

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Алтайский государственный
технический университет им. И. И. Ползунова

В. И. ПОЛИЩУК

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

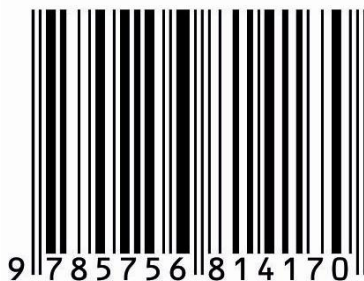
Учебное пособие

ПОЛНЫЙ КУРС

Рекомендовано

*Алтайским государственным техническим университетом им. И.И. Ползунова
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
12.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»*

ISBN 978-5-7568-1417-0



АлтГТУ
Барнаул • 2022

УДК 621.316.925

Полищук В. И. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем : уч. пособие / В. И. Полищук ; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : АлтГТУ, 2022. – 91 с., ил. – URL : http://elib.altstu.ru/uploads/open_mat/2022/Polishuk_RZiAES_up.pdf – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7568-1417-0

Дан полный курс по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», состоящий из теоретического материала в виде курса лекций и практического материала в виде компьютерного лабораторного практикума. В пособии приведены сведения о принципах выполнения и алгоритмах функционирования основных устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем. Приводится информация по использованию устройств релейной защиты в электроэнергетических системах. Изложены принципы действия и выполнения основных видов системной автоматики. В практической части изложено методическое руководство по выполнению лабораторных работ.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной формы обучения.

Рецензенты:

Гольштейн Г. В. – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация электроэнергетических систем» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»;

Лукутин Б. В. – доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Учебное пособие

Минимальные системные требования Yandex (20.12.1) или Chrome (87.0.4280.141) и т. п.
Скорость подключения - не менее 5 Мб/с, Adobe Reader и т. п.

Дата подписания к использованию 12.09.2022. Объем издания – 4 Мб.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, <https://www.altstu.ru>.

ISBN 978-5-7568-1417-0

[вперед \(содержание\)](#)

© Полищук В. И., 2022
© Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

КУРС ЛЕКЦИЙ.....	5
1 ВВЕДЕНИЕ	5
1.1 Назначение релейной защиты и автоматики.....	5
1.2 Требования к релейной защите.....	6
1.3 Принципы построения релейной защиты электроэнергетических систем	7
1.4 Алгоритмы функционирования релейной защиты электроэнергетических систем	8
2 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	10
2.1. Назначение.....	10
2.2 Особенности работы трансформаторов тока в схемах релейной защиты.....	10
2.3 Трансформаторы напряжения в схемах релейной защиты.....	13
3 ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ	17
3.1 Выбор видов релейной защиты с относительной селективностью.....	17
3.2 Максимальные токовые защиты.....	17
3.3 Схема включения трансформаторов тока и токовых реле.....	22
3.4 Пример выполнения схемы максимальной токовой защиты	24
3.5 Расчет параметров максимальной токовой защиты	25
4 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ. ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА	29
4.1 Принцип действия токовой отсечки.....	29
4.2 Токовые ступенчатые защиты	30
4.3 Пример выполнения схемы токовой ступенчатой защиты.....	31
5 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ	33
5.1 Варианты выполнения реле мощности	33
5.2 Варианты выполнения реле мощности	33
5.3 Расчет параметров.....	36
5.4 Схемы максимальных токовых направленных защит	38
6 ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА.....	40
6.1 Принцип действия.....	40
6.2 Характеристики измерительных органов дистанционной защиты.....	41
6.3 Выполнение измерительных органов дистанционной защиты	43
6.4 Структурная схема дистанционной защиты.....	45

6.5 Принципы выполнения блокировки от качаний.....	46
6.6 Расчет параметров срабатывания дистанционной защиты.....	46
7 ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С АБСОЛЮТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ	49
7.1 Продольная дифференциальная защита	49
7.2 Поперечная дифференциальная защита.....	50
7.3 Дифференциально-фазная высокочастотная защита.....	53
8 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	56
8.1 Автоматическое повторное включение (АПВ)	56
8.2. Основные требования к схемам АПВ	57
8.3. Согласование работы устройств АПВ и релейной защиты	57
8.4. Алгоритм работы схемы АПВ однократного действия с пуском от несоответствия положения ключа управления и выключателя.....	59
8.5 АПВ на линиях с двухсторонним питанием	59
8.6 Автоматическое включение резерва (АВР).....	62
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	66
Охрана труда в лаборатории	66
Лабораторная работа №1. Токовые ступенчатые защиты радиальной сети	67
Лабораторная работа №2. Максимальные токовые защиты в кольцевых сетях с односторонним питанием.....	74
Лабораторная работа №3. Поперечная дифференциальная защита линий	82
Лабораторная работа №4. Автоматическое повторное включение линий.....	87
Список использованных источников	91

КУРС ЛЕКЦИЙ

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Назначение релейной защиты и автоматики

Энергетическая система представляет собой сложную многозвенную техническую систему, предназначенную для производства, распределения и потребления электроэнергии. Процессы, происходящие в энергосистеме, отличаются быстротой, взаимосвязанностью, единством процессов производства, распределения и потребления электроэнергии. Управление ими без применения специальных технических средств, называемых средствами автоматического управления, в большинстве случаев оказывается невозможным.

Условно, все устройства автоматики по своему назначению и области применения можно разделить на следующие две большие группы: местную и системную технологическую автоматику, местную и системную противоаварийную автоматику.

Технологическая автоматика обеспечивает автоматическое управление в нормальном режиме:

- пуск блоков турбина-генератор и включение на параллельную работу синхронных генераторов;
- автоматическое регулирование напряжения и реактивной мощности на шинах электростанции;
- автоматическое регулирование частоты и обеспечения режима заданной нагрузки электростанции;
- оптимальное распределение электрической нагрузки между блоками;
- регулирование напряжения в распределительной сети;
- регулирование частоты и перетоков мощности и т.п.

Назначением противоаварийной автоматики является предотвращение или наиболее эффективная ликвидация последствий аварий:

- релейная защита электрооборудования от коротких замыканий и ненормальных режимов;
- автоматическое повторное включение;
- автоматическое включение резерва;
- автоматическая частотная разгрузка;
- автоматическая ликвидация асинхронного режима.
- автоматика предотвращения нарушения устойчивости и т.д.

Из перечисленных видов устройств автоматики особо выделяется релейная защита, изучающая поведение электроэнергетической системы и ее элементов в режимах глубоких возмущающих воздействий и скачкообразных изменений электрических параметров. Эти возмущения вызываются различного рода короткими замыканиями, которых могут возникнуть по причинам:

- пробоя или перекрытия изоляторов линий электропередач в случае грозových перенапряжений или при их загрязнении;
- обрыва проводов или грозозащитных тросов из-за обледенения и вибраций;
- механических повреждений опор, поломке изоляторов разъединителей, схлестывании проводов;
- ошибочного действия оперативного персонала;
- заводских дефектов оборудования и ряда других факторов.

Управление энергосистемой при нарушении ее нормальных режимов тесно связано с работой релейной защиты. Поэтому изложения материала целесообразно начать с рассмотрения этого вида автоматики.

Требование безаварийности и надежности энергоснабжения закладывается уже на стадии проектирования энергосистемы за счет оптимального выбора источника электроэнергии (уголь, газ, вода или другое), расположения электростанций, передачи мощности, учета характеристик нагрузок и перспектив их роста, способов регулирования напряжения и частоты, планированием режимов работы и т. п. И все же полностью исключить факт отказа оборудования из-за коротких замыканий нельзя.

На релейную защиту возлагаются следующие функции:

1. *Автоматическое выявление поврежденного элемента с последующей его локализацией.* Защита подает команду на отключение выключателей этого элемента, восстанавливая нормальные условия работы для неповрежденной части энергосистемы.

2. *Автоматическое выявление ненормального режима с принятием мер для его устранения.* Нарушения нормального режима в первую очередь вызываются различного рода перегрузками, которые не требуют немедленного отключения. Поэтому защита действует на разгрузку оборудования или выдает сообщение дежурному персоналу.

В качестве примера на рисунке 1 представлено микропроцессорное реле, выпускаемое инженерно-производственной фирмой «Реон-Техно», а на рисунке 2 многофункциональное устройство РЗА НТЦ «Механотроника».



Рисунок 1 – Микропроцессорное реле, выпускаемое ИПФ «Реон-Техно»



Рисунок 2 – Многофункциональное устройство РЗА НТЦ «Механотроника»

1.2 Требования к релейной защите

К релейной защите предъявляются следующие основные требования:

– *селективность*: релейная защита должна определять поврежденный элемент и подавать команду на локализацию (отключение) этого элемента выключателями, ближайшими к месту повреждения. Например, для сети, изображенной на рисунке 3, короткое замыкание в точке K_1 должно отключиться выключателями Q_6 и Q_7 , а короткое замыкание в точке K_2 должно ликвидироваться при помощи выключателей Q_1 и Q_3 ;

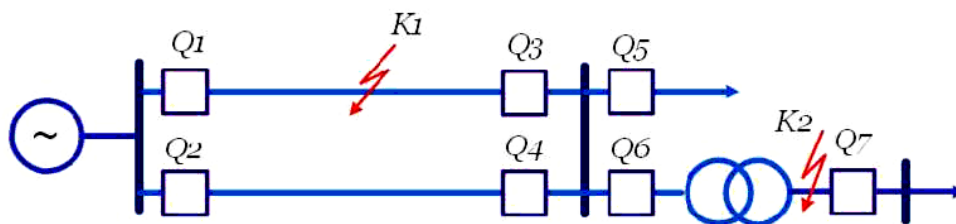


Рисунок 3 – Иллюстрация селективного действия защит

– *быстродействие*: быстрое отключение коротких замыканий позволяет уменьшить размер повреждения оборудования за счет термического и динамического действия токов, снизить влияние понижения напряжения на работу потребителей, повысить вероятность сохранения устойчивости параллельной работы энергосистемы. Защита считается быстродействующей при времени ее срабатывания до 0,1 сек;

– *надежность*: защита должна обладать аппаратной и функциональной надежностью. Аппаратная надежность обеспечивается надежностью ее отдельных компонентов, грамотными схемными реализациями и условиями эксплуатации. Функциональная надежность достигается за счет совершенства алгоритма функционирования защиты;

– *резервирование*: релейная защита объекта в случае отказа основных защит или защит смежных присоединений должна обеспечивать ликвидацию коротких замыканий. Считается, что защита обеспечивает функции ближнего резервирования, если она срабатывает при отказе собственных защит, и дальнего резервирования - при несрабатывании защит или выключателей смежных элементов;

– *чувствительность*: защита должна четко фиксировать все виды повреждений, предусмотренные алгоритмом ее функционирования.

Наряду с изложенными выше требованиями при выборе и проектировании устройств релейной защиты следует принимать во внимание ряд дополнительных факторов:

1. Для повышения надежности функционирования не следует учитывать маловероятные режимы работы системы и маловероятные виды повреждений, если это приводит к заметному усложнению защит.

2. Выбор конкретного типа защиты должна проводиться с учетом экономической эффективности, включающую абсолютную стоимость, стоимость монтажа и наладки, эксплуатационные расходы, возможный ущерб от недовыработки промышленной продукции и снижения ее качества в случае несрабатывания защиты.

1.3 Принципы построения релейной защиты электроэнергетических систем

Любую схему релейной защиты можно представить в виде обобщенной схемы, приведенной на рисунке 4.

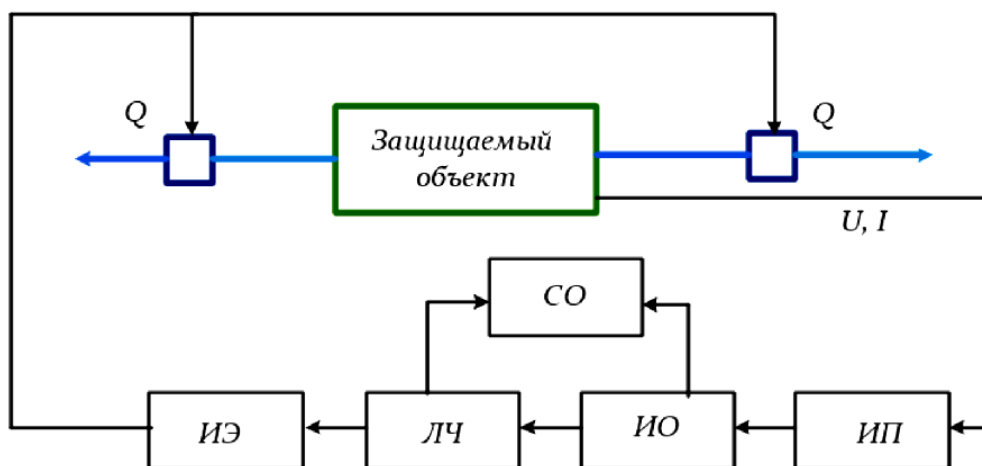


Рисунок 4 – Структурная схема релейной защиты

Информация о состоянии объекта, обычно в качестве контролируемых параметров выступает ток и напряжение, преобразуется при помощи измерительных преобразователей ИП к виду, удобному для дальнейшей обработки и безопасному для обслуживающего персонала. В качестве измерительных преобразователей применяются трансформаторы тока и напряжения.

Измерительные органы ИО, иногда их называют пусковыми, непрерывно контролируют состояние и режим работы защищаемого объекта.

Логическая часть ЛЧ защиты обрабатывает сведения, поступившие с измерительных элементов, и формирует управляющее воздействие через исполнительные элементы ИЭ на коммутационную аппаратуру, звуковую и световую сигнализацию. Сигнальный орган СО фиксирует срабатывание защиты в целом или ее отдельных блоков.

1.4 Алгоритмы функционирования релейной защиты электроэнергетических систем

По способам обеспечения селективности все защиты можно разделить на две группы:

- защиты с относительной селективностью;
- защиты с абсолютной селективностью.

Защиты с относительной селективностью могут работать как при коротких замыканиях на защищаемом объекте, так и при повреждениях на смежных присоединениях в режиме резервирования. К таким защитам относятся токовые защиты, защиты напряжения, дистанционные защиты.

Для иллюстрации принципов работы защит этого типа рассмотрим в качестве защищаемого объекта линию с односторонним питанием рисунок 5.

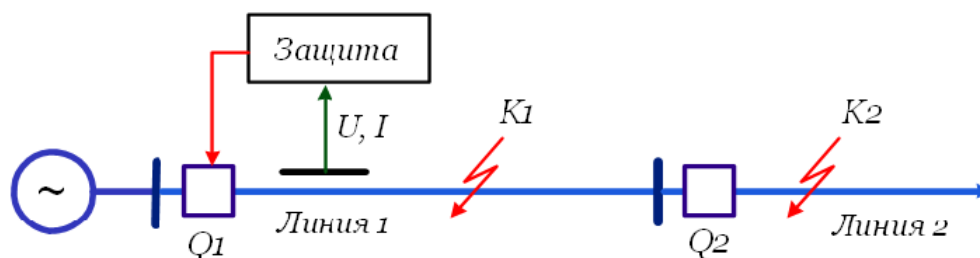


Рисунок 5 – Схема защиты одиночной линии

Токовые защиты основаны на фиксации увеличения тока при возникновении короткого замыкания.

Защиты напряжения учитывают уменьшение напряжения при коротком замыкании.

Дистанционные защиты фиксируют изменение сопротивления.

Если учесть, что $z_{лк} = z_0 l_k$, где z_0 – сопротивление одного км линии, а l_k – расстояние в км до места короткого замыкания, то сопротивление $z_{лк}$ пропорционально расстоянию до места короткого замыкания $z_{лк} \sim l_k$, и, следовательно, дистанционный принцип позволяет определить место возникновения короткого замыкания.

Защиты с относительной селективностью при нормальных условиях работы действуют на отключение выключателей поврежденной линии. Например, при коротком замыкании в точке K_1 рисунок 12 защита действует на выключатель Q_1 . При коротком замыкании в точке K_2 должна сработать защита Линии 2, однако при отказе этой защиты или выключателя Q_2 должна сработать защита Линии 1 и отключить короткое замыкание выключателем Q_1 .

Защиты с абсолютной селективностью работают только при коротком замыкании на защищаемом участке. К таким защитам относятся дифференциальные и дифференциально-фазные защиты.

Принцип действия дифференциальной защиты основан на сравнении токов на входе и выходе защищаемого объекта.

Рассмотрим функционирование дифференциальной защиты на примере линии с двухсторонним питанием рисунок 6.

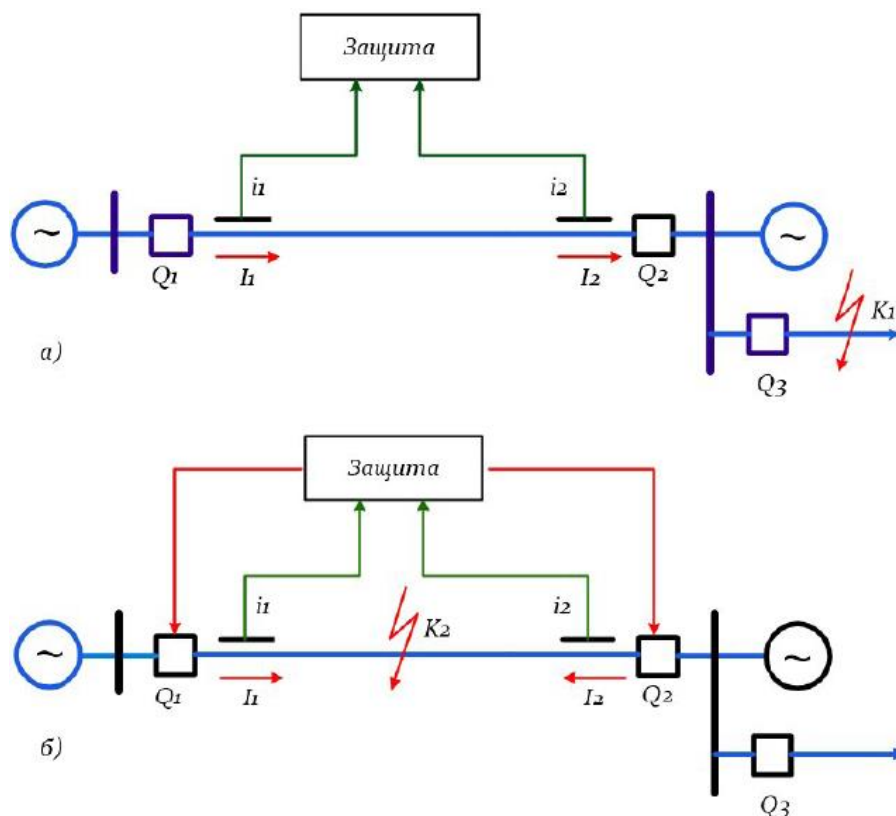


Рисунок 6 – Принцип действия дифференциальной защиты:

а) – короткое замыкание вне зоны защиты; б) – короткое замыкание в зоне действия защиты

В нормальном режиме и в режиме внешнего короткого замыкания в точке K_1 , выполняется соотношение $I_1 = I_2 = I$. В защите эти токи сравниваются между собой, и при их равенстве защита не работает.

При возникновении короткого замыкания в зоне действия защиты, например в точке K_2 , в случае одностороннего питания вектор тока I_2 становится равным нулю, равенство токов нарушается, и защита сработает. При наличии двухстороннего питания значение тока $I_2 > 0$, и в принципе модули токов могут оказаться равными, но векторы имеют разные знаки, и защита также будет работать.

Принцип дифференциально-фазной защиты основан на сравнении фаз токов на входе и выходе объекта.

2 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1. Назначение

Измерительные преобразователи являются общими элементами для всех схем релейной защиты. Их основное назначение изолировать цепи высокого напряжения от вторичных цепей защиты и преобразовать входные величины в величины, удобные для измерений. К наиболее распространенным относятся электромагнитные трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Трансформаторы тока рассчитываются на получение вторичных токов величиной 5 А или 1 А, при помощи трансформаторов напряжения получают вторичные напряжения 100В или $100/\sqrt{3}$ В.

В качестве примера на рисунке 7,а,б показан внешний вид низковольтного кабельного и высоковольтного трансформаторов тока.

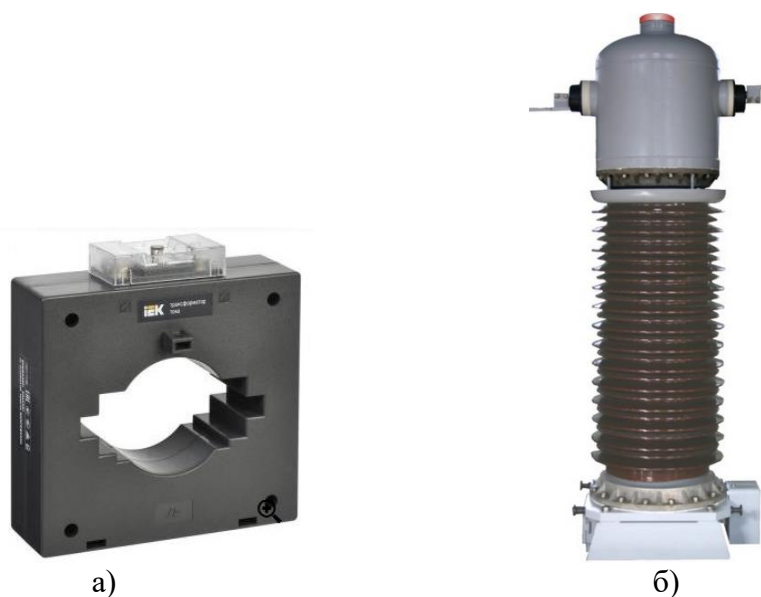


Рисунок 7 – Низковольтный – а) и высоковольтный – б) трансформаторы тока

2.2 Особенности работы трансформаторов тока в схемах релейной защиты

Конструктивно трансформатор тока представляет собой стальной сердечник с двумя обмотками: первичной w_1 и вторичной w_2 рисунок 8.

При протекании тока по первичной обмотке трансформатора тока создается магнитный поток, который наводит во вторичной обмотке, замкнутой на сопротивление нагрузки, ток I_2 . Для идеального трансформатора тока сумма намагничивающих сил обмоток равна нулю:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = 0,$$

отсюда

$$I_2 = -I_1 / (w_2 / w_1)$$

Отношение чисел витков обмоток называется витковым коэффициентом трансформации трансформатора тока:

$$n_B = w_2 / w_1$$

Отношение первичных и вторичных номинальных токов называется номинальным коэффициентом трансформации трансформатора тока.

$$n_{TT} = I_{1ном} / I_{2ном}$$

Из-за потерь в стали сердечника значения виткового и номинального коэффициентов трансформации трансформаторов тока различны. Для рассмотрения причин, вызывающих

эту разницу, обратимся к схеме замещения трансформатора тока рисунок 9.

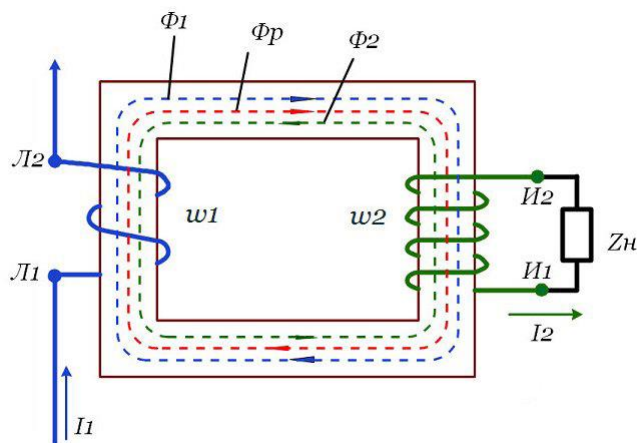


Рисунок 8 – Конструкция трансформатора тока

Первичный ток I_1 проходит сопротивление z_1 и далее разветвляется по двум параллельным ветвям. На нагрузку поступает вторичный ток I_2 , по ветви намагничивания замыкается ток $I_{\text{нам}} = I_2 - I_2$, называемый током намагничивания. Введение ветви намагничивания в схему замещения трансформатора тока позволяет учесть погрешности при реальном процессе трансформации.

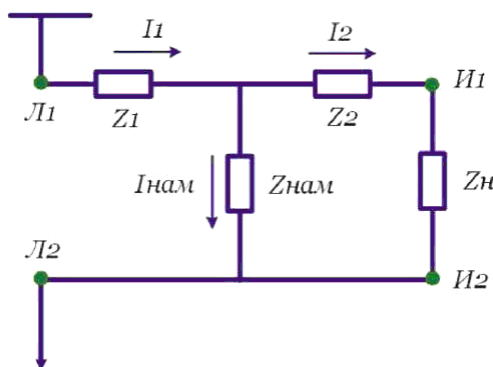


Рисунок 9 – Схема замещения трансформатора тока

Таким образом, соотношение первичного и вторичного токов имеет вид:

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{I}_1 - \bar{I}_{\text{нам}}}{n_{\text{ТТ}}},$$

то есть реальный трансформатор тока имеет погрешности.

Различают следующие виды погрешностей.

Токовая погрешность определяет разницу между измеренным модулем тока и его фактическим значением:

$$f_1 = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \cdot 100\%.$$

Фазовая погрешность определяет угол сдвига вторичного тока относительно первичного.

Из схемы замещения следует, что величина погрешности зависит от значения сопротивления ветви намагничивания $Z_{\text{нам}}$ и от его соотношения с сопротивлением нагрузки Z_H . Сопротивление намагничивания определяется конструкцией трансформатора тока, характеристикой стали сердечника и кратностью первичного тока. Увеличение первичного тока приводит к насыщению стали и уменьшению сопротивления $Z_{\text{нам}}$ нам, что приводит к росту

погрешности. Если увеличивать нагрузку при неизменном первичном токе, то также происходит увеличение погрешности.

Для примера в таблице 1 приведена классификация трансформаторов тока. Допустимые погрешности, приведенные в таблице, соответствуют нагрузкам вторичной обмотки не выше номинальных, и при вторичном токе, не превышающем 120 % номинального значения

Трансформаторы тока, предназначенные для питания схем релейной защиты, работают в режиме коротких замыканий или перегрузок оборудования, когда первичные токи значительно превышают номинальные. Такие условия работы связаны с увеличенным значением погрешностей. И хотя сердечники трансформаторов тока для устройств релейной защиты выполняют из высококачественной электротехнической стали, насыщающейся при больших кратностях тока, обязательным условием возможности использования трансформатора тока является его проверка на допустимую погрешность.

Таблица 1 – Классификация трансформаторов тока в зависимости от класса точности

Класс точности	Допустимая токовая погрешность, %	Допустимая угловая погрешность, мин.	Область применения
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 40	Учет электроэнергии
1,0	$\pm 1,0$	± 80	Щитовые приборы

Согласно нормативным требованиям, погрешность трансформаторов тока в режиме работы защиты не должна превышать 10 %. Рекомендуется следующий порядок выбора трансформаторов тока:

1. Определяется рабочий ток защищаемого объекта $I_{раб}$.
2. По найденному значению тока и номинальному напряжению выбирается трансформатор тока.
3. Определяется максимально возможное значение тока повреждения защищаемого объекта $I_{кmax}$.
4. Рассчитывается кратность тока короткого замыкания как отношение

$$k = \frac{I_{кmax}}{I_{раб}}.$$

5. На основании технической документации поставщика оборудования или справочных материалов и найденной кратности первичного тока определяется допустимая нагрузка $Z_{ндоп}$ для выбранного трансформатора тока.

6. Рассчитывается фактическая нагрузка трансформаторов тока $Z_{нфакт}$ и сравнивается с допустимой.

7. Если $Z_{ндоп} > Z_{нфакт}$ считается, что трансформатор тока удовлетворяет требованиям точности и его можно использовать для данной схемы защиты.

Если $Z_{ндоп} < Z_{нфакт}$, то необходимо принять меры для уменьшения нагрузки. В качестве таких мер можно назвать следующие:

- выбор трансформатора тока с увеличенным значением коэффициента трансформации;
- увеличение сечения контрольного кабеля;
- использование вместо одного трансформатора тока группу трансформаторов, соединенных последовательно.

Фактическую нагрузку трансформаторов тока можно рассчитать по выражению:

$$Z_{нфакт} = Z_p + Z_{пр} + Z_{каб} + Z_{пер},$$

где Z_p – сопротивление реле; $Z_{пр}$ – сопротивление приборов; $Z_{каб}$ – сопротивление контрольно-

го кабеля; $Z_{\text{пер}}$ – сопротивление переходных контактов.

Сложение полных и активных сопротивлений для упрощения расчетов допускается производить арифметически. В трехфазной сети необходимо дополнительно учесть схему соединения трансформаторов тока и вид короткого замыкания.

Трансформаторы тока, в отличие от силовых трансформаторов, работают в условиях, близких к режиму короткого замыкания вторичных выводов. При размыкании вторичной обмотки весь первичный ток переходит в ветвь намагничивания, и трансформатор тока переходит в режим глубокого насыщения, рисунок 10.

Режим насыщения сопровождается нагревом магнитопровода и возникновением опасных перенапряжений на вторичных зажимах, что недопустимо по условиям изоляции вторичных цепей.

С учетом сказанного работа трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой недопустима, а работа с закороченной является частным случаем нормальной работы. По условиям электробезопасности вторичные обмотки трансформаторов тока заземляются.

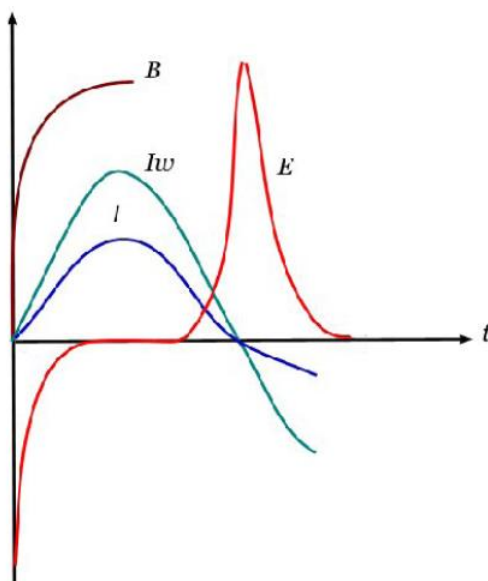


Рисунок 10 – Кривые изменение во времени тока I , ампервитков Iw , индукции B и ЭДС E у трансформатора тока с разомкнутой вторичной обмоткой

2.3 Трансформаторы напряжения в схемах релейной защиты

Трансформатор напряжения представляет собой сердечник, набранный из пластин электротехнической стали, с размещенными на нем первичной и вторичной обмотками рисунок 11.

Первичная обмотка, имеющая большое число витков (несколько тысяч), подключается параллельно силовой сети, к вторичной обмотке w_2 подключаются измерительные приборы, цепи защит и сигнализации. Преобразование напряжения U_1 до величины U_2 определяется соотношением витков первичной и вторичной обмоток:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Отношение чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации трансформатора напряжения:

$$n_{\text{тн}} = \frac{w_1}{w_2}$$

Трансформаторы напряжения выполняются в однофазном и трехфазном исполнении.

В зависимости от требуемой информации однофазные трансформаторы могут соединяться в различные схемы рисунок 12.

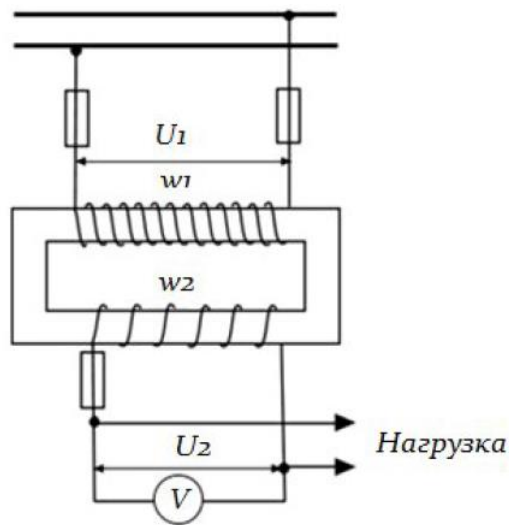


Рисунок 11 – Устройство трансформатора напряжения

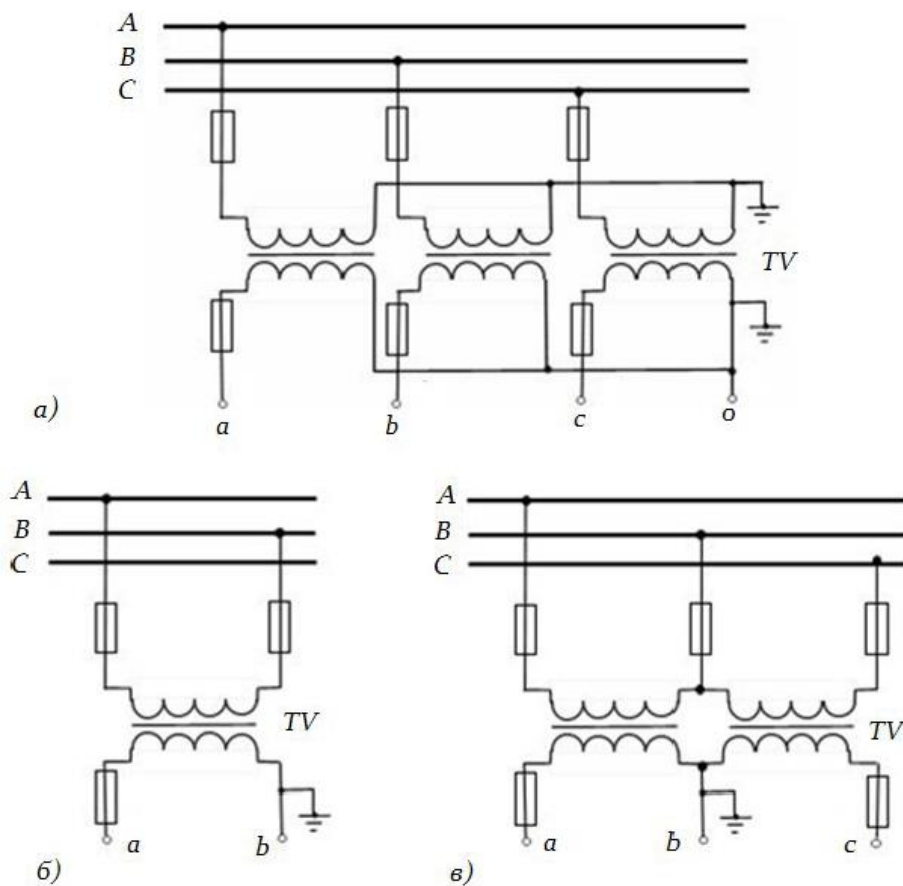


Рисунок 12 – Схемы соединения однофазных трансформаторов напряжения

Для получения одного междуфазного напряжения используется схема, представленная на рисунок 12,б; для получения двух или трех междуфазных напряжений применяется схема неполной звезды рисунок 12,с.

На рисунке 12,а приведено соединение трех трансформаторов напряжения в схему

звезды. Эта схема используется для получения информации о фазных или междуфазных напряжениях.

