите отличия между дифференциальной защитой шин на  $U = 35\text{kV}$  и дифференциальной защитой шин на  $U = 6-10\text{kV}$ .

97. В каких случаях происходит ускорение срабатывания дифференциальной защиты шин?

98. Схемы организации ЛЗШ?

99. Поведение ЛЗШ при внешнем КЗ?

100. Работа ЛЗШ при КЗ на шинах?

101. Надежность ЛЗШ?

102. Недостатки ЛЗШ?

103. Какие требования предъявляются к устройствам АПВ?

104. Для чего АПВ выполняется с выдержкой времени?

105. Как выбираются уставки УАПВ?

106. Зачем в формуле расчета тока срабатывания измерительного органа защиты используется коэффициент схемы?

107. Какие параметры используются в качестве уставок УАПВ?
108. Для каких линий предпочтительно использовать устройства АПВ?
109. Сколько повторных включений обеспечивают устройства АПВ воздушных ЛЭП?
110. Что является логической посылкой для начала работы схемы АПВ в реальных схемах управления выключателями присоединений, обеспечиваемых этой автоматикой; по каким условиям состояния схемы
111. Какие требования предъявляются к устройствам АПВ сборных шин?
112. Почему УАПВ сборных шин должно предусматривать блокировку при срабатывании газовой защиты?
113. Почему на двухтрансформаторных подстанциях можно обойтись без АПВ сборных шин?
114. За счет чего достигается повышения быстродействия УАПВ шин по сравнению с УАПВ линий электропередачи, всегда ли может наблюдаться такое соотношение?
115. Какие требования предъявляются к устройствам АВР?
116. В чем преимущества и недостатки схем электроснабжения с радиальным питанием?
117. Почему включение питания по резервной цепи осуществляется только после отключения выключателя рабочей цепи?
118. Допускается ли срабатывание УАВР, запускающегося только по признаку исчезновения напряжения и имеющего простейшую схему, при возникновении короткого замыкания на отходящем присоединении ближайшего выключателя рабочей цепи?

## **Методические указания по подготовке к экзамену**

Изучение дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов познакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

### **Вопросы к экзамену**

1. Назначение РЗ.
2. Характеристики токов и напряжений в ненормальных и аварийных режимах распределительных ЭС и основных электроприёмников.
3. Виды КЗ и их векторные диаграммы.
4. Симметричные КЗ в сверхпереходном и установившимся режимах.
5. Электромеханические реле и устройства РЗ.
6. Трансформаторы тока.
7. Схемы соединения трансформаторов тока и реле.
8. Трансформаторы напряжения.
9. Схемы соединения трансформаторов напряжения и реле.
10. Вторичные реле прямого действия. Вторичные реле косвенного действия на постоянном оперативном токе.
11. Индукционные измерительные реле и реле направления мощности.
12. Реле времени.

13. Промежуточные реле.
14. Указательные реле.
15. Реакторы и трансреакторы.
16. Магнитные усилители и насыщающиеся трансформаторы тока.
17. Системы, схемы и устройства оперативного тока.
18. Принципы построения и основные типы релейных защит.
19. Принцип построения максимальной токовой защиты.
20. Принцип построения токовой отсечки.
21. Принцип построения максимальной направленной токовой защиты.
22. Защиту предохранителями и автоматическими воздушными выключателями.
23. Защиту воздушных и кабельных ЛЭП.
24. Принцип построения дифференциальной токовой защиты.
25. Продольную дифференциальную защиту линий и её особенности.
26. Поперечную дифференциальную токовую защиту.
27. Принцип действия, виды и характеристики дистанционной защиты.
28. Назначение и основные виды защиты трансформаторов.
29. Газовую защиту трансформаторов.
30. Виды повреждений электродвигателей и виды их защит.
31. Фазоповоротные и частотно-зависимые схемы.
32. Фильтры симметричных составляющих тока и напряжения.
33. Измерительные реле на основе полупроводниковой неинтегральной элементной базы.
34. Измерительные реле на основе полупроводниковой интегральной элементной базы.
35. Измерительные реле на основе микропроцессорной элементной базы.
36. Управляемые предохранители.
37. Способы повышения чувствительности дифференциальной защиты.
38. Дистанционная защита на направленном реле полного сопротивления с эллиптическими характеристиками.
39. Каскадное действие направленных токовых защит.
40. Характеристики аппаратов резервного электрооборудования.
41. Устройства автоматического управления.
42. Устройства автоматического регулирования.
43. Характеристики регулирования.
44. Назначение АПВ.

45. Классификацию устройств АПВ.
46. Основные требования к схемам АПВ.
47. Устройства АПВ однократно действия.
48. Особенности выполнения схем АПВ на телемеханизированных подстанциях.
49. Особенности выполнения схем АПВ на воздушных выключателях.
50. Принцип выполнения схем АПВ на переменном токе.
51. Схему двукратного АПВ для масляных выключателей.
52. Несинхронное АПВ.
53. Быстродействующее АПВ.
54. АПВ с ожиданием синхронизма.
55. Назначение АВР.
56. Основные требования к схемам АВР.
57. Автоматическое включение резерва на подстанциях.
58. Автоматическое включение резервных трансформаторов на подстанциях.
59. Автоматическое регулирование напряжения в электрических сетях.
60. Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов.
61. Принцип ускорения защиты после АПВ.
62. Принцип ускорения защиты до АПВ.
63. Сетевые АВР.
64. Автоматическое включение синхронных генераторов на параллельную работу.
65. Автоматическое регулирование напряжения на шинах подстанции.
66. Принципы автоматического регулирования частоты в энергосистеме.
67. Принципы автоматического регулирования перетоков мощности.
68. Основы диспетчерского управления.
69. Принципы автоматической частотной разгрузки.
70. Назначение и классификацию устройств противоаварийной автоматики.
71. Производить расчёты токов КЗ в сверхпереходном и установившемся режимах.
72. Определять погрешности трансформаторов тока и напряжения.
73. Определять ток срабатывания максимальных токовых защит.
74. Определять зону действия и ток срабатывания токовых отсечек.
75. Рассчитывать степень селективности максимальной токовой защиты.
76. Рассчитывать ток срабатывания плавкой вставки предохранителя.

77. Рассчитывать ток срабатывания расцепителя автоматического воздушного выключателя.
78. Определять уставку теплового реле тепловой защиты электродвигателя.
79. Выбирать аппараты защиты по рассчитанным параметрам.
80. Выбирать аппараты защиты исходя из технической и экономической целесообразности.
81. Выбирать трансформаторы тока в зависимости от рассчитанных токов КЗ.
82. Выбирать и реализовывать схемы и устройства оперативного тока в зависимости от применяемых типов и органов РЗ.
83. Выбирать способы зарядки аккумуляторов и конденсаторов системы оперативного тока.
84. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с ограниченно зависимой выдержкой времени в системе координат: ток - время.
85. Определять ступень селективности максимальных токовых защит.
86. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с токовыми отсечками.
87. Рассчитывать токи небаланса дифференциальной токовой защиты.
88. Реализовывать схемное решение продольной дифференциальной защиты линии.
89. Реализовывать схемное решение поперечной дифференциальной защиты линии.
90. Реализовывать схемы дистанционной защиты.
91. Определять зону действия максимальных направленных токовых защит.
92. Определять токи небаланса дифференциальной токовой защиты трансформатора.
93. Строить и анализировать векторные диаграммы всех видов КЗ и ненормальных режимов.
94. Применять и реализовывать автоматизированное управление схем питания потребителей и электроприёмников.
95. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с независимой и зависимой выдержкой времени в системе координат: ток - время.
96. Составлять алгоритм селективности действия релейной защиты электросети, оснащённой максимальной направленной токовой защитой.
97. Реализовывать схемное решение дистанционной защиты с тремя реле сопротивления.

98. Реализовывать схемное решение дистанционной защиты с одним реле сопротивления.
99. Рассчитывать и строить дифференциальную защиту трансформатора.
100. Реализовывать схемное решение дифференциальной защиты трансформатора.
101. Производить расчёты токов КЗ в сверхпереходном и установившемся режимах.
102. Определять погрешности трансформаторов тока и напряжения.
103. Определять ток срабатывания максимальных токовых защит.
104. Определять зону действия и ток срабатывания токовых отсечек.
105. Рассчитывать степень селективности максимальной токовой защиты.
106. Рассчитывать ток срабатывания плавкой вставки предохранителя.
107. Рассчитывать ток срабатывания расцепителя автоматического воздушного выключателя.
108. Определять уставку теплового реле тепловой защиты электродвигателя.
109. Выбирать аппараты защиты по рассчитанным параметрам.
110. Выбирать аппараты защиты исходя из технической и экономической целесообразности.
111. Выбирать трансформаторы тока в зависимости от рассчитанных токов КЗ.
112. Выбирать и реализовывать схемы и устройства оперативного тока в зависимости от применяемых типов и органов РЗ.
113. Выбирать способы зарядки аккумуляторов и конденсаторов системы оперативного тока.
114. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с ограниченно зависимой выдержкой времени в системе координат: ток - время.
115. Определять степень селективности максимальных токовых защит.
116. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с токовыми отсечками.
117. Рассчитывать токи небаланса дифференциальной токовой защиты.
118. Реализовывать схемное решение продольной дифференциальной защиты линии.
119. Реализовывать схемное решение поперечной дифференциальной защиты линии.
120. Реализовывать схемы дистанционной защиты.