Для получения напряжения нулевой последовательности наряду с фазным и междуфазным применяются трансформаторы напряжения, имеющие две вторичные обмотки. Одна из вторичных обмоток соединяется в звезду, другая - в разомкнутый треугольник рисунок 13.

Вторичные обмотки трансформаторов напряжения обязательно заземляются для обеспечения безопасности персонала при попадании высокого напряжения во вторичные цепи. При соединении вторичной обмотки в звезду заземляется нулевая точка, в других случаях – один из фазных проводов.

Для защиты от коротких замыканий во все незаземленные вторичные цепи трансформаторов напряжения устанавливаются предохранители или автоматические выключатели.

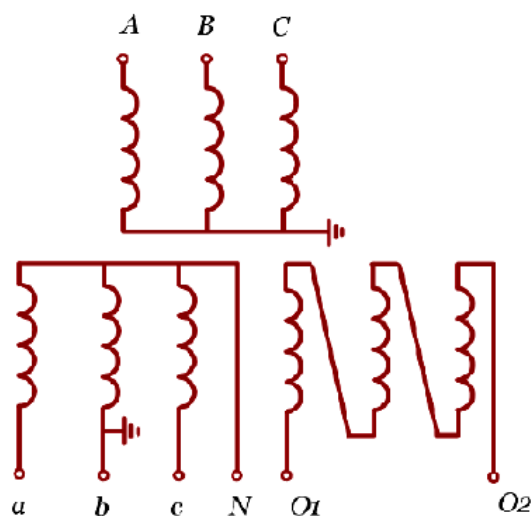


Рисунок 13 – Схема соединения обмоток трансформаторов с двумя вторичными обмотками

Трансформаторы напряжения имеют две погрешности:

1. *Погрешность по напряжению*, под которой понимается отклонение действительного значения коэффициента трансформации от его номинального значения.

2. *Погрешность по углу*. В зависимости от погрешностей трансформаторы напряжения подразделяются на классы точности. В таблице 2 приведена классификация трансформаторов в зависимости от класса точности.

Таблица 2 – Классификация трансформаторов в зависимости от класса точности

Класс точности	Допустимая погрешность по напряжению, %	Допустимая угловая погрешность, мин.	Область применения
0,2	$\pm 0,2$	± 10	Лабораторные измерения
0,5	$\pm 0,5$	± 20	Учет электроэнергии
1,0	$\pm 1,0$	± 40	Щитовые приборы
3,0	$\pm 3,0$	Не нормируется	Сигнализация, цепи защит

В зависимости от нагрузки один и тот же трансформатор напряжения может работать в разных классах точности.

Поэтому в паспортных данных указывается два значения мощности:

- номинальная, при которой трансформатор работает в гарантированном классе точности;
- предельная, при которой нагрев обмоток не выходит за допустимые пределы.

Кроме основных погрешностей на точность измерений оказывает влияние падение напряжения в контрольном кабеле. Величина потерь нормируется, так, для цепей релейной защиты она не должна превышать 3 %.

3 ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ

3.1 Выбор видов релейной защиты с относительной селективностью

К защитам с относительной селективностью относятся максимальные токовые защиты, максимальные токовые направленные защиты, токовые отсечки, защиты минимального или максимального напряжения, дистанционные защиты.

3.2 Максимальные токовые защиты

Принцип действия максимальной токовой защиты основан на фиксации увеличения тока при возникновении короткого замыкания. Структурно схему максимальной токовой защиты, выполняющей функции защиты линии, можно представить в следующем виде рисунок 14.

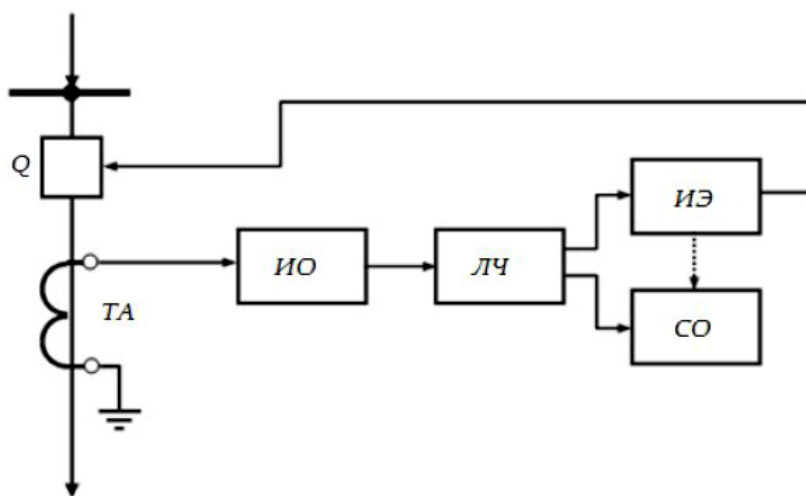


Рисунок 14 – Структурная схема максимальной токовой защиты

Ток защищаемого объекта контролируется измерительным (пусковым) органом защиты ИО. Пусковой орган срабатывает, если контролируемая величина тока $I_{\text{контр}}$ становится больше максимально возможного рабочего значения $I_{\text{рабтах}}$

$$I_{\text{контр}} > I_{\text{рабтах}}$$

Хотя любое короткое замыкание сопровождается увеличением тока, фиксация данного признака не позволяет сделать однозначного вывода о повреждении объекта.

Пусть линии сетевого участка, представленного на рисунке 15, оборудованы максимальной токовой защитой

В случае возникновения короткого замыкания на линии ЛЗ в точке К по условиям селективности должна быть подана команда на отключение выключателя Qз. Короткое замыкание приводит к протеканию тока повреждения по всем линиям, что вызывает срабатывание пусковых органов всех трех защит. Требование селективности обеспечивает логическая часть ЛЧ путем создания задержки на срабатывание, выбираемой по следующему правилу. Защита, наиболее удаленная от источника питания, должна иметь минимальное время срабатывания. По мере приближения к источнику питания выдержки времени защит увеличиваются на величину Δt , называемую ступенью селективности. Для приведенного примера:

$$t_3 \approx 0; t_2 = t_3 + \Delta t; t_1 = t_2 + \Delta t.$$

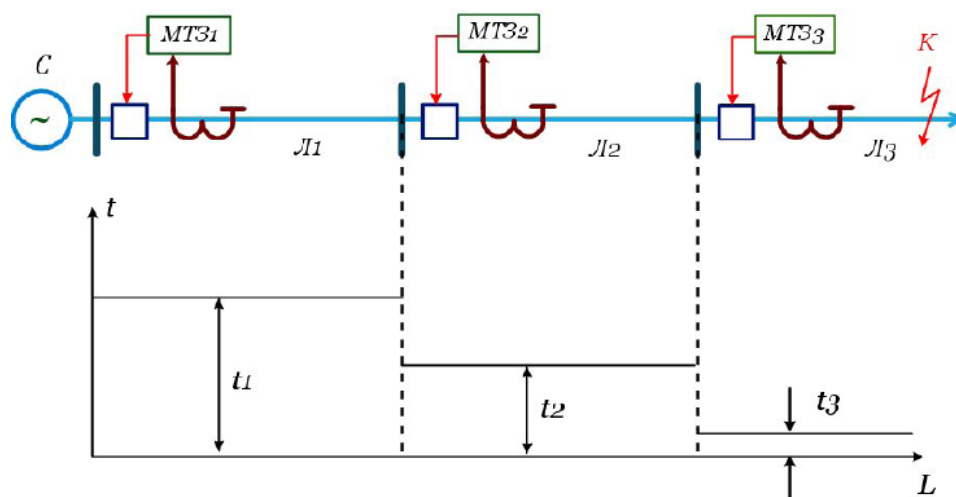


Рисунок 15 – Пример выбора выдержек времени

Степень селективности учитывает время отключения выключателей, погрешности элемента задержки на срабатывание. Обычно Δt принимается равной 0,4...0,6 сек. Исполнительный элемент ИЭ воспринимает сигнал логической части и формирует команду на отключение выключателя. Сигнальный орган СО фиксирует срабатывание защиты. Элементы максимальной токовой защиты – пусковой, логический, исполнительный, сигнальный выполняются на реле. Под термином «реле» понимается группа приборов автоматического управления, скачкообразно меняющих свое состояние при достижении входной величины определенного значения, то есть обладающих релейной характеристикой срабатывания рисунок 16.

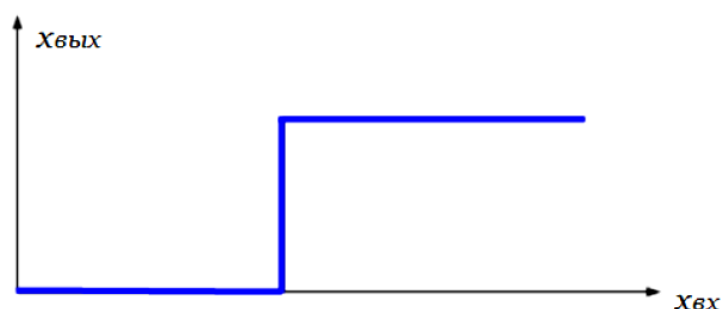


Рисунок 16 – Релейная характеристика срабатывания:
 $X_{вх}$ – входная величина; $X_{вых}$ – выходная величина

Реле могут выполняться на электромагнитном и индукционном принципах, на аналоговой или цифровой микроэлектронике.

Электромагнитные реле тока. Конструктивно реле представляет стальной сердечник 1, с размещенными на нем обмотками 2 рисунок 17. В зазоре между полюсами электромагнита размещен стальной подвижный якорь 3 с закрепленным на нем контактом 4. В исходном состоянии якорь удерживается за счет пружины 6 и упора 7. При протекании тока по обмотке реле создается электромагнитная сила

$$F_э = k \frac{I_p^2 w^2}{R_m^2},$$

где k – коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности конструктивного выполнения реле тока; I_p – ток в реле; w – число витков обмоток; R_m – сопротивление магнитной цепи.

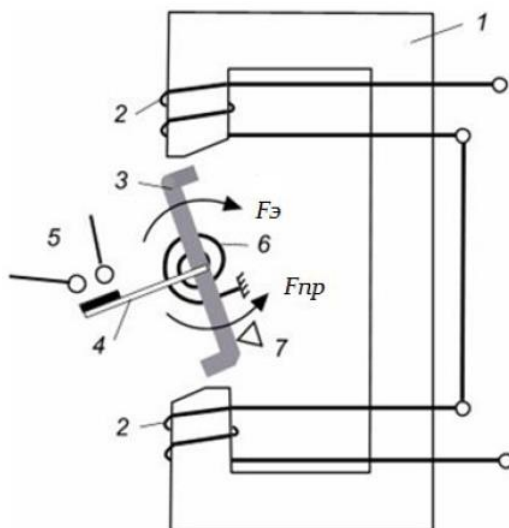


Рисунок 17 – Схема электромагнитного реле тока

Реле срабатывает, когда электромагнитная сила $F_{\text{Э}}$ преодолет момент, создаваемый противодействующей пружиной, и контакты 4, 5 замкнутся. Ток, при котором срабатывает реле, называется током срабатывания реле $I_{\text{ср}}$. В момент срабатывания $F_{\text{Э}} = F_{\text{пр}}$, тогда

$$I_{\text{ср}}^2 = \frac{F_{\text{пр}} R_{\text{м}}^2}{k w^2} \quad \text{и} \quad I_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{м}}}{k_1 w} \sqrt{F_{\text{пр}}}.$$

Из последнего выражения следует, что оперативно величину тока срабатывания реле можно регулировать, меняя сопротивление противодействующей пружины и число витков обмоток реле.

Если после срабатывания реле уменьшать ток в обмотке, то при некотором значении тока, называемом током возврата реле, якорь реле вернется в исходное состояние. Отношение тока возврата реле $I_{\text{вр}}$ к току срабатывания $I_{\text{ср}}$ является нормативным параметром и называется коэффициентом возврата реле:

$$k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{вр}}}{I_{\text{ср}}}.$$

Полупроводниковое реле. В настоящее время выпускается большое количество статических реле различных модификаций. Однако принцип их действия практически одинаков и сводится к сравнению подводимого измеряемого сигнала с опорным рисунок 18.

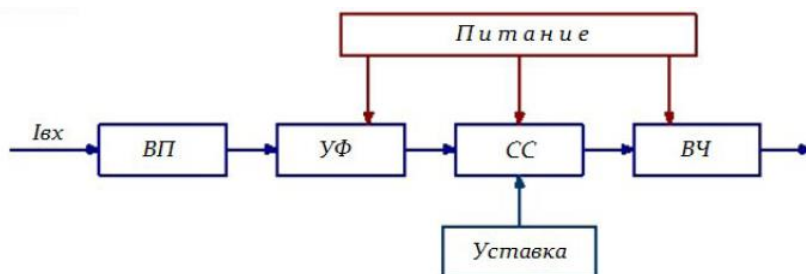


Рисунок 18 – Структурная схема статического реле защиты

1. Входной преобразователь ВП содержит измерительный преобразователь, на вход которого подается сигнал от трансформаторов тока защищаемого объекта. Измерительные преобразователи представляют собой промежуточные трансформаторы или трансреакторы,

которые трансформируют входной сигнал до величины, определяемой условиями управления операционными усилителями. Одновременно преобразователи отделяют полупроводниковую часть реле от вторичных цепей защищаемого объекта. Наряду с основными функциями они решают задачу защиты реле от высокочастотных наводок. Пример простейшего преобразователя тока представлен на рисунке 19.

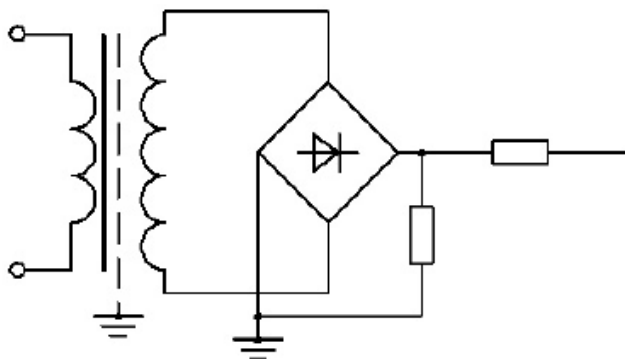


Рисунок 19 – Преобразователь тока с выпрямителем

2. Для получения нужной характеристики реле выходной сигнал, подаваемый с преобразователя, необходимо подвергнуть специальной обработке в узле формирования УФ. Способ и объем такой обработки определяется конкретным типом реле.

Микропроцессорные реле тока. Цифровое реле тока имеет много общего с цифровыми реле различного назначения и структурно его можно представить в виде, представленном на рисунке 20.

Общими для всех цифровых реле являются входные преобразователи, аналого-цифровые преобразователи АЦП, один или несколько микропроцессоров для обработки поступившей информации, клавиатура, дисплей, блок питания и выходной блок.

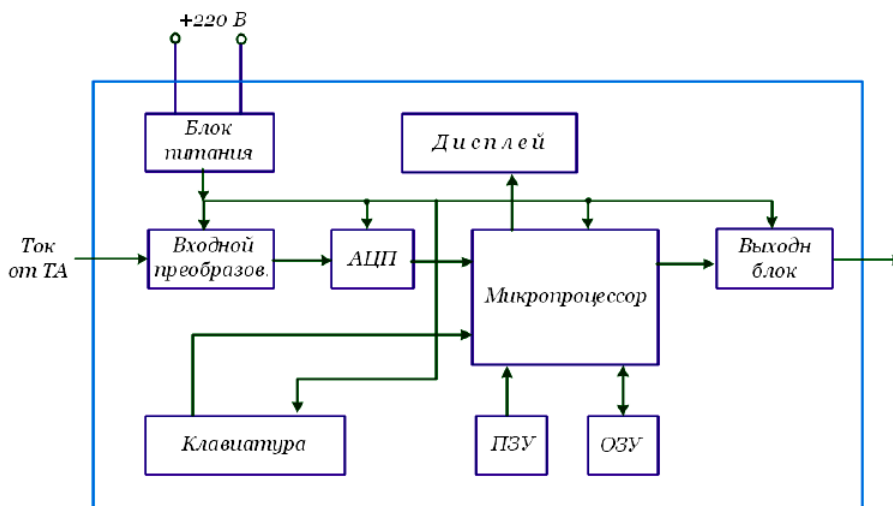


Рисунок 20 – Структурная схема цифрового реле тока

Входные преобразователи обеспечивают гальваническую развязку схемы реле от внешних цепей, нормируют входной сигнал и выполняют его предварительную фильтрацию.

Аналого-цифровой преобразователь АЦП выполняет преобразование мгновенного значения входного сигнала в пропорциональное ему цифровое значение. Процесс перехода от аналогового сигнала к дискретному называется квантованием сигнала, рисунок 21. Кван-

тование всегда происходит с некоторой потерей информации из-за того, что для точного восстановления первоначального сигнала из его дискретного представления частота выборок должна по крайней мере вдвое превышать самую высокочастотную гармоническую составляющую входного сигнала и, соответственно, из входного сигнала должны быть исключены все гармоники с частотой, более высокой чем частота квантования. В устройствах релейной защиты и автоматики применяют АЦП с частотой выборок от 600 до 2000 Гц.

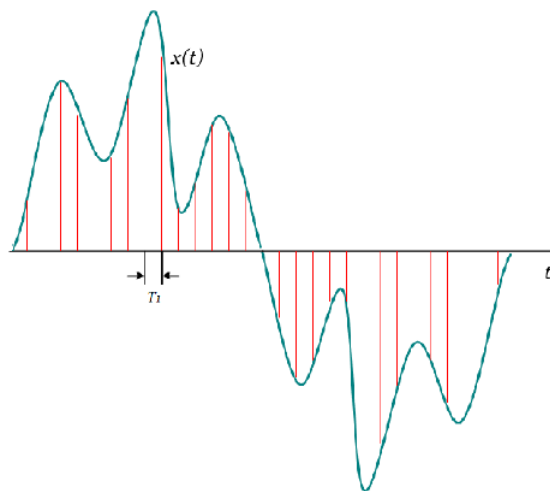


Рисунок 21 – Квантование входного сигнала $x(t)$ – входной аналоговый сигнал;
 T_1 – время дискретизации

Блок питания предназначен для обеспечения стабилизированным напряжением всех узлов реле, независимо от возможных изменений питающей сети. Блок питания может работать от сети постоянного или переменного тока.

Дисплей и клавиатура позволяют оператору получить информацию от устройства, изменить режим его работы, вводить информацию в реле. Дисплей и клавиатура в цифровых реле реализуются в максимально упрощенном виде: дисплей – цифробуквенный, однострочный; клавиатура – несколько кнопок.

Выходной блок формирует дискретный сигнал управления на защищаемый объект с гальванической развязкой коммутируемых цепей.

Микропроцессор является управляющим и решающим блоком реле. Программа его работы хранится в постоянном запоминающем устройстве ПЗУ. Для хранения промежуточных результатов вычислений применяется оперативное запоминающее устройство ОЗУ.

Определение контролируемого параметра, тока, основано на вычислении среднего или действующего значения периодической временной функции $x(t)$.

$$x_{cp}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |x(t)| dt;$$

$$x(t) = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(t) dt \right)}.$$

В реальном времени результат вычисления этого интеграла может быть получен только после наблюдения за контролируемым сигналом $x(t)$ в течение периода T , поэтому собственное время срабатывания цифровых реле осталось практически таким же, как у их электромеханических аналогов.

Теоретически можно мгновенно определить для любого момента времени амплитуду и фазу синусоидального сигнала $x(t) = X \sin(\omega_n t + \varphi)$ частоты $\omega_n t$ по известному его мгновенному значению и значению производной. Решение системы уравнений

$$\begin{cases} x(t) = X \sin(\omega_n t + \varphi); \\ x'(t) = \omega_n X \sin(\omega_n t + \varphi) \end{cases}$$

относительно X и φ дает ответ

$$X = \sqrt{x^2(t) + \left[\frac{x'(t)}{\omega_n} \right]^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega_n x(t)}{x'(t)} - \omega_n t.$$

Практически такой алгоритм требует усреднения нескольких выборок из-за неточности измерения производной, наличия помех и реального увеличения быстродействия достичь не удастся.

Однако в целом, полупроводниковые реле, по сравнению с электромагнитными и индукционными, обладают более высокой точностью, требуют меньших затрат на эксплуатацию, более просты в наладке. Важным достоинством полупроводниковых реле является наличие сервисных функций, таких, как тестирование и самодиагностика.

3.3 Схема включения трансформаторов тока и токовых реле

Практически все электроэнергетические объекты выполняются в трехфазном исполнении. Это обстоятельство должно быть учтено при проектировании устройств релейной защиты и, в частности, при выборе схем соединения обмоток трансформаторов тока и измерительных органов реле.

Наиболее распространенные схемы:

Схема полной звезды. При таком способе соединения трансформаторы тока устанавливаются на все фазы. Во вторичную цепь каждого трансформатора тока подключаются реле, кроме того, одно реле ставится в нулевом проводе рисунок 22.

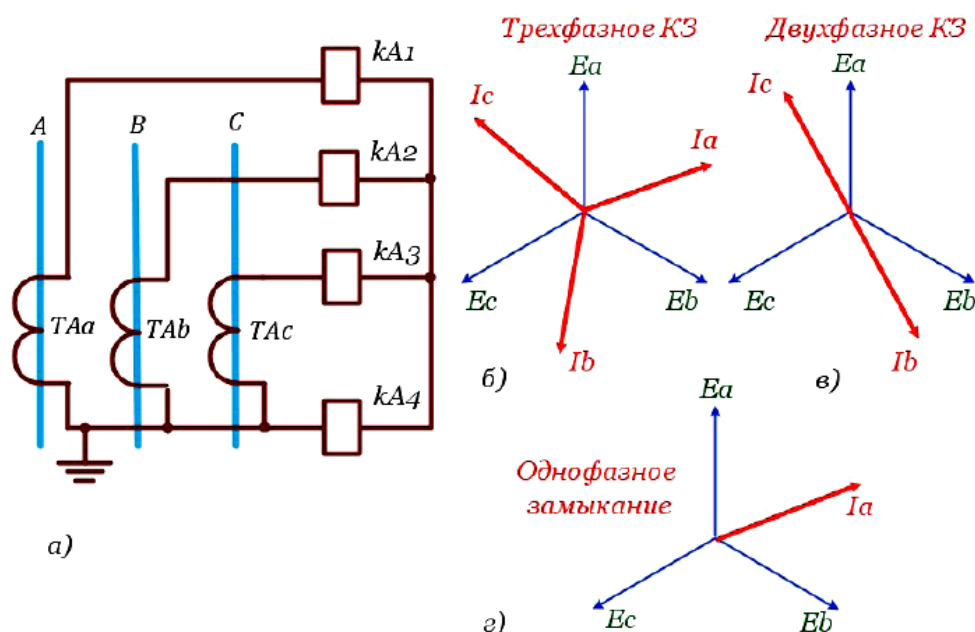


Рисунок 22 – Соединение трансформаторов тока и реле по схеме полной звезды:

а) – схема полной звезды; б) – векторная диаграмма токов при трехфазном замыкании;

в) – векторная диаграмма токов при замыкании фаз А и С;

г) – векторная диаграмма токов при замыкании фазы А на землю

При трехфазном замыкании рисунок 22, б) срабатывают три реле: KA_1 , KA_2 , KA_3 ; при двухфазном рисунок 22, в – два реле; при однофазном, рисунок 22, г – два реле.

Выводы:

1. Схема полной звезды реагирует на все виды замыканий.
2. Схема одинаково чувствительна ко всем видам повреждений.
3. Схема отличается надежностью, так как при любом замыкании срабатывают, по крайней мере, два реле.

Схема неполной звезды. Трансформаторы тока устанавливаются на двух фазах, обычно на фазах А и С, к ним подключаются реле. Дополнительно, в нулевой провод устанавливается еще одно реле рисунок 23, а.

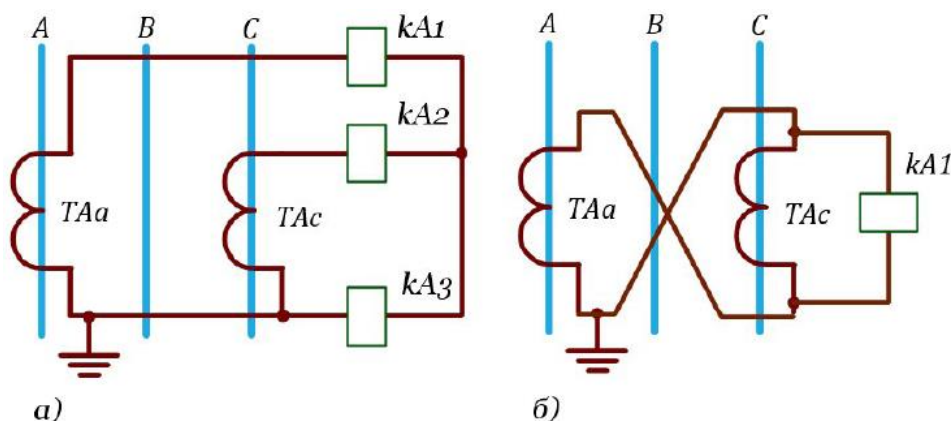


Рисунок 23 – Схемы соединения трансформаторов тока и реле:

а) – в неполную звезду; б) – на разность токов двух фаз

Рассмотрев поведение защиты при различных видах замыканий, нетрудно заметить, что при трехфазном замыкании работают три реле, при двухфазном – два; при замыкании фазы В на землю защита не работает.

Выводы

1. Схема неполной звезды реагирует на все виды междуфазных замыканий.
2. Схема достаточно надежна – при любом междуфазном замыкании срабатывают, по крайней мере, два реле.
3. Для ликвидации однофазных замыканий требуется установка дополнительной защиты.

Схема включения трансформаторов тока и реле на разность токов двух фаз. Для реализации этой схемы трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах, начало каждой обмотки трансформатора тока соединяется с концом другой, и параллельно обмоткам подключается реле рисунок 23,б.

Анализ поведения схемы при различных повреждениях показывает, что такое соединение позволяет выполнить защиту от всех видов междуфазных замыканий. Схема отличается экономичностью, но в то же время обладает сравнительно невысокой надежностью – отказ реле ведет к отказу защиты. Защита имеет разную чувствительность к различным видам междуфазных замыканий.

Схема включения трансформаторов тока и реле в фильтр токов нулевой последовательности. Трансформаторы токов устанавливаются во всех трех фазах, их вторичные обмотки соединяются между собой параллельно рисунок 24.

При возникновении трехфазного замыкания – реле не сработает. При двухфазном замыкании, например фаз А и В – реле не сработает. При возникновении однофазного короткого замыкания, например, фазы А на землю – реле сработает.

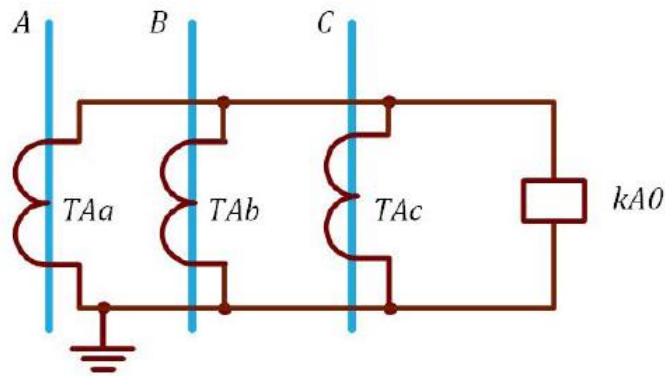


Рисунок 24 – Схема соединения трансформаторов тока и реле в фильтр токов нулевой последовательности

Выводы

1. Схема работает только при замыканиях на землю.
2. Схема находит применение для защиты от замыканий на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью.

3.4 Пример выполнения схемы максимальной токовой защиты

На рисунке 25 показана полная схема максимальной токовой защиты на постоянном оперативном токе с электромагнитными токовыми реле. Трансформаторы тока и реле соединены по схеме неполной звезды

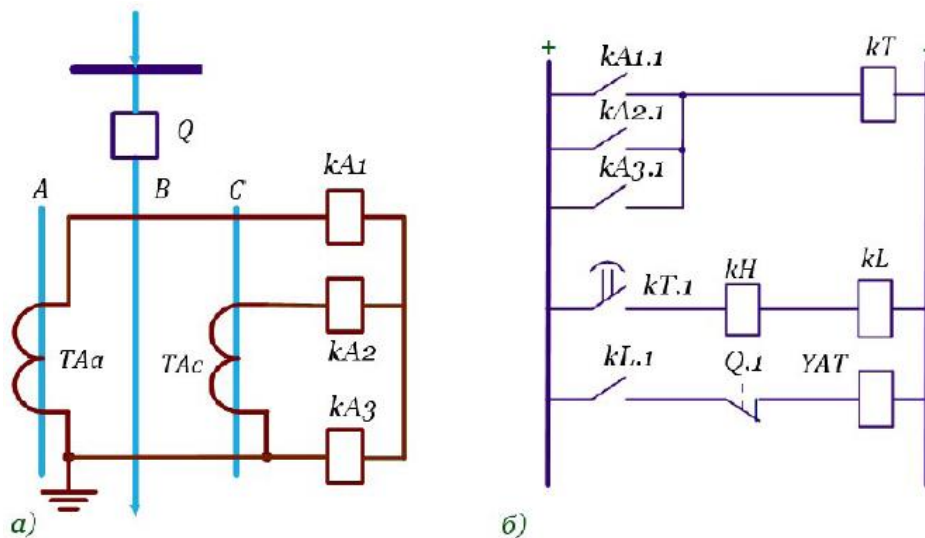


Рисунок 25 – Схема максимальной токовой защиты: а) – схема цепей переменного тока; б) – схема цепей постоянного тока

Оперативный ток нужен для питания реле в схемах релейной защиты, сигнализации, управления выключателями. В качестве источников оперативного тока применяются аккумуляторные батареи, трансформаторы тока и напряжения, трансформаторы собственных нужд. Аккумуляторные батареи используются на крупных энергетических объектах, так как их применение требует специально оборудованных помещений и наличие обслуживающего персонала. Остальные источники оперативного тока используются в системах энергоснабжения промышленных объектов, объектов сельского хозяйства и т. д.

Работа схемы. При возникновении короткого замыкания срабатывают два или три токовых реле и подают питание на реле времени KT . Реле времени, отработав установленную выдержку, подает "плюс" на выходное промежуточное реле KL . Срабатывание выходного реле приводит к подаче питания через блок-контакт выключателя Q_1 на электромагнит отключения $УАТ$. Указательное реле $КН$ сигнализирует о срабатывании защиты.

В более общем виде, без учета конкретной элементной базы, принцип и алгоритм работы максимальной токовой защиты можно проиллюстрировать с помощью алгебры логики, рисунок 26.

Контролируемый сигнал от трансформаторов тока $ТА$ подается на токовые реле $КА_1$, $КА_2$, $КА_3$. Сигнал на выходе каждого из этих реле в режиме дежурства равен нулю, а при возникновении короткого замыкания сработавшие токовые реле формируют на выходе единицу. DW – логический элемент ИЛИ; сигнал на его выходе становится равным единице, если хотя бы один входной сигнал равен единице. В элементе DT реализуется выдержка времени защиты, необходимая для обеспечения требований селективности защиты; KL – выходной орган защиты; $КН$ – элемент сигнализации.

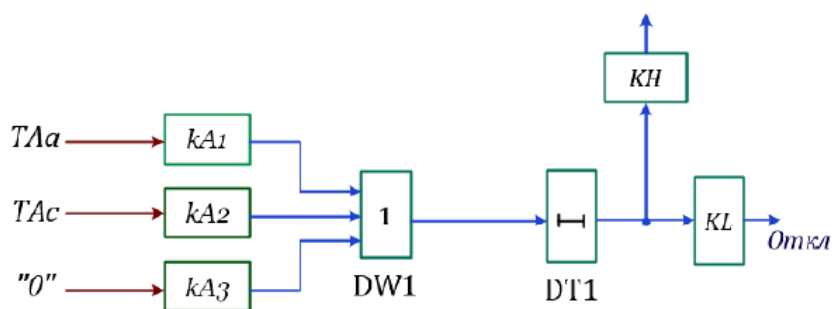


Рисунок 26 – Представление работы максимальной токовой защиты с использованием элементов логики

Если поведение защиты представить в виде логической функции T , то условие срабатывания можно записать в виде $T = (KA_1 \text{ OR } KA_2 \text{ OR } KA_3) \text{ AND } DT_1 = 1$, где KA_1 , KA_2 , KA_3 – логические сигналы на выходах токовых измерительных органов защиты; DT_1 – оператор временной задержки

3.5 Расчет параметров максимальной токовой защиты

Расчет параметров максимальной токовой защиты сводится к выбору тока срабатывания и выдержки времени и оценке чувствительности защиты.

Выбор тока срабатывания

При выборе тока срабатывания $I_{сз}$ нужно учесть следующие факторы:

1. Защита не должна работать от максимально возможного рабочего тока $I_{сз} > I_{\text{раб. макс}}$
2. После отключения внешнего короткого замыкания пусковые органы защиты должны вернуться в исходное состояние

$$I_{сз} > \frac{I_{\text{раб макс}}}{k_{\epsilon}},$$

где k_{ϵ} – коэффициент возврата реле; $I_{\text{ср}}$ – ток срабатывания реле.

3. При выборе тока срабатывания необходимо учесть увеличение тока при пуске двигателей:

$$I_{сз} > \frac{k_{сз}}{k_{\epsilon}} I_{\text{раб макс}},$$

где $k_{сз} = I_{пуск д} / I_{ном д}$ – коэффициент самозапуска, равный отношению пускового тока двигателя к его номинальному значению. Обычно значение $k_{сз}$ находится в пределах (1...4). Точное значение определяется расчетом или задается в качестве исходных данных.

4. Учитывая погрешности расчета, погрешности трансформаторов тока и реле, выражение для тока срабатывания защиты окончательно запишется в виде:

$$I_{сз} > \frac{k_n k_{сз}}{k_\theta} I_{раб макс},$$

где k_n – коэффициент надежности. $k_n = 1,15 \dots 1,3$ – для полупроводниковых реле; $k_n = 1,2 \dots 1,3$ – для электромагнитных реле; $k_n = 1,5$ – для индукционных реле.

Для того чтобы определить ток срабатывания реле, достаточно учесть коэффициент трансформации трансформаторов тока и схему соединения трансформаторов тока и реле:

$$I_{сз} > \frac{k_n k_{сз} k_{сх}}{k_\theta n_{тт}} I_{раб макс}$$

где $n_{тт}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока; $k_{сх}$ – коэффициент схемы, равный отношению тока в реле к вторичному току трансформатора тока.

Выбор времени срабатывания. Максимальные токовые защиты могут иметь независимую и зависимые характеристики срабатывания.

Максимальные токовые защиты с независимой характеристикой срабатывания. Для обеспечения правильной работы защит время срабатывания защиты, наиболее удаленной от источника питания, принимается минимальным. Выдержка времени каждой предыдущей увеличивается на ступень селективности Δt .

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t.$$

Ступень селективности должна учитывать тип установленных выключателей и элементную базу, на основании которой выполняется задержка на срабатывание защиты и обычно составляет

$$\Delta t = 0,4 \dots 0,6 \text{ с.}$$

Максимальные токовые защиты с зависимой характеристикой срабатывания. Наличие зависимой от значения тока выдержки времени позволяет повысить быстродействие и эффективность максимальной токовой защиты, например, при необходимости учета перегрузочной характеристики оборудования.

Структура защиты практически совпадает со схемой, представленной на рисунке 26, с заменой элемента с независимой выдержкой времени элементом с зависимым временем работы.

Расчет выдержек времени защит с зависимыми выдержками времени для сети можно проиллюстрировать на примере радиальной сети, рисунок 27:

1. Рассчитывается время срабатывания защиты РЗ₂ исходя из условия отстройки от времени работы защиты РЗ₃

$$t_2 = t_3 + \Delta t.$$

2. Рассчитывается значение тока трехфазного короткого замыкания I_{K1} в точке K_1 .

3. Выбирается требуемая характеристика срабатывания измерительного органа защиты РЗ₂, которая бы проходила через точку с координатами $\{t_2; I_{K1}/I_P\}$.

4. Рассчитывается значение тока трехфазного короткого замыкания I_{K2} в точке K_2 и по выбранной характеристике определяется время t_2' .

5. Рассчитывается время срабатывания защиты РЗ₁ исходя из условия отстройки от времени работы защиты РЗ₂

$$t_1 = t_2' + \Delta t.$$

6. Выбирается требуемая характеристика срабатывания измерительного органа защиты РЗ₁, которая бы проходила через точку с координатами $\{t_1; I_{K2}/I_P\}$.

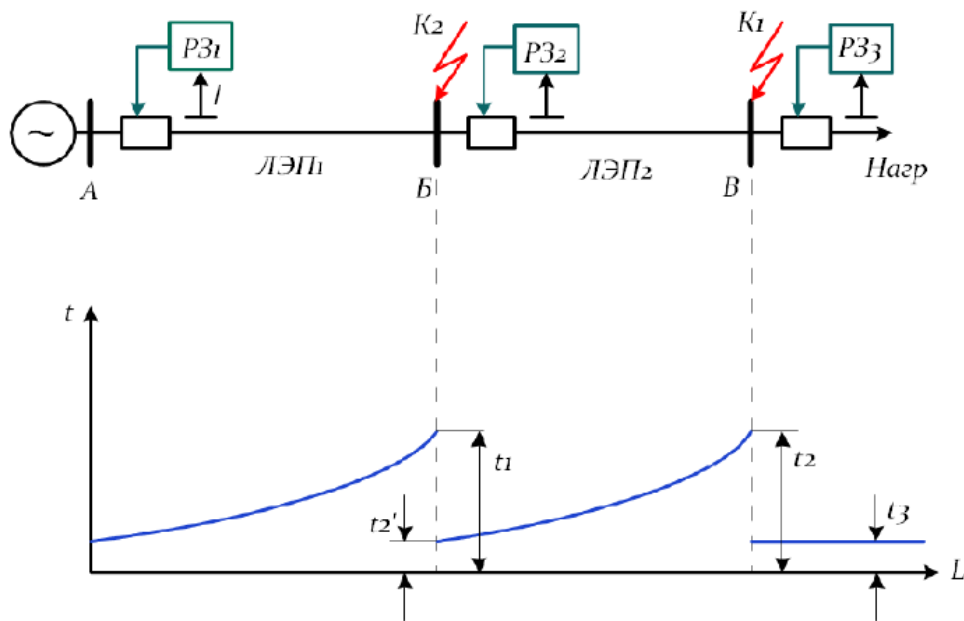


Рисунок 27 – Согласование защит с зависимыми выдержками срабатывания

Чувствительность защиты оценивается значением коэффициента чувствительности:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}^{(2)}}{I_{\text{сз}}},$$

где $I_{\text{кз мин}}^{(2)}$ – минимальное значение тока двухфазного короткого замыкания.

Чувствительность проверяется для двух режимов – основного и режима резервирования рисунок 28.

Если защита РЗ₁ работает как основная, то ее чувствительность проверяется по короткому замыканию в конце защищаемой линии, точка К₁. Для максимальных токовых защит значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 1,5.

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}^{(2)}(K_1)}{I_{\text{сз}}} \geq 1,5$$

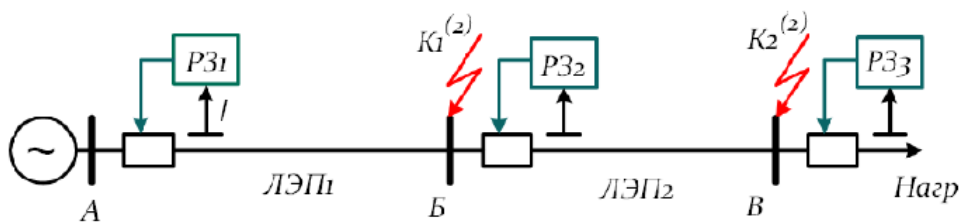


Рисунок 28 – Оценка чувствительности защиты

Если защита РЗ₁ работает в режиме дальнего резервирования, то чувствительность проверяется по короткому замыканию в конце резервируемой линии, точка К₂:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}^{(2)}(K_2)}{I_{\text{сз}}} \geq 1,2.$$

Значение коэффициента чувствительности должно быть больше или равно 1.2.

Выводы.

1. Принцип действия максимальной токовой защиты основан на фиксации увеличения

тока при возникновении анормального режима или короткого замыкания.

2. Селективность защиты обеспечивается введением выдержки времени на срабатывание.

3. Защита отличается простотой, надежностью, невысокой стоимостью.

4. В качестве характерных недостатков следует отметить:

- малое быстродействие;
- недостаточная чувствительность в сильно нагруженных и протяженных линиях;
- невозможность правильной работы в кольцевых сетях и в радиальных сетях с несколькими источниками питания.

4 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ. ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА

4.1 Принцип действия токовой отсечки

Токковая отсечка относится к токовым защитам, реагирующим на увеличение тока. Основное ее отличие от максимальной токовой защиты заключается в способе обеспечения селективности. В качестве примера рассмотрим участок сети, состоящий из двух линий с односторонним питанием рисунок 29.

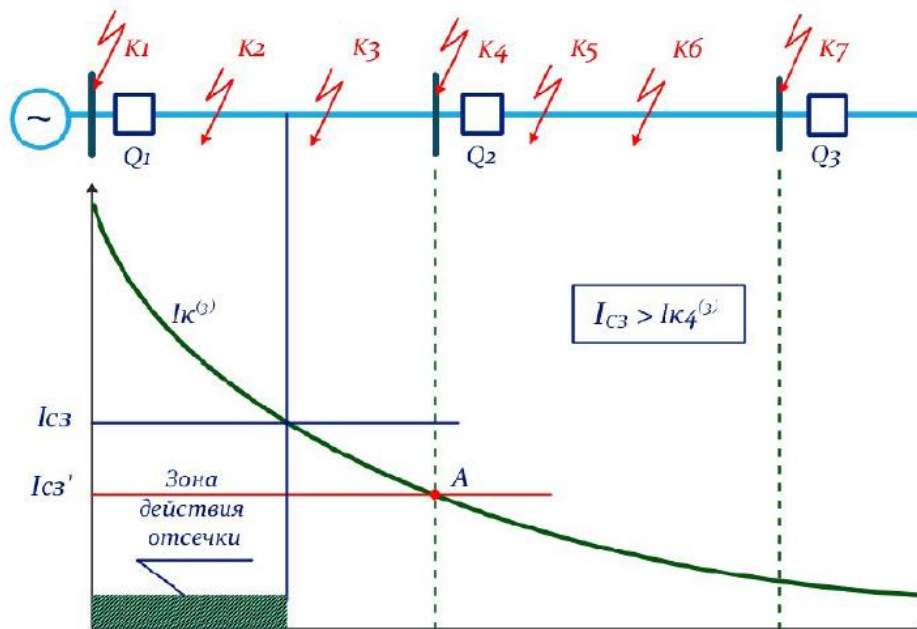


Рисунок 29 – Принцип действия токовой отсечки на линии с односторонним питанием

На этом же рисунке кривая показывает изменение тока трехфазного короткого замыкания в зависимости от расстояния до точки короткого замыкания. Кривая построена на основании выражения

$$I_k^{(3)} = \frac{E_\phi}{x_c + x_0 l_k},$$

где E_ϕ – фазная ЭДС системы; x_c – сопротивление системы; x_0 – удельное сопротивление 1 км линии; l_k – расстояние до места короткого замыкания.

Для того чтобы защита работала при коротких замыканиях на своей линии и не работала на смежной линии, достаточно выполнить условие отстройки защиты от тока трехфазного короткого замыкания в конце линии:

$$I_{cz} \geq I_{k4}^{(3)}.$$

Приняв во внимание погрешности трансформаторов тока, реле и расчета, получим:

$$I_{cz} \geq k_n I_{k4}^{(3)},$$

где $k_n = 1,2 \dots 1,3$ – коэффициент надежности.

Таким образом, по принципу действия токовая отсечка не требует выдержки времени, селективность работы достигается за счет ограничения ее зоны действия. Графическая иллюстрация зоны действия отсечки показана на рисунке 29.

Из-за того что зона работы отсечки не охватывает всю линию, отсечка не может быть использована в качестве единственной защиты.

4.2 Токовые ступенчатые защиты

Токовые ступенчатые защиты представляют собой сочетание токовых отсеков и максимальной токовой защиты, что позволяет выполнить полноценную защиту с высоким быстродействием. Обычно токовые ступенчатые защиты выполняются в виде трех ступеней:

Первая ступень – отсечка мгновенного действия, защищает начальный участок линии.

Вторая ступень – отсечка с выдержкой времени, предназначена для надежной защиты оставшегося участка линии.

Третья ступень – максимальная токовая защита, выполняет функции ближнего и дальнего резервирования.

Принцип действия токовой ступенчатой защиты рассмотрим на примере участка сети, представленного на рисунке 30. На линии АВ установлена трехступенчатая токовая защита, на линии ВС – двухступенчатая.

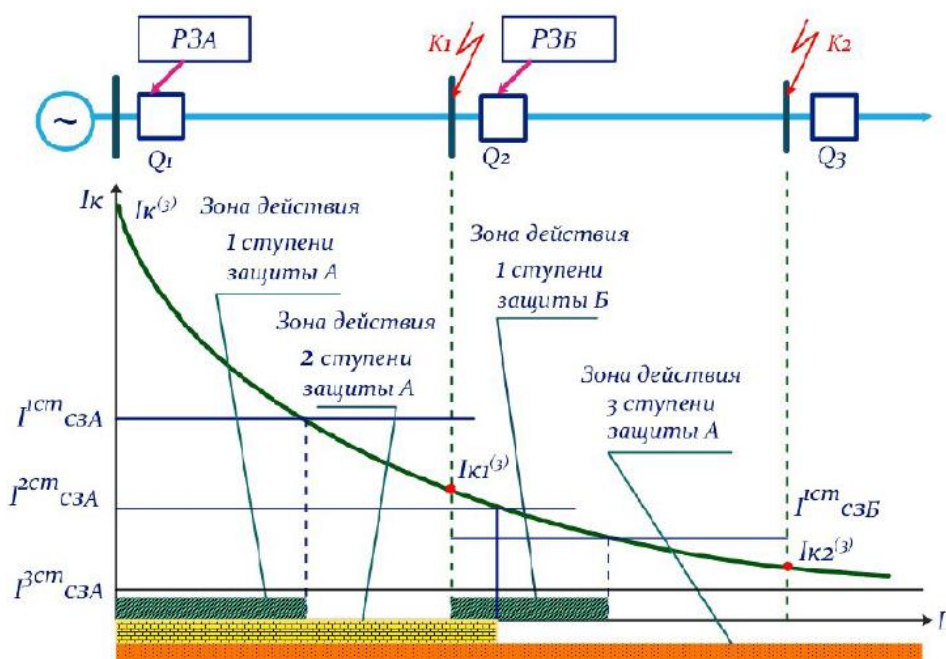


Рисунок 30 – Принцип действия токовой ступенчатой защиты

Токи срабатывания первых ступеней защит А и Б, соответственно $I_{с3А}^1$ и $I_{с3Б}^1$, отстраиваются от токов трехфазных коротких замыканий на шинах противоположных подстанций:

$$I_{с3А}^1 = k_n I_{k2}^{(3)}; I_{с3Б}^1 = k_n I_{k3}^{(3)}.$$

Вторая ступень защиты А должна надежно охватывать защищаемую линию. Ее ток срабатывания согласуется с первой ступенью защиты Б:

$$I_{с3А}^2 = k_n I_{с3Б}^1.$$

Выдержка времени принимается равной 0,4...0,5 сек. Ток срабатывания третьей ступени отстраивается от нагрузочных режимов, выдержка времени согласуется с защитами отходящих присоединений:

$$I_{с3А}^3 = \frac{k_n k_{с3}}{k_{\theta}} I_{\text{раб макс}}.$$

4.3 Пример выполнения схемы токовой ступенчатой защиты

На рисунке 31 представлена схема токовой ступенчатой защиты на электромеханических реле с включением измерительных органов по схеме неполной звезды.

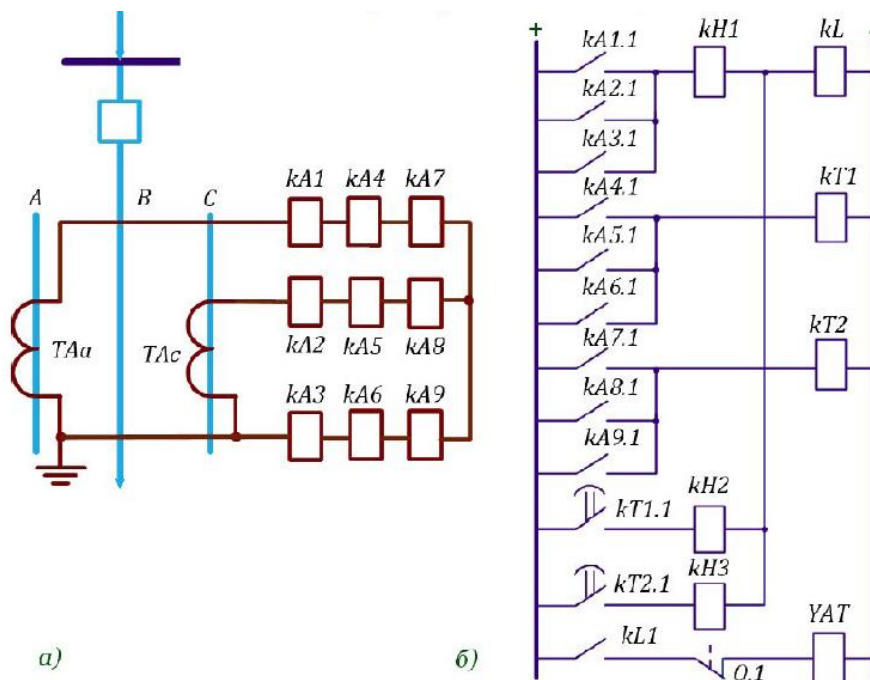


Рисунок 31 – Схема трехступенчатой токовой защиты:

а) – схема цепей переменного тока; б) – схема цепей постоянного тока

Работа схемы. При коротком замыкании в зоне действия первой ступени срабатывают пусковые органы первой, второй и третьей ступеней. Реле первой ступени KA₁₋₃ подают питание на выходное реле KL, реле второй ступени KA₄₋₆ – на реле времени KT₁, реле третьей ступени KA₇₋₉ – на реле времени KT₂. Времена срабатывания KL, KT₁, KT₂ соотносятся между собой следующим образом:

$$t_{KL} < t_{KT1} < t_{KT2} .$$

Следовательно, первым сработает выходное реле KL, и короткое замыкание отключится без выдержки времени.

При коротком замыкании в зоне действия второй ступени сработают пусковые органы второй и третьей ступени и подадут питание на реле KT₁ и KT₂. Первым сработает KT₁, и короткое замыкание отключится с выдержкой времени, равной 0,5 сек.

Третья ступень срабатывает при отказе первой или второй ступени или при отказе защиты смежного участка.

Чувствительность первой ступени определяется графически по величине защищаемой зоны при двухфазном коротком замыкании или по выражению

$$k_{\chi}^1 = \frac{I_{\kappa 3 \min}^{(2)}}{I_{c.3}^1} ,$$

где $I_{\kappa 3 \min}^{(2)}$ – ток двухфазного короткого замыкания в начале защищаемой линии.

Чувствительность второй ступени проверяется по минимальному току двухфазного короткого замыкания в конце линии. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2.

Чувствительность третьей ступени проверяется, как для обычной максимальной токовой защиты.

Выводы.

1. Токовые отсечки реагируют на увеличение тока контролируемого объекта.
2. Селективность токовых отсечек обеспечивается за счет ограничения их зоны действия.
3. Токовые ступенчатые защиты, представляющие собой сочетание токовых отсечек и максимальной токовой защиты, обеспечивают быстрое отключение коротких замыканий.
4. По принципу действия токовые ступенчатые защиты не обеспечивают требование селективности в кольцевых сетях и в радиальных сетях с несколькими источниками питания.
5. Токовые ступенчатые защиты не обеспечивают требуемой чувствительности в сильно нагруженных линиях .
6. Токовые ступенчатые защиты применяются главным образом для защиты от междоузельных коротких замыканий в радиальных распределительных сетях напряжением до 35 кВ.

5 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

5.1 Варианты выполнения реле мощности

Для обеспечения селективности действия максимальных токовых защит в кольцевых сетях с односторонним и радиальных сетях с двухсторонним питанием пусковой орган защиты выполняется в виде двух реле – реле тока и реле направления мощности, контакты которых соединены последовательно. Реле направления мощности (в дальнейшем будем называть реле мощности) замыкает свой контакт при положительном направлении тока. Условились за положительное направление тока считать направление тока от шин в линию. Принцип работы токовой направленной защиты рассмотрим на примере однолинейной схемы рисунок 32.

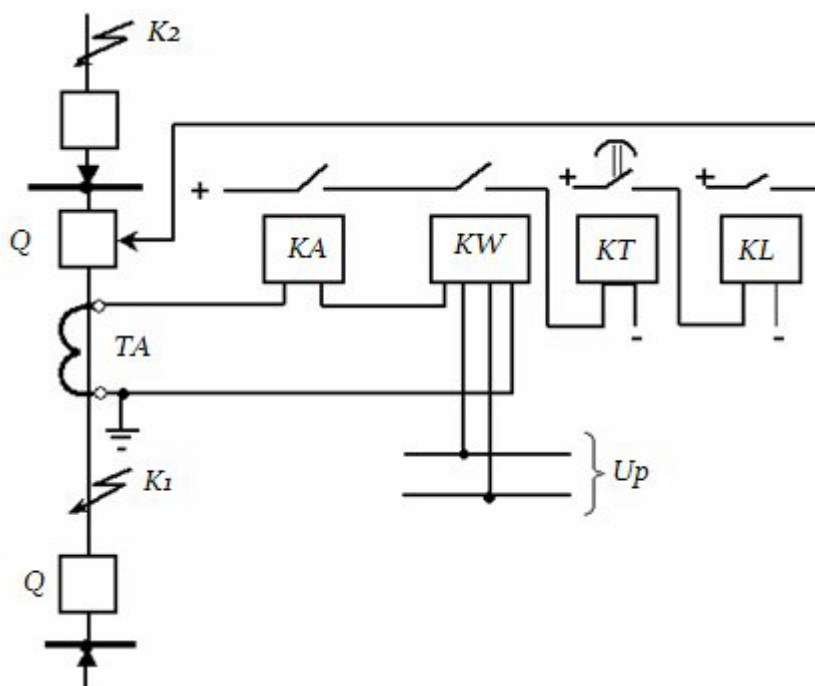


Рисунок 32 – Схема максимальной токовой направленной защиты

При возникновении короткого замыкания на линии, точка K_1 , срабатывают токовое реле KA_1 и реле мощности KW_1 , и защита запускается. При коротком замыкании вне линии, точка K_2 , ток направлен из линии к шинам, реле мощности не работает и блокирует действие защиты.

Введение задержки на срабатывание обеспечивает выполнение требования селективности.

5.2 Варианты выполнения реле мощности

Индукционное реле мощности рисунок 33. Конструктивно индукционное реле мощности представляет собой четырехполюсную магнитную систему 1 с расположенными на сердечнике двумя обмотками: токовой 2 и напряженческой 3.

Между полюсами электромагнита помещен внутренний стальной сердечник и подвижный алюминиевый ротор 6 с закрепленным на нем контактом 4. При протекании тока по обмоткам создаются магнитные потоки Φ_I и Φ_U .

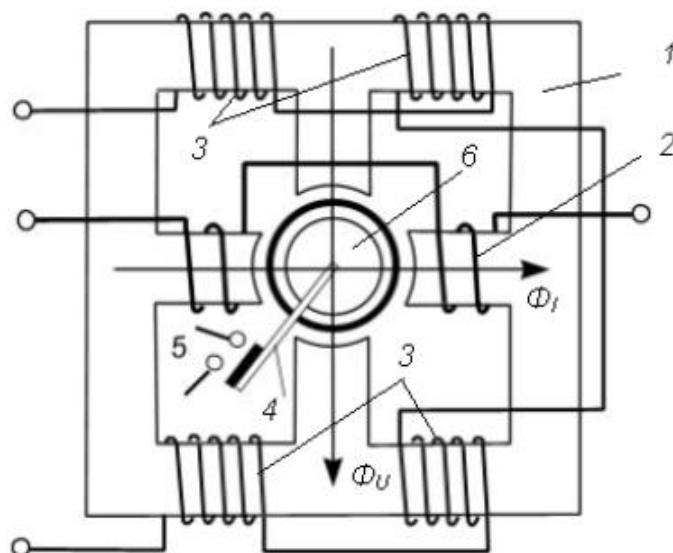


Рисунок 33 – Индукционное реле мощности

За счет взаимодействия этих потоков с индуктированными в цилиндре токами создается вращающий момент:

$$M_{вр} = k \Phi_I \Phi_U \sin \psi,$$

где Φ_I – поток, создаваемый токовой обмоткой; Φ_U – поток, создаваемый обмоткой напряжения; ψ – угол между потоками.

Векторная диаграмма реле представлена на рисунке 34.

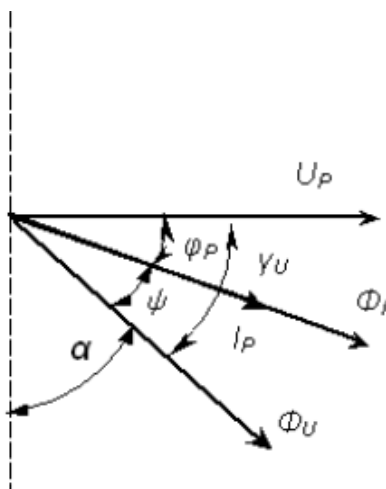


Рисунок 34 – Векторная диаграмма реле направления мощности

Если в выражении для вращающего момента заменить потоки пропорциональными величинами – током в реле I_P и напряжением U_P , а угол ψ , равным ему углом $\psi = 90^\circ - (\varphi_P + \alpha)$, то выражение для момента будет иметь вид:

$$M_{вр} = k_1 \Phi_I \Phi_U \sin(90^\circ - (\varphi_P + \alpha)) = k_1 \Phi_I \Phi_U \cos(\varphi_P + \alpha).$$

Угол, при котором вращающий момент максимален, называется углом максимальной чувствительности. Угол, определяющий сдвиг вектора тока в обмотке напряжения относительно приложенного напряжения, называется углом внутреннего сдвига реле. В зависимости от значения угла внутреннего сдвига характеристика реле меняет свое положение в плоскости координат. При отрицательном угле реле называют реле реактивной мощности или синусным; при положительном – реле активной мощности или косинусным. При промежуточ-

ных значениях угла реле реагирует на обе составляющие мощности и называется реле смешанного типа. Эти реле имеют наибольшее распространение в схемах релейной защиты. Угол внутреннего сдвига можно менять, включая в цепь обмотки напряжения реле активное или емкостное сопротивление.

Рассмотренное реле позволяет определить направление мощности короткого замыкания. Изменение знака момента происходит при изменении направления тока в первичной цепи. Так, при коротком замыкании в точке K_1 рисунок 32 момент положителен, а при коротком замыкании в точке K_2 – отрицателен. В схемах релейной защиты используется способность реле определять направление тока, поэтому такие реле называют реле направления мощности.

Полупроводниковые реле мощности. Наличие ряда недостатков индукционных реле, таких, как трудность отстройки от "самохода", вибрация контактной системы, низкая механическая устойчивость, поставили во-прос о необходимости их замены на полупроводниковые реле. В настоящее время промышленностью выпускаются различные виды полупроводниковых реле мощности. Одна из возможных реализаций реле на микроэлектронной основе представлена на рисунке 35.

Реле состоит из входных преобразователей тока 1 и напряжения 2; двух фильтров низких частот 3 и 4; усилителей-ограничителей 5, 6; детектора знака активной мощности 7, выполненного на основе интегратора и перемножителя; порогового элемента 8, выполненного на компараторе; исполнительного блока 9.

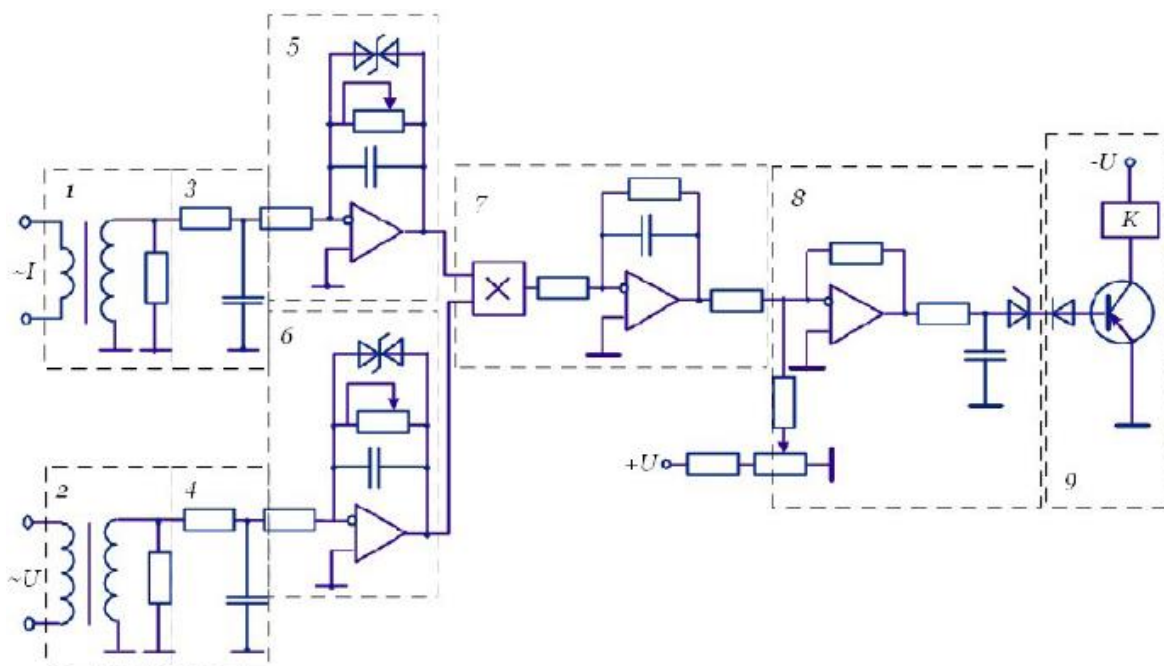


Рисунок 35 – Принципиальная схема полупроводникового реле направления мощности

Информация о токе и напряжении контролируемого объекта через входные преобразователи подается на фильтры низких частот. При помощи фильтров низких частот и усилителей-ограничителей формируются требуемые амплитудно-частотные характеристики каналов тока и напряжения. Сигналы, поступающие на входы детектора знака активной мощности, преобразуются при помощи перемножителя и интегратора в сигнал, пропорциональный активной мощности.

В общем случае, при возникновении повреждения на напряженческий вход реле поступает сигнал, который описывается выражением

$$U(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n),$$

где U_0 – постоянная составляющая; U_{1m} – амплитуда основной гармоники; $U_{2m}, \dots, U_{nm}$ – амплитуды высших гармоник; $\psi_1, \dots, \psi_{1n}$ – начальные фазы соответствующих гармоник.

Сигнал, поступающий на токовый вход, можно записать в следующем виде:

$$I(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n - \varphi_n),$$

где $\varphi_1, \dots, \varphi_{1n}$ – углы сдвига между соответствующими гармониками тока и напряжения.

Средняя мощность в цепи защищаемого объекта:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) I(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + \dots + U_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n)] \times \\ \times [I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n - \varphi_n)] dt.$$

После перемножения многочленов интеграл можно представить в виде суммы следующих интегралов:

$$1. \frac{1}{T} \int_0^T U_0 I_0 dt = U_0 I_0.$$

2. Интегралов, содержащих произведение синусоид одинаковой частоты:

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{km} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = U_{km} I_{km} \cos \varphi_k.$$

3. Интегралов, содержащих произведение синусоид различной частоты:

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_{km} I_{lm} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(l\omega t + \psi_l - \varphi_l) dt = 0.$$

4. Интегралов вида

$$\frac{1}{T} \int_0^T U_0 I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt = 0.$$

и

$$\frac{1}{T} \int_0^T I_0 U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) dt = 0.$$

В итоге

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos \varphi_n.$$

Сигнал после перемножителя и интегратора пропорционален активной мощности и в зависимости от направления тока имеет положительный или отрицательный знак.

Полупроводниковые реле мощности, по сравнению с индукционными, обладают меньшей потребляемой мощностью, более чувствительны и точны, требуют меньших эксплуатационных затрат.

5.3 Расчет параметров

Расчет параметров заключается в выборе тока срабатывания, выдержки времени и оценке чувствительности.

Выбор тока срабатывания. Ток срабатывания токовых направленных защит выбирается так же, как для обычных максимальных токовых защит по условиям отстройки от максимальных нагрузочных режимов. При этом отстройка производится от токов, направленных от шин в линию.

Выбор выдержек времени. Выбор выдержек времени производится по встречно-ступенчатому принципу, применение которого показано на 36.

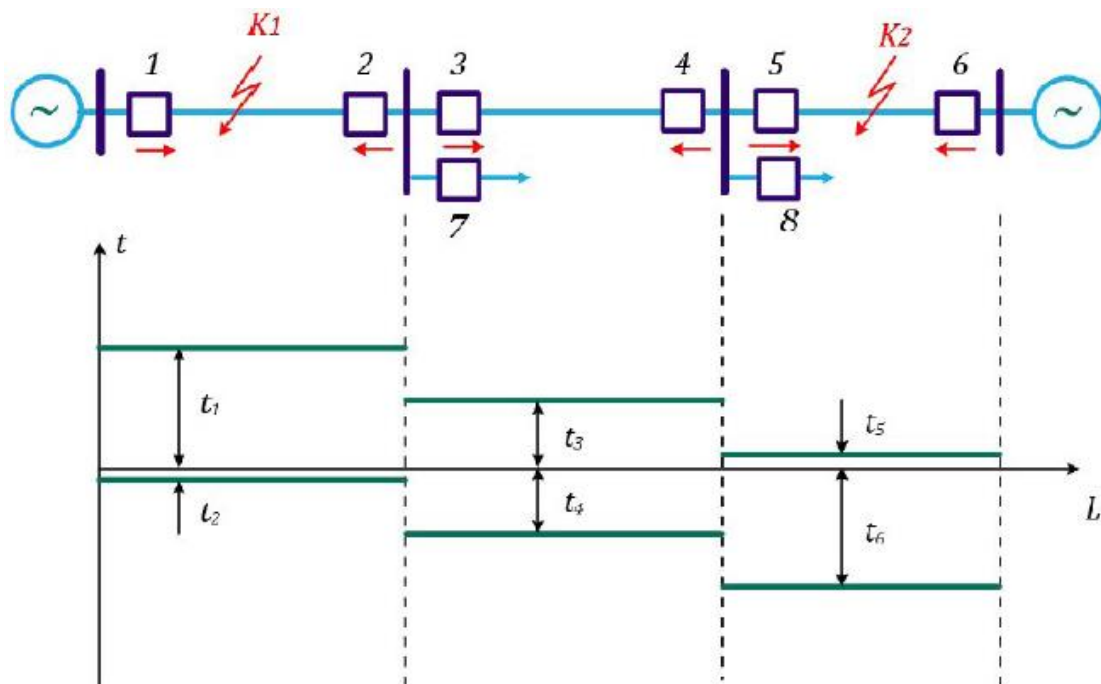


Рисунок 36 – Выбор выдержек времени токовых направленных защит

Стрелками на рисунке показано направление тока, при котором срабатывают пусковые органы защит. При коротком замыкании в точке K_1 сработают пусковые органы защит 1, 3, 5, 6. Наиболее удаленной защитой от источника питания в этом режиме является защита 5, поэтому принимается $t_5 = 0$.

Для других защит

$t_3 = t_5 + \Delta t$; $t_3 = t_7 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее;

$t_1 = t_3 + \Delta t$; $t_1 = t_8 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее.

При коротком замыкании в точке K_2 сработают пусковые органы защит 1, 2, 4, 6. Наиболее удаленной защитой от источника питания в этом режиме является защита 2, поэтому принимается $t_2 = 0$.

Для других защит

$t_4 = t_2 + \Delta t$; $t_4 = t_8 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее;

$t_6 = t_4 + \Delta t$; $t_6 = t_7 + \Delta t$ – из двух значений выбирается большее.

Оценка чувствительности. Чувствительность токовых пусковых органов максимальной токовой направленной защиты оценивается по току двухфазного короткого замыкания в конце защищаемой линии и в конце резервируемых участков.

При оценке поведения защиты следует учесть возможность возникновения двух режимов – режима каскадного действия и отказа защиты из-за наличия "мертвой зоны" по напряжению.

При коротком замыкании вблизи источника в кольцевой сети с односторонним питанием рисунок 37, ток короткого замыкания, проходящий через защиту, установленную на противоположных шинах, может оказаться недостаточным для ее срабатывания. В этом случае, независимо от соотношения выдержек времени, первым сработает комплект, установленный вблизи источника. После отключения линии защитой 6 ток в месте установки защиты 5 увеличивается и становится достаточным для ее срабатывания. Такое действие защиты называется каскадным. Участок линии, в пределах которого защита работает каскадно, называется зоной каскадного действия защиты.

При трехфазном коротком замыкании вблизи места установки защиты напряжение, подводимое к реле направления мощности, может оказаться недостаточным для срабатывания реле, и защита отказывает.

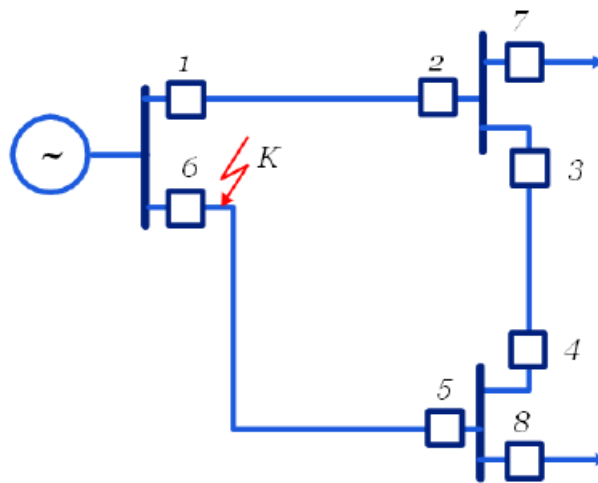


Рисунок 37 – Схема кольцевой сети

Участок линии, в пределах которого при трехфазных коротких замыканиях защита не работает, называется мертвой зоной.

5.4 Схемы максимальных токовых направленных защит

Схемы максимальных направленных защит выполняются в различных вариантах, отличающихся друг от друга в основном схемой включения органа направления мощности. Под схемой включения реле направления мощности понимается сочетание фаз токов и напряжений, подводимых к реле. Схемы включения должны обеспечивать правильное определение направления мощности в условиях короткого замыкания. Наибольшее распространение получили две схемы: 30-градусная и 90-градусная рисунок 38. Сочетания токов и напряжений для этих схем приведены в таблице 3.

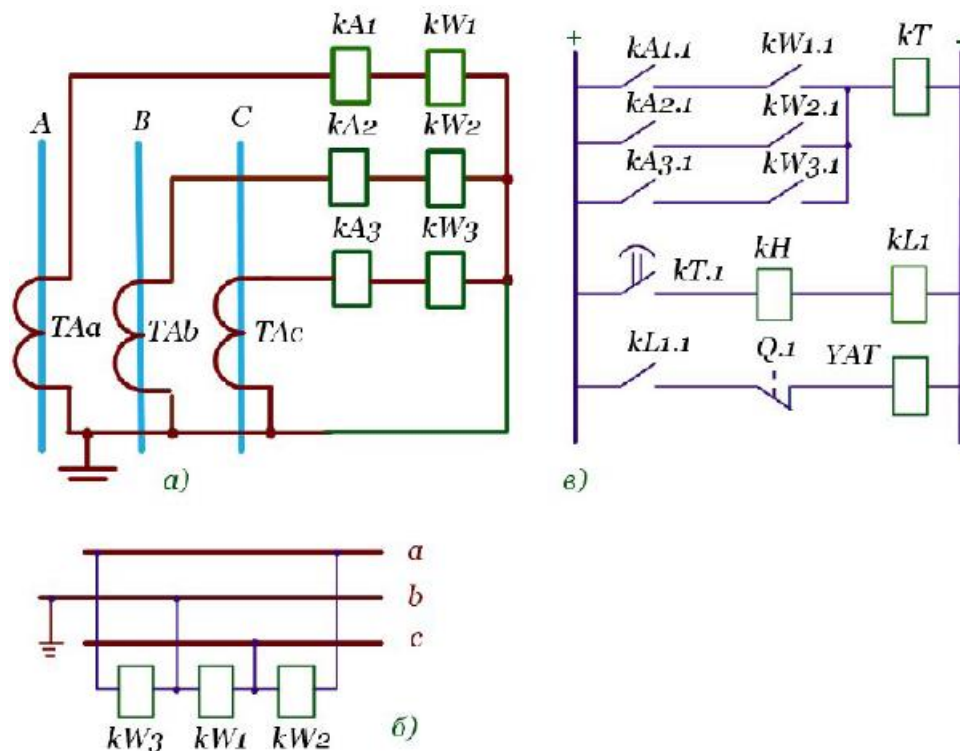


Рисунок 38 – Схема максимальной токовой направленной защиты с реле мощности, включенными по 90-градусной схеме: а) – схема цепей переменного тока; б) – схема цепей переменного напряжения; в) – схема цепей постоянного тока

Таблица 3 – Сочетания токов и напряжений в схемах реле направления мощности

30-градусная схема		90-градусная схема	
Фазы тока	Фазы напряжения	Фазы тока	Фазы напряжения
I_A	U_{AC}	I_A	U_{BC}
I_B	U_{BA}	I_B	U_{CA}
I_C	U_{CB}	I_C	U_{AB}

На рисунке 39 представлен алгоритм работы максимальных токовых направленных защит.

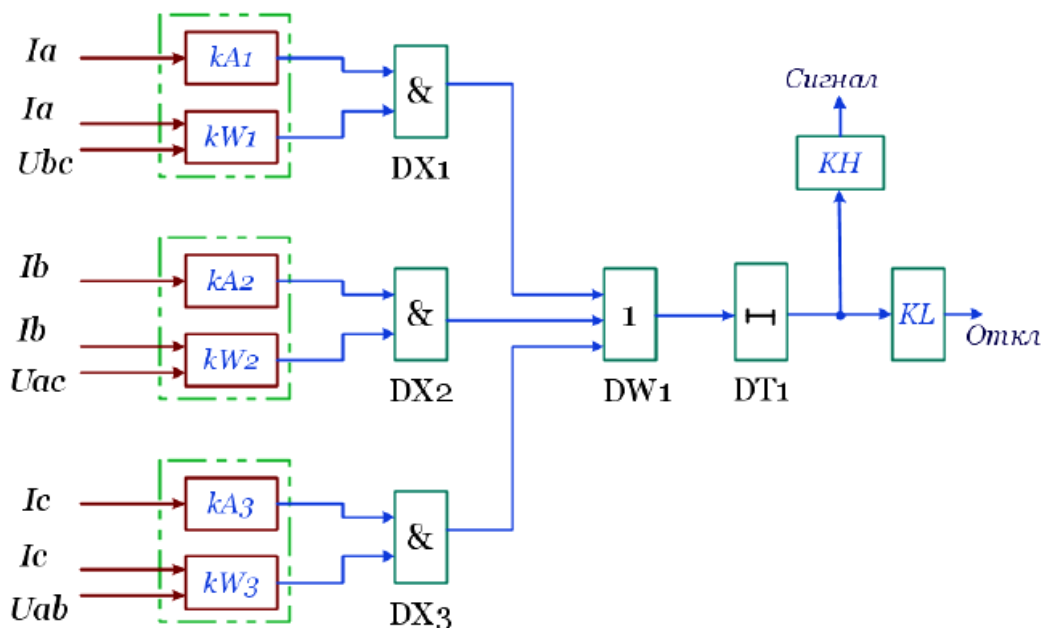


Рисунок 39 – Алгоритм работы максимальных токовых направленных защит

$$T = ((KA_1 \text{ AND } KW_1) \text{ OR } (KA_2 \text{ AND } KW_2) \text{ OR } (KA_3 \text{ AND } KW_3)) \text{ AND } DT_1 = 1$$

Выводы.

1. Применение органа направления мощности позволяет обеспечить селективность токовых защит в кольцевых сетях с одним источником питания и в радиальных сетях с двухсторонним питанием.
2. Защита отличается простотой и надежностью.
3. К недостаткам защиты относятся:
 - малое быстродействие;
 - недостаточная чувствительность в нагруженных и протяженных линиях электропередач;
 - наличие мертвой зоны по напряжению, что может привести к отказу при трехфазных коротких замыканиях вблизи места установки защиты.

6 ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

6.1 Принцип действия

Принцип действия дистанционной защиты основан на контроле изменения сопротивления. Например, если защищаемым объектом является линия рисунок 40, то в нормальном режиме параметры напряжения на шинах и тока в линии близки к номинальным: $U_{\text{л}} = U_{\text{ном}}$, $I_{\text{л}} = I_{\text{ном}}$, отношение $z_{\text{н}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$ соответствует нормальному режиму.

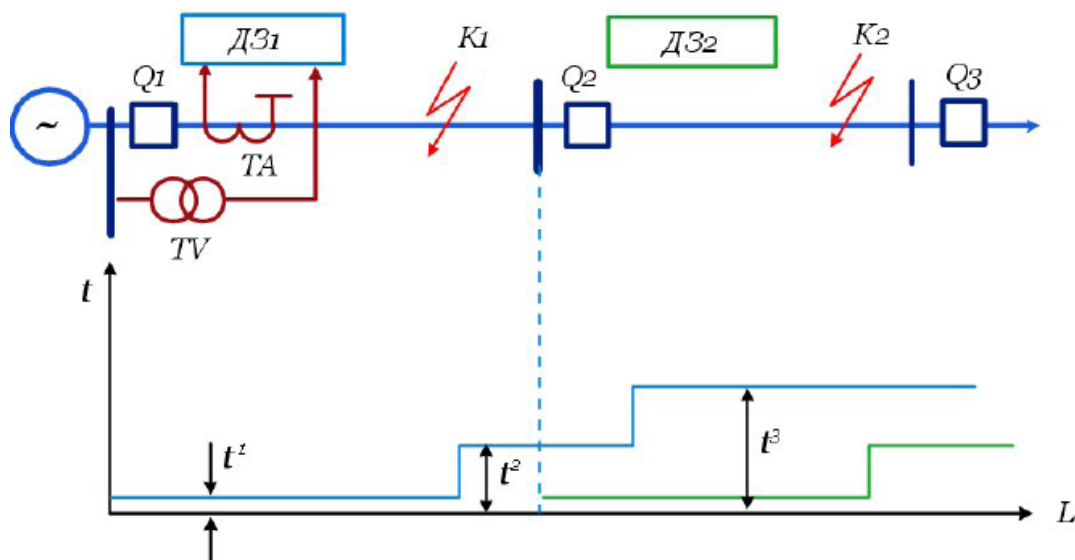


Рисунок 40 – Принцип действия дистанционной защиты

При возникновении короткого замыкания напряжение на шинах уменьшается, ток в линии увеличивается, контролируемое сопротивление уменьшается

$$U_{\text{к}}/I_{\text{к}} < z_{\text{н}}$$

В свою очередь, $z_{\text{к}} = z_0 l_{\text{к}}$, где z_0 – сопротивление 1 км линии; $l_{\text{к}}$ – длина линии, км.

Следовательно, контролируя изменение сопротивления, можно определить факт возникновения короткого замыкания и оценить удаленность точки короткого замыкания.

Обычно дистанционная защита выполняется в виде трех ступеней, характеристика ее времени срабатывания представлена на рисунке 40. Первая ступень предназначена для работы при коротких замыканиях на защищаемой линии $z_{\text{сз}} < z_{\text{л}}$, то есть сопротивление срабатывания защиты должно быть меньше сопротивления линии.

Для идеальных трансформаторов тока и трансформаторов напряжения и при отсутствии погрешностей измерительных органов в последнем выражении должен стоять знак равенства, однако наличие погрешностей может привести к ложной работе защиты при коротком замыкании на смежных присоединениях.

Как правило, первая ступень охватывает 85 % длины защищаемой линии. При коротких замыканиях в зоне действия первой ступени защита работает без выдержки времени, $t_1 = 0$.

Вторая ступень предназначена для надежной защиты всей линии. Ее зона действия попадает на смежную линию, поэтому для исключения неселективного срабатывания защиты при коротком замыкании на отходящей линии в точке K_2 , вводится замедление на срабатывание,

$$t_2 = 0,4 \dots 0,5 \text{ сек.}$$

Третья ступень выполняет функции ближнего и дальнего резервирования

6.2 Характеристики измерительных органов дистанционной защиты

В качестве измерительных органов дистанционной защиты используются реле сопротивления, которые могут выполняться на индукционной или полупроводниковой основе. Основное отличие различных исполнений реле заключается в способе обработки поступающей информации о токе и напряжении.

Поведение реле сопротивления в различных режимах зависит от его характеристики $z_{ср} = f(\varphi_p)$, где φ_p – угол между током и напряжением, подводимых к реле.

Полное сопротивление z состоит из активного r и реактивного x сопротивлений: $z = r + jx$ или $z = \sqrt{r^2 + x^2}$, поэтому характеристику реле сопротивления представляют в плоскости z , откладывая r по горизонтальной, а x – по вертикальной оси.

Характеристики измерительных органов дистанционных защит должны быть надежно отстроены от нагрузочных режимов, учитывать влияние сопротивления дуги.

Виды характеристик реле сопротивления

1. Круговая характеристика с центром в начале координат рисунок 41.

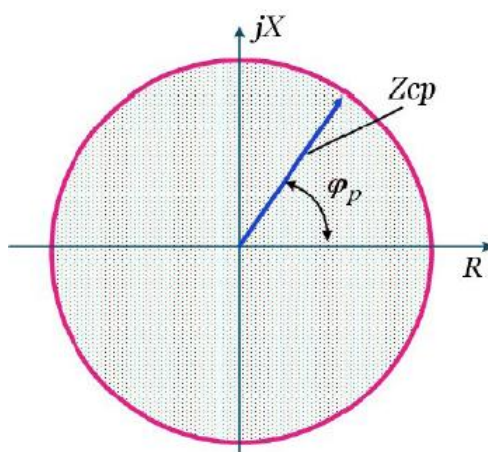


Рисунок 41 – Круговая характеристика с центром в начале координат

Зона, ограниченная окружностью, является зоной действия реле. Сопротивление срабатывания таких реле не зависит от φ_p , поэтому их называют реле полного сопротивления.

2. Круговая характеристика, проходящая через начало координат рисунок 42.

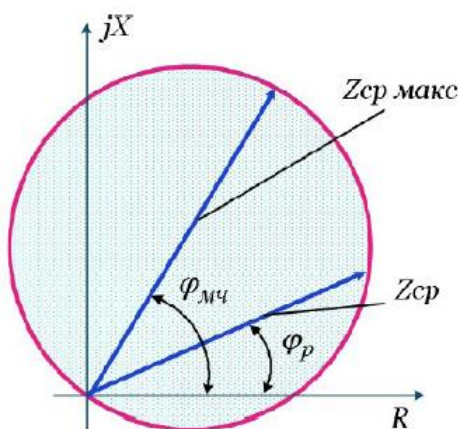


Рисунок 42 – Характеристика направленного реле сопротивления

Реле с такой характеристикой не работают при направлении тока из линии к шинам,

поэтому оно является направленным. Точка 0 соответствует началу защищаемой линии. При коротком замыкании в начале линии, когда r и x равны нулю, реле не работает, что является его недостатком. Угол φ , при котором сопротивление срабатывания реле максимально, называется углом максимальной чувствительности.

3. Реле с эллиптической характеристикой рисунок 43.

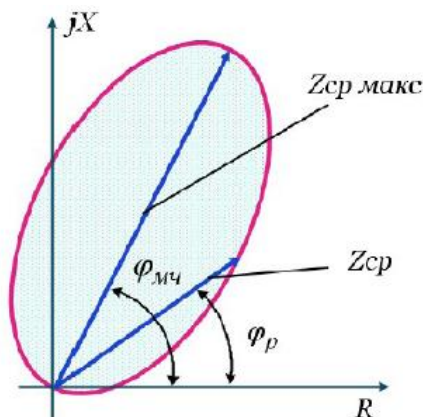


Рисунок 43 – Реле сопротивления с эллиптической характеристикой

Такие характеристики использовались для третьих ступеней защит с целью улучшения отстройки от рабочих режимов и получения большей чувствительности.

4. Реле с многоугольными характеристиками рисунок 44.

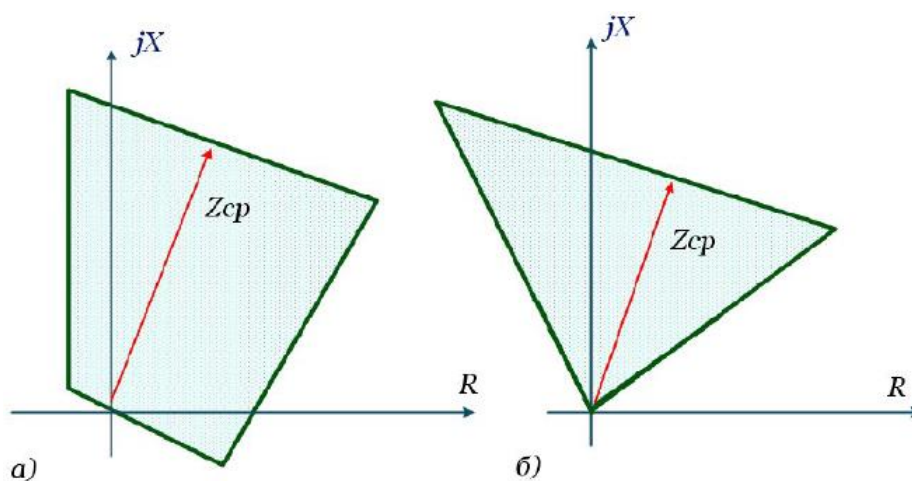


Рисунок 44 – Реле с многоугольными характеристиками

Четырехугольная характеристика рисунок 44,а используется для выполнения второй и третьей ступеней защит. Ее верхняя сторона должна фиксировать концы защищаемых зон, правая боковая сторона обеспечивает отстройку от рабочих режимов. Левая сторона отстраивает защиту от мощностей нагрузок, передаваемых к месту ее включения. Нижняя сторона обеспечивает работу защиты при близких повреждениях, сопровождающихся замыканием через переходное сопротивление.

Треугольная характеристика рисунок 44,б применяется для реле сопротивления третьей ступени, обеспечивает необходимую отстройку от нагрузочных режимов с соблюдением требуемой чувствительности.

6.3 Выполнение измерительных органов дистанционной защиты

В настоящее время измерительные органы дистанционных защит в большинстве случаев выполняются на аналоговых интегральных микросхемах или на цифровой электронике. В качестве примера рассмотрим принцип действия дистанционных органов блок реле сопротивления БРЭ 2801, выполненный на интегральной микроэлектронике.

Блок БРЭ 2801 содержит три реле сопротивления и выходной блок. В зависимости от требований к защите реле сопротивления позволяют получить следующие характеристики срабатывания с углом максимальной чувствительности равным 65° или 85° .

В схеме реле предусмотрена возможность изменять круговую характеристику на эллиптическую с отношением малых и больших осей $\varepsilon = a/b = 0,75$ и $\varepsilon = a/b = 0,5$ рисунок 45,б.

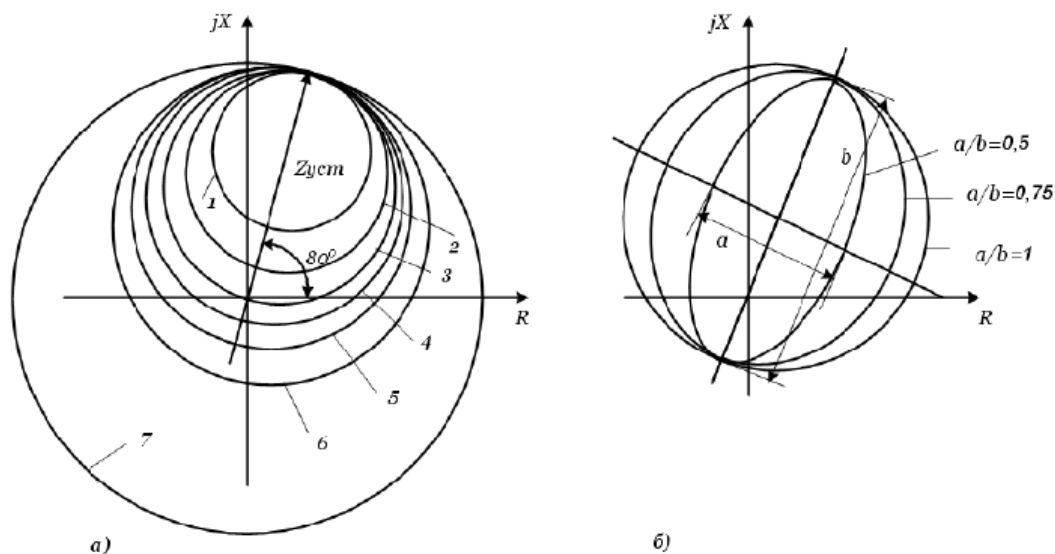


Рисунок 45 – Характеристики срабатывания реле сопротивления блока БРЭ 2801

1 – направленная окружность, смещенная в первый квадрант, с плавной уставкой смещения от 5 до 50% уставки; 2 – направленная окружность с нерегулируемым смещением в первый квадрант на 5% уставки; 3 – направленная окружность, проходящая через начало координат; 4, 5, 6 – направленная окружность с заданным смещением в третий квадрант, соответственно на 5%, 12% или 20% уставки; 7 – ненаправленная окружность с центром в начале координат

Следует отметить, что регулировка характеристики смещения реле не влияет на значение выбранной уставки срабатывания и угла максимальной чувствительности.

Рассмотрим принцип работы реле на примере характеристики, имеющей вид смещенной в третий квадрант рисунок 45. На окружности отметим точки 1 и 2, а вспомогательные вектора, соединяющие начало координат с этими точками, обозначим как Z_1 и Z_2 .

При внешнем коротком замыкании вектор $Z = Z^{\text{II}}$ расположен вне окружности и α^{II} между разностными векторами $Z^{\text{II}} - Z_1$ и $Z^{\text{II}} - Z_2$ будет меньше $\pi/2$. При коротком замыкании в зоне работы реле вектор $Z = Z^{\text{I}}$ расположен внутри окружности, а угол α^{I} между векторами $Z^{\text{I}} - Z_1$ и $Z^{\text{I}} - Z_2$ становится больше $\pi/2$. Учитывая это обстоятельство, можно различить нахождение вектора Z в зоне или вне зоны срабатывания рисунок 46.

Граничным условием срабатывания реле является выполнение равенства $\alpha_{\text{ср}} = \pi/2$.

Эллиптическая характеристика реле имитируется двумя соприкасающимися дугами окружностей. В этом случае угол срабатывания реле будет больше чем $\pi/2$.

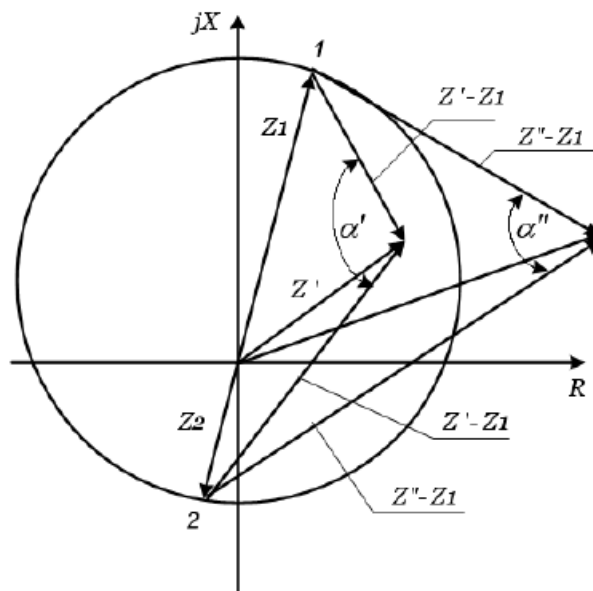


Рисунок 46 – Принцип работы реле сопротивления

В схеме реле, структурная схема которого приведена на рисунке 47, реализация рассмотренного алгоритма организована следующим образом. Сигналы, пропорциональные линейному напряжению U и соответствующей разности фазных токов I , поступают на измерительную часть реле.

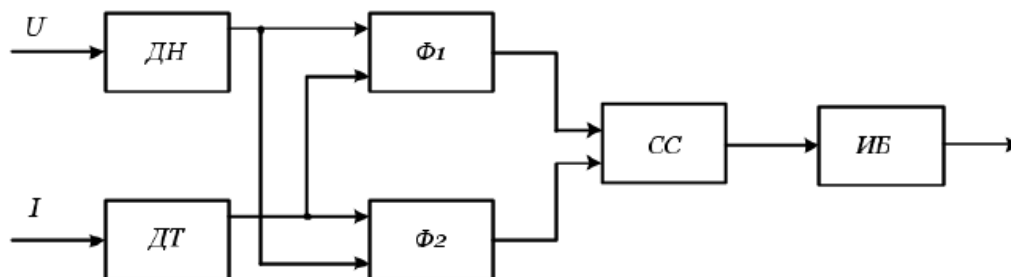


Рисунок 47 – Структурная схема реле сопротивления

С датчиков тока $ДТ$ и напряжения $ДН$ сигналы подаются в узел формирования, содержащий фильтры-сумматоры Φ_1 и Φ_2 . Узел формирования обеспечивает формирование двух величин E_1 и E_2 , каждая из которых является линейной функцией тока и напряжения контролируемой цепи и пропорциональна векторам $Z - Z_1$ и $Z - Z_2$:

$$E_1 = k_{11}U + k_{12}I; \text{ и } E_2 = k_{11}U + k_{22}I;$$

или

$$E_1 = k_{11}I(U/I + k_{12}/k_{11}) = k_{11}I(Z - Z_1);$$

$$E_2 = k_{11}I(U/I + k_{22}/k_{11}) = k_{11}I(Z - Z_2).$$

В этих выражениях $U/I = Z$ является приведенным значением сопротивления до места короткого замыкания, а отношения комплексных коэффициентов $k_{12}/k_{11} = Z_1$ и $k_{22}/k_{11} = Z_2$ – значениями вспомогательных векторов, проведенных из начала координат к особым точкам 1 и 2 на характеристике реле.

Сформированные напряжения E_1 и E_2 поступают в узел сравнения $СС$. В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании угол между напряжениями не достигает угла

срабатывания, и реле не работает. При коротком замыкании в зоне срабатывания фазовый сдвиг между сигналами возрастает и становится больше $\pi/2$, что приводит к срабатыванию реле.

Исполнительный блок ИБ выполнен на электромагнитном реле с двумя контактами.

Блок БРЭ 2801 позволяет осуществлять дистанционную защиту линий и трансформаторов напряжением 110...500 кВ. Погрешность реле по сопротивлению составляет не более 10 %. Время срабатывания в основной части характеристики не превышает 70 мс. Коэффициент возврата может меняться от 1,07 до 1,15 и зависит от значения угла максимальной чувствительности.

6.4 Структурная схема дистанционной защиты

Один из типичных вариантов выполнения трехступенчатой дистанционной защиты представлен на рисунке 48.

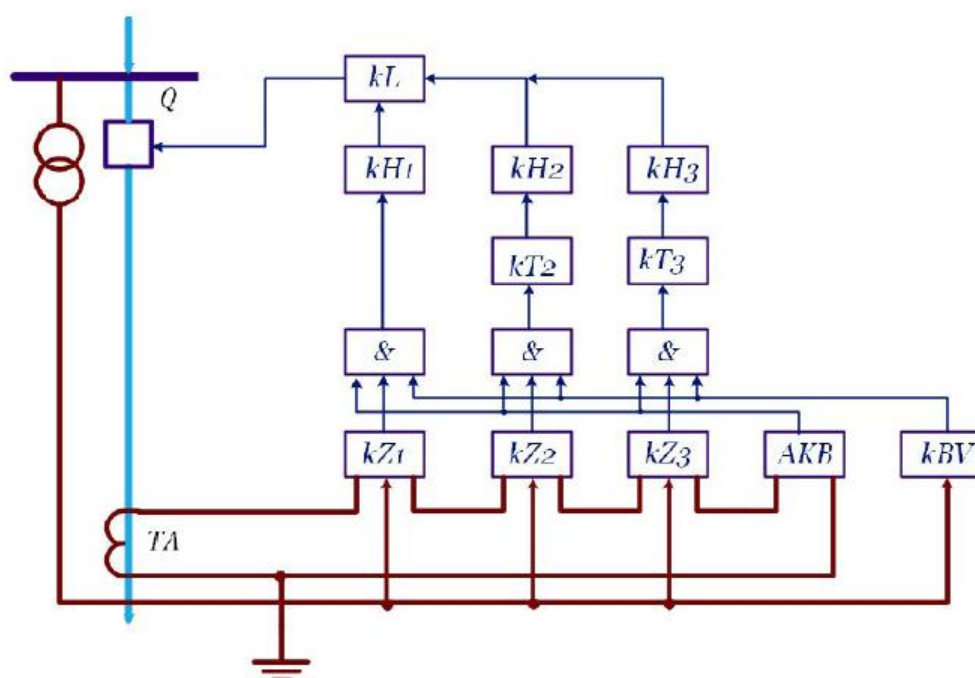


Рисунок 48 – Структурная схема дистанционной защиты

При возникновении короткого замыкания в зоне действия первой ступени срабатывают дистанционные органы первой KZ_1 , второй KZ_2 и третьей KZ_3 ступеней. Сигналы от реле сопротивлений каждой ступени поступают на схемы логического умножения. Одновременно на другие входы схем подаются сигналы блокировки от качаний AKB и блокировки от нарушения цепей напряжения KBV .

Блокировка от нарушения цепей напряжения KBV запрещает работу защиты при неисправности цепей напряжения. В случае срабатывания автоматических выключателей или предохранителей цепей трансформатора напряжения напряжение, подводимое к реле сопротивления, может оказаться недопустимо мало, что приведет к ложному действию защиты.

Блокировка от качаний AKB запрещает работу защиты при нарушении устойчивости в энергосистеме.

Сигналы с выходов схем логического умножения подаются на выходное реле KL и реле времени KT_2 и KT_3 . Первым срабатывает реле KL , подавая команду на отключение вы-

ключателя без выдержки времени.

При коротком замыкании в зоне действия второй ступени срабатывают дистанционные органы второй KZ_2 и третьей ступени KZ_3 Реле времени KT_2 , отработав выдержку порядка 0,4...0,5 сек., формирует команду на отключение выключателя.

Третья ступень работает при отказе первой или второй ступеней защит или несрабатывании защит смежных присоединений.

6.5 Принципы выполнения блокировки от качаний

При нарушении параллельной работы энергосистемы нарушается синхронная работа электростанций и возникает асинхронный ход, сопровождающийся периодическими изменениями (качаниями) тока и напряжения рисунок .В этих условиях реле сопротивления может замерить сопротивление меньше уставки и ложно сработать.

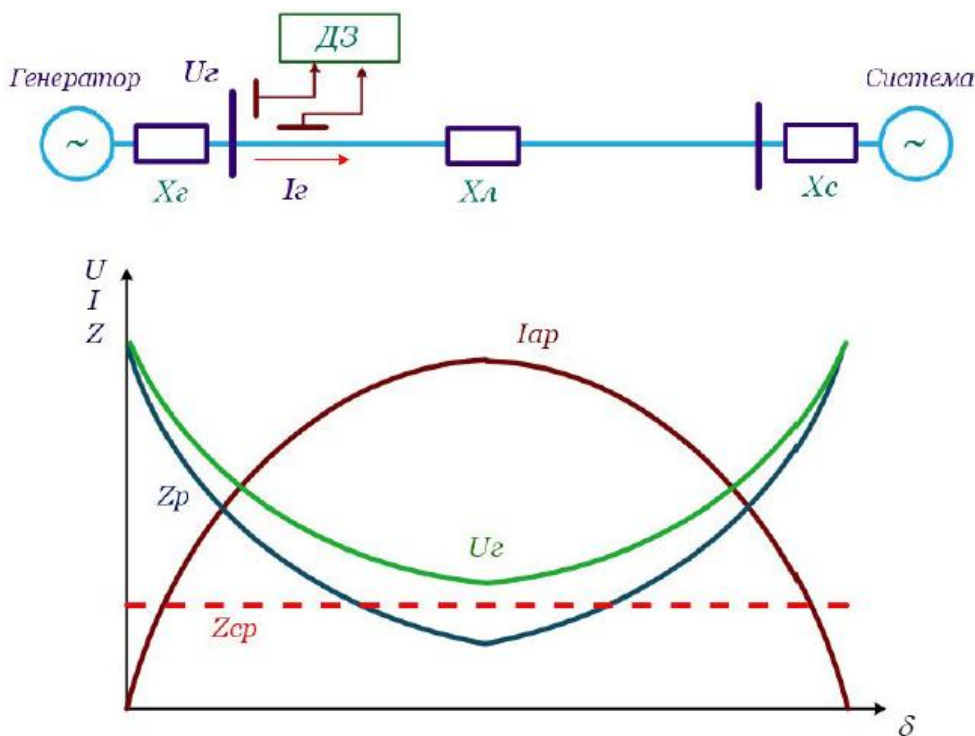


Рисунок 49 – Схема работы электростанции на приемную энергосистему:

I_g – ток в линии; X_g – сопротивление генераторов электростанции; X_l – сопротивление линии связи; X_c – сопротивление системы; U_g – напряжение в месте установки защиты; I_{ap} – ток асинхронного режима; δ – угол между ЭДС генератора и системы

По принципу действия устройства блокировки от качаний могут быть разделены на две группы:

1. Короткие замыкания и качания различают по хотя бы кратковременному наличию аварийных составляющих, например, токов обратной последовательности.
2. Короткие замыкания и качания различают по скорости изменения токов и напряжений.

6.6 Расчет параметров срабатывания дистанционной защиты

Первичное сопротивление срабатывания первой ступени выбирается из условия от-

стройки от коротких замыканий на шинах противоположной подстанции:

$$z_{сз}^1 \leq k_n z_{л1}$$

где $k_n = 0,8 \dots 0,85$ – коэффициент надежности, учитывающий погрешности трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, реле сопротивления и погрешности расчета; $z_{л1}$ – сопротивление защищаемой линии.

Первичное сопротивление срабатывания второй ступени определяется по следующим условиям:

1. Отстройка от конца зоны действия первой ступени дистанционной защиты смежной линии

$$z_{сз}^2 = k_n (z_{л1} + z_{л2} k_n / k_{ток})$$

где $z_{сз}^2$ – первичное сопротивление срабатывания второй ступени дистанционной защиты линии Л₁ рисунок 50; $z_{л1}$ – сопротивление защищаемой линии; $z_{л2}$ – сопротивление смежной линии; $k_{ток}$ – коэффициент токораспределения, учитывающий отношение тока короткого замыкания в месте установки защиты к току в линии, с защитой которой проводится согласование. Например, для дистанционной защиты, представленной на рисунке 50, $k_{ток} = I_{k1}/I_{k2}$.

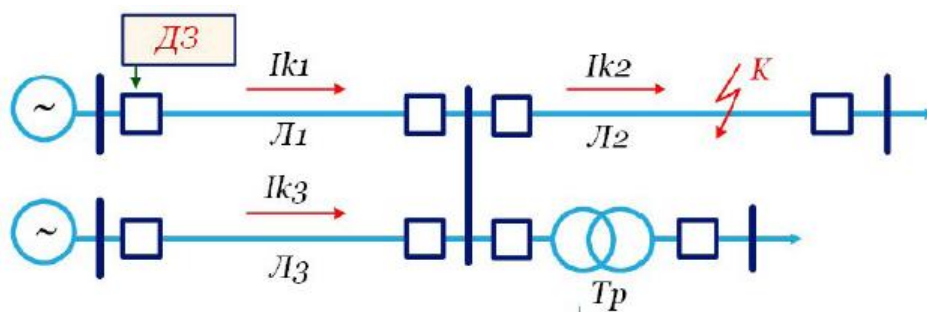


Рисунок 50 – Иллюстрация к расчету дистанционной защиты

2. Отстройка от короткого замыкания за трансформатором приемной подстанции

$$z_{сз}^2 = k_n (z_{л1} + z_{тр} / k_{ток})$$

где $z_{тр}$ – сопротивление трансформатора.

Из рассчитанных значений сопротивлений срабатывания выбирается меньшее.

Коэффициент чувствительности второй ступени определяется по выражению:

$$k_{ч} = z_{сз}^2 / z_{л1} > 1,25.$$

Выдержка времени для второй ступени принимается равной 0,4...0,5) сек.

Сопротивление срабатывания третьей ступени выбирается из условия отстройки от нагрузочного режима:

$$z_{сз}^3 = (U_{min} \sin \varphi_{наг.расч}) / (\sqrt{3} I_{н.мах} k_n k_{\epsilon} \sin \varphi_{мч}),$$

где U_{min} – минимальное рабочее напряжение на шинах подстанции; $I_{н.мах}$ – максимальный ток нагрузки; $k_n = 1,2 \dots 1,25$ – коэффициент надежности; k_{ϵ} – коэффициент возврата; $\varphi_{наг.расч}$ – расчетный угол нагрузки; $\varphi_{мч}$ – угол максимальной чувствительности реле.

Требуемый коэффициент чувствительности оценивается по короткому замыканию в конце зоны резервирования. Его значение должно быть не менее 1,2. Пересчет первичного сопротивления срабатывания защиты на сопротивление срабатывания реле производится по выражению

$$z_{ср} = z_{сз} n_{тн} / n_{тн}$$

где $z_{ср}$ – сопротивление срабатывания реле; $z_{сз}$ – первичное сопротивление срабатывания защиты; $n_{тн}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока; $n_{тн}$ – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Выводы

1. Принцип действия дистанционной защиты основан на контроле сопротивления.
2. Дистанционная защита удовлетворяет требованиям селективности в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания.
3. Защита отличается сравнительно высоким быстродействием.
4. В типовом исполнении дистанционная защита линий содержит три ступени.
5. Дистанционная защита в качестве основной защиты линий от междуфазных коротких замыканий находит применение в сетях напряжением 110...220 кВ.

7 ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ С АБСОЛЮТНОЙ СЕЛЕКТИВНОСТЬЮ

7.1 Продольная дифференциальная защита

К защитам с абсолютной селективностью относятся продольные и поперечные дифференциальные защиты и дифференциально-фазные высокочастотные защиты

Продольная дифференциальная защита.

Принцип действия продольной дифференциальной защиты рассмотрим на примере линии с двухсторонним питанием рисунок 51.

Для выполнения защиты по концам линии ставятся трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки соединяются между собой, параллельно обмоткам включается токовое реле.

В нормальном режиме работы или при внешнем коротком замыкании в точке K_1 , в обоих трансформаторах тока проходит одинаковый первичный ток. Ток в реле, определяемый как разность вторичных токов, примерно равен нулю:

$$I_p = \frac{I_1}{n_{mm}} - \frac{I_2}{n_{mm}} \approx 0.$$

При коротком замыкании в защищаемой зоне, точка K_2 , в реле протекает сумма вторичных токов, и реле сработает:

$$I_p = \frac{I_1}{n_{mm}} + \frac{I_2}{n_{mm}} \neq 0.$$

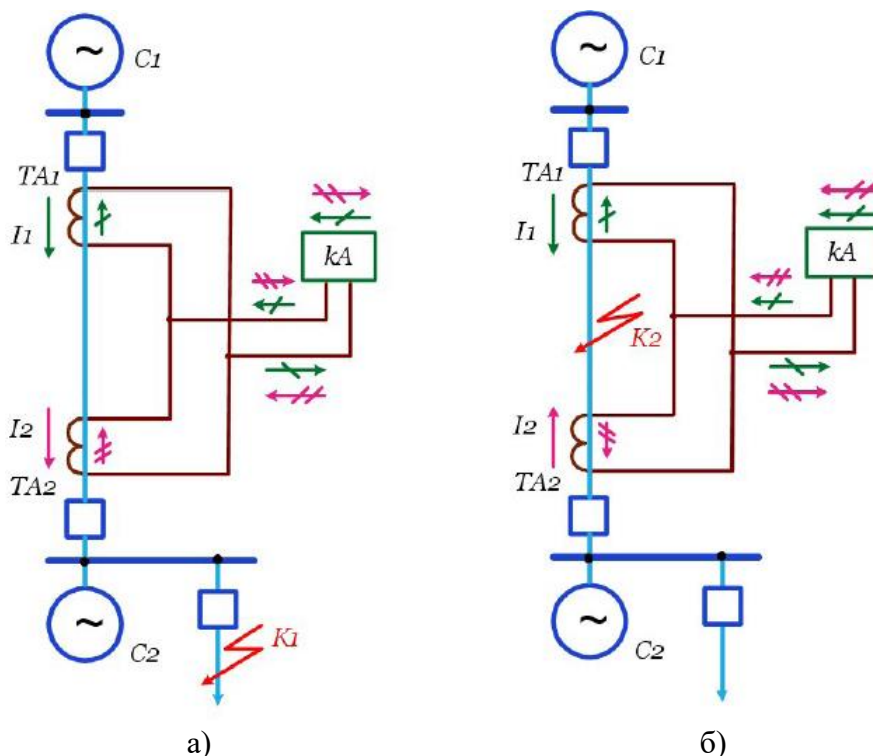


Рисунок 51 – Схема продольной дифференциальной защиты:

а) – режим внешнего короткого замыкания; б) – короткое замыкание в зоне действия защиты

В режиме внешнего замыкания ток в реле равен нулю только для идеальных трансформаторов тока. Реальные трансформаторы тока обладают погрешностями, и через реле протекает ток небаланса. Причина возникновения тока небаланса пояснена на рисунке 52.

Из сопоставления характеристик 1 и 2 следует, что ток небаланса $I_{нб} = I_{нам1} - I_{нам2}$ бу-

дет равен нулю при полном совпадении характеристик, что является нереальным событием. Поэтому, чтобы защита не сработала ложно при внешних замыканиях, ее ток срабатывания должен быть больше максимально возможного тока небаланса:

$$I_{сз} > k_n I_{нб \max}.$$

Для определения тока небаланса пользуются приближенной зависимостью

$$I_{нб} = k_a k_{одн} f_i I_{кз \text{ вн } \max},$$

где k_a – коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в токе короткого замыкания. Если в качестве пускового органа защиты используется обычное реле тока, то величина k_a зависит от времени работы защиты t_3 : $k_a = 2$, если $t_3 < 0,1$ сек.; $k_a = 1,5$, если $t_3 = 0,1 \dots 0,3$ сек.; $k_a = 1$, если $t_3 > 0,3$ сек.; $k_{одн} = 0,5 \dots 1$ – коэффициент однотипности условий работы трансформаторов тока. Значение 0,5 принимается при примерно одинаковых вторичных токах; $f_i = 0,1$ – допустимая погрешность трансформаторов тока; $I_{кз \text{ вн } \max}$ – максимальное значение тока внешнего короткого замыкания

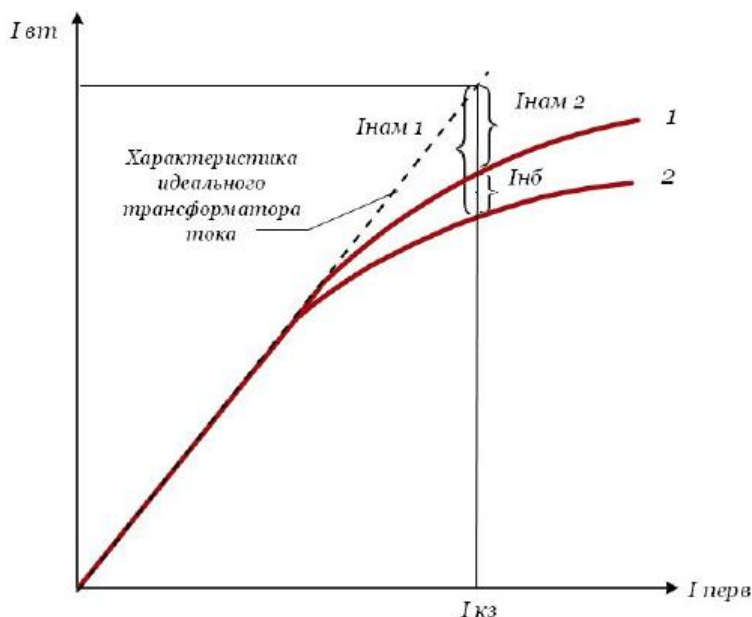


Рисунок 52 – Ток небаланса дифференциальной защиты:

$I_{перв}$ – первичный ток; $I_{вт}$ – вторичный ток трансформатора тока; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания; $I_{нам1}$ и $I_{нам2}$ – токи намагничивания трансформаторов тока TA_1 и TA_2 ; $I_{нб}$ – ток небаланса дифференциальной защиты

Выводы.

1. Принцип действия продольной дифференциальной защиты основан на сравнении токов по концам защищаемого объекта.
2. По принципу действия защита не требует замедления на срабатывание.
3. Необходимость прокладки контрольного кабеля для соединения трансформаторов тока приводит к тому, что для защиты линий продольная дифференциальная защита применяется сравнительно редко.
4. В качестве основной защиты дифференциальная защита получила широкое распространение для защиты оборудования: генераторов, трансформаторов, двигателей, шин.

7.2 Поперечная дифференциальная защита

Принцип действия поперечной дифференциальной защиты рассмотрим на примере сети, представленной на рисунке 53.

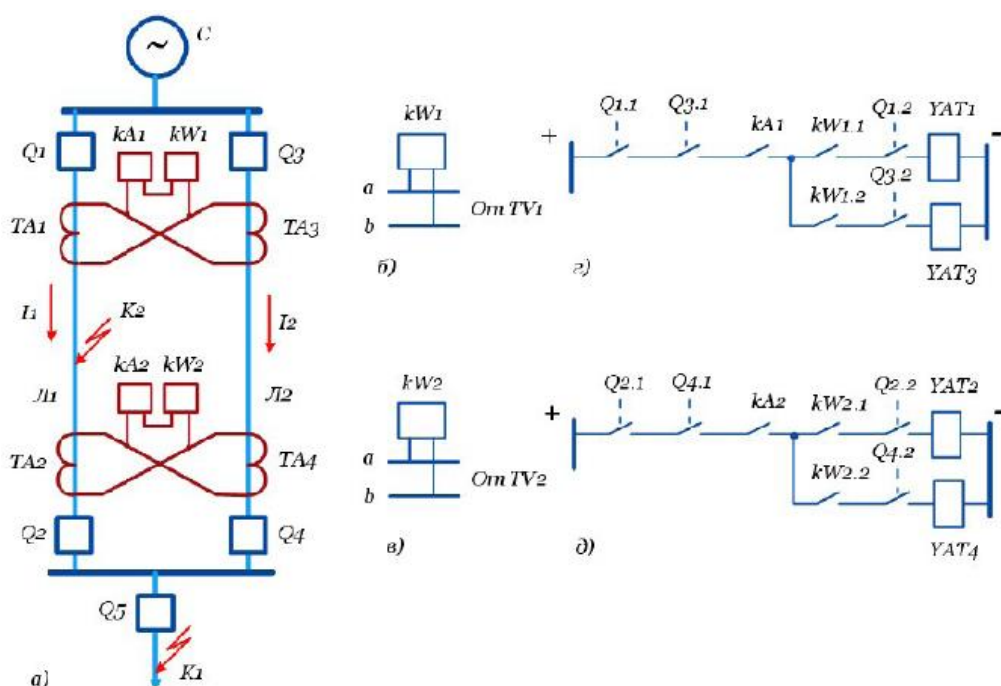


Рисунок 53 – Поперечная дифференциальная токовая защита параллельных линий:
а) – токовые цепи; б), в) – цепи напряжения; г), д) – цепи постоянного тока

По концам каждой из параллельных линий ставятся трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются между собой на разность токов. Параллельно вторичным обмоткам включается пусковой орган, выполненный на реле тока и реле мощности.

В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании в точке K_1 – ток в реле практически отсутствует:

$$I_{p1} = \left(\frac{I_1}{n_{mm}} - I_{нам1} \right) - \left(\frac{I_2}{n_{mm}} - I_{нам2} \right) = I_{нб},$$

$$I_{p2} = \left(\frac{I_1}{n_{mm}} - I_{нам1} \right) - \left(\frac{I_2}{n_{mm}} - I_{нам2} \right) = I_{нб},$$

так как токи I_1 и I_2 , протекающие по параллельным линиям, равны между собой. Через реле проходит лишь ток небаланса, вызываемый погрешностью трансформаторов тока, и защита не работает.

При коротком замыкании на одной из защищаемых линий, например, в точке K_2 , через первый комплект проходит ток

$$I_{p1} = \frac{I_1}{n_{mm}} - \frac{I_2}{n_{mm}} \neq 0,$$

а так как ток $I_1 > I_2$, комплект 1 работает. Одновременно работает комплект 2, поскольку через реле протекает ток

$$I_{p2} = \frac{I_2}{n_{mm}} - \left(-\frac{I_2}{n_{mm}} \right) = \frac{2I_2}{n_{mm}}$$

Реле мощности каждого комплекта выбирает поврежденную линию.

При отключении одной из параллельных линий блок-контактами сработавших выключателей защита выводится из работы для устранения возможности ее неселективного действия при внешнем коротком замыкании.

По принципу действия поперечная дифференциальная защита не требует введения замедления на срабатывание, и при коротких замыканиях на защищаемых линиях оба ком-

плекта сработают одновременно и практически мгновенно. Однако при коротких замыканиях в начале или конце линии защита работает каскадно рисунок 54.

При повреждении в начале линии, точка K_1 , ток $I_1 \ll I_2$, и ток I_1 недостаточен для срабатывания комплекта 2, поэтому выключатель 4 отключится только после отключения выключателя 3, когда весь ток повреждения начинает протекать через второй комплект.

При повреждении в конце линии, точка K_2 , токи, протекающие по линиям, будут примерно одинаковы, поэтому первым работает комплект 2, подаст команду на отключение выключателя 4, и только после этого комплект 1 отключит выключатель 2.

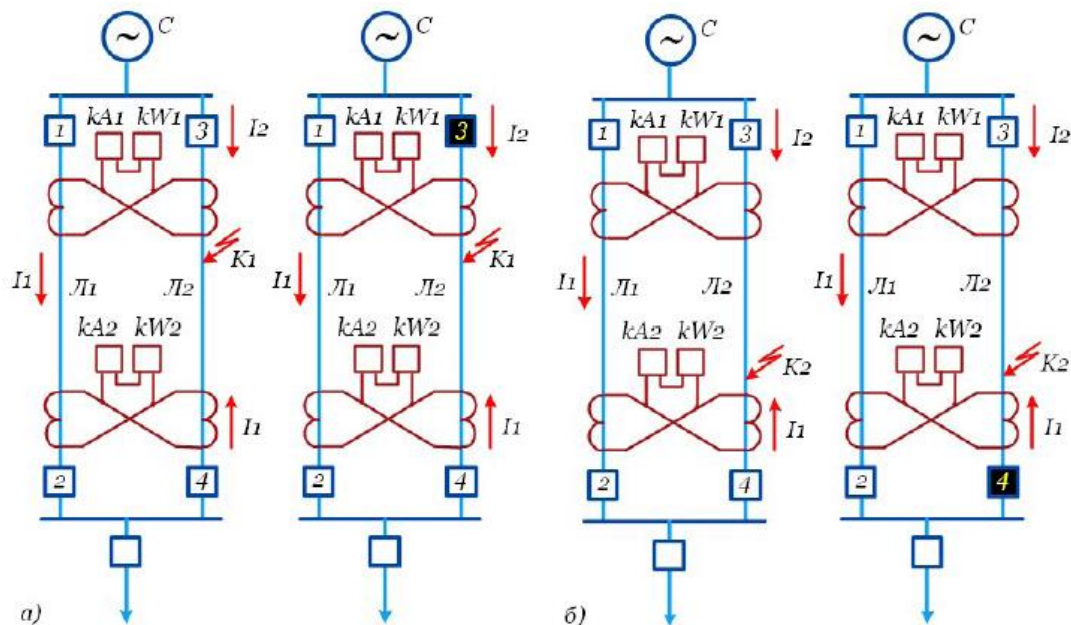


Рисунок 54 – Каскадная работа поперечной дифференциальной защиты:
а) – короткое замыкание в начале линии; б) – короткое замыкание в конце линии

Ток срабатывания поперечной дифференциальной защиты выбирается по двум условиям:

1. Защита не должна работать от максимально возможного тока небаланса при внешних коротких замыканиях:

$I'_{нб} = k_a k_{одн} f_i I_{кз вн \max}$ составляющая тока небаланса, вызываемая погрешностью трансформаторов тока. Значения коэффициентов в выражении такие же, как и для продольной дифференциальной защиты;

$I''_{нб} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}$ – составляющая тока небаланса, обусловленная неодинаковостью сопротивлений параллельных линий за счет их различной длины или разного сечения проводов.

2. Защита не должна работать при отключении одной из параллельных линий, если по второй протекает максимальный рабочий ток:

$$I_{сз} = \frac{k_n}{k_e} I_{раб. \max}.$$

Чувствительность защиты определяется по коротким замыканиям на границе зоны каскадного действия и в точке равной чувствительности. За точку равной чувствительности принимается точка короткого замыкания, при замыкании в которой токи в реле обоих комплектов равны. Защита удовлетворяет требованиям чувствительности при $k_q > 2$.

Выводы.

1. Принцип действия поперечной дифференциальной защиты основан на сравнении токов параллельных ветвей.
2. Защита отличается простотой, отключать короткие замыкания мгновенно в пределах всей линии. высоким быстродействием, достаточно высокой чувствительностью.
3. Принципиальным недостатком защиты является необходимость вывода ее из работы при отключении одной из параллельных линий.
4. Наличие зоны каскадного действия не позволяет.

7.3 Дифференциально-фазная высокочастотная защита

Принцип действия дифференциально-фазной защиты основан на сравнении фаз токов по концам защищаемой линии. На рисунке 55 показана схема токораспределения при внутреннем и внешнем коротких замыканиях.

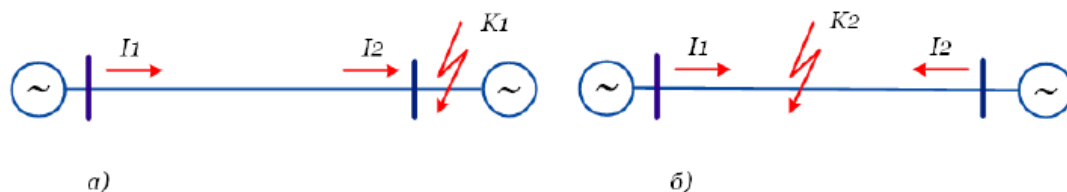


Рисунок 55 – Принцип действия дифференциально-фазной высокочастотной защиты:
а) – внешнее короткое замыкание; б) – внутреннее короткое замыкание

При внешнем коротком замыкании, точка K_1 , фазы токов I_1 и I_2 сдвинуты друг относительно друга на 180° ; при внутреннем замыкании, точка K_2 – совпадают между собой. Следовательно, контролируя фазы токов по концам защищаемой линии, можно определить возникновение повреждения на ней.

Комплекты защиты ставятся по концам защищаемой линии, и каждый из них должен обладать информацией о фазе токов на противоположном конце линии. Для передачи информации о фазе токов используется канал высокой частоты. На рисунке 56 показана схема организации высокочастотного канала

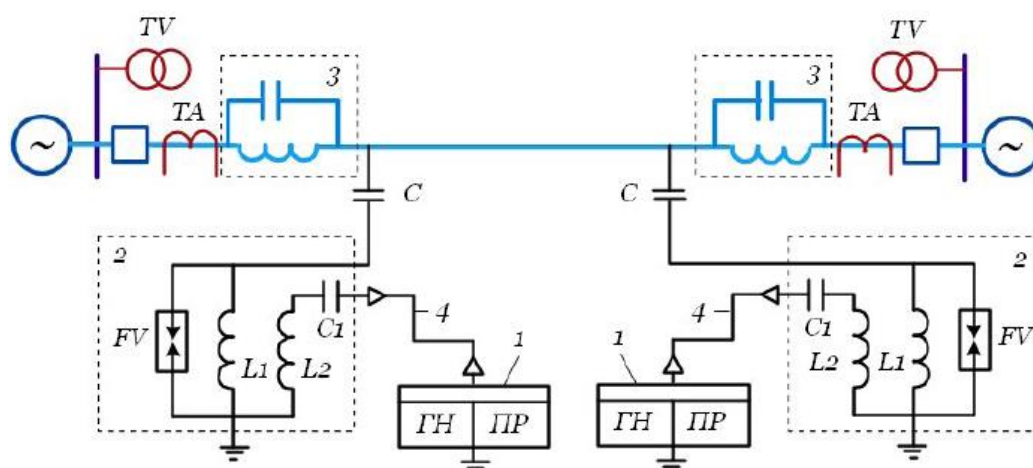


Рисунок 56 – Принципиальная схема высокочастотного канала

Каждый комплект содержит высокочастотный приемопередатчик 1, состоящий из генератора высокочастотных сигналов $ГН$ и приемника $ПР$. Приемопередатчик через фильтр

присоединения 2 и конденсатор связи C соединяется с линией. Ток от высокочастотного генератора в этой схеме подается на одну из фаз линии. Для того чтобы токи высокой частоты не выходили за пределы линии, по концам линии устанавливаются специальные высокочастотные заградители 3.

Заградитель представляет собой индуктивно-емкостный фильтр, обладающий малым сопротивлением для токов промышленной частоты и не пропускающий токи высокой частоты за пределы защищаемой линии.

С помощью фильтра присоединения согласуется входное сопротивление высокочастотного кабеля 4 и линии. Параллельно обмотке L_1 фильтра подключен разрядник FV , который срабатывает в случае пробоя конденсатора связи. Упрощенная принципиальная схема логической части направленной фильтровой высокочастотной защиты линий 110...330 кВ типа ПДЭ 2802 представлена на рисунке 57.

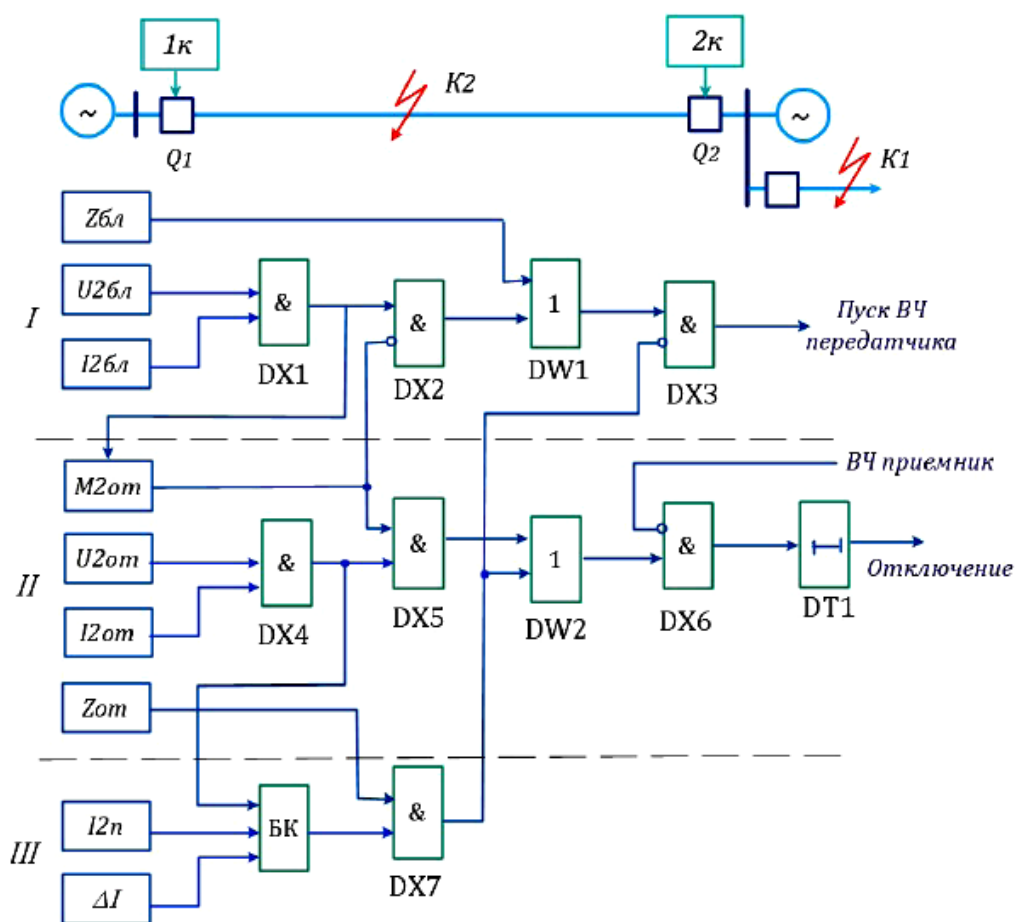


Рисунок 57 – Упрощенная принципиальная схема логической части ПДЭ 2802

В схеме можно выделить несколько основных каналов, поясняющих принцип работы защиты:

- I – канал пуска высокочастотного передатчика;
- II – канал отключения;
- III – канал блокировки при качаниях.

При внешнем несимметричном замыкании, точка K_1 , чувствительные измерительные органы обоих комплектов, содержащие реле тока обратной последовательности $I26л$ и реле напряжения обратной последовательности $U26л$ и включенные по схеме II, запускают высокочастотные передатчики.

Для 1 комплекта направление тока положительно, что приводит к срабатыванию реле

мощности обратной последовательности $M2om$, разрешающего прохождение команды на отключение выключателя Q_1 и останавливающего высокочастотный передатчик своего комплекта.

Реле мощности 2 комплекта не сработает, из-за чего прохождение команды на отключение выключателя Q_2 блокируется, а высокочастотный передатчик комплекта не останавливается. Блокирующий элемент $DX6$ 1 комплекта при наличии высокочастотного сигнала в линии запрещает прохождение команды на отключение выключателя Q_1 .

Защита не работает.

Селективность действия защиты обеспечивается за счет согласования по чувствительности элементов $I2бл$ и $U2бл$ с более грубыми $I2om$ и $U2om$.

При внутреннем несимметричном замыкании, точка K'_2 , сработают реле мощности каждого из комплектов, передатчики останавливаются и подается команда на отключение Q_1 Q_2 .

При симметричных повреждениях роль измерительных органов защиты выполняют два направленных реле сопротивления $Zбл$ и Zom с эллиптическими характеристиками. Реле сопротивления вводятся в действие схемой блокировки при качаниях $БК$. Пуск блокировки производят реле ΔI , реагирующее на производную фазного тока, и реле $I2n$, срабатывающее за счет появления кратковременной несимметрии.

При внешнем симметричном коротком замыкании реле сопротивления второго комплекта $Zбл$ запускает высокочастотный передатчик и передает по линии блокирующий сигнал. Отключения не произойдет.

При симметричных коротких замыканиях в защищаемой зоне Zom останавливают передатчики всех комплектов и через элемент $DW2$ воздействуют на основной канал отключения.

При качаниях или асинхронном ходе реле ΔI и $I2n$ не разрешают прохождение команды на отключение в случае возможного срабатывания реле Zom .

Выводы.

1. Принцип действия дифференциально-фазной защиты основан на сравнении фаз токов по концам защищаемой линии.

2. Защита отличается быстроедействием, высокой чувствительностью, обеспечивает требование селективности в сетях любой конфигурации и с любым числом источников питания.

3. По принципу действия дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку и качания.

8 ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

8.1 Автоматическое повторное включение (АПВ)

Назначение и классификация. Практика эксплуатации энергосистем показала, что большинство коротких замыканий являются неустойчивыми, то есть такими, которые самоустраиваются после кратковременного снятия напряжения. Причинами таких повреждений могут быть кратковременные перекрытия изоляции в результате грозových перенапряжений, схлестывание проводов, «наброс» на провода и тому подобное.

Устройства автоматики, осуществляющие повторное включение оборудования после кратковременного отключения его релейной защитой, называются устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

Повторное включение является технически простым и эффективным средством повышения надежности работы энергосистем и потребителей. Так, в сетях высокого напряжения процент успешных АПВ составляет 50...90 %. Согласно ПУЭ (Правилам устройства электроустановок) применение АПВ является обязательным для всех линий напряжением выше 1 кВ.

Условно все виды АПВ можно классифицировать по признакам приведенными на рисунке 58.



Рисунок 58 – Классификация устройств автоматического повторного включения

Как видно из рисунка 58 АПВ классифицируются:

1. По числу включаемых фаз – трехфазные (ТАПВ), осуществляющие повторное включение трех фаз выключателя, и однофазные (ОАПВ), осуществляющие повторное включение одной фазы, отключенной релейной защитой.

В свою очередь, трехфазные АПВ подразделяются на несколько видов: простые (ТАПВ), быстродействующие (БАПВ), несинхронные (НАПВ), с ожиданием синхронизма (АПВОС), с улавливанием синхронизма (АПВУС) и др.

2. По числу циклов повторного включения – АПВ однократного действия и АПВ многократного действия.

По статистическим данным, процент успешных АПВ воздушных ЛЭП составляет: первое АПВ – 65...90 %; второе АПВ (при неуспешном первом) – 10... 15 %; третье АПВ (при неуспешных первых двух) – 3...5 %.

Ввиду меньшей эффективности второго и третьего циклов АПВ в энергосистемах

России наибольшее распространение получило однократное АПВ, а трехкратное практически не применяется. На линиях с двухсторонним питанием используется АПВ однократного действия.

3) По способу пуска – пуск от релейной защиты и пуск от несоответствия положения ключа управления и выключателя.

Пуск от релейной защиты выполняется после отключения оборудования релейной защитой. Ограниченность применения этого метода состоит в том, что он выполняет запуск АПВ при включении выключателя оперативным персоналом на короткое замыкание, поскольку повреждения в этом случае обычно бывают устойчивыми.

Второй способ пуска более универсален и лишен приведенного выше недостатка.

4) По виду включаемого оборудования различают АПВ следующего назначения:

- воздушные и кабельные линии напряжением выше 1000 В;
- сборные шины станций и подстанций при отсутствии автоматического включения резерва;
- одиночно работающие понижающие трансформаторы мощностью более 1000 кВА;
- обходные и шиносоединительные выключатели;
- ответственные электродвигатели собственных нужд.

8.2. Основные требования к схемам АПВ

Все устройства автоматического включения независимо от места их установки должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Устройство АПВ должно приходить в действие при любых аварийных отключениях выключателя за исключением случая, когда выключатель включается оперативным персоналом на короткое замыкание;
2. АПВ не должно работать при отключении выключателя оперативным персоналом;
3. Схема АПВ должна обеспечивать заданную кратность действия;
4. Время работы АПВ должно быть минимально возможным;
5. Устройство АПВ должно выполняться с автоматическим возвратом в исходное состояние.

8.3. Согласование работы устройств АПВ и релейной защиты

Согласование работы устройств и релейной защиты применяется для уменьшения экономического ущерба от недоотпуска электроэнергии при возникновении коротких замыканий и снижения капитальных затрат на сооружение источника электроснабжения.

Ускорение действия защиты до АПВ применяется на радиальных линиях с односторонним питанием напряжением 10...35 кВ при отсутствии быстродействующих защит. Ликвидация коротких замыканий вблизи источников питания на таких линиях будет сопровождаться большими выдержками времени, что резко снижает эффективность действия АПВ рисунк 59.

На головной линии, помимо селективной защиты МТЗ₁, ставится неселективная НЗ, не имеющая выдержки времени на срабатывание и устройство АПВ. На других линиях АПВ не устанавливается.

При коротких замыканиях на любой из линий, например в точке К, работает неселективная защита НЗ и без выдержки времени отключает головной выключатель. Далее АПВ включает выключатель и выводит из работы неселективную защиту. При успешном АПВ короткое замыкание ликвидируется с минимальной выдержкой времени при неуспешном – работает селективная защита поврежденной линии.

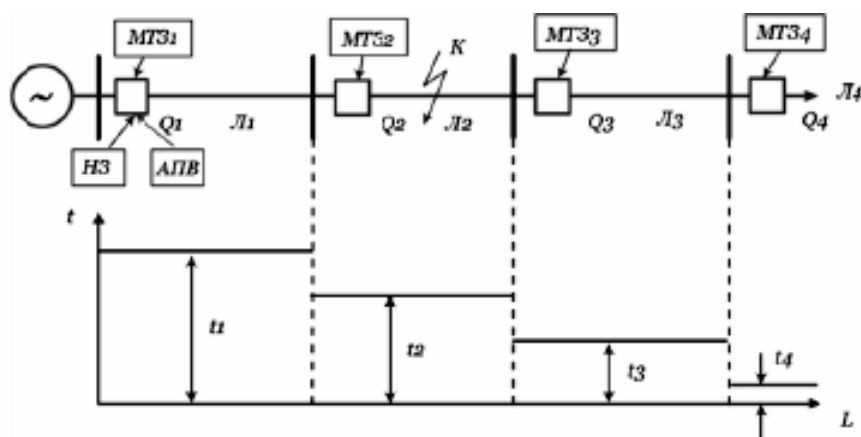


Рисунок 59 – Ускорение действия защиты до АПВ

Ускорение действия защиты после АПВ предусматривается на оборудовании не имеющем быстродействующих защит для снижения или полного исключения выдержки времени защиты после повторного его включения на устойчивое повреждение.

На линиях, оснащенных быстродействующей защитой, ускорение после АПВ может ставиться для уменьшения вероятности нарушения устойчивости работы энергосистемы и уменьшения размеров повреждений в месте короткого замыкания.

На рисунке 60 показан принцип выполнения ускорения действия защиты после АПВ.

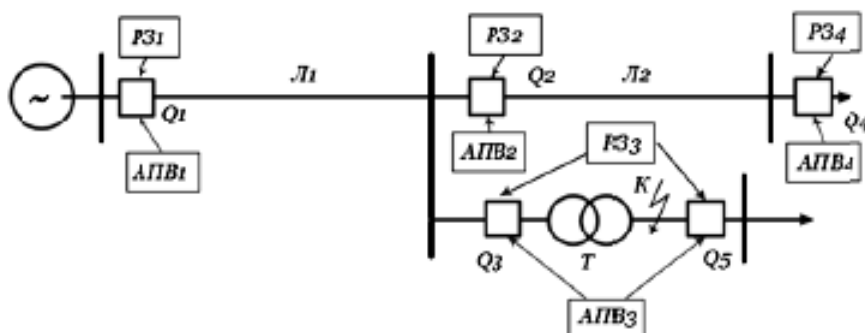


Рисунок 60 – Ускорение действия защиты после АПВ

Устройства АПВ ставятся на каждом присоединении. При коротком замыкании в какой-либо точке сети, например в точке K , работает селективная защита $РЗ_3$ и с установленной выдержкой времени подает команду на отключение выключателей Q_3 и Q_4 . После отключения выключателей АПВ повторно их включает. В случае устойчивого к.з. снова работает релейная защита, но команда на отключение трансформатора будет сформирована без выдержки времени.

Выполнение АПВ на линиях с ответвлениями с отделителями на стороне высокого напряжения. В ряде случаев для уменьшения затрат, связанных с организацией электроснабжения потребителей, на линиях с ответвлениями на стороне высокого напряжения трансформаторов не ставят выключатели. Ликвидация коротких замыканий в этих случаях проводится согласованным действием устройств релейной защиты трансформатора.

При возникновении короткого замыкания в трансформаторе, рисунок 61, его защита действует на отключение выключателя Q_2 и на включение короткозамыкателя, который создает искусственное однофазное или двухфазное короткое замыкание на землю. Увеличение тока вызывает срабатывание быстродействующей защиты линии $РЗ_1$. После отключения ли-

нии ток исчезает, и в бестоковую паузу, автоматический отделитель отключает поврежденный трансформатор. Далее устройство АПВ повторно включает линию под напряжение.

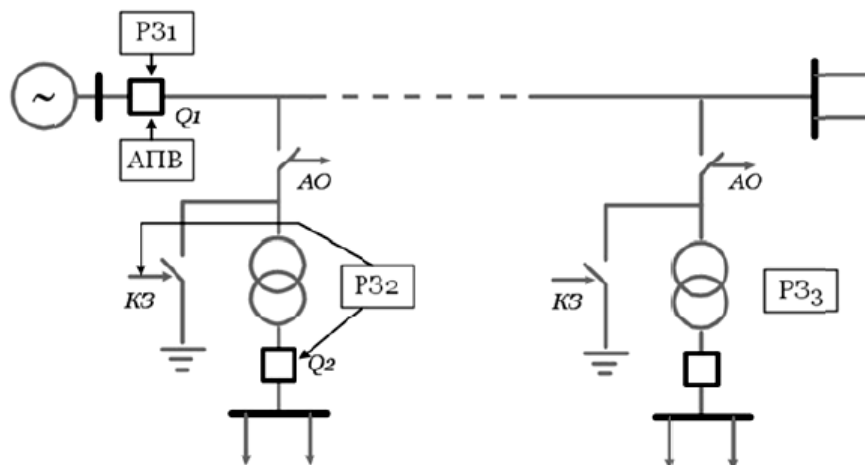


Рисунок 61 – АПВ линий с ответвлениями к подстанциям без выключателей на стороне высокого напряжения

8.4. Алгоритм работы схемы АПВ однократного действия с пуском от несоответствия положения ключа управления и выключателя

При подаче от ключа управления команды на включение выключателя одновременно формируется сигнал на подготовку АПВ к работе. Через промежуток времени порядка 8...10 секунд устройство АПВ готово к работе. Задержка необходима для исключения возможности повторного включения линии на устойчивое короткое замыкание. В случае возникновения короткого замыкания на линии работает релейная защита и отключает выключатель. Возникающее несоответствие между положением ключа управления (ключ управления находится в положении «Включено») и фактическим состоянием выключателя (контакты разомкнуты) является признаком запуска АПВ.

Устройство АПВ подает команду на включение выключателя. В случае неустойчивого короткого замыкания нормальный режим работы линии восстанавливается. При неуспешном АПВ снова работает релейная защита, отключает выключатель, и при однократном АПВ дальнейшая его работа запрещается.

Выдержка времени АПВ на повторное включение линии с односторонним питанием определяется с учетом двух условий:

- привод выключателя должен быть готов к повторному включению

$$t_{АПВ} \geq t_{ГП} + \Delta t,$$

где $t_{ГП}$ – время готовности привода выключателя.

- за время бестоковой паузы дуга, возникшая в месте повреждения, должна погаснуть

$$t_{АПВ} \geq t_d + \Delta t,$$

где t – время деионизации, составляющее для линий напряжением 110...500 кВ, величину, примерно равную 0,1...0,45 сек; $\Delta t = 0,3...0,5$ сек – время запаса.

Из двух рассчитанных значений принимается большее.

8.5 АПВ на линиях с двухсторонним питанием

В случае использования АПВ на линиях с двухсторонним питанием необходимо учитывать два обстоятельства:

1. Повторное включение может быть выполнено только при отключении линии с двух

сторон для устранения возможности включения линии под напряжение при неотключенном коротком замыкании с противоположной стороны. АПВ выключателей производится поэтапно. Сначала включается выключатель, оборудованный устройством контроля напряжения на линии в режиме опробования. При устойчивом коротком замыкании действие АПВ с другого конца линии блокируется, при успешном АПВ – разрешается.

2. Успешное включение ЛЭП может сопровождаться большими толчками тока и активной мощности. В момент включения величина тока при равенстве модулей напряжений разделившихся частей энергосистемы зависит от угла сдвига.

Условно все устройства АПВ можно разделить на две группы:

– Устройства, допускающие несинхронное включение. К ним относится несинхронное АПВ (НАПВ).

– Устройства, выполняющие включение с ограничением значения по углу включения. К ним относятся АПВ с ожиданием синхронизма (АПВОС), быстродействующее АПВ (БАПВ), АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС).

Несинхронное АПВ. НАПВ применяется в сетях среднего напряжения и повторно включает линию под напряжение без проверки условий синхронизма. Включение сопровождается значительными толчками тока, которые при определенных условиях могут превысить значение тока трехфазного короткого замыкания. Все электрооборудование энергосистем проектируется с учетом выполнения требований электродинамической и термической стойкости к токам трехфазного к.з., и превышение значения тока включения выше расчетной величины может привести к повреждению оборудования. В то же время несомненным достоинством такого способа является быстрота восстановления нормальной работы в случае успешного АПВ.

Для определения возможности применения НАПВ разработаны критерии допустимости его применения. НАПВ применимо, если кратность периодической составляющей тока включения не превышает следующих значений:

– для гидрогенераторов с успокоительными контурами и турбогенераторов с косвенным охлаждением обмоток

$$\frac{I_{НС}}{I_{НОМ}} \leq \frac{0,625}{X''d};$$

– для гидрогенераторов без успокоительных контуров и турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток

$$\frac{I_{НС}}{I_{НОМ}} \leq 3;$$

– для синхронных компенсаторов

$$\frac{I_{НС}}{I_{НОМ}} \leq \frac{0,84}{X''d};$$

– для трансформаторов и автотрансформаторов

$$\frac{I_{НС}}{I_{НОМ}} \leq \frac{100}{U_K, \%},$$

где $X''d$ – сверхпереходное сопротивление генераторов и синхронных компенсаторов; $I_{НОМ}$ – номинальный ток соответствующего оборудования; U_K – напряжение короткого замыкания трансформаторов; $I_{НС}$ – ток несинхронного включения.

Для определения значения тока несинхронного включения составляется схема замещения без учета нагрузок, рисунок 62.

По выражению

$$I_{НС} = \frac{E_{C1} + E_{C2}}{X_{C1} + X_L + X_{C2}}$$

находится значение $I_{НС}$ и распределяется по элементам включаемых частей энергосистемы.

В этом выражении E_{C1} , E_{C2} – фазные ЭДС, в первом приближении принимаются рав-

ными $E_{C1} = E_{C2} = 1,05 U_{НОМ}/\sqrt{3}$; X_{C1} , X_{C2} , X_L – сопротивления разделившихся частей энергосистемы и включаемой линии.

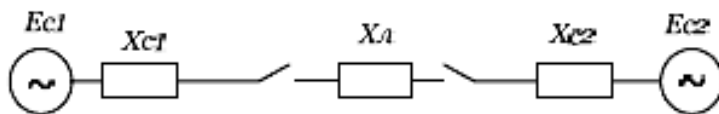


Рисунок 62 – Иллюстрация к расчету тока несинхронного включения

Поскольку работа НАПВ сопровождается значительным толчком тока, то при выборе параметров срабатывания защиты этот режим необходимо принимать во внимание.

Если токи несинхронного включения для какого-либо электрооборудования превышают допустимые значения, то расчет следует повторить с учетом нагрузки $E_H = 0,9$; $X_H = 0,35$. Если и повторный расчет приведет к отрицательному результату, то следует выбрать другой вид АПВ, в первую очередь, устройство АПВ с ожиданием синхронизма АПВОС.

АПВ с ожиданием синхронизма Принцип действия АПВОС основан на контроле синхронности напряжений включаемых частей энергосистемы. Повторное включение допускается при одновременном выполнении следующих условий:

1. Разность модулей включаемых напряжений не должна превышать 5 %.
2. Угол сдвига между векторами напряжений в момент включения не должен превышать 70° .
3. Разность частот не должна превышать 0,2 Гц.

При выполнении этих условий величина тока включения не превышает значение номинального тока линии.

Пример выполнения устройства АПВОС на линии с двухсторонним питанием показан на рисунке 63.

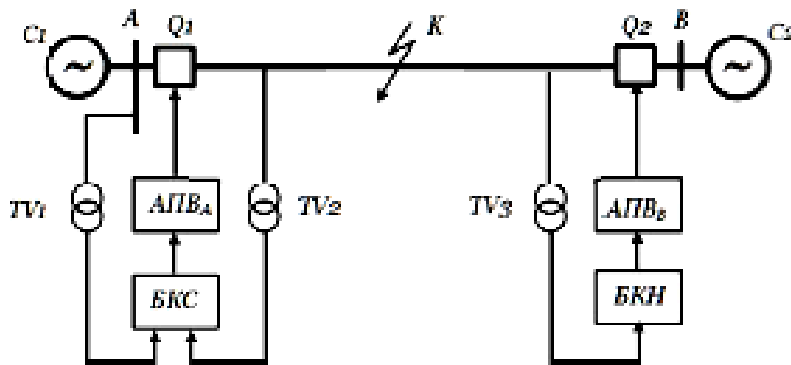


Рисунок 63 – АПВОС на линии с двухсторонним питанием

В случае возникновения короткого замыкания на линии работает релейная защита и отключает выключатели Q_1 и Q_2 . Первым начинает обрабатывать возникшее возмущение устройство АПВ_В, установленное со стороны шин В. Разрешение на запуск АПВ_В получает от блока контроля отсутствия напряжения на линии БКН, который контролирует отсутствие напряжения на линии. В режиме «опробования» определяется устойчивость короткого замыкания. При успешном включении линии под напряжение блок контроля синхронизма БКС определяет момент времени, когда напряжения включаемых частей энергосистемы синхронны или близки к синхронным, и разрешает работу АПВ_А.

Основным недостатком этого вида АПВ является длительное время восстановления нормального режима в аварийных режимах при меняющихся напряжениях по величине и по частоте. Поэтому АПВОС обычно применяются на параллельных линиях, когда отключение

одной из линий не приводит к нарушению синхронизма между частями энергосистемы.

Быстродействующее БАПВ. Принцип БАПВ заключается в том, что после отключения выключателей повторно включить их следует как можно быстрее, чтобы за время бестоковой паузы угол между векторами ЭДС разделившихся частей энергосистемы не успел значительно увеличиться.

Как правило, БАПВ применяются на слабонагруженных линиях электропередачи, оборудованных быстродействующей защитой и воздушными выключателями.

АПВ шин. АПВ шин имеет высокую эффективность, так как каждый случай работы релейной защиты при коротких замыканиях на шинах связан с большим числом отключений.

Один из возможных вариантов выполнения АПВ шин представлен на рисунке 64.

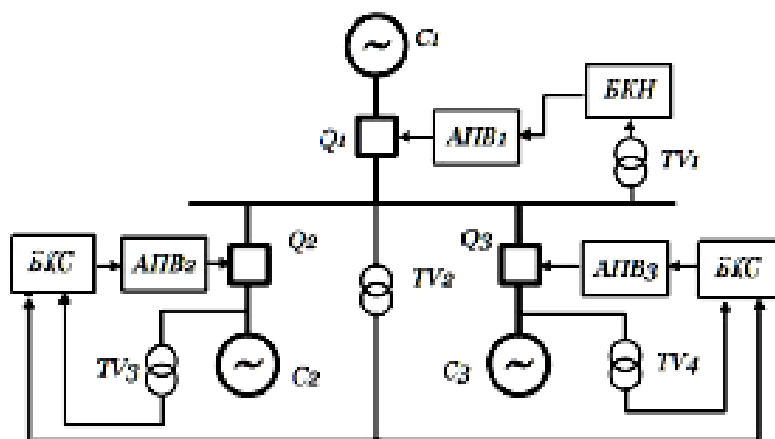


Рисунок 64 – АПВ шин

При возникновении короткого замыкания на шинах релейная защита отключает выключатели присоединений. После бестоковой паузы первым начинает работать АПВ₁ оборудованное блоком контроля отсутствия напряжения БКН. Если включение будет неуспешным и защита снова отключит выключатель, действие других устройств АПВ запрещается. При успешном АПВ, включение других присоединений будет выполнено при синхронности включаемых напряжений.

8.6 Автоматическое включение резерва (АВР)

Устройства АВР предназначены для автоматического включения резервного питания при исчезновении напряжения на шинах потребителя. Применение АВР позволяет повысить надежность и эффективность электроснабжения за счет упрощения релейной защиты снижения уровня токов короткого замыкания и удешевления коммутационной аппаратуры.

К устройствам АВР предъявляют следующие требования:

1. АВР должно приходить в действие при исчезновении напряжения на шинах потребителя по любым причинам: аварийное отключение источника, ошибочное или самопроизвольное отключение выключателя.

2. Включение резерва должно происходить как можно быстрее для уменьшения вероятности нарушения технологического цикла электроприемника.

3. Действие АВР должно быть однократным, чтобы не включать несколько раз резервный источник на устойчивое короткое замыкание.

4. Включение резервного источника должно происходить только после отключения выключателей рабочего источника.

5. Схема АВР не должна приходить в действие при повреждениях во вторичных цепях.

По виду резерва, включаемого действием устройства АВР, различают схемы с использованием явного резерва рисунок 65,а, неявного резерва рисунок 65,б, групповое резервирование рисунок 65,в.

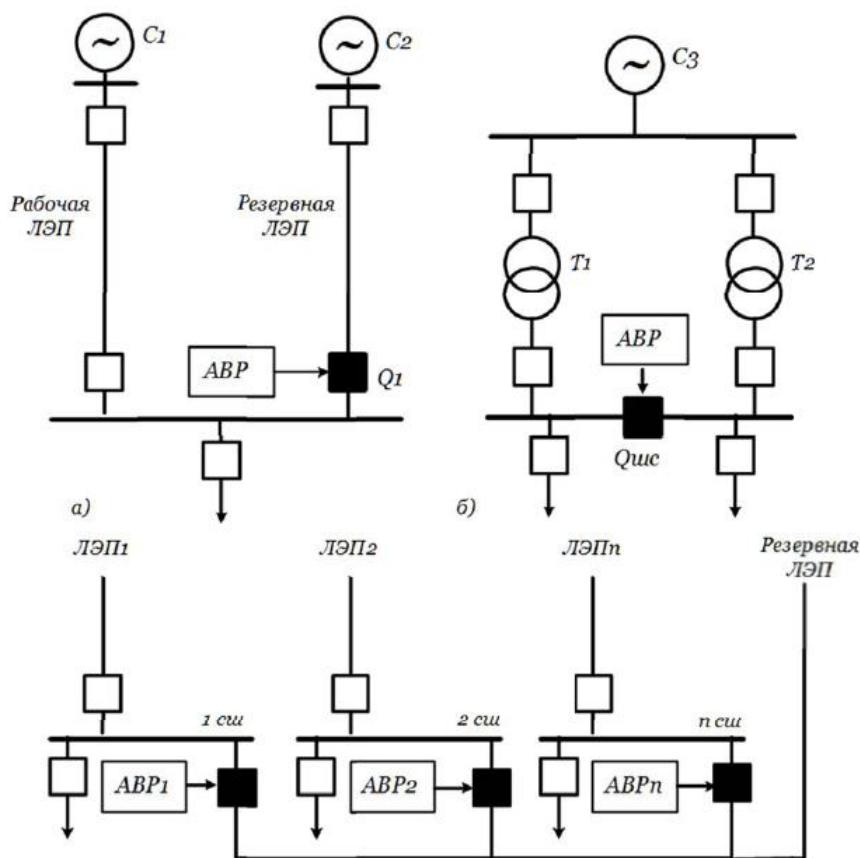


Рисунок 65 – Принципы применения АВР

а) – схема с явным резервом; б) – схема неявного резерва;
 в) – схема группового резервирования

При наличии явного резерва резервный источник находится под напряжением, без нагрузки. В случае неявного резерва работают оба источника с возможностью взаимного резервирования при отключении одного из них. Мощность каждого из источников должна быть достаточной для покрытия своей нагрузки и нагрузки резервируемого элемента. При групповом резервировании один резервный источник способен обеспечить подачу питания группе близко расположенных потребителей.

Групповое резервирование применяется в схемах собственных нужд электростанции.

Принципы выполнения пусковых органов АВР. Пуск по факту исчезновения напряжения на шинах потребителя. Пусковой орган контролирует наличие напряжения на шинах потребителя и при его исчезновении и наличии напряжения на шинах резервного источника через определенную выдержку времени запускается схема АВР рисунок 66.

Если поведение схемы пуска АВР представить в виде логической функции T то условие запуска можно записать в виде

$$T = ((\text{ПО}U_{\max} \text{ AND } \text{ПО}_1U_{\min} \text{ AND } \text{ПО}_2U_{\min}) \text{ AND } DT) = 1,$$

где $\text{ПО}U_{\max}$ – пусковой орган максимального напряжения, контролирующий наличие напряжения на шинах резервного источника; $\text{ПО}_1U_{\min}$ и $\text{ПО}_2U_{\min}$ – пусковые органы минимального напряжения, контролирующие исчезновение напряжения на шинах потребителя; DT – оператор временной задержки.

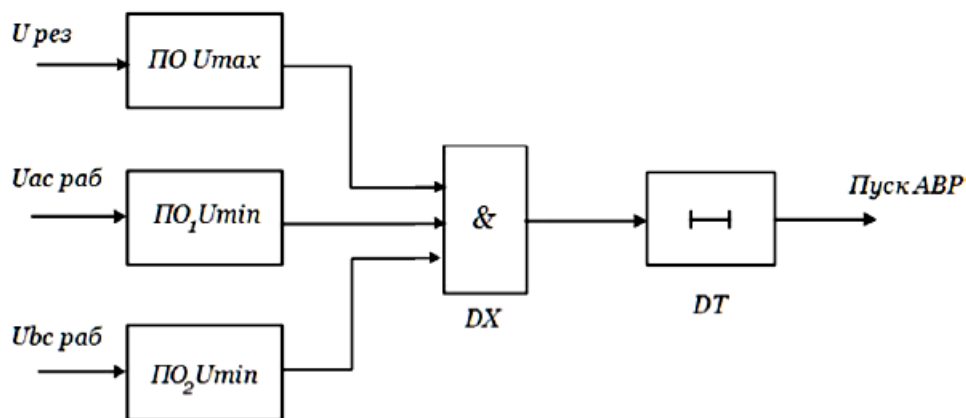


Рисунок 66 – Пуск по исчезновению напряжения

Пусковые органы минимального напряжения соединены по схеме логического умножения для того, чтобы избежать запуска АВР при перегорании предохранителя во вторичных цепях трансформатора напряжения. Задержка на запуск АВР необходима для отстройки от времени действия защит отходящих присоединений.

Напряжение срабатывания пускового органа минимального напряжения обычно принимается равным $0,25U_{ном}$, напряжение срабатывания пускового органа максимального напряжения, блокирующего включение резервного источника, принимается равным $0,8U_{ном}$.

Пуск по факту исчезновения напряжения у потребителя и тока в питающем элементе. Пусковой орган контролирует исчезновение напряжения на шинах потребителя и тока в питающем элементе, рисунке 67.

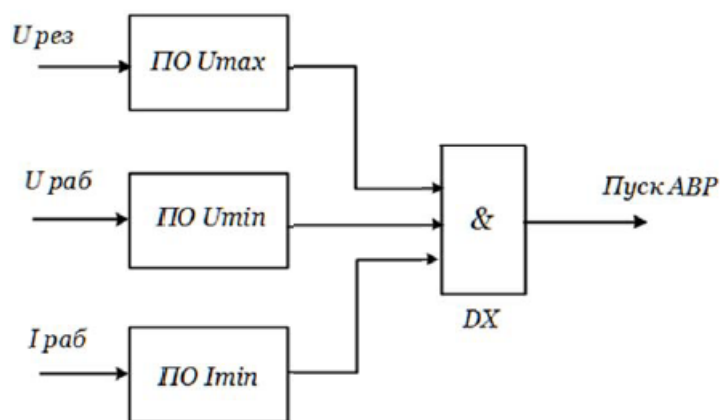


Рисунок 67 – Пуск АВР по факту исчезновения напряжения у потребителя и тока в питающем элементе

Логическую функцию T схемы пуска АВР можно представить в виде:

$$T = (ПОU_{max} \text{ AND } ПОU_{min} \text{ AND } ПОI_{min}) = 1.$$

где $ПОU_{max}$ – пусковой орган максимального напряжения, контролирующий наличие напряжения на шинах резервного источника: $ПОU_{min}$ и $ПОI_{min}$ – соответственно пусковые органы минимального напряжения и минимального тока.

Ток срабатывания пускового органа минимального тока отстраивается от минимально возможного тока нагрузки.

Пуск по факту исчезновения тока в питающем элементе и понижения частоты на шинах потребителя. При выполнении АВР на подстанциях, к шинам которых подключены

мощные синхронные двигатели, необходимо принимать во внимание эффект подпитки со стороны этих двигателей. В результате напряжение на шинах снижается достаточно медленно. Время снижения напряжения до величины уставки пускового органа минимального напряжения $0,25 U_{ном}$ составляет величину 2...3 сек. Действие АВР на включение резерва после такой выдержки времени не даст желаемого эффекта из-за невозможности самозапуска синхронных двигателей.

Для повышения быстродействия в таких системах электроснабжения пусковой орган контролирует исчезновение тока в питающем элементе и понижение частоты на шинах потребителя, рисунок 68.

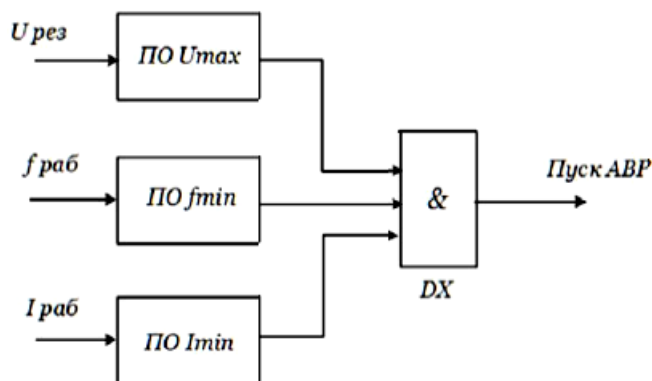


Рисунок 68 – Пуск АВР по факту исчезновения тока в питающем элементе и понижения частоты на шинах потребителя

Уставка у пускового органа. $ПО f_{min}$ контролирующего снижение частоты, принимается равной 48 Гц, и замедление на действие АВР составит 0,2...0,3 сек. Вероятность восстановления нормальной работы потребителей увеличивается. Действие АВР с таким выполнением пускового органа должно быть согласовано с работой автоматической частотной разгрузки.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Охрана труда в лаборатории

Проведение лабораторной работы осуществляется индивидуально на компьютере. К выполнению работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по инструкции по охране труда при проведении работ в лаборатории. Результаты инструктажа регистрируются в специальном журнале. Все работы могут проводиться только с разрешения преподавателя.

При любой неисправности в электрооборудовании следует прекратить работу, отключить напряжение и сообщить преподавателю. При любом происшествии или несчастном случае необходимо отключить электропитание в лаборатории, прекратить все работы, доложить преподавателю и принять необходимые меры по оказанию помощи пострадавшему.

Все лабораторные работы выполняются в программе



Лабораторная работа №1. Токовые ступенчатые защиты радиальной сети

Цель работы: изучение принципа работы трехступенчатой токовой защиты участка радиальной сети, получения и закрепления навыков расчета уставок и способов отладки селективности работы релейной защиты, экспериментальная проверка чувствительности, быстродействия, надежности работы и селективности релейной защиты.

Принцип действия

Токовые ступенчатые защиты представляют собой сочетание токовых отсеков и максимальной токовой защиты, что позволяет выполнить полноценную защиту с высоким быстродействием. Обычно токовые ступенчатые защиты выполняются в виде трех ступеней:

Первая ступень – отсечка мгновенного действия, защищает начальный участок линии.

Вторая ступень – отсечка с выдержкой времени, предназначена для надежной защиты оставшегося участка линии.

Третья ступень – максимальная токовая защита, выполняет функции ближнего и дальнего резервирования.

Принцип действия токовой ступенчатой защиты рассмотрим на примере участка сети рисунок 1.1 На линии АБ установлена трехступенчатая токовая защита, на линии БВ – двухступенчатая.

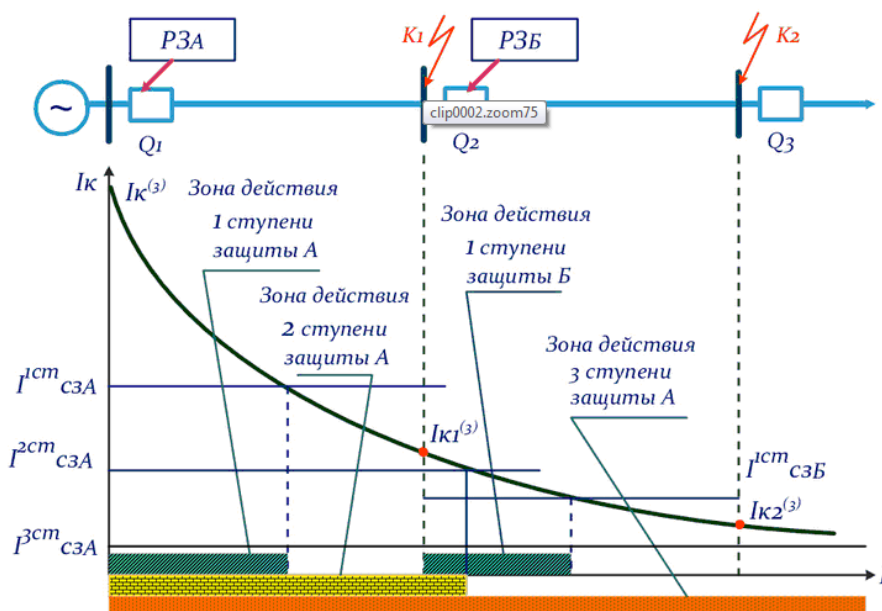


Рисунок 1.1 – Принцип действия токовой ступенчатой защиты

Токи срабатывания первых ступеней защит А и Б, соответственно, отстраиваются от токов трехфазных коротких замыканий на шинах противоположных подстанций.

Вторая ступень защиты А должна надежно охватывать защищаемую линию. Ее ток срабатывания согласуется с первой ступенью защиты Б.

Выдержка времени принимается равной (0,4 – 0,5) сек.

Ток срабатывания третьей ступени отстраивается от нагрузочных режимов, выдержка времени - от времени работы защит отходящих присоединений.

Схема токовой ступенчатой защиты

На рисунке 1.2 представлена схема, токовой трехступенчатой защиты с включением измерительных органов по схеме неполной звезды

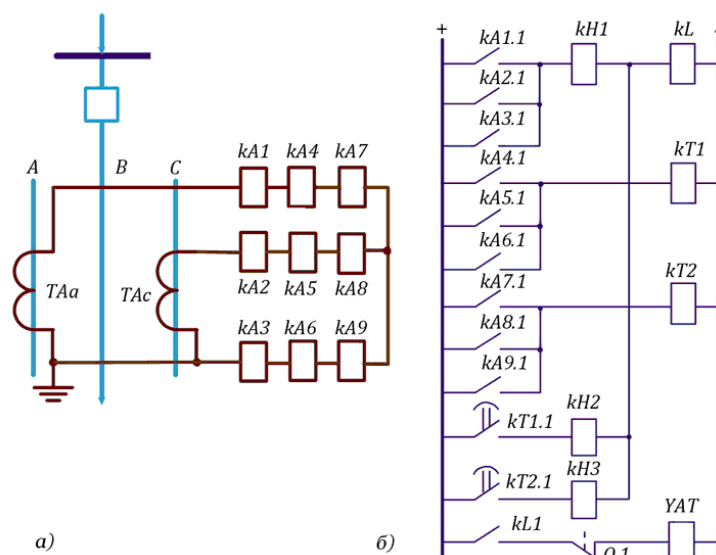


Рисунок 1.2 – Схема токовой трехступенчатой защиты с включением измерительных органов по схеме неполной звезды

Работа схемы

При коротком замыкании в зоне действия первой ступени срабатывают пусковые органы первой, второй и третьей ступеней. Реле первой ступени $kA1$, $kA2$, $kA3$ подают питание на выходное реле kL , реле второй ступени $kA4$, $kA5$, $kA6$ - на реле времени $kT1$, реле третьей ступени $kA7$, $kA8$, $kA9$ - на реле времени $kT2$. Времена срабатывания kL , $kT1$, $kT2$ соотносятся между собой следующим образом: $t_{kL} < t_{kT1} < t_{kT2}$. Следовательно, первым сработает выходное реле kL , и короткое замыкание отключится без выдержки времени.

При коротком замыкании в зоне действия второй ступени сработают пусковые органы второй и третьей ступени и подадут питание на реле $kT1$ и $kT2$. Первым сработает $kT1$, и короткое замыкание отключится с выдержкой времени, равной 0,5 сек.

Третья ступень срабатывает при отказе первой или второй ступени или при отказе защиты смежного участка.

Расчет параметров защиты

В работе моделируется участок сети, состоящий из двух линий и трансформатора рисунок 1.3. Для защиты линии АБ используется трехступенчатая токовая защита, для линии БВ – двухступенчатая, для трансформатора – двухступенчатая.

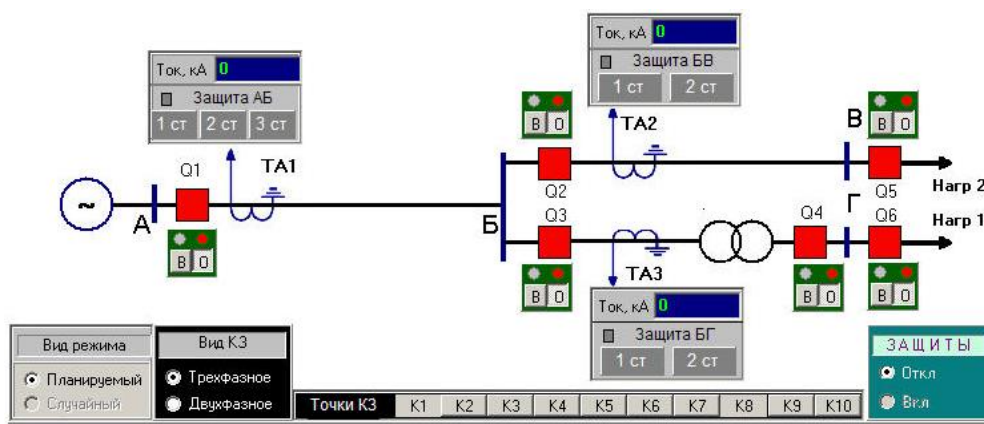


Рисунок 1.3 – Участок сети

В состав трехступенчатой защиты входят токовая отсечка, токовая отсечка с выдержкой времени, максимальная токовая защита. Двухступенчатая защита на линии БВ и защита трансформатора содержат токовую отсечку и максимальную токовую защиту.

Токи срабатывания первых ступеней защит линий АБ и БВ и защиты трансформатора отстраиваются от токов трехфазных коротких замыканий на шинах противоположных подстанций:

$$I_{с3А}^I = k_H I_{КБ}^{(3)}; \quad I_{с3Б}^I = k_H I_{КВ}^{(3)}; \quad I_{с3Тр}^I = k_H I_{КГ}^{(3)},$$

где $I_{с3А}^I$ – ток срабатывания первой ступени линии АБ;

$I_{с3Б}^I$ – ток срабатывания первой ступени линии БВ;

$I_{с3Тр}^I$ – ток срабатывания первой ступени трансформатора;

$k_H = 1,2 - 1,3$ – коэффициент надежности;

$I_{КБ}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции Б;

$I_{КВ}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции В;

$I_{КГ}^{(3)}$ – ток трехфазного короткого замыкания на шинах подстанции Г.

Вторая ступень защиты линии АБ должна надежно охватывать защищаемую линию.

Ее ток срабатывания согласуется с первыми ступенями защиты линии БВ и трансформатора

$$I_{с3А}^2 = k_H I_{с3Б}^I$$

$$I_{с3А}^2 = k_H I_{с3Тр}^I,$$

где $k_H = 1,1$ – коэффициент надежности.

Из двух рассчитанных значений принимается большее.

Выдержка времени второй ступени принимается равной (0,4- 0,5) сек.

Третья ступень защиты линии АБ, вторая ступень защиты линии БВ и вторая ступень защиты трансформатора – максимальные токовые защиты, предназначенные для выполнения функций ближнего и дальнего резервирования. Их ток срабатывания выбирается из условия несрабатывания в максимальных нагрузочных и пусковых режимах.

$$I_{с3А}^3 = \frac{k_H k_{с3}}{k_B} I_{РАБ\ МАКС\ АБ}; \quad I_{с3Б}^2 = \frac{k_H k_{с3}}{k_B} I_{РАБ\ МАКС\ БВ}; \quad I_{с3Тр}^2 = \frac{k_H k_{с3}}{k_B} I_{РАБ\ МАКС\ Тр};$$

где $k_H = 1,2$ – коэффициент надежности;

$k_{с3} = (1,2 - 2,0)$ – коэффициент самозапуска;

$k_B = 0,85$ – коэффициент возврата;

$I_{РАБ\ МАКС\ АБ}$ – рабочий максимальный ток линии АБ;

$I_{РАБ\ МАКС\ БВ}$ – рабочий максимальный ток линии БВ;

$I_{РАБ\ МАКС\ Тр}$ – рабочий максимальный ток трансформатора;

Выдержка времени максимальных токовых защит согласуется с защитами отходящих присоединений.

Чувствительность первых ступеней оценивается графически.

Чувствительность второй ступени защиты линии АБ, отсечки с выдержкой времени, оценивается по току двухфазного короткого замыкания в конце линии. Значение коэффициента чувствительности должно быть не менее 1,2.

Чувствительность третьей ступени защиты линии АБ, максимальной токовой, проверяется по ее работе в режимах ближнего и дальнего резервирования.

Если ступень выполняет функции ближнего резервирования, значение коэффициента чувствительности проверяется по току двухфазного короткого замыкания в конце защищаемой линии. Его величина должна быть не менее 1,5.

Если ступень выполняет функции дальнего резервирования, значение коэффициента чувствительности проверяется по току двухфазного короткого замыкания в конце смежного резервируемого участка. Его величина должна быть не менее 1,2.

Чувствительность вторых ступеней защит линии БВ и трансформатора – максимальных токовых, проверяется для данной схемы сети только при работе их в режиме ближнего резервирования.

Указания по выполнению лабораторной работы

1. Работа с программой начинается с активации формы *Задание на работу* путем выбора меню Работа  Задание  или путем нажатия кнопки инструментальной панели 

После появления формы рисунок 1.4 ознакомиться с заданием на работу.

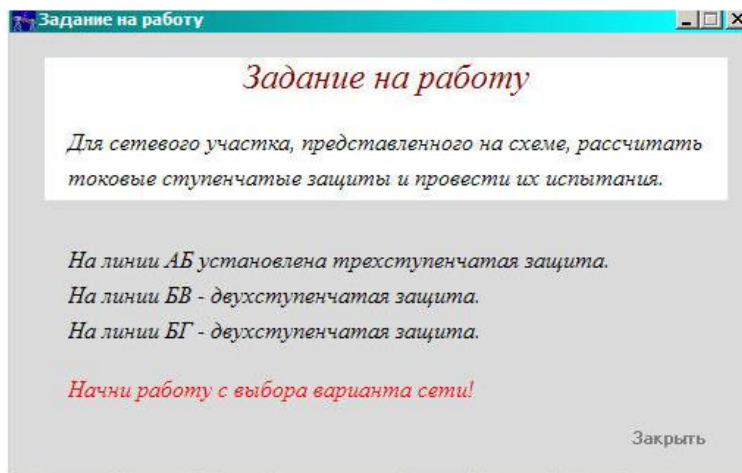


Рисунок 1.4 – Задание на работу

2. Активизировать кнопкой формы  *Параметры сети* рисунок 1.5 и выбрать вариант с исходными данными.

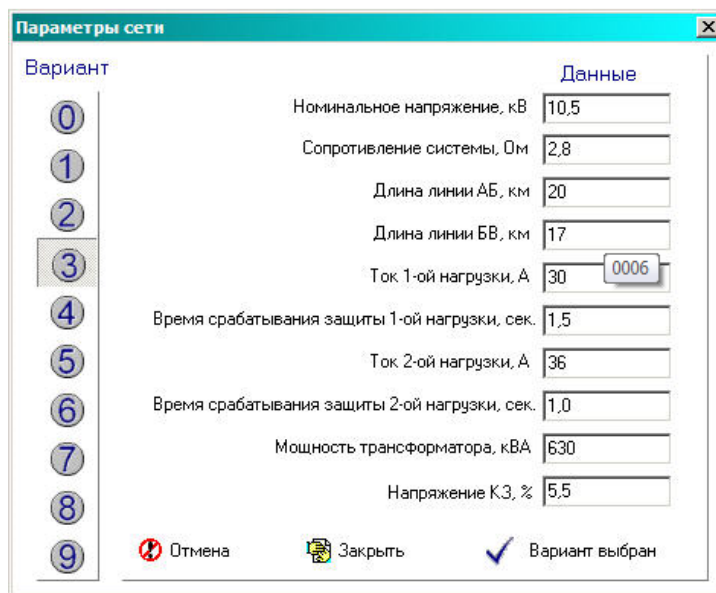


Рисунок 1.5 – Выбор варианта

3. Включить выключатели рисунок 1.6.

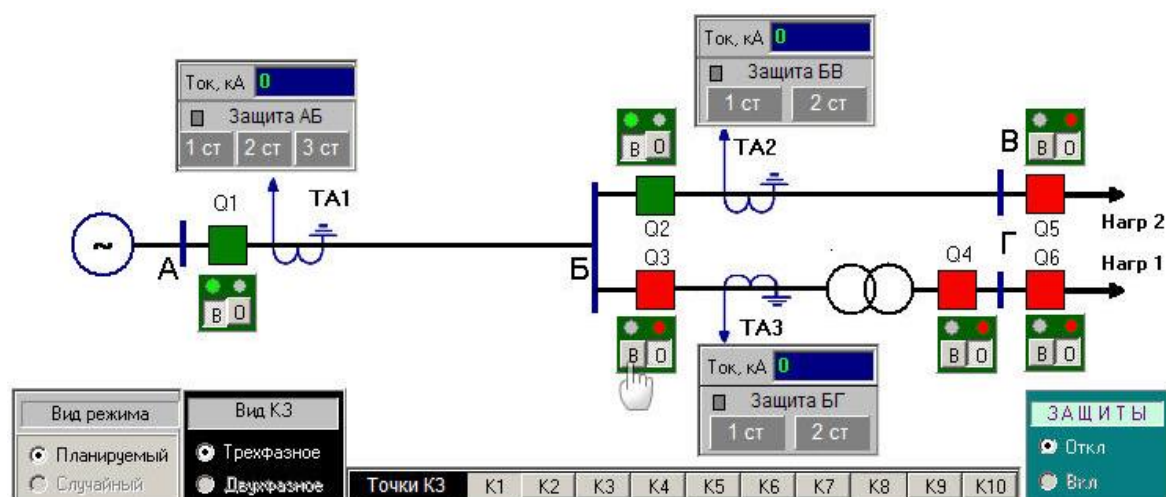


Рисунок 1.6 – Включение выключателей

4. Провести замеры рабочих токов и токов двухфазного и трехфазного коротких замыканий рисунок 1.7.

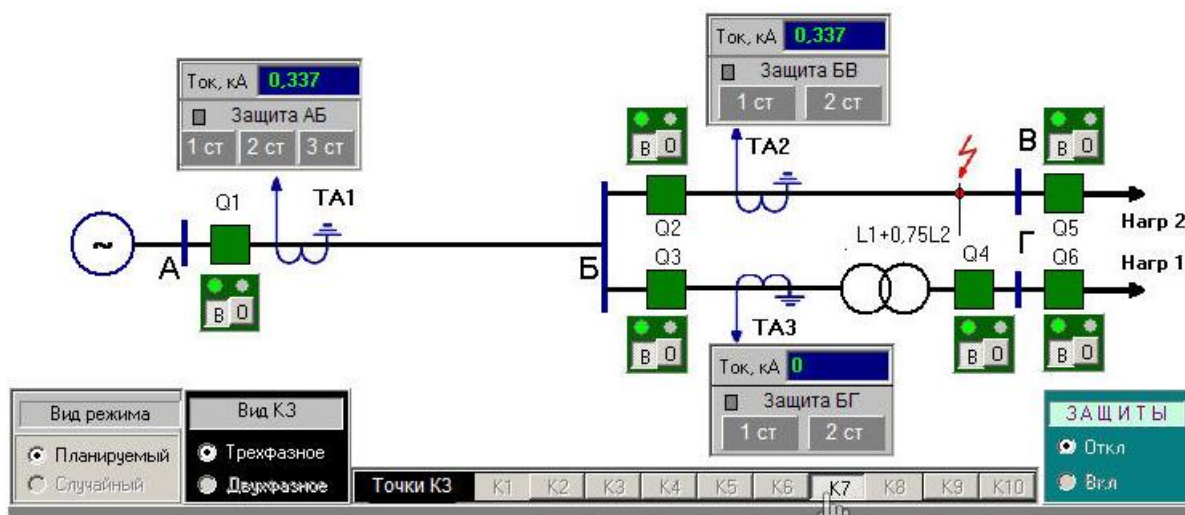


Рисунок 1.7 – Замер токов трехфазного короткого замыкания

Сброс режима короткого замыкания производится отключением любого выключателя в цепи питания. Переключение вида короткого замыкания доступно при отключенном головном выключателе Q1.

5. Рассчитать параметры защит и выставить уставки по току и времени, рисунок 1.8. Форма Параметры защиты вызывается нажатием кнопки 

Параметры защиты

Защита АБ

Токи срабатывания, кА	Время срабатывания, сек	Включение ступеней
1-я ступень: 0,68	1-я ступень: 0	1-я ступень: ☒
2-я ступень:	2-я ступень:	2-я ступень: ☒
3-я ступень:	3-я ступень:	3-я ступень: ☒

Защита БВ

Токи срабатывания, кА	Время срабатывания, сек	Включение ступеней
1-я ступень:	1-я ступень: 0	1-я ступень: ☒
2-я ступень:	2-я ступень:	2-я ступень: ☒

Защита трансформатора

Токи срабатывания, кА	Время срабатывания, сек	Включение ступеней
1-я ступень:	1-я ступень: 0	1-я ступень: ☒
2-я ступень:	2-я ступень:	2-я ступень: ☒

Отмена | Защиты настроены

Рисунок 1.8 – Панель настройки уставок защит

6. После настройки уставок закрыть форму и на панели режимов рисунок 1.9 включить защиты

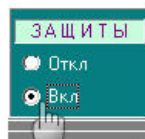


Рисунок 1.9 – Панель режимов

7. При установке Вид режима Планируемый провести испытания защит при работе их в качестве основных и в режимах резервирования. Отдельные ступени защит могут быть выведены из работы, если убрать галочку против требуемой ступени на панели настройки.

О срабатывании защиты сигнализирует изменение цвета сигнальной индикации соответствующей ступени рисунок 1.10.

Защита АБ			Защита БВ			Защита БГ		
Ток срабат. 1 ст., кА	0,68	1 ст	Ток срабат. 1 ст., кА	0,42	1 ст	Ток срабат. 1 ст., кА	0,36	1 ст
Время срабат. 1 ст., сек	0		Время срабат. 1 ст., сек	0		Время срабат. 1 ст., сек	0	
Ток срабат. 2 ст., кА	0,47	2 ст	Ток срабат. 2 ст., кА	0,05	2 ст	Ток срабат. 2 ст., кА	0,06	2 ст
Время срабат. 2 ст., сек	0,5		Время срабат. 2 ст., сек	1,5		Время срабат. 2 ст., сек	2	
Ток срабат. 3 ст., кА	0,14	3 ст						
Время срабат. 3 ст., сек	2,5							

Сброс сигнализации | Выход

Рисунок 1.10 – Панель сигнализации

После Сброса сигнализации снова становится доступным режим испытания защит.

8. После проведения планируемых испытаний на панели режимов выбрать Вид режи-

ма Случайный. Ознакомиться с сообщением появившейся формы рисунок 1.11, закрыть ее и на основании показаний регистраторов и положения индикации панели сигнализации объяснить поведение защит.

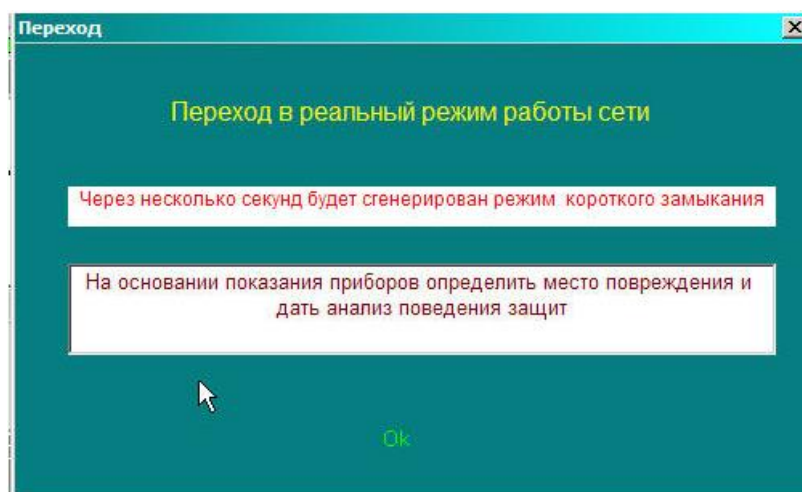


Рисунок 1.11 – Переход в реальный режим работы сети

9. Результаты работы оформить в виде отчета, загрузив шаблон отчета  Раздел **Выводы** отчета должен быть заполнен обязательно.

Лабораторная работа №2. Максимальные токовые защиты в кольцевых сетях с односторонним питанием

Цель работы: изучение принципа работы Максимальных токовых защит в кольцевых сетях с односторонним питанием, получения и закрепления навыков расчета уставок и способов отладки селективности работы релейной защиты, экспериментальная проверка чувствительности, быстродействия, надежности работы и селективности релейной защиты.

Принцип действия

Для обеспечения селективности действия максимальных токовых защит в кольцевых сетях с односторонним и радиальных сетях с двухсторонним питанием пусковой орган защиты выполняется в виде двух реле - реле тока и реле направления мощности, контакты которых соединены последовательно. Реле направления мощности замыкает свой контакт при положительном направлении тока. Условились за положительное направление тока считать направление тока от шин в линию. Принцип работы токовой направленной защиты рассмотрим на примере однолинейной схемы рисунке 2.1.

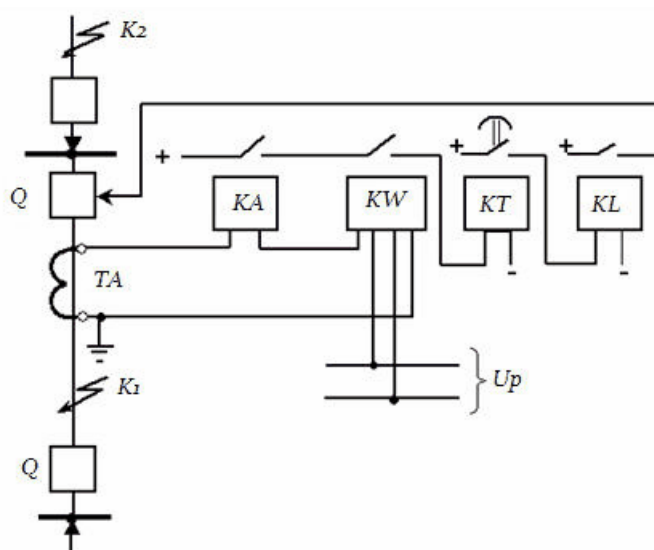


Рисунок 2.1 – Принцип действия максимальной токовой направленной защиты

При возникновении короткого замыкания на линии, точка K_1 , срабатывают токовое реле KA и реле мощности KW , и защита запускается. При коротком замыкании вне линии, точка K_2 , ток направлен из линии к шинам, реле мощности не работает и блокирует действие защиты. Введение задержки на срабатывание обеспечивает выполнение требования селективности.

Схема защиты

Схемы максимальных направленных защит выполняются в различных вариантах, отличающихся друг от друга в основном схемой включения органа направления мощности. Под схемой включения реле направления мощности понимается сочетание фаз токов и напряжений, подводимых к реле. Схемы включения должны обеспечивать правильное определение направления мощности в условиях короткого замыкания. Наибольшее распространение получили две схемы: 30 градусная и 90 градусная рисунок 2.2. Сочетания токов и напряжений для этих схем приведены в таблице 1.

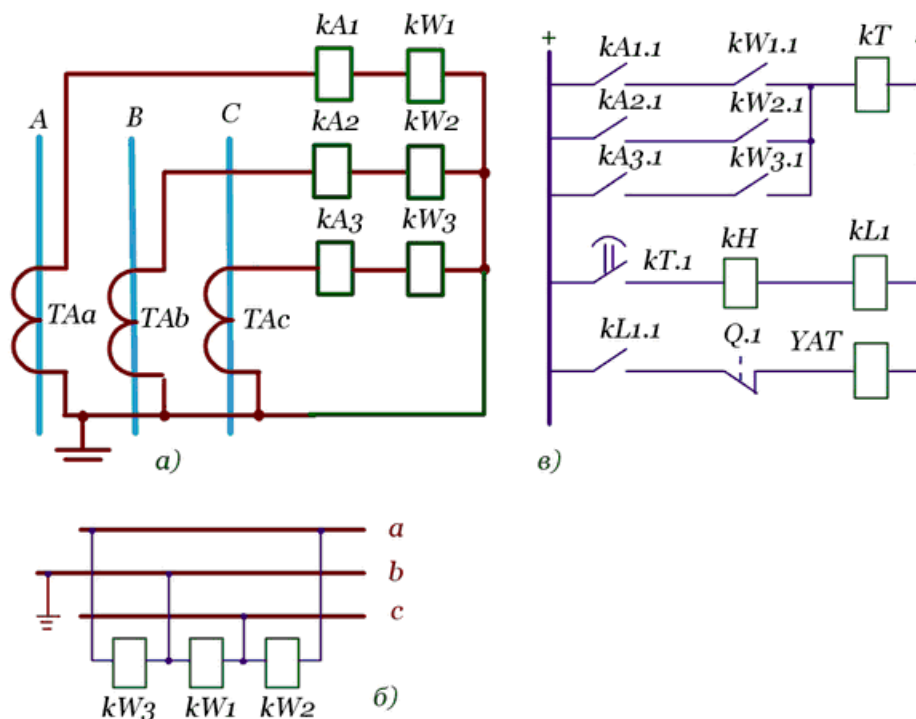


Рисунок 2.2 – Схема максимальной токовой направленной защиты

Таблица 1.

30-градусная схема		90-градусная схема	
Фазы тока	Фазы напряжения	Фазы тока	Фазы напряжения
I_A	U_{AC}	I_A	U_{BC}
I_B	U_{BA}	I_B	U_{CA}
I_C	U_{CB}	I_C	U_{AB}

Расчет параметров

Расчет параметров заключается в выборе тока срабатывания, выдержки времени и оценке чувствительности.

Выбор тока срабатывания

Ток срабатывания токовых направленных защит выбирается так же, как для обычных максимальных токовых защит по условиям отстройки от максимальных нагрузочных режимов. При этом отстройка производится от токов, направленных от шин в линию.

$$I_{CЗ} = \frac{k_H k_{CЗ} I_{РАБ\ МАКС}}{k_B}$$

где $k_H = 1,2$ – коэффициент надежности;

$k_{CЗ} = 1,2-1,5$ – коэффициент самозапуска;

$k_B = 0,8$ – коэффициент возврата;

$I_{РАБ\ МАКС}$ – рабочий максимальный ток линии.

Выбор выдержек времени

Выбор выдержек времени производится по встречно-ступенчатому принципу, применение которого показано на рисунке 2.3.

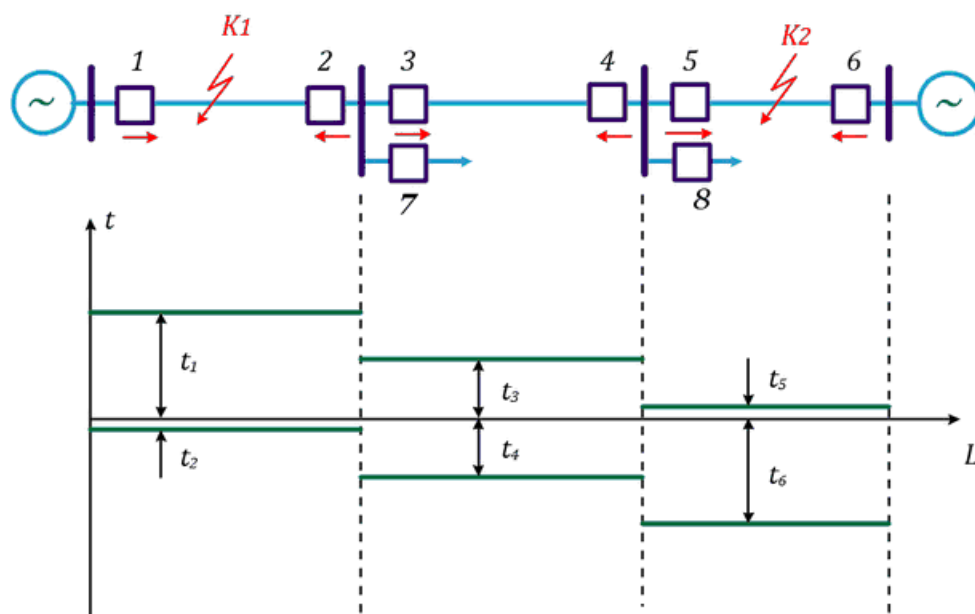


Рисунок 2.3 – Выбор выдержек времени токовых направленных защит

Стрелками на рисунке показано направление тока, при котором срабатывают пусковые органы защит. При коротком замыкании в точке K_1 сработают пусковые органы защит 1,3,5,6. Наиболее удаленной защитой от источника питания в этом режиме является защита 5, поэтому принимается $t_5 = 0$

Для других защит

$$t_3 = t_5 + \Delta t; \quad t_3 = t_8 + \Delta t \quad \text{— из двух значений выбирается большее;}$$

$$t_1 = t_3 + \Delta t; \quad t_1 = t_7 + \Delta t \quad \text{— из двух значений выбирается большее.}$$

При коротком замыкании в точке K_2 сработают пусковые органы защит 1,2,4,6. Наиболее удаленной защитой от источника питания в этом режиме является защита 2, поэтому принимаем $t_2 = 0$.

Для других защит

$$t_4 = t_2 + \Delta t; \quad t_4 = t_7 + \Delta t \quad \text{— из двух значений выбирается большее;}$$

$$t_6 = t_4 + \Delta t; \quad t_6 = t_8 + \Delta t \quad \text{— из двух значений выбирается большее.}$$

Оценка чувствительности

Чувствительность токовых пусковых органов максимальной токовой направленной защиты оценивается по току двухфазного короткого замыкания в конце защищаемой линии и в конце резервируемых участков.

Каскадное действие защиты

При оценке поведения защиты следует учесть возможность возникновения режима каскадного действия.

При коротком замыкании вблизи источника в кольцевой сети с односторонним питанием рисунок 2.4 ток короткого замыкания, проходящий через защиту, установленную на противоположных шинах, может оказаться недостаточным для ее срабатывания. В этом случае, независимо от соотношения выдержек времени, первым сработает комплект, установленный вблизи источника. После отключения линии защитой 6 ток в месте установки защиты 5 увеличивается и становится достаточным для ее срабатывания. Такое действие защиты называется каскадным. Участок линии, в пределах которого защита работает каскадно, называется зоной каскадного действия защиты.

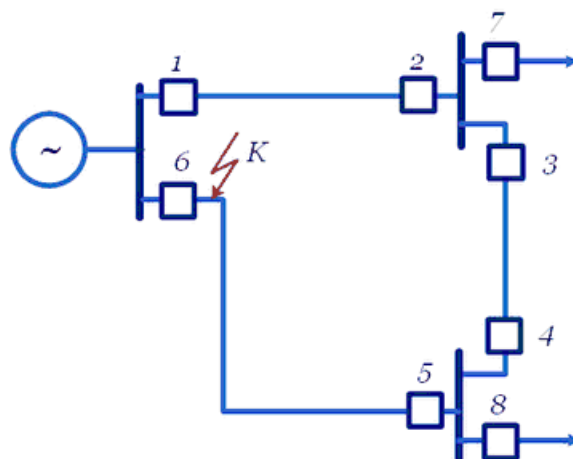


Рисунок 2.4 – Каскадное действие защиты

Указания по выполнению лабораторной работы

1. Работа с программой начинается с активации формы **Задание на работу** путем выбора меню **Задание Работа** или путем нажатия кнопк  инструментальной панели. После появления формы рисунок 2.5 ознакомиться с заданием на работу.

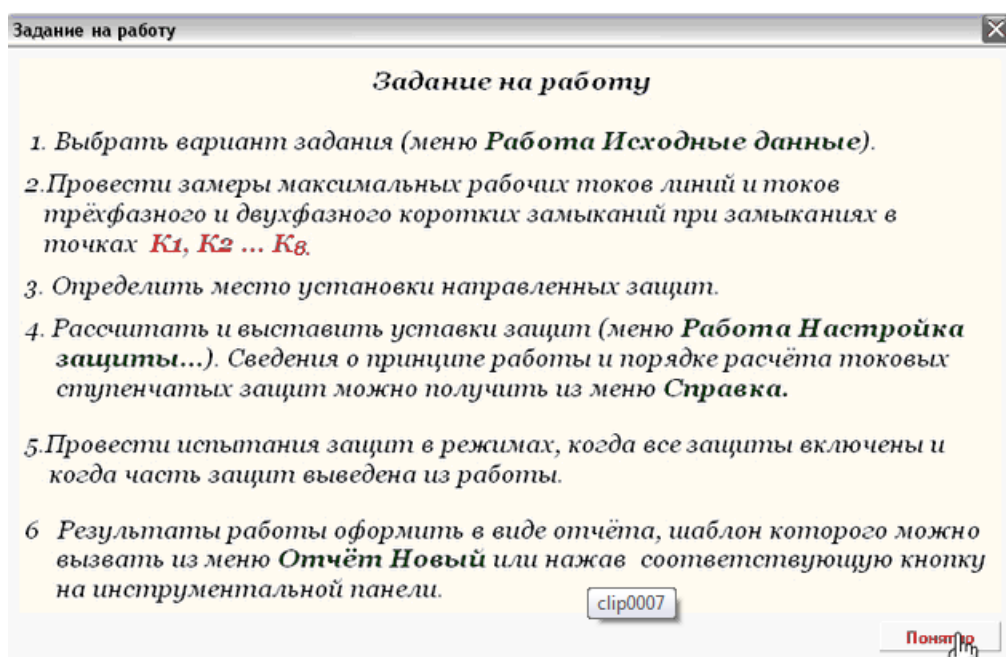


Рисунок 2.5 – Задание на работу

2. Активизировать кнопкой форму  **Параметры сети** рисунок 2.6 и выбрать вариант с исходными данными.

Выбор варианта

Параметры

Вариант	Номинальное напряжение, кВ	35
0	Сопротивление системы, Ом	1,7
1	Длина линии W1, км	30
2	Длина линии W2, км	25
3	Длина линии W3, км	21
4	Ток 1-ой нагрузки, кА	0,08
5	Время срабатывания защиты 1-й нагрузки, сек	1,0
6	Ток 2-й нагрузки, кА	0,09
7	Время срабатывания 2-й нагрузки, сек	0,5
8		
9		

Отмена Вариант выбран

Рисунок 2.6 – Параметры сети

3. Включить выключатели рисунок 2.7.

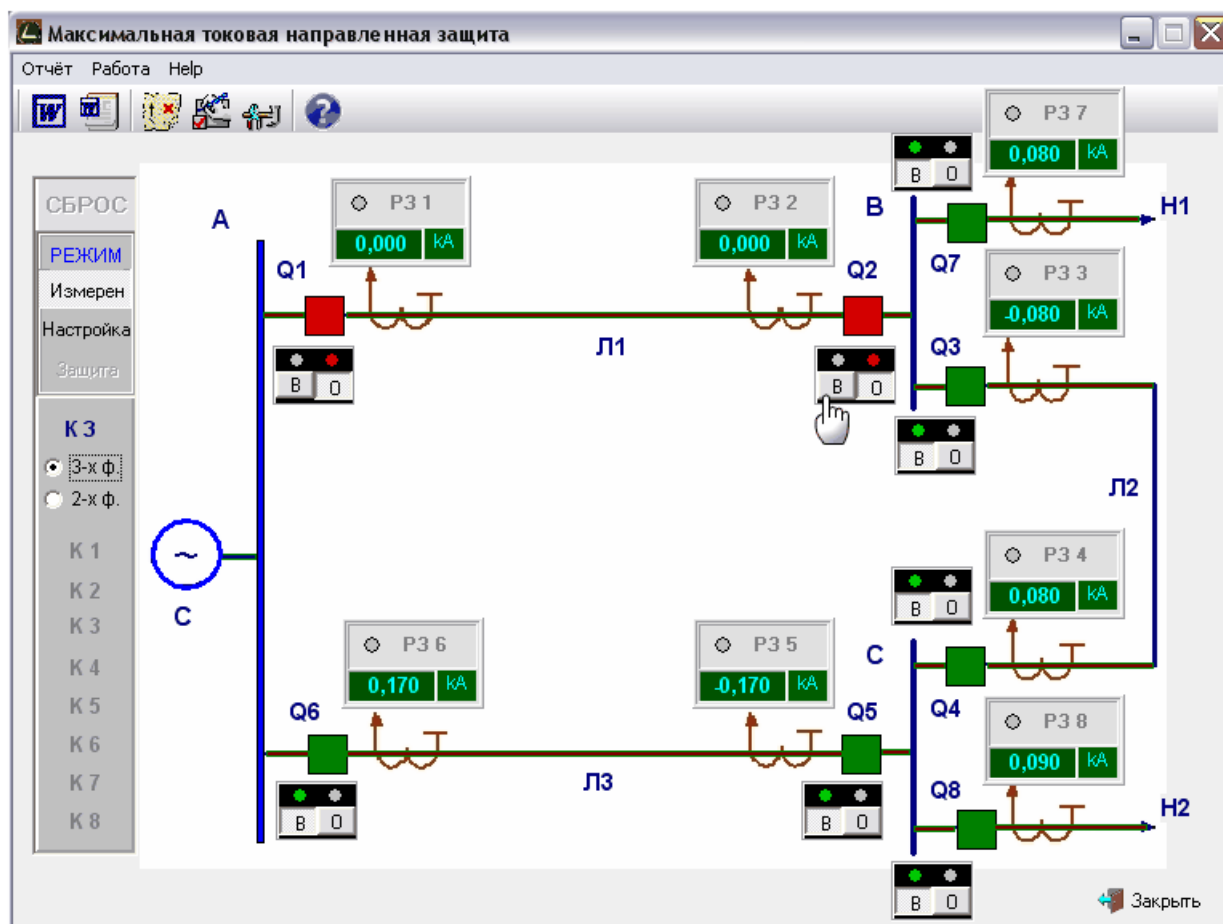


Рисунок 2.7 – Включение выключателей

4. Провести замеры рабочих токов и токов двухфазного и трехфазного коротких замыканий в различных режимах работы сети, рисунок 2.8, а,б,.

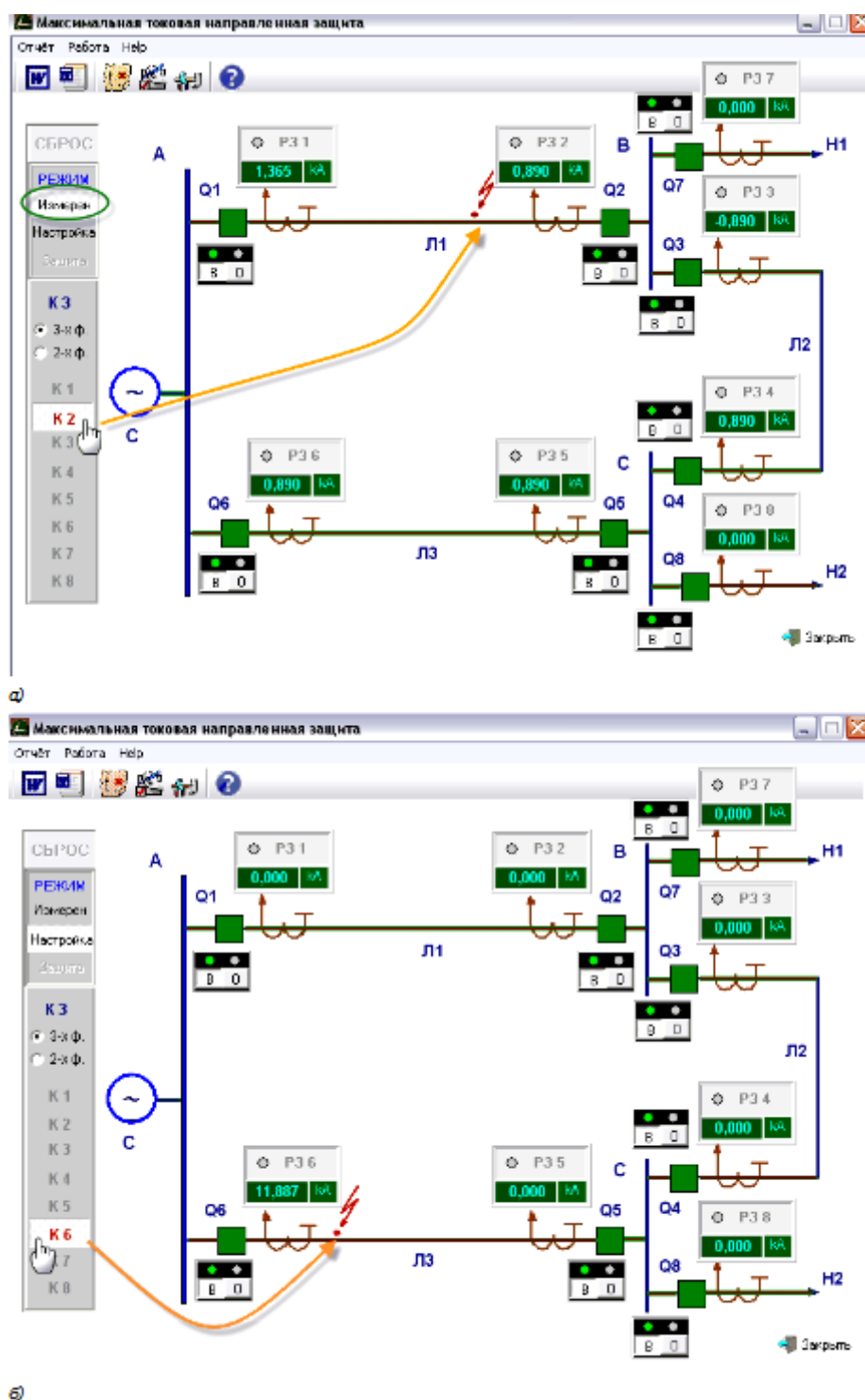
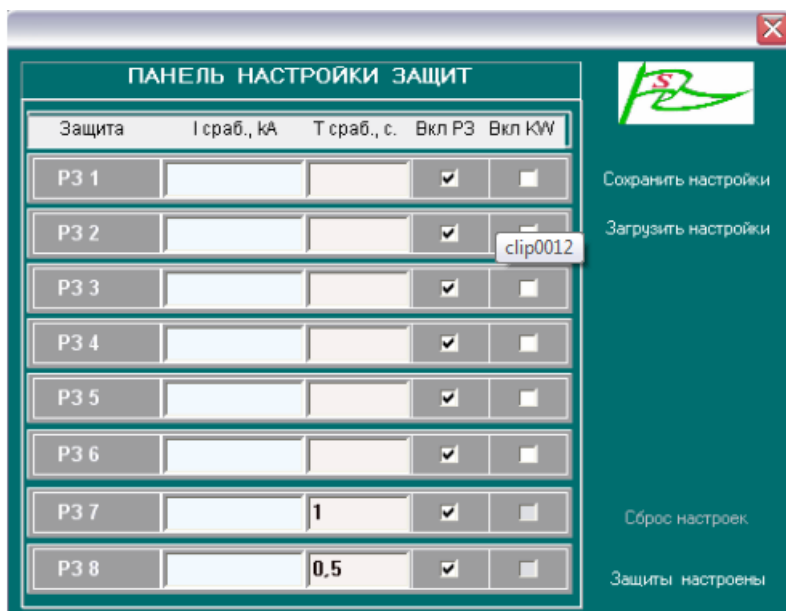


Рисунок 2.8 – Измерение рабочих токов и токов коротких замыканий

Снятие режима к.з. производится отключением соответствующих выключателей, например, при коротком замыкании в точке К6 снятие режима производится отключением выключателей Q6 и Q5.

5. Рассчитать параметры защит, выставить уставки по току и времени, выбрать место установки реле мощности рисунок 2.9. Форма Параметры защиты вызывается нажатием кнопки 



Защита	I сраб., кА	T сраб., с.	Вкл РЗ	Вкл КМ
P3 1			☒	☐
P3 2			☒	☐
P3 3			☒	☐
P3 4			☒	☐
P3 5			☒	☐
P3 6			☒	☐
P3 7		1	☒	☐
P3 8		0,5	☒	☐

Buttons: Сохранить настройки, Загрузить настройки, Сброс настроек, Защиты настроены

Рисунок 2.9 – Параметры защиты

При желании рассчитанные уставки защит можно сохранить, нажав кнопку **Сохранить** настройки рисунок 2.10.

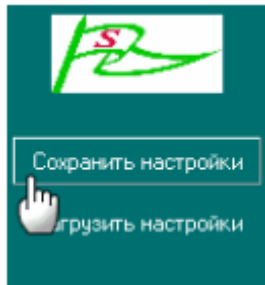


Рисунок 2.10 – Настройки

6. После настройки уставок закрыть форму и на панели режимов рисунке 2.11 включить защиты.

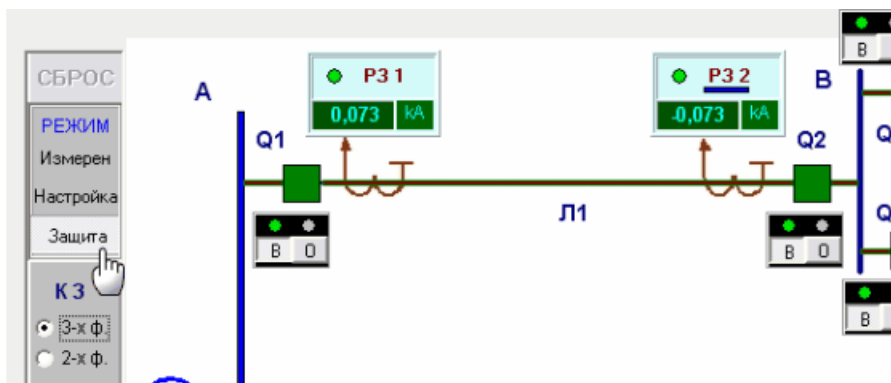


Рисунок 2.11 – Включение защиты

Направленные защиты выделены подчеркиванием синей линией названия защиты.

7. Провести испытания защит при работе их в качестве основных и в режимах резервирования. Отдельные защиты могут быть выведены из работы, если убрать галочку против защиты на панели настройки.

Например, на рисунке 2.12 показано поведение защит при коротком замыкании на линии Л1.

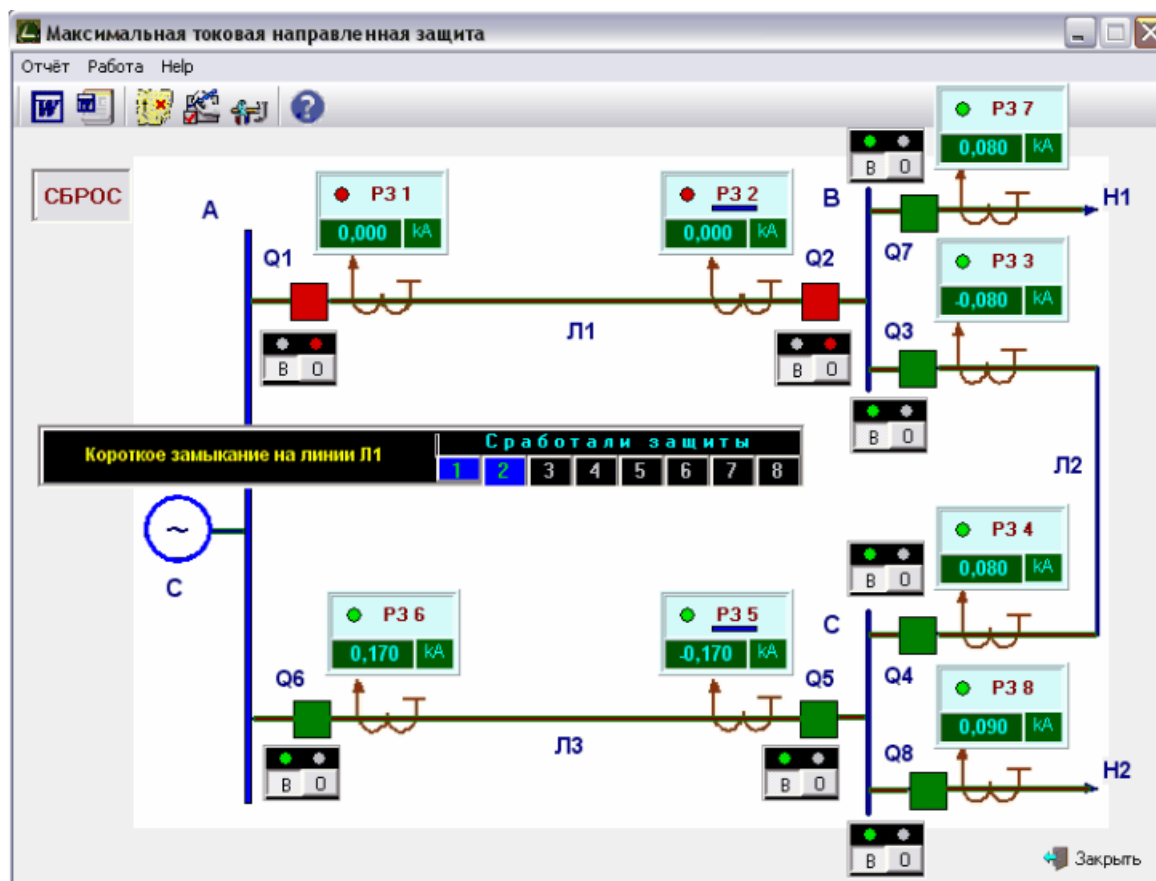


Рисунок 2.12 – Поведение защит при коротком замыкании на линии Л1.

Возврат в режим испытания защит производится нажатием кнопки *Сброс*.

9. Результаты работы оформить в виде отчета, загрузив шаблон отчета  Раздел **Выводы** отчета должен быть заполнен обязательно.

Лабораторная работа №3. Поперечная дифференциальная защита линий

Цель работы: изучение принципа работы поперечной дифференциальной защиты линий, получения и закрепления навыков расчета уставок и способов отладки селективности работы релейной защиты, экспериментальная проверка чувствительности, быстродействия, надежности работы и селективности релейной защиты.

Принцип действия

Принцип действия поперечной дифференциальной защиты рассмотрим на примере сети, представленной на рисунке 3.1.

По концам каждой из параллельных линий ставятся трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются между собой на разность токов. Параллельно вторичным обмоткам включается пусковой орган, выполненный на реле тока и реле мощности.

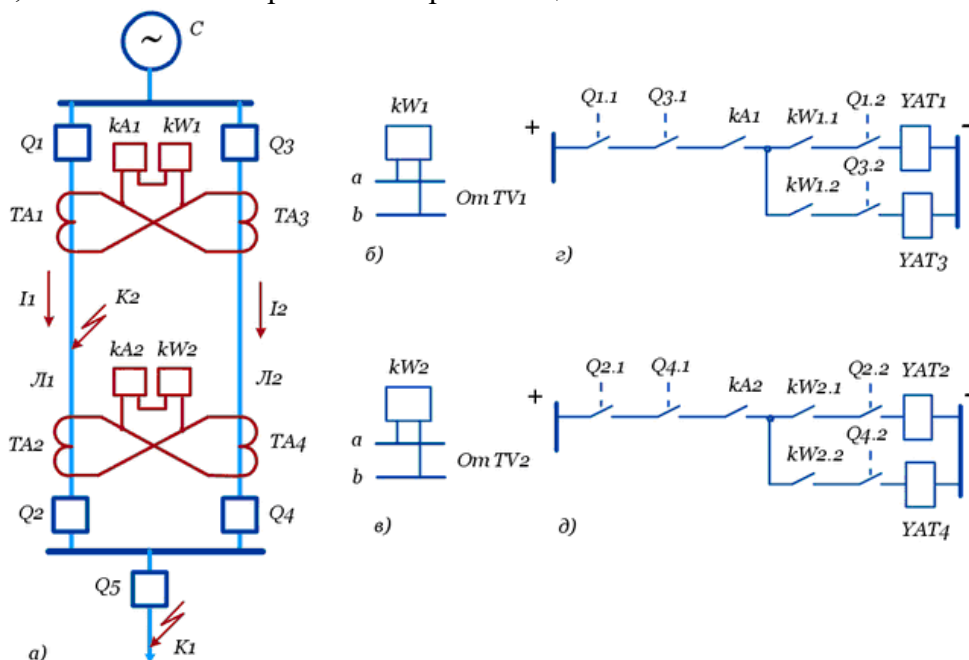


Рисунок 3.1 – Принцип действия дифференциальной защиты линий

В нормальном режиме и при внешнем коротком замыкании в точке K_1 ток в реле практически отсутствует:

$$I_{P1} = \left(\frac{I_1}{n_{TT}} - I_{НАМ1} \right) - \left(\frac{I_2}{n_{TT}} - I_{НАМ2} \right) = I_{НБ};$$

$$I_{P2} = \left(\frac{I_1}{n_{TT}} - I_{НАМ1} \right) - \left(\frac{I_2}{n_{TT}} - I_{НАМ2} \right) = I_{НБ}.$$

так как токи I_1 и I_2 , протекающие по параллельным линиям, равны между собой. Через реле проходит лишь ток небаланса, вызываемый погрешностью трансформаторов тока, и защита не работает.

При коротком замыкании на одной из защищаемых линий, например, в точке K_2 , через первый комплект проходит ток

$$I_{P1} = \frac{I_1}{n_{TT}} - \frac{I_2}{n_{TT}} \neq 0,$$

так как ток $I_1 > I_2$, и комплект 1 сработает. Одновременно сработает комплект 2, поскольку через реле протекает ток

$$I_{P2} = \frac{I_2}{n_{TT}} - \left(-\frac{I_2}{n_{TT}} \right) = \frac{2I_2}{n_{TT}}.$$

Реле мощности каждого комплекта выбирает поврежденную линию.

При отключении одной из параллельных линий блок-контактами сработавших выключателей защита выводится из работы для устранения возможности ее неселективного действия при внешнем коротком замыкании.

Расчет параметров

Ток срабатывания поперечной дифференциальной защиты выбирается по двум условиям:

1. Защита не должна работать от максимально возможного тока небаланса при внешних коротких замыканиях:

$$I_{сз} \geq k_n (I'_{нб} + I''_{нб}),$$

где $I'_{нб} = k_a k_{одн} f_i I_{кз\text{ вн макс}}$ – составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;

$k_a = 1$ – коэффициент, учитывающий наличие апериодической составляющей в токе короткого замыкания;

$k_{одн} = 0,5 - 1$ – коэффициент однотипности условий работы трансформаторов тока. Значение 0,5 принимается при примерно одинаковых вторичных токах;

$f_i = 0,1$ – допустимая погрешность трансформаторов тока;

$I_{кз\text{ вн макс}}$ – максимальное значение тока внешнего короткого замыкания;

$I''_{нб} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} I_{кз\text{ вн макс}}$ – составляющая тока небаланса, обусловленная неодинаковостью сопротивлений параллельных линий за счет их различной длины или разного сечения проводов.

2. Защита не должна работать при отключении одной из параллельных линий, если по второй протекает максимальный рабочий ток:

$$I_{сз} = \frac{k_n}{k_e} I_{\text{раб макс}},$$

Чувствительность защиты определяется по коротким замыканиям на границе зоны каскадного действия и в точке равной чувствительности. За точку равной чувствительности принимается точка короткого замыкания, при замыкании в которой токи в реле обоих комплектов равны. Защита удовлетворяет требованиям чувствительности при

Указания к выполнению лабораторной работы

1. Работа с программой начинается с активации формы *Задание на работу* путем выбора меню **Работа Задание**. После появления формы рисунок 3.2 ознакомиться с заданием на работу.

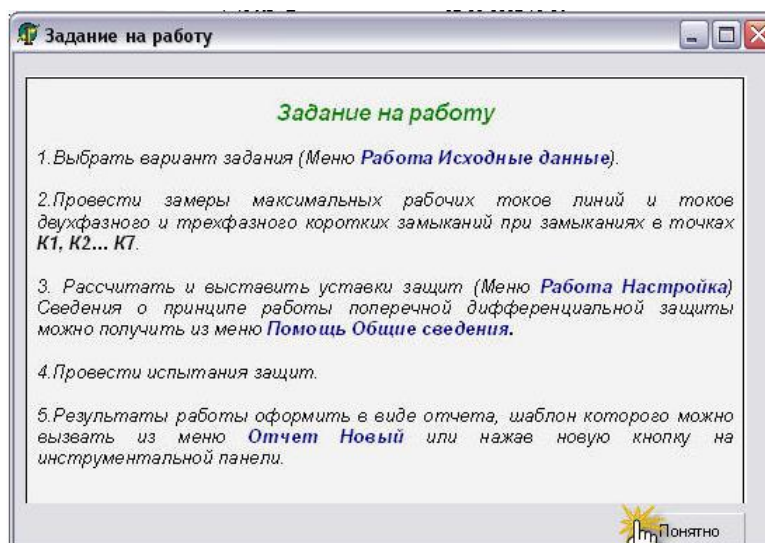


Рисунок 3.2 – Задание на работу

2. Активизировать форму *Параметры сети* путем выбора меню *Работа Вариант* рисунок 3.3 и выбрать вариант с исходными данными



Рисунок 3.3 – Вариант сетевого участка

3. Включить выключатели рисунок 3.4

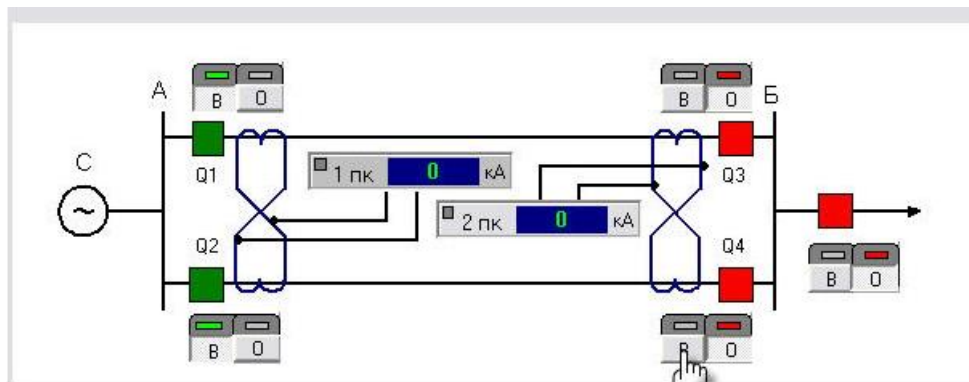


Рисунок 3.4 – Включение выключателей

4. Провести замеры рабочих токов и токов двухфазного и трехфазного коротких замыканий рисунок 3.5.

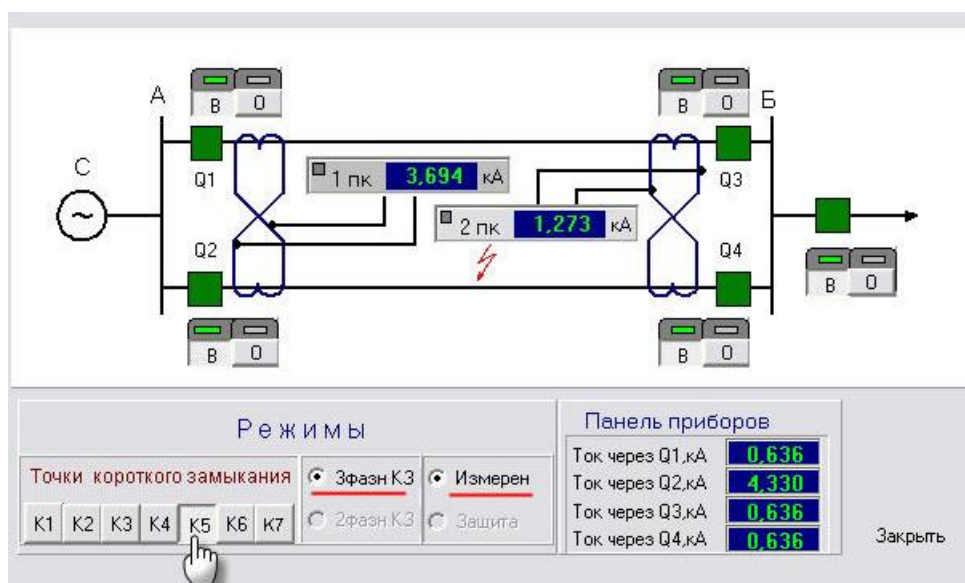


Рисунок 3.5 – Замеры рабочих токов и токов двухфазного и трехфазного коротких замыканий

Снятие режима к.з. производится отключением соответствующих выключателей.

5. Рассчитать параметры защит и выставить уставки рисунок 3.6. Форма **Параметры защиты** вызывается выбором меню **Работа Настройка**

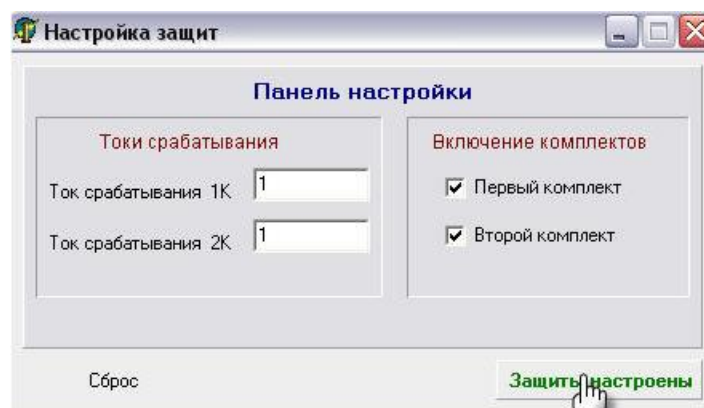


Рисунок 3.6 – Настройка защиты

6. После настройки уставок закрыть форму и на панели режимов рисунок 3.7 включить защиты

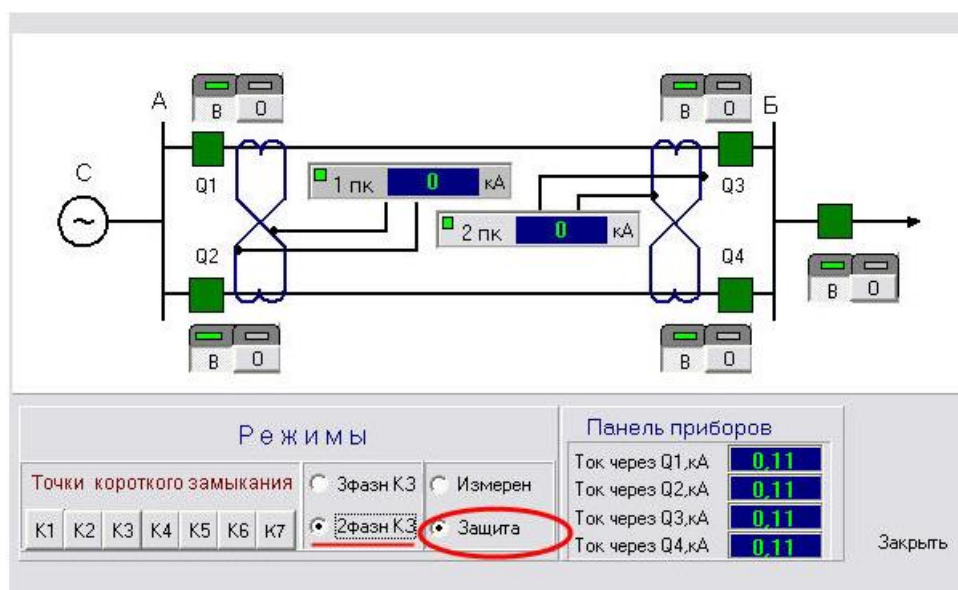


Рисунок 3.7 – Панель режимов

7. Провести испытания защит при коротких замыканиях в различных точках сети. Полупакеты могут быть выведены из работы, если против него убрать галочку на панели настройки.

О срабатывании защиты сигнализирует изменение цвета сигнальной индикации рисунок 3.8.

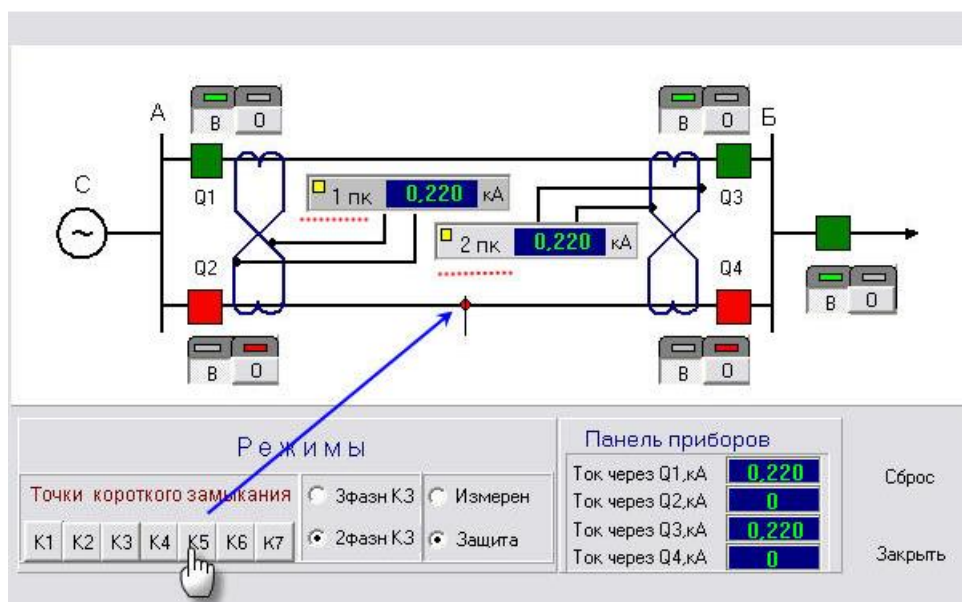


Рисунок 3.8 – Срабатывание защиты

После Сброса снова становится доступным режим испытания защит.

8. Результаты работы оформить в виде отчета, загрузив шаблон отчета из меню **Отчет Новый**. Раздел **Выводы** отчета должен быть заполнен обязательно.

Лабораторная работа №4. Автоматическое повторное включение линий

Цель работы: принципа работы автоматического повторного включения линий, получения и закрепления навыков расчета уставок и способов отладки селективности работы релейной защиты, экспериментальная проверка чувствительности, быстродействия, надежности работы и селективности релейной защиты.

Принцип действия

Устройства автоматики, осуществляющие повторное включение выключателя после отключения его релейной защитой называются устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

Ввиду высокой эффективности АПВ (успешность АПВ составляет величину 50-90%) их применение согласно Правилам устройства электроустановок, обязательно на всех воздушных и кабельно-воздушных линиях напряжением выше 1кВ.

Схемы АПВ должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- схема АПВ должна приходить в действие при любом аварийном отключении выключателя;
- схема АПВ не должна работать при отключении выключателя оперативным персоналом;
- схема АПВ должна обеспечивать заданное количество циклов повторного включения выключателя;
- время действия АПВ должно быть минимально возможным.

Указания по выполнению лабораторной работы

1. Работа с программой начинается с активизации задания на работу, рисунок 4.1, выбрав пункт меню *Задание Задание на работу*.



Рисунок 4.1 – Задание на работу

2. Задать выдержки времени защиты и АПВ, рисунок 4.2, а,б,в. Окончание ввода – нажатие клавиши ENTER.

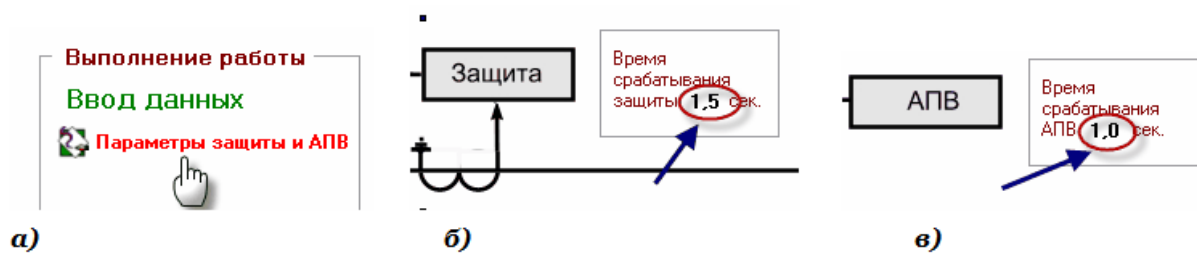


Рисунок 4.2 – Задача выдержек времени

3. Включить линейный выключатель рисунок 4.3

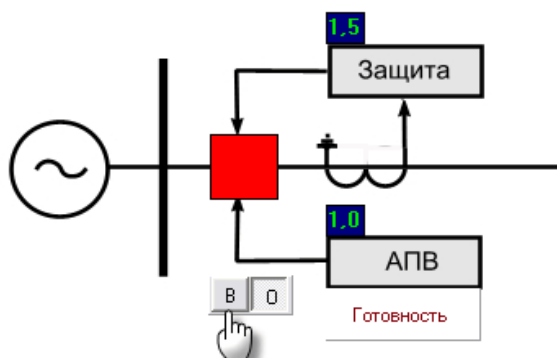


Рисунок 4.3 – Включение линейного выключателя

4. Дождаться готовности АПВ рис. 4.4.

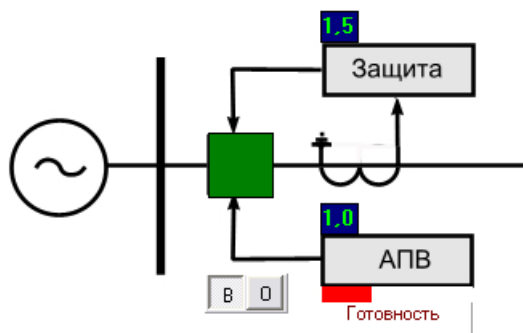


Рисунок 4.4 – Готовность АПВ

5. Выбрать режим испытаний рисунок 4.5.

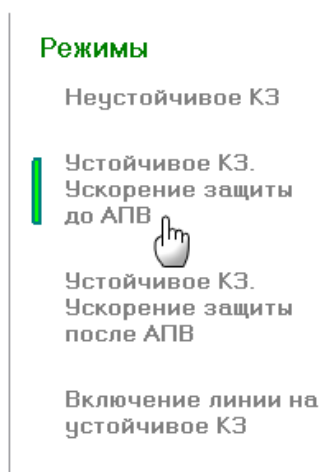


Рисунок 4.5 – Выбор режима испытаний.

6. После появления формы **Работа схемы АПВ** Рис. 4.6, ознакомиться с работой схемы АПВ

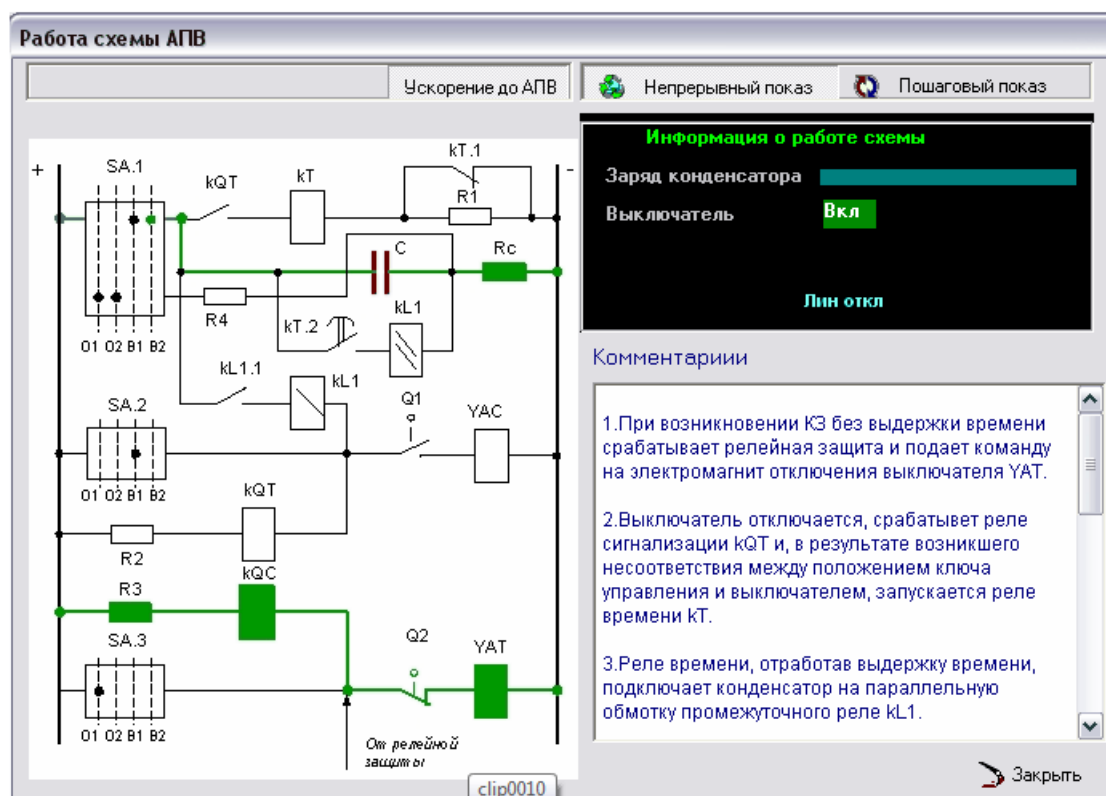


Рисунок 4.6 – Режимы работы схемы АПВ

Для чего, выбрать вид демонстрации - **Непрерывный показ** или **Пошаговый показ** рисунок 4.7.

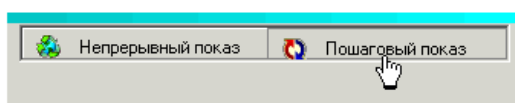


Рисунок 4.7 – Выбор вида демонстрации

Активизировать режим КЗ рисунок 4.8 и проследить поэтапное поведение схемы рисунок 4.9.

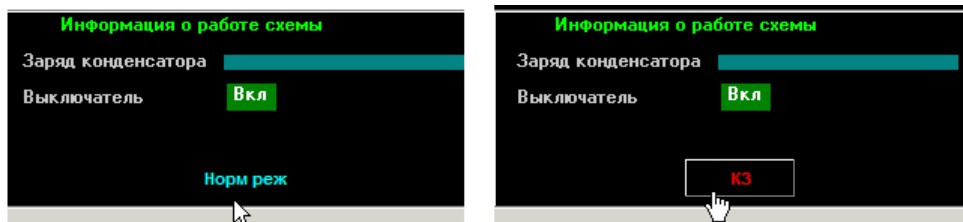


Рисунок 4.8 – Активация режима

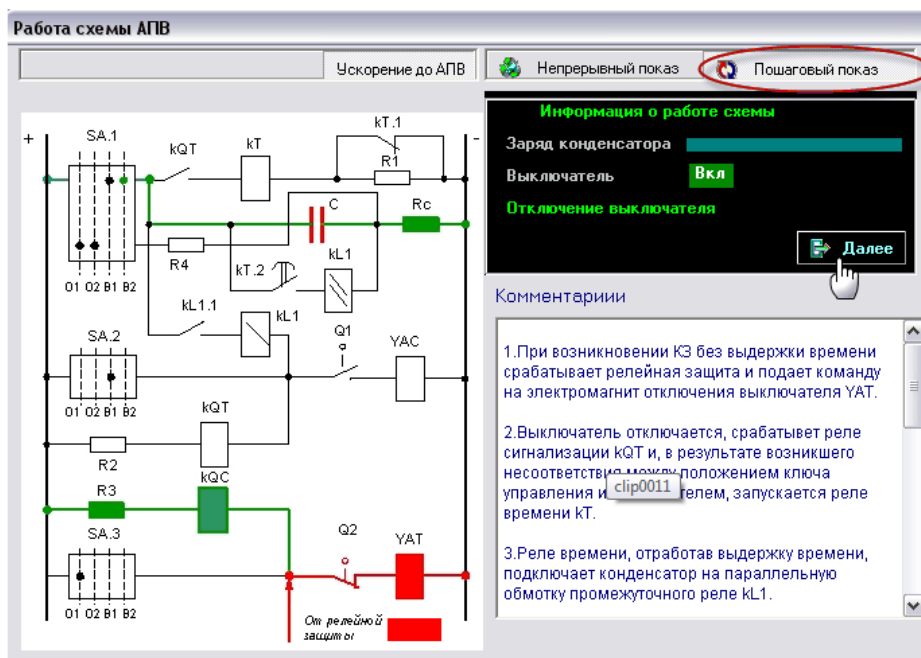


Рисунок 4.9 – Работа схемы АПВ

6. Руководствуясь показаниями приборов сигнализации на информационной панели рисунок 4.10, объяснить поведение защит и АПВ.

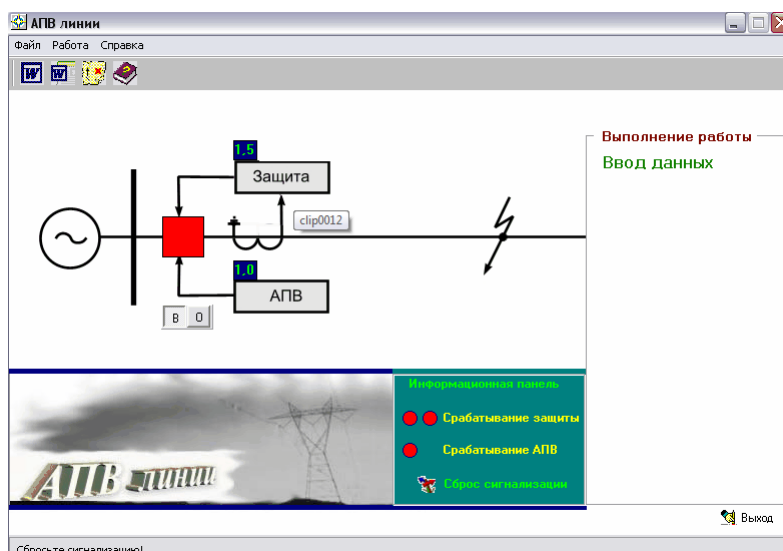


Рисунок 4.10 – Информационная панель АПВ линий

7. Сбросить сигнализацию и выбрать другой режим работы. Оформить отчет в шаблоне . Раздел **Выводы** отчета должен быть обязателен.

Список использованных источников

1. Копьев, В. Н. Релейная защита : учебное пособие / В. Н. Копьев ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во ТПУ. – 2011. – 160 с.
2. Полищук, В. И. Исследование принципов выполнения и алгоритмов функционирования основных устройств релейной защиты электроэнергетических систем: лабораторный практикум по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2020. – 34 с.: ил. – Текст: электронный.

Учебное издание

Полищук Владимир Иосифович

**РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
656038, Барнаул, пр. Ленина, 46

[В начало](#)