121. Выбирать методы и характеристики автоматического регулирования параметров энергосистемы.
122. Рассчитывать статические и динамические коэффициенты регулирования.
123. Анализировать работу схемы АПВ однократного действия.
124. Анализировать работу схемы двукратного АПВ для масляных выключателей.
125. Выбирать принципы осуществления АВР при разных схемах питания потребителей.
126. Рассчитывать уставки АВР.
127. Анализировать схемы АВР различного назначения.
128. Анализировать схемы устройств автоматического включения генераторов на параллельную работу.
129. Выбирать способы регулирования частоты в энергосистеме.
130. Анализировать работу схем автоматической частотной разгрузки.
131. Определять зону действия максимальных направленных токовых защит.
132. Определять токи небаланса дифференциальной токовой защиты трансформатора.
133. Строить и анализировать векторные диаграммы всех видов КЗ и ненормальных режимов.
134. Применять и реализовывать автоматизированное управление схем пит器ия потребителей и электроприёмников.
135. Согласовывать характеристики максимальных токовых защит с независимой и зависимой выдержкой времени в системе координат: ток - время.
136. Составлять алгоритм селективности действия релейной защиты электросети, оснащённой максимальной направленной токовой защитой.
137. Реализовывать схемное решение дистанционной защиты с тремя реле сопротивления.
138. Реализовывать схемное решение дистанционной защиты с одним реле сопротивления.
139. Рассчитывать и строить дифференциальную защиту трансформатора.
140. Реализовывать схемное решение дифференциальной защиты трансформатора.
141. Реализовывать схемы ускорения защиты после АПВ.
142. Реализовывать схемы ускорения защиты до АПВ.
143. Реализовывать схемы АВР на постоянном оперативном токе.
144. Реализовывать схемы АВР на переменном оперативном токе.

145. Применять и реализовывать автоматизированное управление схем питания потребителей и электроприёмников.

146. Реализовывать схемы автоматического включения резерва линий и отдельных энергообъектов.

147. Составлять и формулировать требования к устройствам противоаварийной автоматики.

148. Составлять алгоритм автоматической частотной разгрузки.

149. Реализовывать схему автоматического ограничение снижения напряжения включением устройства продольной емкостной компенсации линии электропередачи.

150. Реализовывать схему автоматического ограничения повышения напряжения включением шунтирующего реактора на конце линии электропередачи.

151. Навыками автоматизированного управления состояниям схем питания потребителей и электроприёмников.

152. Навыками регулирования частоты в энергосистеме

153. Навыками введения уставок в микропроцессорные и компьютерные устройства и органы систем автоматики.

154. Навыками работы с испытательными установками для проверки простых защит.

155. Навыками работы с испытательными установками для проверки сложных защит.

156. Навыками сбора оперативной информации о работе электроэнергетических систем.

157. Навыками оперативных переключений в системах автоматики.

158. Навыками применения устройств автоматического управления и регулирования.

159. Навыками выбора устройств автоматики.

160. Навыками диспетчерского управления.

161. Автоматизированным управлением состояниями схем питания потребителей и электроприёмников.

162. Порядком расчета защиты автоматическими выключателями.

163. Порядком расчета защиты предохранителями.

164. Навыками введения уставок в микропроцессорные и компьютерные устройства и органы РЗА.

165. Методами определения и нейтрализации токов небаланса дифференциальной токовой защиты линий электропередач.

166. Навыками определения места КЗ с помощью органов дистанционной защиты.
167. Способами защиты асинхронных электродвигателей от перегрузки и неполнофазного режима.
168. Способами защиты синхронных электродвигателей от несинхронной работы.
169. Методами включения синхронных генераторов в параллельную работу.
170. Навыками диспетчерского управления
171. Методом выбора параметров аппаратов.
172. Схемными решениями максимальных токовых защит.
173. Принципами размещения максимальных токовых защит.
174. Принципами размещения токовых отсечек.
175. Схемными решениями токовых отсечек.
176. Принципами размещения максимальных направленных токовых защит.
177. Схемными решениями максимальных направленных токовых защит.
178. Методами расчёта токов короткого замыкания на всех участках радиальной линии электропередачи.
179. Методами защиты воздушных и кабельных ЛЭП.
180. Методами составления схем замещения участков электросети.
181. Навыками введения уставок в реле тока.
182. Навыками введения уставок в реле напряжения.
183. Навыками введения уставок в реле времени.
184. Навыками выбора трансформаторов тока для защиты линий электропередач.
185. Методами определения селективности действия токовой отсечки линий с односторонним и двухсторонним питанием.
186. Способами построения дифференциальной защиты линий электропередач.
187. Навыками сборки схем дифференциальной токовой защиты.
188. Способами дифференциальной защиты трансформаторов от короткого замыкания.
189. Способами защиты трансформаторов от длительной перегрузки.
190. Способами применения газовой защиты трансформаторов.
191. Методикой определения времени автоматического возврата схемы АПВ в исходное положение.
192. Автоматизированным управлением состояниями схем питания потребителей и электроприёмников.
193. Порядком расчета защиты автоматическими выключателями.
194. Порядком расчета защиты предохранителями.

195. Навыками введения уставок в микропроцессорные и компьютерные устройства и органы РЗА.

196. Методами определения и нейтрализации токов небаланса дифференциальной токовой защиты линий электропередач.

197. Навыками определения места КЗ с помощью органов дистанционной защиты.

198. Способами защиты асинхронных электродвигателей от перегрузки и неполнофазного режима.

199. Способами защиты синхронных электродвигателей от несинхронной работы.

200. Методами включения синхронных генераторов в параллельную работу.

201. Навыками диспетчерского управления.

202. Схемными решениями максимальных токовых защит.

203. Принципами размещения максимальных токовых защит.

204. Принципами размещения токовых отсечек.

205. Схемными решениями токовых отсечек.

206. Принципами размещения максимальных направленных токовых защит.

207. Схемными решениями максимальных направленных токовых защит.

208. Методами расчёта токов короткого замыкания на всех участках радиальной линии электропередачи.

209. Методами защиты воздушных и кабельных ЛЭП.

210. Методами составления схем замещения участков электросети.

211. Навыками введения уставок в реле тока.

212. Навыками введения уставок в реле напряжения.

213. Навыками введения уставок в реле времени.

214. Навыками выбора трансформаторов тока для защиты линий электропередач.

215. Методами определения селективности действия токовой отсечки линий с односторонним и двухсторонним питанием.

216. Способами построения дифференциальной защиты линий электропередач.

217. Навыками сборки схем дифференциальной токовой защиты.

218. Способами дифференциальной защиты трансформаторов от короткого замыкания.

219. Способами защиты трансформаторов от длительной перегрузки.

220. Способами применения газовой защиты трансформаторов.

221. Методом выбора параметров аппаратов.

## ***Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины***

### ***Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины***

#### ***Перечень основной литературы:***

1. Куксин, А. В. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : учебное пособие / А. В. Куксин. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2020. — 215 с. — ISBN 978-5-4497-0531-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/94929.html>
2. Горемыкин, С. А. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : практикум / С. А. Горемыкин, Н. В. Ситников. — Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2021. — 71 с. — ISBN 978-5-7731-0933-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/111504.html>
3. Агафонов, А. И. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное пособие / А. И. Агафонов, Т. Ю. Бrostилова, Н. Б. Джазовский. — 2-е изд. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 300 с. — ISBN 978-5-9729-0505-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98355.html>

#### ***Перечень дополнительной литературы:***

1. Богданов, А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах : учебное пособие / А.В. Богданов, А.В. Бондарев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет, Кумертауский филиал ОГУ. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 82 с. : схем., табл., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 8-987-903550-43-2 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481747>
2. Соловьев, А. Л. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ : учебное пособие / А. Л. Соловьев, М. А. Шабад ; под редакцией А. В. Беляев. — Санкт-Петербург : Политехника, 2016. — 176 с. — ISBN 978-5-7325-1100-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/59516.html>

***Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине***

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».
3. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

***Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks