

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования**
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Методические указания по выполнения лабораторных работ
по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»**

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профили) «Электроснабжение»
Квалификация выпускника бакалавр

Ставрополь
2026

Оглавление

Введение	5
Лабораторная работа 1	6
Векторные диаграммы токов и напряжения при коротких замыканиях	
Лабораторная работа 2	22
Испытание трансформаторов тока и схем их соединений	
Лабораторная работа 3	47
Токовая защита на постоянном оперативном токе	
Лабораторная работа 4	80
Токовая защита на переменном оперативном токе	
Лабораторная работа 5	120
Направленная токовая защита	
Лабораторная работа 6	147
Дифференциальная защиты силового трансформатора	
Лабораторная работа 7	183
Испытание фильтровых реле тока и напряжения	
Лабораторная работа 8	201
Исследование принципов работы дистанционной защиты	
Литература	226
Приложение 1	227

Введение

Настоящее учебное пособие предназначено для проведения лабораторного практикума по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» у студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Дисциплина «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» является базовой, призванной сформировать профессиональные компетенции бакалавров в сфере релейной защиты. Лабораторный практикум рассчитан на закрепление и расширение знаний, полученных при изучении наиболее трудоёмких и сложных теоретических разделов дисциплины. Целью выполнения лабораторных работ является: непосредственное получение навыков сборки схем релейной защиты, ознакомление с принципом действия электромагнитных и полупроводниковых реле, навыки работы с векторными диаграммами. Учебное пособие разработано в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, рабочим учебным планом и рабочей программой дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Практикум направлен на формирование следующих профессиональных компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (П К - 3) ; с п о с о б н о с т ь рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Лабораторная работа 1

Векторные диаграммы токов и напряжения при коротких замыканиях

Цель работы: знакомство с работой прибора ВАФ-85М и методикой выполнения измерений в трехфазных электрических цепях и освоение методики построения векторных диаграмм, разложения на симметричные составляющие. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить по документации принцип работы и техники выполнения измерений с помощью прибора ВАФ-85М.
2. Выполнить измерения в трехфазной цепи при имитации различных коротких замыканиях.
3. Построить векторные диаграммы.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать. Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6);

Уметь. Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6);

Владеть. Навыками проверки и определения параметров устройств релейной

защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6).

Теоретическая часть

Общие замечания.

Для анализа поведения устройств релейной защиты и ряда измерительных устройств в нормальных и аварийных режимах необходимо производить сравнение и расчет переменных токов, напряжений и магнитных потоков.

Для расчета токов, напряжений и магнитных потоков требуется их изображение. Одним из возможных видов изображения переменных величин является изображение их с помощью векторных диаграмм.

Общим требованием при изображении электрической величины является его соответствие задаче, для решения которой это изображение используется. Для этого изображение должно содержать информацию (сведения), необходимую для решения рассматриваемой задачи.

При наладке и проверке схем включения устройств, функционирование которых определяется не только модулями подводимых к ним синусоидальных величин, но и от их фазового сдвига, нашли широкое применение специализированные приборы, к числу которых можно отнести комбинированный электроизмерительный прибор вольтамперфазоиндикатор типа ВАФ-85, например, модификации ВАФ-85М (рисунок 1.1). Отметим, что имеются электронные приборы с функциями прибора ВАФ-85, ПАРМА ВАФ-Т, ВАФ-4303.

Прибор вольтамперфазоиндикатор типа ВАФ-85М

Описание прибора ВАФ-85М.

Вольтамперфазоиндикатор ВАФ предназначен для комплексных испытаний защит генераторов, трансформаторов, линий в цепях трансформаторов тока и напряжения, проверки и наладки фазочувствительных схем релейной защиты. Имеется возможность определения порядка следования фаз, может использоваться для фазировки и контроля правильности включения 3-х фазных электрических счетчиков. Некоторые модели приборов позволяют определять мощность в однофазной или трехфазной цепи.

Необходимо отметить то, что с помощью приборов этого класса имеется возможность выполнения измерений, как значений модулей, так и фаз переменных тока или напряжения частотой 50 Гц.

Угол сдвига фаз φ измеряемых величин определяется относительно вектора $\underline{U}_{AB}$ трехфазной системы напряжений, подводимых к прибору, т. е., например, располагая модулем тока I и его фазой φ_i , можно записать комплексное выражение $\underline{I} = I \cdot e^{j\varphi_i} = I \angle \varphi_i$ для тока, полагая, например, что вектор $\underline{U}_{AB}$ совмещен с вещественной осью комплексной плоскости. Например, если при измерениях фаз двух токов I_1 и I_2 результаты измерений оказались равными $\varphi_1 = 40^\circ C$; $\varphi_2 = 80^\circ L$ согласно показаний лимба прибора (рис. 1.1б), то вектора токов можно записать как $\underline{I}_1 = I_1 \angle +40^\circ$ и $\underline{I}_2 = I_2 \angle -80^\circ$, а угол между векторами этих токов будет равен 120° (рис. 1.1в).

В приборе ВАФ-85М в качестве измерителя $ИМ$ использован магнитоэлектрический микроамперметр М-4204.36 (рис. 1.1а,б); выпрямление осуществляется германиевым диодом $VD1$. При определении фазы тока или напряжения питание к измерительному прибору подается через фазозависимый полупроводниковый выпрямитель AI , который обеспечивает максимальный ток через измерительный прибор, если напряжения, подводимые к фазозависимому выпрямителю, совпадают по

фазе. Фазозависимый выпрямитель AI содержит: сельсин M ; резистор $R2$, конденсатор $C4$, диод $VD2$, реле K типа РЭС42.

Прибор ВАФ-85М имеет следующие пределы измерений:

- по току без разрыва цепи (с использованием поставляемых комплектно электроизмерительных клещей $A2$) – 1, 5, 10 А;
- по току с разрывом цепи – 10, 50, 250 мА при падении напряжения на зажимах прибора не более соответственно 50, 20, 20 мВ;
- по напряжению – 1, 5, 25, 125, 250 В при входном сопротивлении прибора на всех пределах измерения не менее 250 Ом/В.

Класс точности прибора 1,5; 4.

Для измерения тока в пределах 1, 5, 10 А или напряжения в пределах 1–250 В переключатель $S2$ устанавливается в положение *Величина*; переключатель пределов измерений $S3$ на соответствующий (или максимальный) предел по току или напряжению; переключатель $S1$ – в положение AV .

Измеряемое напряжение подается к зажимам K_{10} , отмеченным звездочкой (*), и $K_8 (U)$. При измерении тока проводник с измеряемым током охватывается электроизмерительными клещами, от которых гибкий шнур с вилкой на конце включается в гнездо $K_{10}(*)$ и $K_9(A)$ маркировка у штырей вилки должна, соответствовать маркировке, указанной на панели прибора.

Если измеряемый ток меньше нижнего предела измерения, магнитопровод клещей можно охватить *несколько* раз проводником, по которому проходит измеряемый ток, и полученный результат измерений разделить на количество витков (для подготовки такого измерения обычно приходится отключать измеряемую цепь).

Для измерения малых токов используется промежуточный трансформатор TA , включаемый в разрыв измеряемой цепи зажимами: обозначенными * (K_4) и 10 мА (K_5) или 50 мА (K_6), 250 мА (K_7). Переключатель $S1$ устанавливается в положение *мА*. При этом входное

сопротивление оказывается настолько малым, что устройство может использоваться для измерения тока небаланса в схемах релейной защиты.

Для измерения фазы тока или напряжения переключатель $S2$ устанавливается в положение *Фаза*, переключатель $S1$ – в положение AV . К зажимам A, B, C подводится напряжение от трехфазной цепи 110 – 220 В.

Порядок чередования фаз определяется по направлению вращения диска фазорегулятора, приходящего в движение при освобождении тормоза. Вращение диска по часовой стрелке свидетельствует о правильном (прямом) чередовании фаз.

Подготовка прибора к работе и его использование

Перед выполнением:

- измерения фазы тока *или* напряжения должно быть обращено внимание на правильность присоединения цепей, а именно, при определении фазы тока сторона магнитопровода электроизмерительных клещей, обозначенная (*), должна быть обращена к питающему концу токопровода;
- измерения фазы напряжения, оно должно подводиться так, чтобы к зажиму (*) присоединялся провод, связанный с точкой (фазой), соответствующей принятому началу вектора напряжения.

В рассматриваемом устройстве совпадение нулевого положения диска и нуля прибора соответствует подаче к зажимам $K_{10}(*)$ и $K_8(V)$ - напряжения U_{AB} . Поэтому за исходный при измерении углов или снятии векторных диаграмм, как уже отмечалось, принимается вектор напряжения U_{AB} (базовое напряжение). Подав на клеммы A, B и C прибора трехфазное напряжение (на лабораторном стенде используется напряжение 220 В), перед измерением следует проверить нулевое положение стрелки прибора $ИМ$ и диска (лимба), подведя с клемм A и B прибора к его зажимам $V-(*)$ напряжение U_{AB} , т. е. на полярный зажим (*) должно быть подано напряжение фазы A , а на не полярный зажим V – фаза B (рис. 1.1б), при этом переключатель $S3$ должен находиться в положении 250 В.

Для измерения угла φ диск (лимб) вращают по часовой стрелке до тех пор, пока указатель измерительного прибора ИМ не установится на нуль.

Угол будет определен правильно, если при незначительном повороте диска лимба стрелка прибора будет перемещаться в ту же сторону, что и лимб. Стрелки на диске, обозначенные буквами L , C , указывают в какую сторону относительно вектора напряжения U_{AB} будет **смещен** вектор измеряемого тока или напряжения: L – в сторону отставания, C – в сторону опережения. Угол (в градусах) отсчитывают по делениям, нанесенным на диск лимба.

При измерении угла сдвига между векторами двух величин вначале определяют углы между каждой из измеряемых величин относительно вектора напряжения U_{AB} , затем находится разность этих углов. Так, например, если при измерениях фаз двух токов I_1 и I_2 результаты измерений оказались $\varphi_1 = +40^\circ$; $\varphi_2 = -80^\circ$, то угол между векторами этих токов будет равен 120° (рис. 1.1в).

Таким образом, рассматриваемый прибор позволяет не только построить векторные диаграммы измеренных электрических величин, но и записать аналитически их комплексные изображения.

На рис. 1.1г в качестве примера для момента времени $t = 0$ приведено взаимное положение симметричных векторов линейных и фазных напряжений источника синусоидального питания системы с изолированной нейтралью и векторов линейных синусоидальных токов в фазах этой системы в предположении, что соответствующие измерения выполнены прибором ВАФ. Отметим, что, располагая взаимным положением измеренных трех векторов токов (напряжений) трехфазной системы можно графически или аналитически определить симметричные составляющие (прямую, обратную и нулевую) измеренных векторов (рис. 1.1д). Располагая взаимным расположением тока и соответствующего фазного напряжения можно

определить направление потока мощности (полной и его составляющих) в этой фазе.

Определение симметричных составляющих векторов трехфазной системы электроснабжения

В системе электроснабжения наиболее тяжелые режимы работы возникают при появлении поперечной несимметрии (различного вида короткие замыкания) или при продольной несимметрии, например при обрыве одной из фаз, например, при перегорании в одной из фаз плавкой вставки предохранителя ПСН-35 на стороне 35 кВ силового трансформатора 35/6–10 кВ. В реальных условиях возможно возникновение одновременно и поперечной и продольной несимметрии, или когда появление одного вида несимметрии порождает возникновение другого. Все эти режимы являются несимметричными режимами. Релейная защита и противоаварийная автоматика должна правильно работать в этих условиях и обеспечить локализацию (отключение от источников питания) поврежденного элемента системы электроснабжения.

Для обеспечения правильного функционирования отдельных типов защит в них может использоваться информация, как о величинах, так и фазовых сдвигов соответствующих симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений.

Известно, что анализ несимметричных режимов в трехфазной системе электроснабжения выполняют на основе метода симметричных составляющих. В его основе лежит представление каждого из трех заданных (или искомых) векторов токов или напряжений трехфазной системы

$$\underline{\dot{A}} = \dot{A} \angle \varphi_A, \quad \underline{\dot{A}} = \hat{A} \angle \varphi_{\hat{A}} \text{ и } \underline{\tilde{N}} = \tilde{N} \angle \varphi_{\tilde{N}} \quad (1.1)$$

суммой трех симметричных векторов, сводящих решение исходного несимметричного режима к рассмотрению трех задач, но уже для симметричных режимов. В выражении (1.1) под векторами $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ в общем

случае следует понимать соответствующие линейные или фазные вектора либо напряжений, либо токов.

Принято вначале определять симметричные составляющие последовательностей для определяющей фазы, например фазы А, т. е. для этой фазы в результате расчетов получают значения векторов нулевой $\underline{A}_0 = A_0 \angle \varphi_0$, прямой $\underline{A}_1 = A_1 \angle \varphi_1$ и обратной $\underline{A}_2 = A_2 \angle \varphi_2$ последовательностей.

Учитывая, что далее рассматриваются выполнение вычислений на основе языка схем упомянутых выше программ, приведем основные соотношения, связывающих между собой истинные значения векторов электрических величин и векторов их симметричных составляющих:

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_0 + \underline{A}_1 + \underline{A}_2; & a) \\ \underline{B} &= \underline{B}_0 + \underline{B}_1 + \underline{B}_2 = \underline{A}_0 + a^2 \cdot \underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 = & б) \\ &= A_0 \angle \varphi_0 + A_1 \angle (\varphi_1 + 240^\circ) + A_2 \angle (\varphi_2 + 120^\circ); & (1.2) \\ \underline{C} &= \underline{C}_0 + \underline{C}_1 + \underline{C}_2 = \underline{A}_0 + a \cdot \underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 = & в) \\ &= A_0 \angle \varphi_0 + A_1 \angle (\varphi_1 + 120^\circ) + A_2 \angle (\varphi_2 + 240^\circ).\end{aligned}$$

Располагая параметрами векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$, симметричные составляющие $\underline{A}_0$, $\underline{A}_1$ и $\underline{A}_2$ могут быть найдены с использованием выражений (1.2):

$$\begin{aligned}\underline{A}_0 &= (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3 = (A \angle \varphi_A + B \angle \varphi_B + C \angle \varphi_C)/3; & a) \\ \underline{A}_1 &= (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C})/3 = [A \angle \varphi_A + B \angle (\varphi_B + 120^\circ) + C \angle (\varphi_C + 240^\circ)]/3; & б) \\ \underline{A}_2 &= (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C})/3 = [A \angle \varphi_A + B \angle (\varphi_B + 240^\circ) + C \angle (\varphi_C + 120^\circ)]/3 & в)\end{aligned}\quad (1.3)$$

В (2) и (3) $a = 1 \cdot e^{j120^\circ} = 1 \angle +120^\circ = 1 \angle -240^\circ$ – фазовый множитель; $a^2 = 1 \cdot e^{j240^\circ} = 1 \angle +240^\circ = 1 \angle -120^\circ$. Множители определяют поворот вектора при нем при положительном угле множителя против хода часовой стрелки на угол, равный положительному аргументу, или по ходу часовой стрелки на угол, равный отрицательному аргументу.

Располагая тремя комплексными значениями ($\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$) либо соответствующих напряжений, либо соответствующих токов, по выражениям

(3) можно определить требуемые для последующего анализа симметричные составляющие.

В устройствах релейной защиты задача выделения симметричных составляющих осуществляется с помощью специальных схем, называемых фильтрами симметричных составляющих: фильтр прямой последовательности, фильтр обратной последовательности, фильтр нулевой последовательности. Необходимо отметить, что в отдельных случаях используется *комбинированный* фильтр, у которого выходной сигнал, определяется, например, сочетанием значений двух последовательностей. В цифровой релейной защите определение симметричных составляющих осуществляется программными средствами.

Располагая параметрами векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ можно аналитически или с помощью соответствующих графических построений определить симметричные составляющие этих трех векторов, например, для определяющей фазы A . Аналитическое решение осуществляется по выражениям (1.3). В соответствии с этими выражениями симметричные составляющие $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$ и $\underline{A}_0$ можно определить графическими построениями, которые иллюстрируются рис. 1.2.

Возможно решение обратной задачи, т. е. по заданным симметричным составляющим ($\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$ и $\underline{A}_0$) определяются истинные значения векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$. Для этого при аналитическом решении можно воспользоваться выражениями (1.1), либо выполнить для этого соответствующие графические построения, т. е. выполнить решение этих уравнений графически. Методика поясняется рис. 1.3 с использованием симметричных составляющих, полученных на рис. 2.1. На основе построений, приведенных на рис. 1.2б, в, г получают симметричные составляющие $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$ и $\underline{A}_0$ для определяющих фазы A . По ним можно построить систему симметричных векторов: $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1$, $\underline{C}_1$; $\underline{A}_2$, $\underline{B}_2$, $\underline{C}_2$ и $\underline{A}_0$, $\underline{B}_0$, $\underline{C}_0$ (см. рис. 1.3а, б, в) и в конечном итоге построить систему исходных векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ (см. рис. 1.3г и 1.2а).

Располагая векторами фазных напряжений и токов, можно определить направление полной мощности и его составляющих в каждой фазе (см. рис. 1.12).

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- прибор ВАФ-85М;
- специальная панель, позволяющая реализовать различные виды коротких замыканий (рис. 1.4). Регулируемый источник тока выполнен на основе трехфазных *ЛАТР* и трансформатора, нагруженного на активную нагрузку, подключаемую к нему через ключи SA. Соответствующие виды коротких замыканий (поперечная несимметрия) создаются установкой соответствующих перемычек, устанавливаемых между точками a' , b' , c' и n' схемы. Продольная несимметрия создается размыканием соответствующих ключей SA1 – SA3. Вид схемы электроснабжения (без заземления или с заземленной нулевой точкой источника питания) создается соответствующим положением ключа SA4.

Примечание. Все эксперименты выполняются на пониженном напряжении. Токи, протекающие в фазах, образованных сопротивлениями R_1 и R_2 , не должны превышать 4А. Условно можно считать, что сопротивление R_1 является сопротивлением некоторой линии, а сопротивление R_2 – сопротивлением нагрузки. Поэтому в экспериментах как бы моделируются различного вида повреждения на зажимах нагрузки.

3. Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

Все необходимые измерения величин токов и напряжений и их фаз выполняются в месте предполагаемой установки защиты, а именно, перед ключами SA (рис. 1.2).

Примечание. Варианты повреждений задаются преподавателем!

1. Исследование симметричного режима.

Изучить схему, приведенную на стенде.

Собрать схему для исследования симметричного режима (схема трехпроводная). Отметим, что симметричный режим соответствует трехфазному короткому замыканию. Используя ВАФ-85М, измерить величины

- напряжений и их фазы;
- токи и их фазы.

2. Исследование схемы при несимметричном режиме (схема трехпроводная).

Режим двухфазного КЗ. Несимметрия создается путем закорачивания соответствующих двух фаз (указывается преподавателем). Используя ВАФ-85М, измерить величины напряжений и их фазы, токи и их фазы.

Режим двухфазного КЗ с обрывом фазы. Оборванная фаза указывается преподавателем. Выполнить измерения.

3. Собрать четырехпроводную схему и определить величины напряжений и токов и их фазы:

- при двухфазном КЗ;
- при двухфазном КЗ с продольной несимметрией;
- при двухфазном КЗ «на землю»;
- при двухфазном КЗ «на землю» с продольной несимметрией;
- при однофазном КЗ.

4. Обработка экспериментальных данных

На основе полученных экспериментальных данных:

1. построить в масштабе векторные диаграммы для напряжений и токов;
2. для выбранного несимметричного режима на основе построения векторов определить соответствующие симметричные составляющие;
3. получить те же вектора, но на основе аналитических расчетов.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, *ФИО* студента, номера группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Используемые в экспериментах схемы.
3. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
5. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

Контрольные вопросы

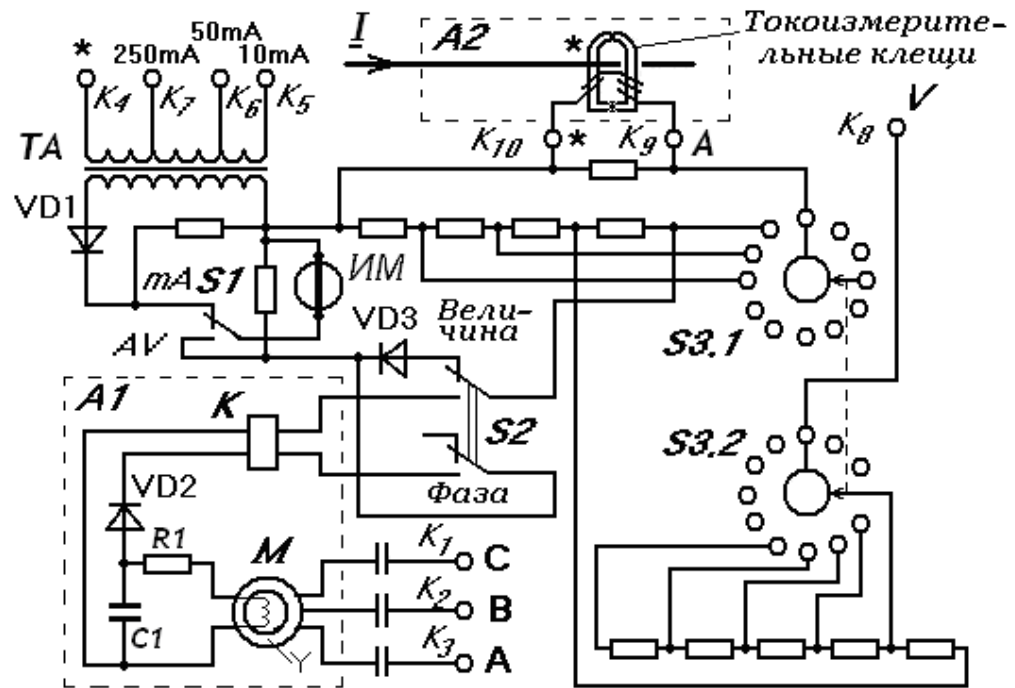
1. Объясните назначение прибора ВАФ-85М и его технические данные.
2. В чем состоит подготовка прибора к работе?
3. Каким образом выполняются измерения величин напряжений и их фазы с помощью прибора?
4. Каким образом выполняются измерения токов и их фазы с помощью прибора?
5. Каким образом выполняются построения векторных диаграмм?

6. Как с помощью векторной диаграммы для симметричного режима сделать заключение – куда направлена мощность? Поясните на своем примере.
7. Каким образом на основе выполненных измерений получить значения несимметричных составляющих режима путем построения векторной диаграммы? Имеется в виду любых.
8. Каким образом на основе выполненных измерений получить значения несимметричных составляющих режима путем аналитических расчетов? Имеется в виду любых.
9. Постройте векторные диаграммы для токов и напряжений для заданного преподавателем несимметричного режима.

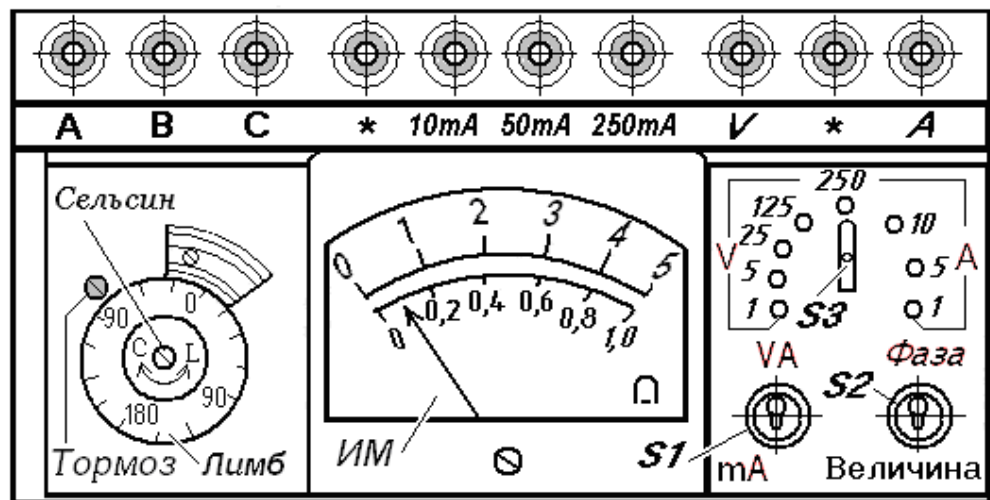
4. Список рекомендуемой литературы

Основная [1, 2]

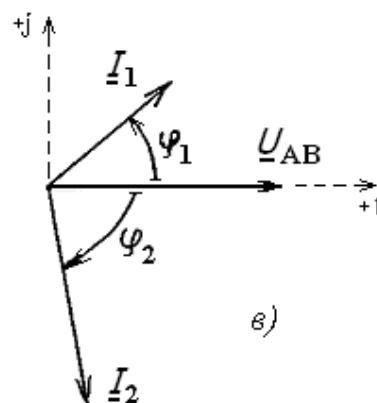
Дополнительная [3, 4, 5]



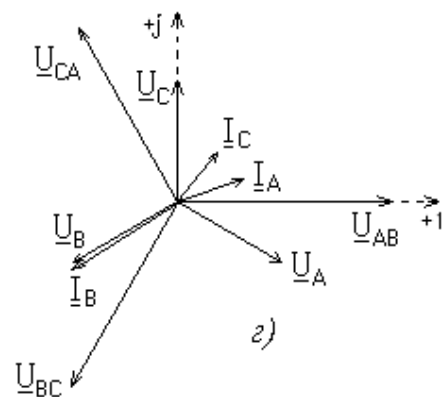
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.1 – Схема (а) и лицевая панель (б) прибора ВАФ-85М. К построению векторных диаграмм (в, г)

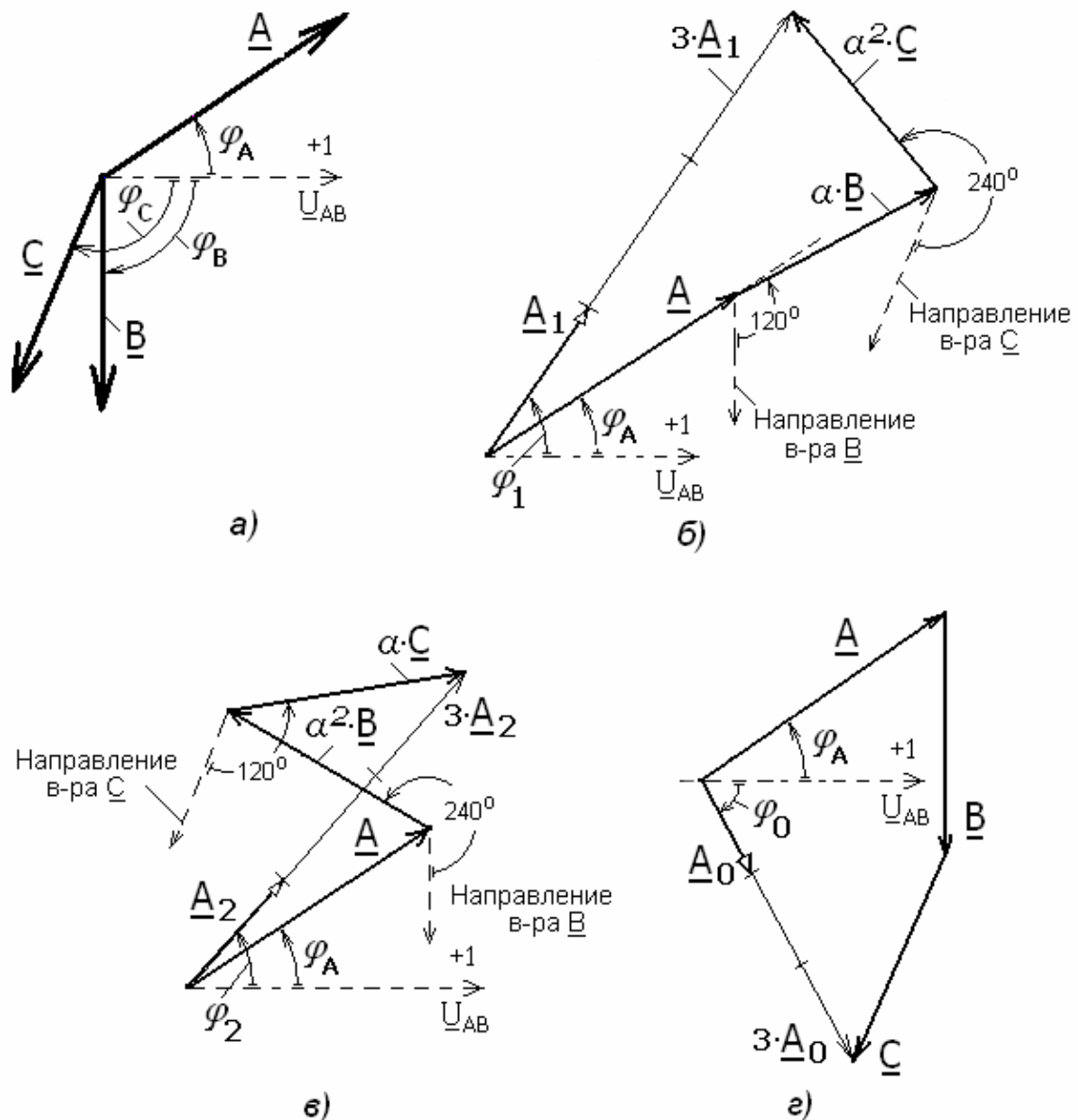


Рисунок 1.2 – К графическому определению симметричных составляющих определяющей фазы:

а – исходные вектора; б – определение прямой последовательности;
 в – определение обратной последовательности; г – определение нулевой последовательности

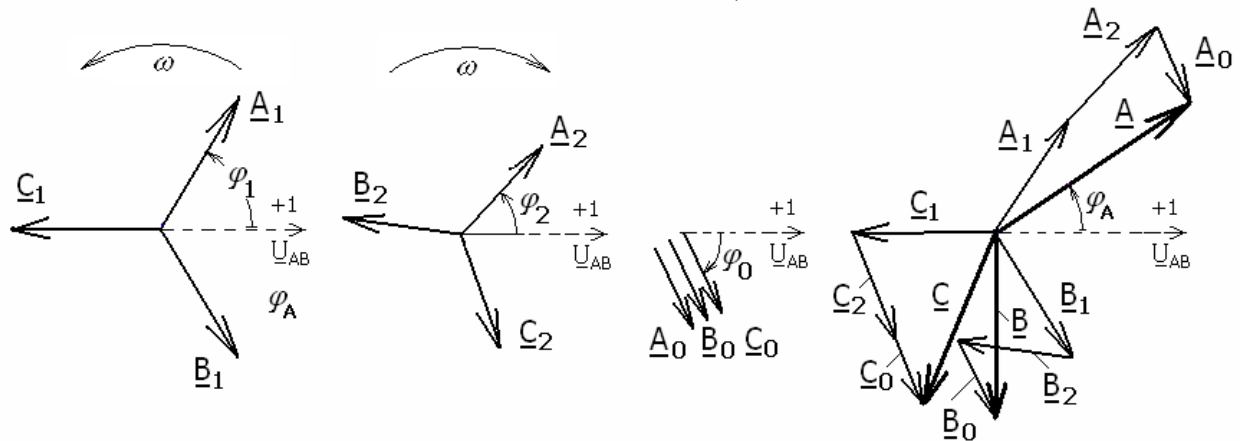


Рисунок 1.3 – К графическому построению исходных векторов А, В и С по известным симметричным составляющим

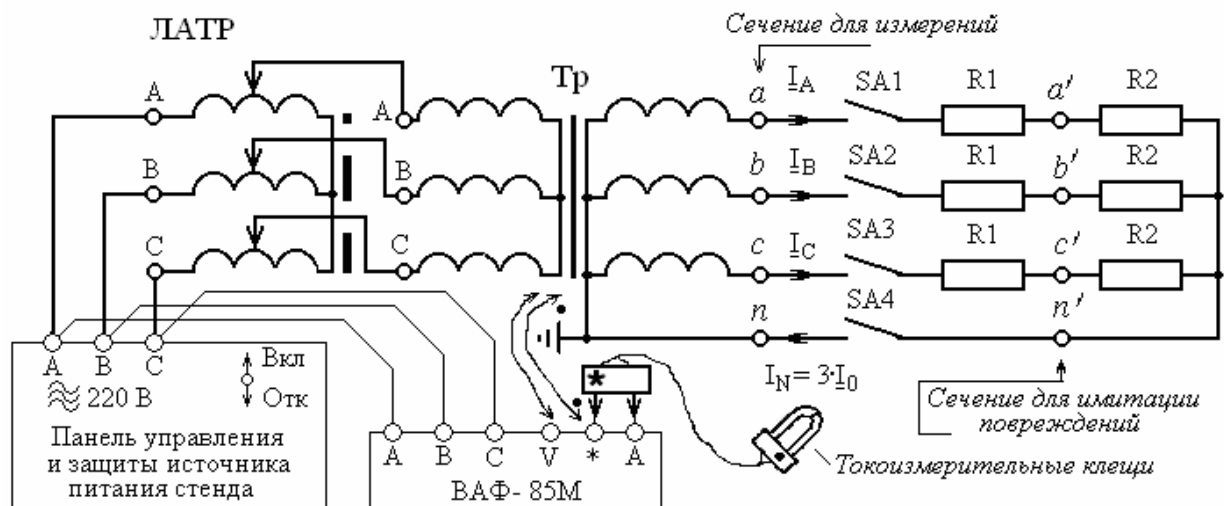


Рисунок 1.4 – Схема экспериментальной установки

Лабораторная работа 2

Испытание трансформаторов тока и схем их соединений

Цель работы: знакомство с методикой испытаний трансформаторов тока, применяемых в схемах релейной защиты, исследование схем соединения обмоток трансформаторов тока (ТА) и поведения схем (их чувствительности) при имитации различных видов коротких замыканий в системе электроснабжения. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Проверить правильности разметки (полярности) зажимов трансформатора тока и его коэффициента трансформации.
2. Снять характеристики намагничивания ТТ.
3. Снять зависимости вторичного тока трансформатора от первичного при различных вторичных нагрузках.
4. Исследовать схемы соединения трансформаторов тока. Изучить токораспределение в схемах соединения трансформаторов тока при имитации различных видов коротких замыканий.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

Токовые цепи устройства релейной защиты подключаются к токовым цепям защищаемого элемента системы электроснабжения посредством измерительных трансформаторов тока ТА. С помощью ТА изолируются цепи релейной защиты от системы высокого напряжения, что позволяет персоналу производить работу в токовых вторичных цепях при включенном первичном оборудовании. Кроме того, трансформаторы тока дают возможность получить необходимые различные сочетания токов для работы защиты, как в нормальных режимах, так и при возникновении коротких замыканий в системе электроснабжения.

ТА имеют стандартный номинальный вторичный ток $I_{2ном} = 1$ или 5 А при любых значениях номинального первичного тока $I_{1ном}$: $1, \dots, 50, 75, \dots, 100, 150, 200, 250, 300, 400, \dots, 1000, 2000, \dots, 10000\text{ А}$.

Конструктивные особенности трансформатора зависят от того, в каких условиях он будет эксплуатироваться. Поэтому высоковольтные ТА выпускаются как для внутренней установки, так и для наружной.

На рис. 2.1 приведены некоторые из вариантов выполнения ТА. Например, трансформаторы типа ТПЛ-10 находят широкое применение в закрытых распреустройствах на 6-10 кВ; масляный трансформатор тока

типа ТНФД-110М используется на открытых распределительных устройствах при напряжении 110 кВ. Трансформаторы ТНФД-110М имеют один магнитопровод с обмоткой класса 0,5 для подключения токовых цепей измерительных приборов и, в зависимости от модификации, два-три магнитопровода с обмотками для питания токовых цепей релейной защиты. Чем выше напряжение, тем труднее осуществить изоляцию первичной обмотки, поэтому на напряжение 330 кВ и более изготавливаются трансформаторы тока каскадного типа. Наличие двух каскадов трансформации (двух сердечников с обмотками) позволяет выполнить изоляцию обмоток каждой ступени не на полное напряжение, а на его половину.

Общие сведения о работе трансформаторов тока и схемах их соединений

Одно из принятых изображений ТА и схема замещения двухобмоточного трансформатора тока приведены на рис. 2.2. Основными элементами ТА являются первичная обмотка с числом витков w_1 , вторичная обмотка с числом витков w_2 и магнитопровод, выполненный из электро-технической стали.

Первичная обмотка включается в цепь измеряемого (первичного тока) I_1 . В цепь вторичной обмотки включаются токовые цепи измерительных приборов и реле, обрабатывающие информацию о первичном токе. Во вторичной цепи течет ток I_2 . Начала и концы обмоток ТА указываются на их выводах. Выводы первичной обмотки Л1 и Л2 маркируются произвольно, однако выводы вторичной обмотки И1 и И2 маркируются с учетом принятого обозначения первичной обмотки. За начало вторичной обмотки И1 принимается вывод, из которого мгновенное значение тока i_2 направляется в цепь нагрузки, когда в первичной обмотке ток i_1 входит в вывод Л1. При такой маркировке мгновенное значение тока в токовой обмотке реле имеет то

же направление, что и при включении непосредственно в защищаемую цепь (без трансформатора ТА, см. рис. 2.2б). Соблюдение указанного правила маркировки зажимов ТА имеет принципиальное значение, так как вторичные обмотки ТА могут соединяться по разным схемам и вторичные токи, протекающие через токовые обмотки реле, должны правильно отражать токораспределение в первичных обмотках ТА как при симметричных режимах (нагрузка, трехфазное КЗ), так и при всех видах продольной и поперечной несимметрии, например, при двухфазных КЗ, что очень важно для правильной работы как измерительных приборов, так и релейной защиты.

Вследствие того, что вторичная обмотка индуктивно связана с первичной, в ней под воздействием первичного тока индуцируется э. д. с. взаимоиндукций E_2 , вызывающая вторичный ток и вторичное напряжение U_2 как функции первичного тока, то есть ТА по своему функционированию является источником тока, управляемый током ($I_2 = K_I \cdot I_1$, где коэффициент передачи K_I применительно к ТА называется коэффициентом трансформации трансформатора тока)

Работа трансформатора характеризуется уравнением намагничивающих сил (МДС), согласно которому геометрическая сумма МДС первичной и вторичной обмоток создает результирующую МДС $I_{\text{нам}} \cdot w_1$ образующую основной магнитный поток Φ , т. е.

$$\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_{\text{нам}} w_2 \quad (2.1)$$

или

$$\underline{I}_2 = (\underline{I}_1 - \underline{I}_{\text{нам}}) \cdot \frac{w_1}{w_2} = \left(\frac{\underline{I}_1}{K_I} - \frac{\underline{I}_{\text{нам}}}{K_I} \right) = \underline{I}_1' - \underline{I}_{\text{нам}}', \quad (2.2)$$

где $\frac{w_2}{w_1} = K_I$ – номинальный коэффициент трансформации ТА.

Отметим, что применительно к ТА используется Т-образная схема замещения при условии, что параметры первичного контура приведены к параметрам вторичной обмотки (рис. 2.2б).

Из (2) следует, что действительный вторичный ток I_2 отличается от расчетного на величину $I_{нам} / K_1$. Таким образом, вследствие наличия тока намагничивания $I_{нам}$ во вторичную обмотку трансформируется не весь первичный ток I_1 , а только его часть, что и, вызывает погрешность в работе трансформатора тока.

В ГОСТ 7746–78Е на трансформаторы тока регламентируются погрешности ТА только в установившемся режиме в предположении, что измеряемый первичный ток является синусоидальной функцией времени.

Регламентированы три вида погрешностей (рис. 2.2в):

- угловая δ , равная углу сдвига фаз первичного I_1 и вторичного I_2 токов (выражается в градусах и минутах);
- токовая ΔI , определяемая по формуле, связывающей между собой действующие значения токов:

$$\varepsilon_m = \left(\frac{K_{Ино} \cdot I_2}{I_1} - 1 \right) \cdot 100\% = \frac{I_{нам} / K_{Ино}}{I_1 / K_{Ино}} 100\%; \quad (2.3)$$

- полная, которую находят через мгновенные значения соответствующих токов согласно выражению

$$\varepsilon\% = \frac{100\%}{I_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2 \cdot K_{1ном} - i_1)^2 dt} . \quad (2.4)$$

Трансформаторы тока, используемые в релейной защите, имеют два класса точности: 5Р и 10Р. Полная погрешность первых не должна превышать $\varepsilon = 5\%$, а вторых — $\varepsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и расчетной предельной кратности первичного тока.

Если полная погрешность не превышает 10%, то она может быть определена по формуле токовой погрешности (2.3).

Из приведенных выражений для погрешности видно, что погрешность ТА зависит от величины намагничивающего тока $I_{\text{нам}}$. Значение погрешности ТА зависит от конструктивных особенностей ТА, размеров сердечника, материала магнитопровода, от значения нагрузки $Z_{\text{н}}$, подключенной к вторичным зажимам ТА. С увеличением нагрузки вторичной обмотки $Z_{\text{н}}$ погрешность возрастает вследствие увеличения тока намагничивания.

Поэтому при проверке работы трансформаторов тока следует знать сопротивление всех элементов, подключенных к данному трансформатору и определяющих значение расчетной вторичной нагрузки $Z_{\text{н,расч}}$. Номинальная вторичная нагрузка представляет собой полное сопротивление внешней вторичной цепи трансформатора тока, при котором гарантируется класс точности или предельная кратность тока (предполагается, что $\cos\varphi_{\text{н}} = 0,8$). Значение $Z_{\text{н,ном}}$ устанавливается заводом-изготовителем и указывается на паспортной табличке трансформатора тока, как и класс точности (если трансформатор тока предназначен для релейной защиты, то вместо класса точности может ставиться буква P). Предельная кратность – это наибольшее отношение первичного тока к номинальному первичному току трансформатора тока, при котором полная погрешность $\varepsilon\%$ при заданной вторичной нагрузке не превышает 10%, $K_{10} = I_{1\text{max}} / I_{1\text{ном}}$

В информационных материалах заводов-изготовителей должны быть приведены кривые предельной кратности $K_{10}=f(Z_{\text{н}})$. На паспортных табличках трансформаторов тока для устройств релейной защиты должно быть также указано значение номинальной предельной кратности $K_{10\text{ном}}$ при номинальной вторичной нагрузке, гарантированное заводом-изготовителем.

На рис. 2.3 в качестве примера приведены кривые предельной 10% погрешности ТА типа ТПЛ-10.

Наибольшая кратность первичного тока, при которой гарантируется, что полная погрешность не превысит 10%, называется предельной кратностью K_{10} (или *десятипроцентной* погрешностью ТА).

Ток намагничивания состоит из активной составляющей $I_{a.нам}$, обусловленной активными потерями на гистерезис и от вихревых токов в сердечнике ТА, и реактивной составляющей $I_{p.нам}$, создающей магнитный поток Φ , который индуцирует во вторичной, обмотке э. д. с. E_2 , причем

$$I'_{p.нам} \gg I'_{a.нам}.$$

Ток $I_{p.нам}$ связан с потоком Φ соотношением $I_{p.нам} = \Phi \cdot R_M / w_1$

Эта зависимость называется характеристикой намагничивания ТА (рис. 2.4).

В начальной части характеристики ток намагничивания почти пропорционален Φ . При некотором значении $\Phi = \Phi_{нас}$ происходит насыщение магнитопровода, из-за чего поток Φ растет медленнее, чем ток намагничивания $I_{нам}$, что вызывает резкое увеличение погрешности ТА.

Для уменьшения $I_{p.нам}$ необходимо уменьшить магнитное сопротивление R_M , т. е. увеличивать сечение магнитопровода и применять сталь с высокой магнитной проницаемостью, добиваясь увеличения прямолинейной части характеристики намагничивания и ее крутизны.

При изготовлении трансформаторов тока выводы их первичной и вторичной обмоток обозначаются (*маркируются*) так, чтобы при помощи этих обозначений определять направление вторичного тока по направлению первичного.

Согласно ГОСТ начало и конец первичной обмотки обозначаются соответственно $L1$ и $L2$ (линейные), а начало и конец вторичной обмотки –

И1 и *И2* (измерительные). Концы вторичной обмотки должны быть выведены таким образом, чтобы при направлении тока в первичной обмотке от *Л1* к *Л2* ток во вторичной обмотке протекал от *И2* к *И1*, а во вторичной внешней цепи (цепи нагрузки ТА) – от *И1* к *И2*.

Зажимы *Л1* и *И1* и соответственно *Л2* и *И2* называются однополярными.

Однополярные зажимы индуктивно связанных контуров обладают следующим свойством: протекание к однополярному зажиму одного контура тока, возрастающего по величине, вызывает повышение потенциала на однополярном зажиме второго контура.

Для правильной сборки большинства измерительных схем и схем релейной защиты необходимо быть уверенным в правильности разметки выводов обмоток трансформатора тока, поэтому перед монтажом предварительно проверяют правильность разметки.

По мере увеличения сопротивления нагрузки $\underline{Z}_H$ (рис. 2.2б), ток i_1' распределяется таким образом, что ток I_2 уменьшается, а ток I_{ia}' увеличивается, т. е. трансформатор тока начинает работать с большими погрешностями. В пределе, когда $\underline{Z}_H = \infty$ (обмотка разомкнута), ток $I_2 = 0$, $I_{ia}' = I_1'$ и результирующая МДС резко возрастает. Она становится равной МДС первичной обмотки. Следствием этого является значительное увеличение магнитного потока Φ . При размыкании вторичной обмотки магнитопровод быстро насыщается, что обуславливает появление на разомкнутой обмотке трансформатора несинусоидальной ЭДС e_2 , максимальные мгновенные значения которой могут достигать тысяч и даже десятков тысяч вольт, что представляет опасность для обслуживающего персонала и изоляции. Наряду с этим в связи с увеличением магнитного потока возрастают потери в стали магнитопровода трансформатора. Он недопустимо перегревается, что может привести к усиленному износу или

даже повреждению изоляции трансформатора тока. Таким образом, нормальным режимом работы трансформатора тока является режим короткого замыкания вторичной цепи с малой МДС $\underline{F}_{i\dot{a}i} = w_1 \cdot \underline{I}_{i\dot{a}i}$, т. е. сердечник ТА находится под воздействием незначительного магнитного потока Φ .

Отметим, что по соображениям техники безопасности вторичные токовые цепи измерительных ТА должны иметь заземление одной из точек соответствующей схемы.

Для питания цепей защиты используются различные схемы соединения вторичных обмоток ТА и токовых измерительных цепей защиты. Схемы соединения ТА приведены на рис. 2.9. В общем случае под токовой обмоткой амперметра А следует понимать токовую измерительную обмотку устройства защиты.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- специальная панель с установленными трансформаторами тока;
- нагрузочное устройство на основе трехфазного трансформатора;
- приборы для измерения величин напряжения, тока и фазовых сдвигов (прибор ВАФ-85М и другие)

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

1. Проверка параметров трансформатора тока

В лабораторной работе используются ТА, выполненные на основе магнитопроводов со вторичной обмоткой от низковольтных трансформаторов

тока. Число витков первичной обмотки ТА были изменены исходя из возможностей лабораторного стенда и решаемых в лабораторной работе задач.

В лабораторной работе трансформатор тока исследуется по следующей программе: проверка правильности разметки зажимов обмоток; коэффициента трансформации, снятии кривой намагничивания (вольт-амперной характеристики) трансформатора тока, исследование ТА при различной нагрузке на вторичной обмотке трансформатора.

Для выполнения ряда исследований предлагается с нестандартным коэффициентом трансформации модель трансформатор тока, выполненного на основе магнитной системы низковольтного трансформатора типа ТО-0,66. У модели трансформатора имеется возможность менять число витков первичной обмотки w_1 , кроме того, помимо вторичной w_2 , в трансформаторе предусмотрена третья обмотка $w_{кз}$, с помощью которой имитируется возможность возникновения короткозамкнутых витков во вторичной обмотке ТА из-за ее повреждения в условиях эксплуатации или при изготовлении ТА.

2. Проверка правильности разметки зажимов обмоток трансформаторов тока

Существует несколько способов проверки полярности зажимов трансформаторов тока. В работе используются наиболее часто применяемый на практике *«способ постоянного тока»*.

Для проверки по этому способу собирают схему, представленную на рис. 2.5а. Первичную обмотку испытуемого трансформатора подключают к источнику постоянного тока так, чтобы на зажим Л1 был подан *«плюс»* от источника постоянного тока, а на зажим Л2 – *«минус»*. Величину сопротивления реостата подбирают такой, чтобы ток был порядка 5 – 10 А. (отметим, что в лабораторной работе достаточно установить ток в пределах 1 А). При любом способе проверки разметку зажимов первичной обмотки

можно считать правильной, а если она отсутствует, то любой зажим можно принять за начальный, обозначить $Л1$ и подать на него «плюс» от источника постоянного тока.

К зажимам вторичной обмотки подключают магнитоэлектрический прибор (амперметр или вольтметр) желательно иметь с нулем на середине шкалы. В лабораторной работе для этого используется гальванометр магнитоэлектрической системы. Если в момент замыкания рубильника ($di/dt > 0$) стрелка прибора отклонится в сторону положительных показаний, то зажим первичной обмотки, подключенный к «плюсу» источника, и зажим вторичной обмотки, подключенный к положительному зажиму прибора, являются однополярными.

Используя описанный способ, выполните проверку разметки зажимов испытуемого ТА. Сделайте заключение.

Отметим, что разметку зажимов можно выполнить с использованием прибора ВАФ-85М.

3. Проверка коэффициента трансформации трансформатора тока

Число витков первичной обмотки w_1 установите согласно рекомендации преподавателя. Соберите схему, приведенную на рис. 2.6. В качестве источника первичного тока используется регулируемый источник тока, созданный на основе силового трехфазного трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания, т.е. его вторичная обмотка закорочена через первичную обмотку ТА, а первичная обмотка силового трансформатора запитана от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР). Это позволяет регулировать напряжение на первичной обмотке силового трансформатора и, следовательно, регулировать ток в первичной обмотке ТА.

К вторичной обмотке проверяемого ТА подключается образцовый амперметр. Ток в первичной обмотке контролируется образцовым ТА с включенным на его зажимы образцовым амперметром.

Перед подачей напряжения на схему *убедитесь*, что на первичную обмотку силового трансформатора ***подано нулевое напряжения***.

После включения схемы под напряжение ЛАТРоМ установите во вторичной обмотке проверяемого ТА ток в 5 А. Используя показания образцового ТА, выполните измерение тока, протекающего через первичную обмотку ТА.

На основе экспериментальных данных определите коэффициент трансформации испытуемого ТА.

а. Снятие кривых намагничивания

Снятие кривых намагничивания при отсутствии короткозамкнутых витков.

Кривая намагничивания трансформатора $U_2 = f(I_{\text{нам}})$ (рис. 2.7а) представляет собой зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока намагничивания, проходящего по ней при разомкнутой первичной обмотке.

Кривая намагничивания позволяет:

- судить об исправности трансформаторов тока, в частности, может быть выявлено витковое замыкание, при наличии которого кривая располагается ниже типовой и имеет неправильную форму;
- решить вопрос о возможности совместного использования трансформаторов тока в схемах дифференциальной защиты, так как при почти совпадающих характеристиках токи небаланса будут малы, и наоборот;
- определить с достаточной для практики точностью погрешность трансформаторов тока.

Схема для снятия характеристики намагничивания приведена на рис. 2.7б. Регулируемый источник тока реализуется на основе лабораторного автотрансформатора ЛАТР маломощного трансформатора Тр и низкоомного

реостата $R_{\text{доб}}$. Наличие сопротивления $R_{\text{доб}}$ позволяет через вторичную обмотку модели ТА пропускать ток, близкий к синусоидальному, несмотря на то, что ТА ведет себя как нелинейный элемент из-за особенностей зависимости $B(H)$ материала сердечника. Изменяя ЛАТРом напряжение, измеряют ток во вторичной обмотке ТА. Этот ток для ТА является током намагничивания. Для построения зависимости $U_2(I_{\text{нам}})$ следует снять 8 – 10 точек, наиболее частых в начале этой характеристики (рис. 2.7а). Желательно снимать характеристику до насыщения, т. е. до таких значений, при которых дальнейшее увеличение тока намагничивания практически не приводит к увеличению напряжения, измеряемого вольтметром V . Приборы должны быть электромагнитной или электродинамической системы, реагирующими на действующее значение измеряемых величин. Перед снятием кривой намагничивания и после нее производят размагничивание сердечника путем двух – трех плавных подъемов и снижений тока в обмотке w_2 до нуля.

Примечание. При наличии осциллографа целесообразно проследить за изменением формы тока во вторичной цепи путем его подсоединения к $R_{\text{доб}}$ и формы напряжения, генерируемого обмотками ТА. Для этого осциллограф следует подключить к зажимам L_1 и L_2 модели трансформатора ТА.

Результаты измерений заносят в табл. 1.

Таблица 1 – Данные измерений к опыту холостого хода

$I_{\text{нам}}, \text{А}$								
$U_2, \text{В}$								

Снятие кривой намагничивания при наличии короткозамкнутых витков.

По указанию преподавателя установите необходимое для эксперимента количество короткозамкнутых витков $w_{кз}$.

Для тех же значений вторичных токов, что и в эксперименте по п. 1.3.1, снимите необходимые данные для построения зависимости $U_2 = f(I_{\text{нам}})$. Результаты измерений занесите в таблицу, аналогичную по структуре табл. 1.

По данным таблиц на одном графике постройте кривые $U_2 = f(I_{\text{нам}})$ для обоих случаев и сделайте необходимые выводы.

Снятие зависимости вторичного тока ТА от первичного при различной вторичной активной нагрузке.

Выше отмечалось, что с увеличением сопротивления нагрузки Z_n ТА его погрешность возрастает, но при условии использования ТА для питания токовых цепей защиты она не должна превышать 10%-ой погрешности. Для этого снимается при указанных выше условиях кривые 10%-ой погрешности.

Так как лабораторный стенд не позволяет обеспечить в полной мере условия снятия этой зависимости, то влияние нагрузки на ТА оценивается не при активно-индуктивной нагрузке при $\cos \varphi = 0,8$, а при чисто активной.

Используя схему эксперимента, приведенную на рис. 2.8б, для заданного преподавателем тока $I_{1\text{расч}}$ путем изменения нагрузки R_n получите данные для построения зависимости $I_2(I_1)$. Для расчетного значения $I_{1\text{расч}}$ определить 10%-ую погрешность (рис. 2.8а). Конкретные условия выполнения эксперимента задаются преподавателем.

Таблицу для записи экспериментальных данных составить самостоятельно.

Исследование схем соединения трансформаторов тока (рис. 2. 9).

Примечание 1. Выполняемые эксперименты задаются преподавателем, но порядок выполнения необходимо знать для всех экспериментов!

Цель данных экспериментов заключается в ознакомлении со схемами соединения вторичных обмоток трансформаторов тока, используемых в устройствах релейной защиты и автоматики, а также определение поведения этих схем при различных видах КЗ.

При выполнении защиты элементов электрических систем могут быть использованы различные схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и токовых обмоток реле. Например, схемы полной и неполной звезды; включение реле на разность токов двух фаз; соединение обмоток трансформаторов тока в треугольник и обмоток реле в звезду; включение обмотки реле на сумму токов трех фаз (на фильтр токов нулевой последовательности). Возможны также комбинированные схемы или включение измерительного органа ИО на фильтр токов прямой и обратной последовательностей и пр. Выбор схемы определяется ее назначением (от каких видов КЗ предусмотрена защита), требованием чувствительности, необходимостью экономить количество реле и трансформаторов тока. При определении параметров защиты (например, тока срабатывания и чувствительности) необходимо учитывать коэффициент схемы

$$k_{cx} = \frac{I_p^{(вид-режима)}}{I_2}, \quad (2.5)$$

где I_p – ток, проходящий по обмотке реле в рассматриваемом режиме (при нормальном режиме и при том или ином виде КЗ); I_2 – вторичный ток трансформатора тока в том же режиме, $I_2 = I_1 / K_{Iном}$; I_1 – первичный ток; $K_{Iном}$ – номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

В таблице 2 приведены значения коэффициента относительной чувствительности $k_{\div, I}$ различных схем соединения трансформаторов тока и измерительных органов при искусственном условии равенства первичных токов в месте КЗ при их различных видах $I^{(3)} = I^{(2)} = I^{(1)}$. Коэффициент $k_{\div, I}$ определяется схемой соединения ТА.

При n -м виде КЗ этот коэффициент равен

$$k_{\dot{I}} = \frac{k_{\dot{I}}^{(n)}}{k_{\dot{I}}^{(3)}} = \frac{I_p^{(n)}}{I_{c.p}} \cdot \frac{I_p^{(3)}}{I_{c.p}} = \frac{I_p^{(n)}}{I_p^{(3)}}, \quad (2.6)$$

где $I_p^{(n)}$, $I_p^{(3)}$ – токи в ИО при $K^{(n)}$ и $K^{(3)}$ и условии равенства $I^{(n)} = I^{(3)}$.

Таблица 2 – Характеристики относительной чувствительности схем соединения трансформаторов тока

Наименование схемы	$K_{C\chi}^{(3)}$	$k_{ч.о}$ при КЗ в сети, где установлена защита							$k_{ч.о}$ при КЗ за трансформатором $Y/\Delta-11$ (на стороне Y)						
		$K^{(3)}$	$K_{AB}^{(2)}$	$K_{BC}^{(2)}$	$K_{CA}^{(2)}$	$K_A^{(1)}$	$K_B^{(1)}$	$K_C^{(1)}$	$K^{(3)}$	$K_{AB}^{(2)}$	$K_{BC}^{(2)}$	$K_{CA}^{(2)}$	$K_A^{(1)}$	$K_B^{(1)}$	$K_C^{(1)}$
Полная звезда (трехлинейная)	1	1	1			1			1	$2/\sqrt{3}$			$1/\sqrt{3}$		
Полный треуголь- ник (трехлинейная)	$\sqrt{3}$	1	$2/\sqrt{3}$			$1/\sqrt{3}$			1	1			$2/\sqrt{3}$		
Полный треуголь- ник (двухрелейная)	$\sqrt{3}$	1	$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$			1	1			$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	
Неполная звезда (двухрелейная)	1	1	1			1	0	1	1	$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$		
Неполная звезда (трехлинейная)	1	1	1			1	0	1	1	$2/\sqrt{3}$			$1/\sqrt{3}$		
Неполный тре- угольник	$\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$		$1/\sqrt{3}$	0	$1/\sqrt{3}$	1	1	0	1	$2/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	

Относительный коэффициент чувствительности при n -м виде КЗ равен отношению тока $I_p^{(n)}$ в измерительном органе к току в нем при $K(3)$, т. е. току $I_p^{(3)}$, если первичные токи в месте КЗ при разных видах КЗ считаются одинаковыми. Нули в некоторых позициях таблицы 1 говорят о том, что применять данные схемы соединения ТА и ИО для защиты некоторых объектов системы электроснабжения недопустимо.

Для выполнения экспериментов на лабораторном стенде используется группа из шести ТА (рис. 2.9а, б), причем вторичные обмотки трансформаторов 1ТА, 2ТА и 3ТА соединяются в треугольник (рис. 2.9а), а вторичные обмотки трансформаторов 4ТА, 5ТА и 6ТА могут соединяться в схему полной звезды (рис. 2.9б), неполной звезды (рис. 2.9в), на разность

токов двух фаз (рис. 2.9з), на сумму токов трех фаз – фильтр тока нулевой последовательности (рис. 2.9д).

Схема подсоединяется к регулируемому источнику тока, а различные виды КЗ имитируются замыканием или размыканием ключей S1, S2, S3 и S4.

Перед началом экспериментов необходимо убедиться, что от ЛАТР трехфазного источника тока на первичную обмотку его трехфазного трансформатора будет подано нулевое напряжение.

В общем случае в экспериментальной схеме по току можно выставить такой режим, когда необходимые измерения во всех ветвях схемы можно выполнить с помощью прибора ВАФ-85М.

Примечание 2. Если ток в первичной цепи ТА больше 10 А, то для измерения этого тока имеется возможность выполнить измерения с помощью амперметра, включенного ко вторичной обмотке лабораторный ТА, первичная обмотка которого включается через специальный переключатель на первичный ток той фазы, в которой необходимо выполнить измерение.

С помощью этого же прибора выполняется измерение фаз токов, протекающих во вторичных цепях ТА.

Напоминаем, что ВАФ-85М измеряет фазовый сдвиг тока относительно вектора базового напряжения $\underline{U}_{AB}$. Поэтому, чтобы определить направление мощности в трехфазной схеме необходимо построить векторную диаграмму, связывающую взаимное положение соответствующих векторов фазных напряжения и тока.

Для заданных преподавателем схем соединения ТА и вариантах КЗ выполнить измерения токов в первичной и во вторичной цепях ТА с одновременным измерением фаз токов.

Устанавливаемую величину тока в первичных обмотках ТА задает преподаватель.

Примечание 3. Если ТА не используется в эксперименте, то его вторичная обмотка должна быть **закорочена!**

Обработка экспериментальных данных

1. На основе данных эксперимента п. 3 определить коэффициент трансформации используемого в данном эксперименте трансформатора тока.

2. На основе данных эксперимента п.п. 4 построить кривых намагничивания как при отсутствии короткозамкнутых витков, так и при его наличии.

3. На основе данных п. 4 привести соответствующие зависимости и сделать заключение о влиянии нагрузки на погрешность ТА.

4. На основе экспериментальных данных п. 4 построить в масштабе вектора токов, проходящих в первичных обмотках ТА, в их вторичных обмотках, а также в цепях подключения токовых обмоток реле.

Для всех схем определить значения коэффициента схемы $k_{сх}$

На основе полученных результатов сделать заключение об изменении чувствительности схем в зависимости от вида КЗ.

Сделать выводы о целесообразности использования рассмотренных схем в комплектах защит от междуфазных КЗ и от замыканий на землю.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Используемые в экспериментах схемы.
3. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
5. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Назначение трансформатора тока и какими параметрами он характеризуется? Что означает буква «Р», присутствующая в обозначении ТА?
2. Зачем и как можно проверить маркировку зажимов трансформатора тока?
3. Приведите схему замещения трансформатора тока, какой параметр этой схемы и как влияет на его погрешность?
4. Объясните влияние короткозамкнутого витка во вторичной обмотке трансформатора тока и в чем это проявляется?
5. Что понимается под 10%-ой погрешностью трансформатора тока? Поясните назначение кривых 10%-ой погрешности.
6. Каково назначение нейтрального провода в схеме полной звезды?
7. Что понимается под коэффициентом схемы и зависит ли он от вида короткого замыкания?
8. Какая(ие) схема(ы) на рис. 2.9 образуют фильтр тока нулевой последовательности и почему? В каких защитах используется этот фильтр и для каких целей?
9. Что такое коэффициент схемы и почему его нужно учитывать при определении тока срабатывания реле?
10. Какие схемы соединения трансформаторов тока находят применение в сетях с изолированной нейтралью. Чему равны их коэффициенты схемы при различных КЗ?
11. К чему приведет изменение полярности вторичной обмотки одного трансформатора тока в схеме на рис. 2.9г?
12. Как должны быть соединены контакты трех реле тока в схемах на рис. 2.9а-г при выполнении максимальной токовой защиты от всех видов КЗ?
13. Какие схемы соединения обмоток трансформаторов тока используются в защитах от многофазных КЗ?

14. Какие схемы соединения ТА используются для защиты трехфазных силовых трансформаторов и почему?

15. Какая схема соединения ТА преимущественно используется для защиты асинхронных двигателей и чему равен коэффициент $k_{сх}$ этой схемы для разных видов КЗ?

16. Какие схемы и почему для целей защиты нельзя использовать?

17. В экспериментах в схеме рис. 2.9б был определен ток I_n . Чему равен ток нулевой последовательности в токе I_N и как он связан с током I_n ?

18. Чем вызвано содержание примечания 3 в п. 4?

19. Объясните смысл содержания таблицы 1. Что означает наличие в его некоторых позициях значений, равных нулю?

20. Если считать, что вместо амперметров в схеме на рис. 2.9г подразумевать обмотки измерительных токовых реле, то как будет меняться относительный коэффициент чувствительности схемы при разных видах КЗ в сети с заземленной нейтралью?

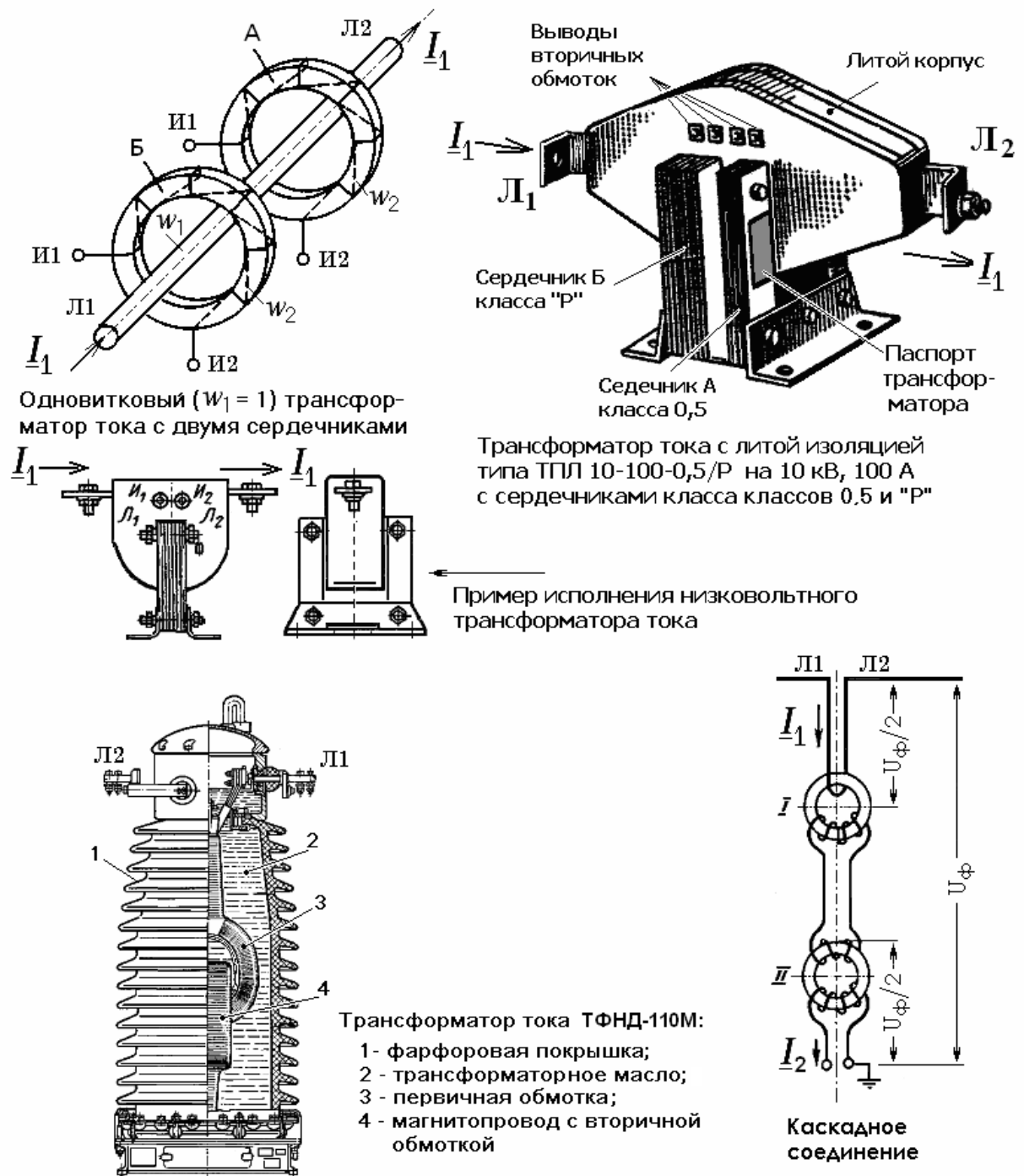


Рисунок 2.1 – Трансформатор тока и некоторые конструктивные особенности

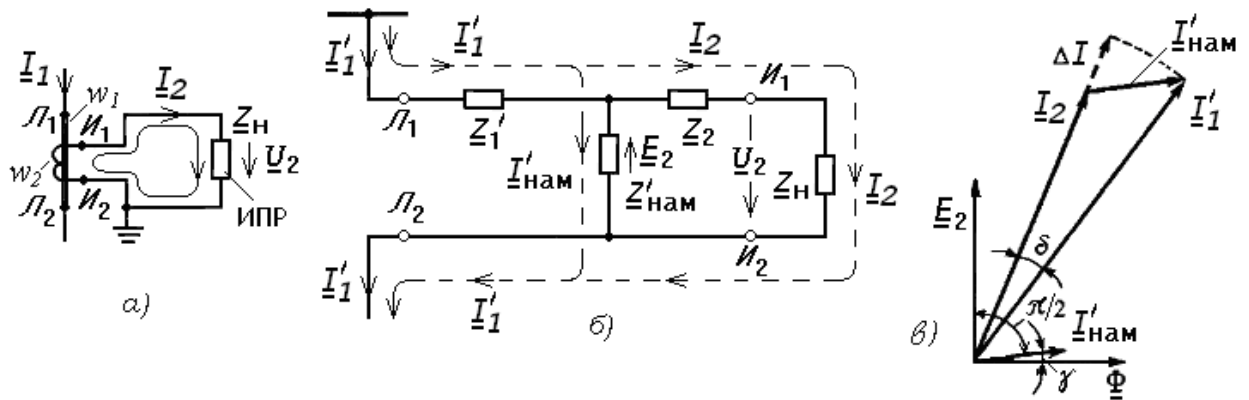


Рисунок 2.2 – Трансформатор тока: *а* – условное обозначение; *б* – схема замещения; *в* – векторная диаграмма

Примечание. На рис. 2.2. *ИПР* – это измерительные приборы и реле (их последовательно соединенные токовые цепи). В дальнейшем они условно заменяются обобщенной нагрузкой Z_H , равной отношению комплексных значений напряжения и тока $\underline{U}_2 / \underline{I}_2$.

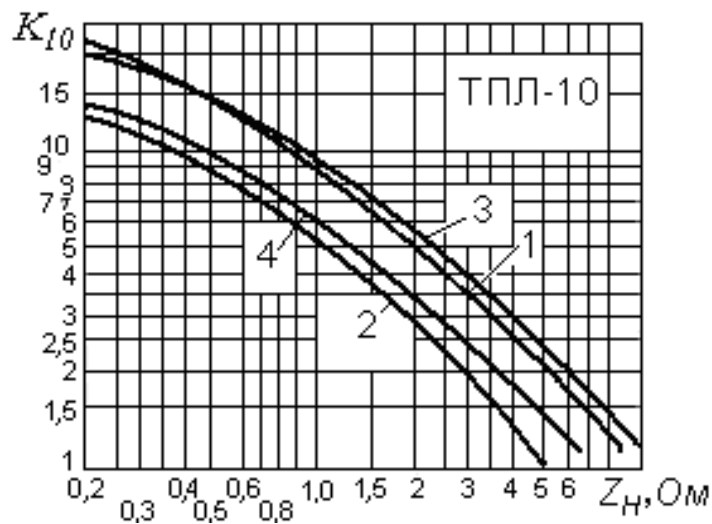


Рисунок 2.3 – Кривые предельной кратности тока трансформатора ТПЛ-10:

- 1 – для $k_{Iном}=5/5 - 300/5$ класса Р и 2 – для класса 0,5;
- 3 – для $k_{Iном}=400/5 - 300/5$ класса Р и 4 – для класса 0,5

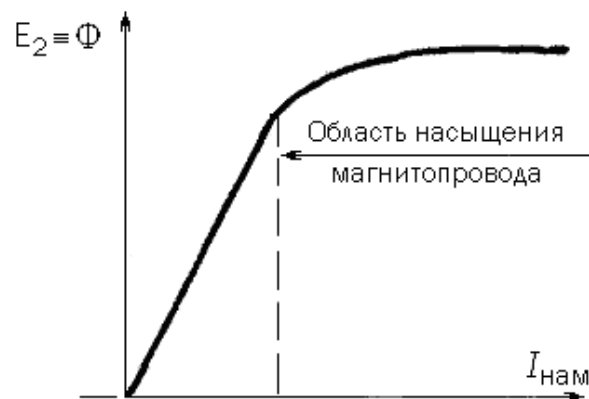


Рисунок 2.4 – Характер зависимости, получаемой из опыта холостого хода ТА

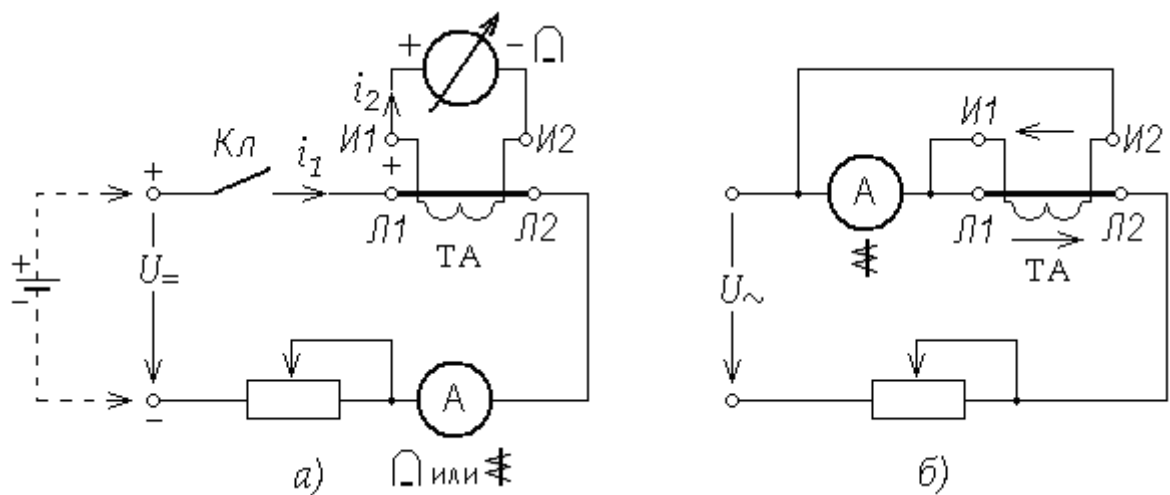


Рисунок 2.5 – Варианты схем проверок однополярных выводов ТА

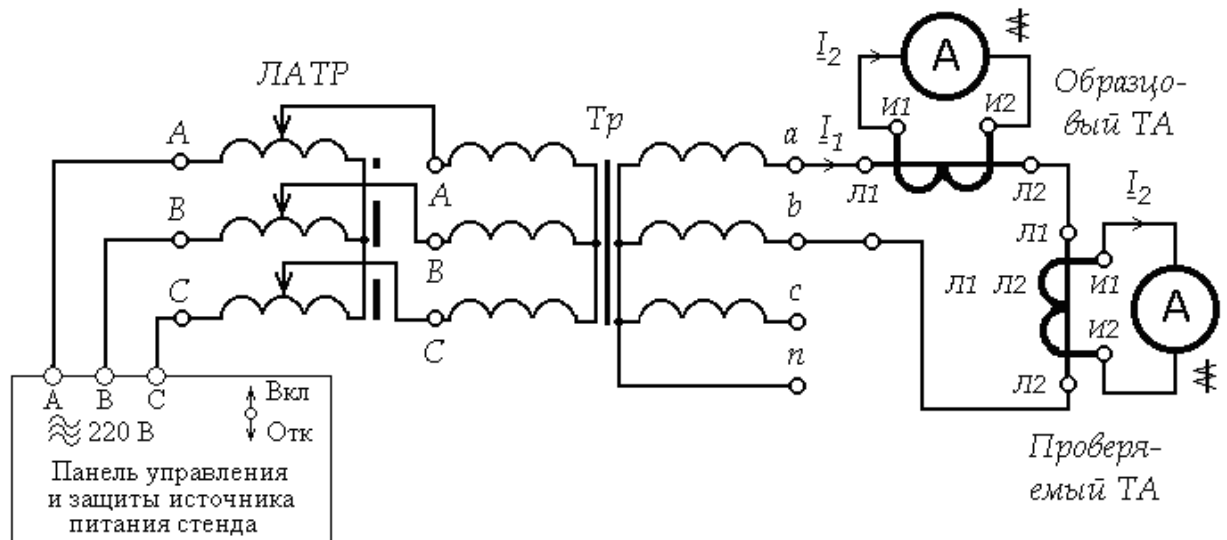


Рисунок 2.6 – Схема определения коэффициента трансформации ТА

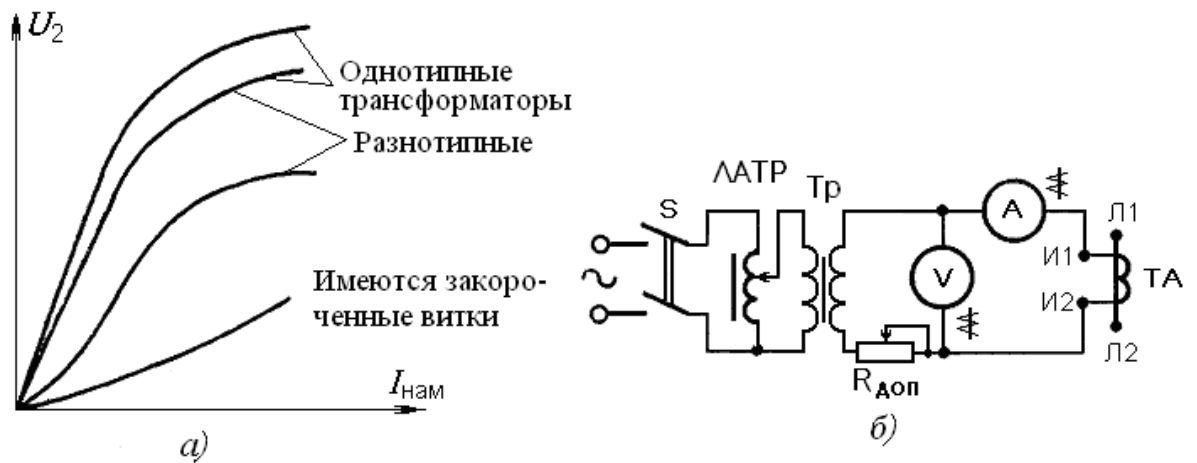


Рисунок 2.7 – Снятие вольт-амперной характеристики трансформатора тока:
 а – вольт-амперная характеристика при разных условиях;
 б – схема испытания

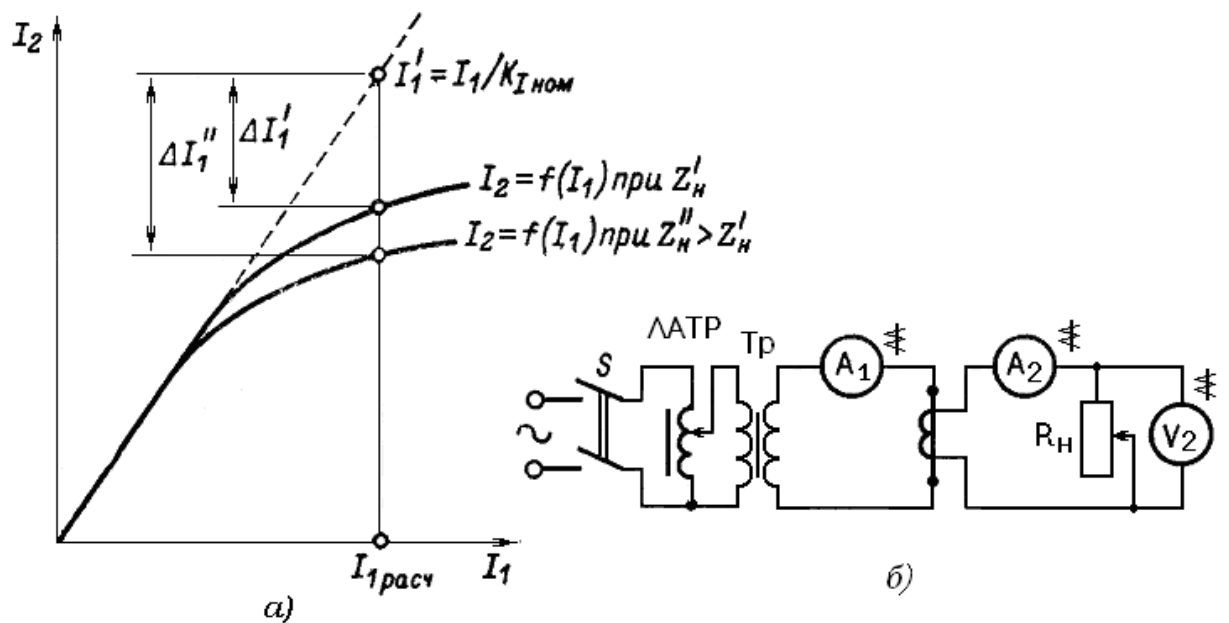


Рисунок 2.8 – Зависимость вторичного тока ТА от первичного при различных нагрузках Z_H (а); схема эксперимента (б)

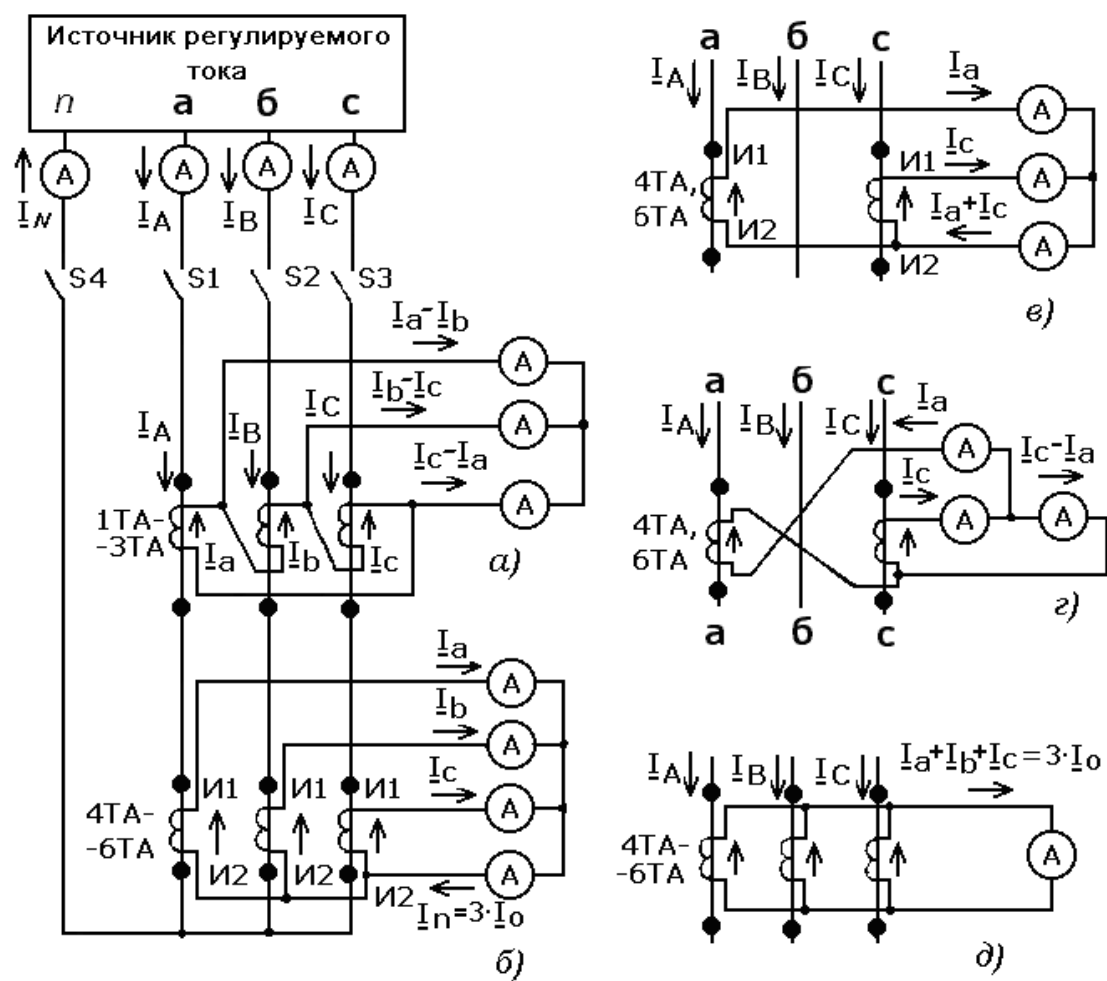


Рисунок 2.9 – К исследованию схем соединения трансформаторов тока

Лабораторная работа 3

Токовая защита на постоянном оперативном токе

Цель работы: Изучить принципы построения схем токовых защит на постоянном оперативном токе, измерительные органы тока и реле, формирующие замедление срабатывания защит. Освоить методику проверки и настройки уставок этих реле. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить принципы построения токовой защиты на постоянном оперативном токе.
2. На образцах реле изучить их конструкцию и экспериментально освоить методику проверки и настройки реле тока и времени на заданные параметры.
3. Собрать схему токовой защиты на постоянном оперативном токе и проверить ее функционирование совместно с имитатором высоковольтного выключателя.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики

электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

Токовые защиты

Общие замечания

При аппаратной технической реализации устройств релейной защиты (УРЗ) измерительная часть содержит отдельные конструктивно оформленные измерительные органы (ИО): измерительные реле тока ИОТ, напряжения ИОН, направления тока (мощности) ИОНМ, полного сопротивления ИОПС и направленное реле сопротивления НИОС

Развитие интегральной электроники обусловило разработку и промышленный выпуск статических измерительных реле на аналоговых (интегральных операционных усилителях) и дискретных (компараторах, триггерах, логических элементах) микросхемах. Нашли применение реле, сочетающие в себе элементы электроники и электромеханического реле в качестве выходного органа, т. е. на основе полупроводниковой электроники совершенствовались измерительные реле и реле, используемые в логической части релейной защиты. Как отмеченные реле, так и реле на чисто электромеханическом принципе находятся в эксплуатации и безотказно служат, удовлетворяя требованиям высокой надежности функционирования.

В настоящее время в энергетике все большее распространение находят применение микропроцессорные защиты, в которых функции измерительных органов реализованы программно.

В качестве оперативного тока для питания цепей релейной защиты, управления и автоматики используется оперативный постоянный ток или оперативный переменный ток. На постоянном оперативном токе для питания логической части защиты и некоторых типов измерительных органов используются соответствующие реле, рассчитанные на работу на постоянном токе. При переменном оперативном токе используются соответствующие типы реле.

В качестве источника постоянного оперативного тока, как правило, используется аккумуляторная батарея напряжением 220 В или 110 В, с помощью которой формируются следующие цепи питания (рис. 3.1в, г): $\pm$ ЕС (или $\pm$ ШУ) – шинки управления; $\pm$ ЕН (или $\pm$ ШС) – шинки сигнализации; $\pm$ ЕУ (или $\pm$ ШВ) – шинки цепей управления выключателем (цепи не показаны).

На оперативном постоянном токе токовая защита чаще всего выполняется с независимой от величины тока КЗ выдержкой времени срабатывания.

Принципы выполнения токовых защит

Токовая защита – наиболее распространенный тип релейной защиты. Она устанавливается практически на всех элементах электрических станций и подстанций: на генераторах, трансформаторах, электродвигателях, воздушных и кабельных линиях всех классов напряжения.

Функциональная схема типовой трехступенчатой токовой защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени срабатывания приведена рис. 3.1а, на которой: КА – вторичные токовые измерительные органы (ИТО); КТ – органы создания выдержки времени; КЛ – промежуточное реле; КН – указательное реле. Первая ступень защиты (измерительный токовый орган $КА^I$) – токовая отсечка ($ТО^I$), срабатывающая без выдержки времени, т. е. $t_{mo} = t_{c.p}^I = 0$. Практически для отстройки от работы трубчатых

разрядников, создающих кратковременное КЗ, для этой ступени вводится некоторое замедление $t_{c.p}^I \leq 0,1$ с.

Вторая ступень (измерительный токовый орган $КА^{II}$) – токовая отсечка ($ТО^{II}$), срабатывающая с выдержкой времени $t_{c.p}^{II}$, которая создается реле времени $КТ^{II}$. И третья ступень (измерительный орган $КА^{III}$) – максимальная токовая защита ($МТЗ^{III}$), срабатывающая с выдержкой времени $t_{c.p}^{III}$, которая создается реле времени $КТ^{III}$, при этом $t_{c.p}^{II} < t_{c.p}^{III}$.

Структура токовой защиты (количество и состав ступеней) определяется решаемой защитой задачей. На рис. 3.1б в качестве примера приведены токовые цепи двухступенчатой токовой защиты, например, радиальной линии 6 – 35 кВ, состоящей из $ТО^I$ и $МТЗ^{III}$.

По своему назначению и принципу действия $МТЗ$ должна давать команду на отключение защищаемого элемента при появлении аварийных сверхтоков короткого замыкания или опасных сверхтоков перегрузки, значения которых превышают ток срабатывания защиты $I_{c.з}$. Этот ток, например, линии должен быть отстроен от максимально возможного тока $I_{\dot{e}.max}$. Значение тока срабатывания защиты (уставки $I_y = I_{c.з}$) выбирается таким образом, чтобы она не срабатывала на отключение при допускаемых кратковременных технологических перегрузках ($I_{л.max}$), например, при пуске одного или нескольких асинхронных электродвигателей, или при внезапном отключении одного из параллельно работающих понижающих трансформаторов. Ток срабатывания защиты задается уставкой срабатывания I_y , устанавливаемой в ИОТ ($КА^{III}$ на рис. 3.1а, б).

В отдельных случаях в состав трехступенчатой токовой защиты может быть введена четвертая ступень ($МТЗ^{IV}$), в задачу которой входит отслеживать возникающую перегрузку по току, например, кабельной линии. Эта защита называется защитой от перегрузки и действует или на сигнал оповещения обслуживающего персонала о возникшей перегрузки

контролируемого элемента, или на его разгрузку путем отключения части потребителей, или даже на его отключение от источника питания. Время действия защиты от перегрузки может быть значительно больше, чем время действия МТЗ^{III}, т. е. $t_{с.р}^{IV} \gg t_{с.р}^{III}$.

Таким образом, у максимальной токовой защиты и токовой защиты от перегрузки один и тот же принцип действия, но назначение различное. На рис. 3.1а функция МТЗ^{IV} не показана.

Наряду с надежным несрабатыванием максимальной токовой защиты при технологических перегрузках необходимо обеспечить ее высокую чувствительность и надежность срабатывания при всех видах короткого замыкания (КЗ). Это обеспечивается правильным выбором типов максимальных реле тока, их количества, схемы их включения, а также правильным выбором параметров срабатывания защиты (уставок по току для КА и по времени для КТ).

Принцип действия. Максимальная токовая защита (МТЗ) и токовая отсечка (ТО) запускаются при возникновении на защищаемом элементе сверхтока, значение которого превышает заранее установленный ток срабатывания (уставку) измерительных органов защиты – максимальных реле тока. При этом токовая отсечка дает команду на отключение защищаемого элемента, как правило, м г н о в е н н о, поскольку зона ее действия не выходит за пределы этого элемента. Например, за пределы длины $l_{отс}$ на рис. 3.2а. Максимальная токовая защита должна действовать на отключение с некоторой задержкой (в ы д е р ж к о й в р е м е н и) для того, чтобы дать возможность сработать раньше другим аналогичным защитам, расположенным ближе к месту повреждения. Например, при КЗ на линии W2 запускаются как токовая защита дальнего резервирования комплекта АКЗ линии W3, так и комплект защиты АК2 линии W2, но уставка по времени МТЗ^{III} комплекта АКЗ должна дать возможность сработать защите АК2 и выдать сигнал на отключения выключателя Q2, и при не отключении этого

выключателя повреждение на линии W2 должно быть отключено защитой МТЗ^{III} комплекта АКЗ.

Понятие о выборе параметров токовых защит

При выборе наиболее рациональной схемы и уставок максимальной токовой защиты необходимо учитывать несколько факторов:

- вид защищаемого элемента (генератор, электродвигатель, линия электропередачи, трансформатор) и его характеристики, например, схему соединения обмоток защищаемого трансформатора, значение пускового тока электродвигателя и др.;
- класс напряжения и схему электрической сети, к которой подключен защищаемый элемент;
- типы и характеристики защитных устройств на питающих и, при необходимости, на питаемых элементах прилегающей электрической сети;
- вид оперативного тока, принятого для подстанций, где устанавливается защита (на электростанциях, как правило, используется только постоянный оперативный ток).

Далее рассматривается работа двухступенчатой токовой защиты (рис. 3.2a), где зона действия $\ell_{отс}$ токовой отсечки ТО^I, установленной на линии W3, не выходит за пределы защищаемой линии, иначе говоря, на все КЗ вне этой зоны токовая отсечка линии W3 не реагирует. При КЗ в зоне ее действия (в пределах участка линии $\ell_{отс}$) отсечка срабатывает без выдержки времени.

Ток срабатывания токовой отсечки $I_{с.р}^I$ выбирается таким образом, чтобы отсечка не чувствовала КЗ за пределами защищаемого элемента, например на линии W2 (рис. 3.2a), т. е. при КЗ на предыдущих элементах: на линии W2 или в трансформаторе Т_Б подстанции Б, отсечка линии W3 не должна срабатывать. Для этого ее ток срабатывания $I_{с.р}^I$ должен быть больше, чем максимальное значение тока КЗ в конце защищаемой линии W3 (при КЗ на шинах Б). Как правило, токовая отсечка не может защищать всю

линию или трансформатор Т_Б, и поэтому является вспомогательной защитой, дополняющей основную – максимальную токовую (или дистанционную защиту линии), но удовлетворяющая требованиям по быстродействию.

Первичный $I_{с.р}^I$ и вторичный I_{ϕ}^I токи срабатывания ТО^I радиальной линии определяются из выражений:

$$\begin{aligned} I_{с.р}^I &= k_{омс}^I \cdot k_{сх}^{(3)} \cdot I_{к.вн.маx}^{(3)} ; & а) \\ I_{\phi}^I &= I_{с.р}^I / n_I , & б) \end{aligned} \quad (3.1)$$

где:

$k_{омс}^I$ коэффициент отстройки защиты с электромагнитным реле РТ-40.

При наличии выходного промежуточного реле КЛ принимается равным $k_{омс}^I = 1,2 \dots 1,3$;

$k_{сх}^{(3)}$ – коэффициент схемы, показывающий, во сколько раз ток в обмотке реле больше, чем ток во вторичной обмотке трансформатора тока при нормальном *симметричном* режиме работы защищаемого элемента; значение $k_{сх}^{(3)}$ зависит от схемы соединения трансформаторов тока и реле. Например, для приведенной на рис. 3.1б схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока ТА и обмоток реле КА коэффициент схемы равен $k_{сх}^{(3)} = 1$;

n_I — коэффициент трансформации трансформаторов тока ТА.

$I_{к.вн.маx}^{(3)}$ – максимальный ток трехфазного КЗ ($K^{(3)}$) на шинах Б (за выключателем Q2) в условиях максимальной работы системы ($S_{с.маx}$).

Максимальная токовая защита МТЗ^{III} на линии W3 может и, как правило, должна запускаться также и при КЗ на предыдущих элементах, т. е. на линии W2 и в отдельных случаях даже на W1. Это необходимо для того, чтобы при КЗ, например, на линии W2 и при отказе в отключении линейного выключателя Q2 смогла бы действовать защита последующей линии W3 и отключить выключатель Q3. Однако при коротком замыкании в точке КЗ и при своевременном отключении выключателя Q2 не должно происходить

отключения линии W3. Для этого выдержка времени t_3 МТЗ^{III} последующей линии W3 должна быть больше выдержки времени t_2 МТЗ^{III} предыдущей линии W2.

Первичный ток срабатывания максимальной токовой защиты МТЗ^{III} определяется по формуле

$$I_{с.р}^{III} \geq k_{отс}^{III} \cdot k_{сзн} \cdot I_{л.раб.макс} / k_{в}, \quad (3.2)$$

где $k_{в} = 0,8$ – коэффициент возврата электромеханического реле типа РТ-40; $k_{отс}^{III} = 1,2–1,3$; $k_{сзн}$ – коэффициент самозапуска нагрузки, может принимать значения от 1,1 до 4.

Для защиты, выполненной с вторичными реле тока (ИОТ), необходимо определить ток срабатывания самого реле (выставляемую на нем уставку по току) по выражению

$$I_y^{III} = I_{с.р}^{III} = \frac{k_{сх}^3 \cdot I_{с.р}^{III}}{n_I}, \quad (3.3)$$

где $I_{с.р}^{III}$ – первичный ток срабатывания МТЗ^{III}, А, определяемый по (3.1).

Способность защиты АКЗ реагировать на удаленные КЗ на *предыдущей* линии W2 называется *д а л ь н и м р е з е р в и р о в а н и е м*.

Соотношение времен срабатывания согласуемых между собой МТЗ, а именно $t_{3\text{посл}} > t_{2\text{пред}}$, является одним из важнейших для обеспечения с е л е к т и в н о й (избирательной) работы релейной защиты.

Для создания выдержки времени в схемах защит используются специальные реле времени.

Селективность действия защит обеспечивается ступенчатым выбором времени работы согласуемых между собой защит с использованием ступени селективности по времени Δt и графически отображается картой селективности (рис. 3.2б), т. е. $t_3 = t_2 + \Delta t$. Для защит на постоянном оперативном токе ступень может быть принята равной $\Delta t = 0,5$ с.

Таким образом, совместное применение максимальной токовой защиты и токовой отсечки, иначе говоря – двухступенчатой токовой защиты, наилучшим образом обеспечивает выполнение основных требований, предъявляемых к релейной защите:

- селективность, или избирательность, т. е. способность отключения в первую очередь ближайшего к месту повреждения выключателя;
- чувствительность ко всем видам повреждения в основной защищаемой зоне и в зонах дальнего резервирования (последнее, к сожалению, не всегда технически возможно, что и оговорено в правилах устройств электроустановок);
- быстродействие, т. е. обеспечение минимально возможного времени отключения сверхтоков КЗ;
- надежность функционирования устройств, т. е. надежность срабатывания на отключение при аварийных условиях и надежность несрабатывания при технологических перегрузках защищаемого элемента.

Максимальные токовые защиты с независимыми от величины тока временными характеристиками срабатывания устанавливаются на понижающих трансформаторах напряжением 35 кВ и выше, на генераторах, на линиях электропередачи разных классов напряжения, на электродвигателях и других элементах. Ток срабатывания максимальной токовой защиты выбрать значительно сложнее, поскольку необходимо знать наибольшее значение рабочего тока защищаемого элемента (например, $I_{\text{л}}$ линии), количество и параметры электродвигателей, участвующих в самозапуске после кратковременного перерыва питания, возможности параллельной работы питающих (последующих) и питаемых (предыдущих) элементов и другие условия.

Эффективность защиты оценивается с помощью коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$, который показывает, насколько ток в реле защиты при соответствующем виде КЗ превышает ток срабатывания $I_{\text{с.р}}$ (уставку):

$$k_{\div} = I_{p.\min} / I_{c.p}, \quad (3.4)$$

где $I_{p.\min}$ – минимальное значение тока в реле при наименее благоприятных условиях, А. При определении значения этого тока необходимо учитывать вид и место КЗ, схему включения измерительных органов (реле) защиты (учитывается соответствующим минимальным коэффициентом схемы $k_{cx.\min}^{(вудКЗ)}$, а так же реально возможные минимальные режимы работы питающей энергосистемы ($S_{c.\min}$), при которых токи КЗ имеют наименьшие значения. Например, в сетях с изолированной нейтралью этому току соответствует ток двухфазного КЗ в конце защищаемой зоны при минимальном режиме работы системы, т. е. $I_{\min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\min}^{(3)}$, коэффициент схемы для схемы на рис. 3.1б равен $k_{cx.\min}^{(2)} = 1$.

Минимальные значения коэффициента чувствительности защит должны быть не менее, чем требуется правилами устройства электроустановок: для максимальной токовой защиты они должны иметь значение не менее 1,5 при КЗ в конце основной зоне защиты (для МТЗ^{II} комплекта АКЗ при КЗ на шинах Б) и не менее 1,2 при КЗ в зонах дальнего резервирования (при КЗ на шинах В, рис. 3.2а).

Краткие сведения о некоторых реле, используемых в схемах токовых защит на постоянном оперативном токе

Измерительные реле тока (ИОТ)

Эти измерительные органы относятся к реле с одной воздействующей величиной.

В качестве ИОТ (КА на рис.3.1) могут использоваться либо электромеханические реле максимального тока типа РТ-40, либо статические реле максимального тока типа РСТ-40.

Электромеханическое реле максимального ток типа РТ-40.

Максимальное реле тока РТ-40 (рис. 3.3а) применяется в устройствах релейной защиты и автоматики в качестве органа, реагирующего на увеличение тока в контролируемой цепи. Магнитная система реле состоит из П-образного шихтованного сердечника 1 и Г-образного якоря 3. На сердечнике расположены две катушки 2, концы которых выведены на цоколь реле (зажимы 2, 4, 6 и 8, рис. 3.3в). К контактам 1, 3, 5 и 7 на цоколе присоединены неподвижные контактные пружины (рис. 3.3б). При прохождении тока по обмотке реле магнитный поток, создаваемый этим током, намагничивает подвижный якорь. Возникающая при этом электромагнитная сила, действующая на якорь, будет обуславливать вращающий момент, поворачивающий подвижную систему и связанный с осью контактный мостик 5. Замыкание цепи произойдет при соприкосновении подвижных контактов с неподвижными, приваренными к плоским бронзовым пружинам, т. е. произойдет замыкание контакта 1–3 и размыкание контакта 5–7 (рис. 3.3в). На рис. 3.3б пояснено выполнение крепления контактных пружин 8 и 9 к неподвижному держателю 10. Перемещению подвижной системы препятствует спиральная пружина 4, создающая противодействующий момент. Для надежного срабатывания реле необходимо, чтобы вращающий момент превосходил противодействующий момент пружины, а также моменты трения и инерции подвижной системы. Равенство моментов определяет граничное условие, т. е. условие срабатывания реле, которому соответствует поворот подвижной системы на угол α_k (рис. 3.3г), когда произойдет замыкания разомкнутых контактов 1 – 3 (рис. 3.3в). Для реле подобного типа наиболее простым способом изменения тока срабатывания является изменение натяжения пружины 4. Если ослабить пружину, т. е. сдвинуть указатель 6 влево по шкале, то ток срабатывания реле $I_{с.р}$ уменьшится. У реле типа РТ-40 при перемещении указателя от крайнего левого в крайнее правое положение ток срабатывания увеличивается в 2 раза. Ток срабатывания реле можно изменить переключением катушек с

последовательного соединения на параллельное (рис. 3.3в); в последнем случае ток, проходящий по каждой катушке, уменьшается в 2 раза и, следовательно, для получения той же намагничивающей силы, что и в первом случае (при последовательном соединении), потребуется в 2 раза больший ток в цепи реле. Таким образом, ток срабатывания реле можно изменить в 4 раза относительно минимальной уставки.

Схема внутренних соединений реле представлена на рис. 3.3в. Цифрами обозначена принятая маркировка зажимов. Для согласованного включения катушек реле должно быть включено в цепь крайними зажимами – 2 и 8. При последовательном соединении обмоток накладкой соединяются средние зажимы 4 и 6; при параллельном соединении используются две накладки – между зажимами 2 – 4 и 6 – 8. Цифра под дробью в марке реле, указанной на его щитке, обозначает максимальный ток срабатывания реле. Так, например, для реле РТ-40/10 при последовательном соединении обмоток диапазон уставок токов срабатывания будет 2,5 – 5 А, а при параллельном соединении будет 5 – 10 А. Учитывая, что шкала реле градуируется при последовательном соединении обмоток, во втором случае цифры уставок следует увеличивать в 2 раза.

При прохождении по обмотке реле переменного синусоидального тока

$$i_p = I_{p,\max} \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (3.5)$$

якорь реле притягивается с усилием

$$F_{\dot{y}} = k^2 \cdot I_{\dot{\theta},\max}^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot t = k^2 \cdot I_p^2 - k^2 \cdot I_p^2 \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t = F_{\dot{y}\approx} - F_{\dot{y}\approx}, \quad (3.6)$$

Поворот якоря на угол α происходит под действием постоянного усилия

$F_{\approx}$, определяемом действующим значением протекающего по обмоткам реле тока I_p . Знакопеременное усилие $F_{\dot{y}\approx}$ с частотой, удвоенной по сравнению с частотой сети ($2 \cdot \omega = 2 \cdot 2 \cdot \pi f$), вызывает вибрацию якоря и, следовательно, вибрацию связанной с ним магнитной системы.

Для уменьшения вибрации контактов в конструкции реле РТ-40 предусмотрен совместный ход подвижного и неподвижного контактов и специальное устройство – гаситель вибрации 7 (рис. 3.3а), представляющий собой барабанчик, заполненный хорошо просушенным кварцевым песком. При любом ускорении подвижной системы песчинки приходят в движение и часть сообщенной якорю энергии тратится на преодоление сил трения между песчинками.

Обмотка реле чаще всего подключается в цепи вторичной обмотки трансформаторов тока ТА, который при больших кратностях первичного тока ($I_1/I_{1н}$) входит в режим насыщения. Это приводит к тому, что вторичный ток i_2 ТА, протекающий по обмоткам реле имеет несинусоидальную форму. Гармоники этого тока также вызывают вибрацию якоря реле. Поэтому предусмотренный в конструкции реле барабанчик способствует гашению вибрации и от содержащихся в токе i_2 гармоник.

На рис. 3.3г поясняется релейный эффект перемещения Г-образного, якоря, где α_n – угол поворота, соответствующий исходному положению якоря, α_k – конечный угол поворота якоря, при котором у реле максимального тока происходит замыкание нормально разомкнутого контакта 5, т. е. замыкающего контакта.

Ток $I_{с.р}$ называется током срабатывания реле, а ток $I_{в.р}$ – током возврата реле (рис. 3.3а). Работа реле оценивается коэффициентом возврата k_v , который определяется выражением

$$k_a = \frac{I_{\hat{a}.\delta}}{I_{с.р}}, \quad (3.7)$$

Измерительные органы тока в токовых защитах срабатывают при превышении протекающего через его токовую обмотку тока равного или превышающего ток срабатывания реле (уставку реле). Поэтому $k_v < 1$. Такие реле иногда называют реле максимального тока. Желательно иметь высокий $k_v \approx 0,8 - 0,85$, а в отдельных случаях и даже выше, так как в конечном итоге, от этого коэффициента зависит коэффициент чувствительности защиты.

Однако чрезмерное повышение этого коэффициента нежелательно, так как может приводить к повышенной вибрации контактной системы при протекании по обмоткам тока, равного или незначительно превышающего ток уставки I_y .

Из изложенного следует, что проверка работы реле должна проводиться при синусоидальном протекающем через его обмотку токе.

Измерительные реле тока на основе аналоговых микросхем с одной воздействующей величиной.

Эти реле являются аналогами реле серии РТ-40. Основным функциональным элементом реле является аналоговая микросхема – операционный усилитель (ОУ).

На рис. 3.4а приведена упрощенная схема реле тока серии РСТ-14. Отметим, что она используется также для выполнения реле напряжения серии РСН-14 – РСН-17, но вместо датчиков тока в них используются датчики напряжения.

Основными элементами схемы являются операционные усилители $A1$ и $A2$, конденсатор C и стабилитрон $VD2$. Операционный усилитель $A1$ включен по схеме компаратора.

Работа компаратора поясняется рис. 3.4б. Входное выпрямленное напряжение $U_{вх1}$ (рис. 3.4б, в) подается на инвертирующий вход. Оно сравнивается с заданным (опорным) напряжением $U_{вх2}$ неинвертирующего входа. При этом продолжительность сигнала определяется полярностью на выходе $U_{вых}$ при заданном $U_{вх2}$ зависит от амплитуды напряжений $U_{вх1}$. Эта зависимость и используется в рассматриваемых реле.

Итак, на инвертирующий вход реле (рис. 3.4а) подается входное выпрямленное напряжение $U_{А1вх1}$, форма которого соответствует напряжению $U_{вх1}$ на рис. 3.4в. Это напряжение сравнивается с заданным напряжением $U_{А1вх2}$ на неинвертирующем входе.

В зависимости от соотношения между этими напряжениями на выходе усилителя $A1$ (рис. 3.4а) появляются положительные или отрицательные

импульсы напряжения $U_{A1\text{вых}}$ (рис. 3.4з). Это напряжение обуславливает заряд конденсатора C . В первом случае ток заряда проходит по резистору $R5$, а напряжение на конденсаторе возрастает и стремится к максимальному положительному значению $+U_{\text{ст}}$. При отрицательном $U_{A1\text{вых}}$ открывается диод $VD1$ и ток заряда конденсатора C не только меняет направление, но и благодаря параллельному включению резисторов $R5$ и $R6$ возрастает через диод $VD1$, а напряжение на конденсаторе стремится к наибольшему отрицательному значению $(-U_{\text{ст}})$. Максимальное значение напряжения на конденсаторе ограничивается стабилитроном $VD2$. Таким образом, напряжение на конденсаторе в процессе его перезаряда имеет пилообразный характер. Оно подается на инвертирующий вход усилителя $A2$, включенного по схеме триггера Шмитта, и сравнивается с заданным напряжением неинвертирующего входа $U_{A2\text{вх}2}$. Напряжение $U_{A2\text{вых}2}$ на выходе $A2$ может быть, как положительным, так и отрицательным в зависимости от знаков и абсолютных значений сравниваемых напряжений. Благодаря положительной обратной связи в виде резистора $R9$ напряжение $U_{A2\text{вх}2}$ будет одного знака с напряжением $U_{A2\text{вых}2}$.

Реле работает следующим образом. В нормальном режиме амплитудное значение входного выпрямленного напряжения $U_{A1\text{вх}1}$ меньше, чем заданное напряжение $U_{A1\text{вх}2}$ усилителя $A1$, поэтому напряжение на выходе усилителя $A1$ $U_{A1\text{вых}}$ имеет наибольшее положительное значение и конденсатор C заряжается до максимального положительного напряжения $+U_{\text{ст}}$. Оно подается на инвертирующий вход усилителя $A2$, т. е. $U_{A2\text{вх}2} = +U_{\text{ст}}$ (рис. 4з). Напряжение $U_{A2\text{вх}1}$ больше заданного напряжения $U_{A2\text{вх}2}$ неинвертирующего входа усилителя $A2$, поэтому на выходе усилителя максимальное отрицательное напряжение $-U_{A2\text{вых}}$. При этом $U_{A2\text{вх}2}$ тоже отрицательное. Это соответствует исходному состоянию реле. Очевидно, состоянию после срабатывания должно соответствовать максимальное положительное напряжение на выходе $A2$.

Для этого необходимо переключить операционный усилитель $A2$, что произойдет при коротких замыканиях, когда на его инвертирующий вход будет подано отрицательное напряжение, достигшее значения $-U_{A2Bx2}$. В самом деле, при возникновении повреждения амплитуда выпрямленного входного напряжения U_{A1Bx1} превысит заданное входное напряжение U_{A1Bx2} и на выходе усилителя $A1$ появится прямоугольный импульс максимального отрицательного напряжения (рис. 3.4з). Конденсатор C начнет перезаряжаться. Когда напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на инвертирующем входе U_{A2Bx1} усилителя $A2$ достигнет значения отрицательного напряжения U_{A2Bx2} , усилитель переключится и на его выходе появится максимальное положительное напряжение U_{A2Bx2} . Вместе с ним изменяет знак и напряжение U_{A2Bx2} . Последующие положительные и отрицательные импульсы напряжения U_{A1Bx1} будут перезаряжать конденсатор, однако при этом напряжение $+U_{A2Bx1}$ не достигнет значения $+U_{A2Bx2}$ и усилитель $A2$ остается в состоянии после срабатывания. В таком состоянии он находится до тех пор, пока на усилителе $A1$ входное напряжение U_{A1Bx1} будет превышать заданное входное напряжение U_{A1Bx2} .

В зависимости от пределов уставки тока срабатывания имеется семь вариантов типового исполнения реле РСТ (0,2 ... 120 А). Коэффициент возврата реле $k_v = 0,9$, а время действия при $1,2 \cdot I_{cp}$ составляет не более 0,06 с.

Выпускаются статические реле тока, объединенные с электронной схемой создания выдержки времени схемой, например РСТ-40В.

Реле времени

В качестве реле времени (КТ на рис. 3.1) в защитах на постоянном оперативном токе могут использоваться:

- либо электромеханическое реле серии РВ-100 (ЭВ-100) с часовым механизмом,
- либо реле серии РВ-01, которые являются электронным аналогом РВ-100.

Электромеханіческие реле времени серии РВ-100 (рис. 3.5) имеют различные исполнения, отличающихся диапазоном регулирования выдержек времени, длительной или кратковременной термической стойкостью. Реле может иметь один *конечный* контакт, замыкающийся с регулируемой выдержкой времени, и на схемах защит обозначаемый как , или помимо этого контакта еще имеется *проскальзывающий* контакт (временно замыкающийся), обозначаемый на схемах защит как , момент замыкания которого может также регулироваться. Реле могут иметь исполнение, когда часовой механизм запускается в работу при подаче оперативного постоянного напряжения на обмотку реле, либо после снятия напряжения с обмотки реле. В трехзначном числе, обозначающем типоразмер реле РВ-100, первая цифра обозначает род тока (постоянный – 1, переменный – 2, вторая цифра – пределы плавного регулирования времени срабатывания реле, третья – тип контактного устройства и некоторые другие особенности.

Пределы плавного регулирования времени срабатывания следующие:

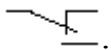
0,1-1,3 с – у реле типов РВ-112, 113, 114, 215, 217, 218;

0,25-3,5 с – у реле типов РВ-124, 127, 128, 225, 227, 228;

0,5-9 с – у реле типов РВ-132, 133, 134, 235, 237, 238;

1,0-20 с – у реле типов РВ-142, 143, 144, 245, 247, 248.

Реле с последней цифрой 4 или 7 (РВ-114, 124, 134, 144, 217, 227, 237 и 247) имеют один конечный замыкающий контакт с регулируемой выдержкой времени и один мгновенный переключающий контакт, обозначаемый как



Реле типов РВ-113, 123, 133, 143 являются термически стойким, т. е. они могут длительно находиться под напряжением; у них имеется также один конечный замыкающий контакт с регулируемой выдержкой времени и один мгновенный замыкающий контакт .

Реле с последней цифрой 2 или 8 дополнительно к конечному имеют скользящий (временно замыкающийся) контакт, оба – с регулируемыми

выдержками времени, а также один мгновенный переключающий контакт (например, реле типов РВ-112,132, 228 и др.).

Еще раз отметим, что реле времени для схем на переменном оперативном токе в качестве первой цифры в обозначении имеют цифру 2.

Подробное описание действие часового механизма реле серии РВ (рис. 3.5а) приведено в учебной литературе.

Электронное реле времени серии РВ-01

Электронными аналогами электромеханических реле времени являются статические реле типов РВ-01 (рис. 3.6).

Управление работой реле РВ-01 осуществляется подачей напряжения оперативного тока контактами, например, измерительных органов максимальной токовой защиты ($КА^{II}$, $КА^{III}$ на рис. 3.1). В реле этого типа для получения выдержки времени используется принцип электрического заряда конденсатора. Известно, что время заряда конденсатора зависит от значения сопротивления цепи, по которой происходит заряд конденсатора; это сопротивление называют зарядным.

В большинстве случаев емкостное (конденсаторное) реле времени выполняется по мостовой схеме, принцип которого поясняется рис. 3.6а.

Реле состоит из конденсатора C , диода VD и трех резисторов R_1 , R_2 и R_3 . Разность потенциалов между точками «а» и «b» контролируется нуль-индикатором $НИ$. В рассматриваемом случае пуск реле времени осуществляется расшунтирование конденсатора C пусковым контактом $П$.

Условием срабатывания нуль-индикатора $НИ$ является соотношение

$$U_C \geq U_{R3} = U_{\dot{I}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (3.8)$$

где U_{Π} – напряжение питания реле.

Напряжение U_C по времени изменяется по экспоненциальному закону

$$U_C = U_{\dot{I}} \cdot (1 - e^{-t/R_1 C}). \quad (3.9)$$

Из приведенных выражений получаем время срабатывания реле

$$t_{c.p} = -R_1 \cdot C \cdot \ln \frac{R_2}{R_2 + R_3}, \quad (3.10)$$

является функцией емкости конденсатора C и сопротивлений резисторов R_1, R_2, R_3 . От напряжения питания $U_{\text{п}}$ время срабатывания реле практически не зависит.

На рис. 3.6б приведена структурная схема реле РВ-01. Она содержит следующие блоки: преобразователь входного управляющего напряжения U_1 , формирующий питающее $U_{\text{п}}$ и опорное $U_{\text{оп}}$ напряжения для электронной схемы; времязадающий блок U_2 , формирующий требуемую временную задержку на срабатывание; пороговую схему (компаратор) SF ; усилитель мощности сигнала A с ключом KL на выходе; схему обнаружения отключения питания реле U_3 и электронный ключ SF для ускоренного разряда конденсаторов в реле. Для получения стабильной временной задержки в реле используется принцип дозаряда конденсатора от фиксированного начального напряжения до напряжения срабатывания пороговой схемы. Управление работой отдельных узлов реле осуществляется по факту скачкообразного изменения питающего напряжения.

Регулировка выдержек времени в реле РВ-01 осуществляется путем дискретного изменения значения соответствующего зарядного сопротивления с помощью набора резисторов.

В зависимости от варианта исполнения реле выдержка времени устанавливается с помощью одной или двух перемычек, устанавливаемых на соответствующих колодках, или с помощью выведенных на панель реле поворотных шлицов микропереключателей.

Реле времени РВ-01 обладают настолько высокой точностью, что при расчетах времени срабатывания защит с этими реле разрешено принимать ступень селективности около 0,3 с (при диапазоне уставок по времени 0,1—1,0 с). Это является большим преимуществом электронных реле времени по сравнению с электромеханическими.

Реле времени РВ-01 выпускаются на все те же номинальные напряжения постоянного и переменного оперативного тока, что и реле РВ-100, РВ-200.

Схема внешних подключений реле РВ-01 для постоянного тока приведена на рис. 3.6б. Реле имеет два исполнительных контакта 1 и 2, переключающихся с одной и той же выдержкой времени. Последнее обстоятельство является недостатком конструкции РВ-01 по сравнению с реле серии РВ-100, РВ-200, у которых на одном реле можно выполнить две разные выдержки времени, т. е. дать две команды поочередно. У реле РВ-01, выпускаемых в настоящее время, можно дать две команды лишь одновременно. При необходимости выполнения разновременных команд надо установить два таких реле. Отметим, что размеры реле РВ-01 примерно такие же, как размеры РВ-100, РВ-200, а стоимость - значительно выше.

Выпускаются вариант исполнения реле РВ-01 для переменного оперативного напряжения и реле РВ-03, которое предназначено для получения выдержки времени на возврат после отключения напряжения его питания в схемах устройств РЗА на переменном оперативном токе.

Помимо электронных реле типа РВ-01 и РВ-03 можно встретить электронные реле времени типа ПРВ и ВЛ-23.

Отметим также, что на большие времена срабатывания выпускаются специальные двигательные реле времени постоянного или переменного тока, у которых верхний предел уставок по времени может достигать несколько десятков минут.

Промежуточные реле

В схемах релейной защиты находят применение различного типа промежуточные реле, с помощью которых могут решаться те задачи, которые возникают при проектировании схем исходя из конкретных требований к работе релейной защите и автоматике, т. е. с их использованием реализуется логическая часть защиты. На принципиальных схемах эти реле обозначают KL.

Промежуточные реле в схемах максимальных токовых защит и токовых отсечек используются, главным образом, в качестве исполнительного органа (например, выходного реле KL на рис. 3.1б). Своими достаточно мощными контактами они подают оперативное напряжение $\pm E_C$ на электромагниты отключения YAT коммутационных аппаратов (выключателя Q, рис. 3.1а).

Промежуточные реле могут иметь одну или несколько обмоток, причем как правило, одна обмотка (включающая) подключается на напряжение, а другие обмотки токовые (удерживающие), например, подключаемые на ток I_{YAT} электромагнита YAT . Обмотка напряжения рассчитана на работу под номинальным напряжением $U_{ном}$, но они должны надежно срабатывать при напряжениях $U_p \leq 0,8 \cdot U_{ном}$. Промежуточные реле имеют низкий коэффициент возврата $k_v = 0,1 \dots 0,4$.

К большей части промежуточных реле предъявляется требование быстродействия: их время срабатывания не должно превышать $t_{с.р.} \leq 0,01 \dots 0,03$ с.

Контакты реле характеризуются коммутационной способностью контактов, т. е. какие максимальный ток и мощность они могут коммутировать без повреждения контактов. Самое неприятное – это возможность сваривания контактов при коммутации больших токов, что может привести к неправильной работе релейной защиты, отказу в работе.

Отметим, что на лабораторном стенде в соответствующих схемах используется реле РП23-25, способное работать как в цепях постоянного тока, так и переменного, а также промежуточное реле РП16-1, которое более совершенно, чем реле РП-23.

Подробно конструкции промежуточных реле разного назначения рассматриваются в последующих лабораторных работах

Указательные реле.

На схемах защиты эти реле имеют обозначение КН и используются для указания о происходивших срабатываниях устройств защиты. Указательное реле иногда называют *блинкер*. Эти реле облегчают последующий анализ действия защиты и определение характера повреждения. Реле выпускаются двух базовых модификаций. Первая рассчитана на срабатывания от протекающего через его обмотку тока, например тока через катушку отключения УАТ привода выключателя, а вторая – при подаче напряжения на его обмотку.

Реле выпускается с двумя замыкающими контактами (при необходимости каждый из контактов можно переделать на размыкающийся контакт).

Наиболее распространены реле с последовательным включением обмотки (с токовой обмоткой), когда обмотка реле включается последовательно с обмотками других реле или других аппаратов, действие которых необходимо контролировать. Например, на упрощенной схеме токовой защиты (рис. 3.16) обмотка указательного реле КН включена последовательно с обмоткой реле КЛ. Сопротивление обмотки КН таково, что оно позволяет сработать реле КЛ при подаче через соответствующие контакты на цепь из КН и КЛ напряжения $\pm E_C$. Для надежного срабатывания реле КН обмотка реле КЛ может быть зашунтирована балластным резистором R_6 . Однако при этом ток, протекающий при замыкании соответствующих контактов в цепи, не должен превышать их коммутационной способности.

Промышленность выпускает электромагнитные указательные реле различных типов, но в технике РЗА находят широкое применение реле типа РУ-21 с поворотным якорем для включения в цепь постоянного тока. Они могут быть использованы и в схемах защиты и автоматики на переменном оперативном токе.

Отметим, что возврат сигнального флажка указательного реле и его контактов производится вручную.

Изучение конструкции промежуточных и указательных реле осуществляется в процессе выполнения лабораторной работы.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- образцы реле, используемые при построении токовых защит;
- регулируемые источники переменных напряжения и тока;
- регулируемый источник постоянного напряжения;
- приборы для измерения токов, напряжений и времени срабатывания реле (электросекундомер);
- модель токовой защиты на постоянном оперативном токе с имитационной моделью высоковольтного выключателя

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Внимание. Подача и снятие напряжения с исследуемых схем осуществляется с общего пульта управления стенда!

Указания по порядку выполнения работы

1. Испытание максимального реле тока.

К испытанию может быть предложено либо электромеханическое реле тока либо статическое.

1. Записать данные испытуемого реле.
2. Собрать схему испытания реле (рис. 3.7а). Схему соединения обмоток реле указывает преподаватель.

Для каждого оцифрованного деления шкалы путем плавного увеличения тока зафиксировать минимальное его значение, при котором контакты реле надежно замыкаются, т. е. определить ток срабатывания реле

$I_{с.р.}$ Уменьшая ток, зафиксировать максимальное его значение, при котором контакты надежно размыкаются, т. е. определить ток возврата реле $I_{в.р.}$

Для каждого деления выполняется по три измерения и среднее значение заносится в таблицу 1. Отметим, что реле типа РТ-40 допустимое максимальное отклонение не должно превышать $\pm 5\%$.

Надежность замыкания контактов контролируется вспомогательной схемой по свечению светодиода на стенде.

Таблица 1 – Данные проверки токового реле

$I_{уст}, А$	$I_{с.р}, А$	$I_{в.р}, А$	k_B	Соединение обмоток

3. Подключив к токовым зажимам реле милливольтметр, измерить мощность, потребляемую обмоткой реле при минимальной уставке:

$$S = I_{уст\min} \cdot U_p \quad (3.11)$$

4. Измерить время срабатывания реле тока при значениях $I_p = 1,2 \cdot I_{уст}$ и $I_p = 3 \cdot I_{уст}$. Схема измерения времени срабатывания приведена на рис. 3.8б. В схеме используется электросекундомер, однако в условиях эксплуатации должен использоваться специальный миллисекундомер, например типа ЭМС-54 или другой, позволяющий фиксировать малые интервалы времени.

5. Дать заключение о пригодности реле в эксплуатации, сравнив полученные результаты с техническими данными реле (коэффициент возврата, потребляемая мощность, время срабатывания) указанные в справочной литературе. Учесть, что допустимые отклонения коэффициента возврата не должно превосходить значения $\pm 0,03$.

2. Испытание реле времени

Примечание. К испытанию могут быть предложены одно из двух реле времени, либо электромеханическое, либо статическое, либо оба типа.

1. Ознакомиться с устройством испытуемого реле времени. Записать паспортные данные.

2. Собрать схему для проверки электрических характеристик испытуемого реле времени (рис. 3.8а).

3. Определить напряжение срабатывания реле, т. е. минимальное напряжение (для электромеханического реле), при котором якорь реле сразу втягивается до упора (напряжение срабатывания определяется при подаче на обмотку реле напряжения толчком. Плавное уменьшение напряжения, определить значение напряжения возврата реле. Полученное значение напряжения четкого срабатывания не должно превышать $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$. Напряжение возврата должно быть не менее $0,05 \cdot U_{\text{ном}}$.

4. Проверить время срабатывания реле на наибольшей, наименьшей и рабочей (заданной преподавателем) уставке по шкале при номинальном напряжении на обмотке. На каждой уставке следует производить не менее пяти измерений. Полученные результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица 2 – Данные проверки реле времени

Уставка по шкале	Измерения						Расчет	
	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$t_5, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	Разброс, с	Отклонение от уставки, с
Максимальная								
Минимальная								
Рабочая								

Примечание. При наличии в реле проскальзывающего контакта по специальной схеме определяется длительность его замыкания.

Сделать выводы о пригодности реле в эксплуатации.

3. Изучение на макете схемы токовой защиты и ее испытание

Испытание схемы токовой защиты выполняется на модели токовой защиты на постоянном оперативном токе с имитационной моделью высоковольтного выключателя (рис. 3.9).

На лабораторном стенде цепи тока выполнены только для фазы А. Предполагается, что токовые реле КА1 и КА2 установлены в токовой обмотке ТА фазы А.

В схеме используются следующие реле КА1 и КА2 – РТ40, КТ – РВ-01, КQC – РП23-25; дугообмоточное реле KL1 – РП18-4; KL2 – РП16-5, КН1 и КН2 – РУ-21.

Реле КQT на лицевой панели стенда не установлено.

Так как в качестве указательных реле КН используются реле с токовыми обмотками, то параллельно обмотке реле KL2 подсоединен резистор R.

Сигнализация положения выключателя регистрируется светодиодами HLG (отключено): HLR (включено). Светодиод HLW регистрирует срабатывание защиты и состояние «*Блинкер не поднят*».

Схема защиты из отдельных реле собирается после установки в соответствующее гнездо разъема внешнего ключа.

По приведенным на рис. 3.9 схемам изучите работу токовой защиты. На токовых реле и реле времени выставьте заданные преподавателем уставки. Подайте на схему оперативный постоянный ток. Нажатием кнопок SB_{вкл} и SB_{отк} проверьте, что имитатор выключателя управляется. Условно поставьте линию под напряжением и, изменяя ток в цепи токовых реле, проследите за работой схемы.

Примечание. Дополнительные схемы (на рис. 3.9 они не показаны), необходимые для эксперимента, создаются при участии преподавателя.

4. Обработка экспериментальных данных

На основе экспериментов по п.п. 5.1 и 5.2 привести данные и результаты их обработки. Сделать выводы по результатам экспериментов.

На основе проведенных опытов по п. 5.3 дать краткое описание работы в случае работы ТО и в случае работы МТЗ.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Используемые в экспериментах схемы.
3. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
5. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Назначение токовой защиты, ее типовая структура и как она функционирует.
2. Что понимается под постоянным оперативным током и варианты его получения?
3. Что понимается под основной и резервной зонам работы токовой защиты?
4. Какими параметрами оценивается эффективность использования токовой защиты и их минимально допустимые значения?
5. Какие технические решения используются во вторичных токовых измерительных органах?
6. Как выбираются уставки ступеней токовой защиты?
7. Чем отличается первичный и вторичный токи срабатывания токовых защит?
8. Что понимается под зоной действия токовой отсечки и от чего она зависит?
9. Какой параметр ИОТ сказывается на выбора уставки токовых защит?

10. Как оценивается чувствительность ступеней токовых защит?
11. Какие соединения трансформаторов тока используются в токовых защитах линий 6–35 кВ и на линиях в сетях с заземленной нейтралью?
12. Какие технические средства используются для реализации выдержки времени в защитах на постоянном оперативном токе?
13. Каким образом создается выдержка времени в реле времени при его электромеханической и электронной реализации?
14. Что понимается по ступенью выдержки времени и какие типовые значения они могут принимать?
15. Как по времени согласуются между собой защиты с независимой и зависимой выдержками времени?
16. Какие электромагнитные реле относятся к категории вспомогательных реле? Каково их назначение?
17. Каковы конструктивные особенности отличительные особенности промежуточных реле постоянного и переменного тока?
18. Обоснуйте необходимость работы вспомогательных реле при сниженном напряжении оперативного тока. При каком уровне снижения напряжения должны быть обеспечена четкая работа вспомогательных реле?
19. Если требуется установить время действия 1 с при минимально возможном разбросе, какое реле целесообразно использовать: со шкалой 0,–1,3 с или со шкалой 0,5–9 с?
20. Приведите схему испытания токового реле и как выполняется проверка работы реле и оценка точности его работы на выставленной уставке?
21. Приведите схему испытания реле времени и как выполняется проверка его работы и оценка точности его работы на выставленной уставке?

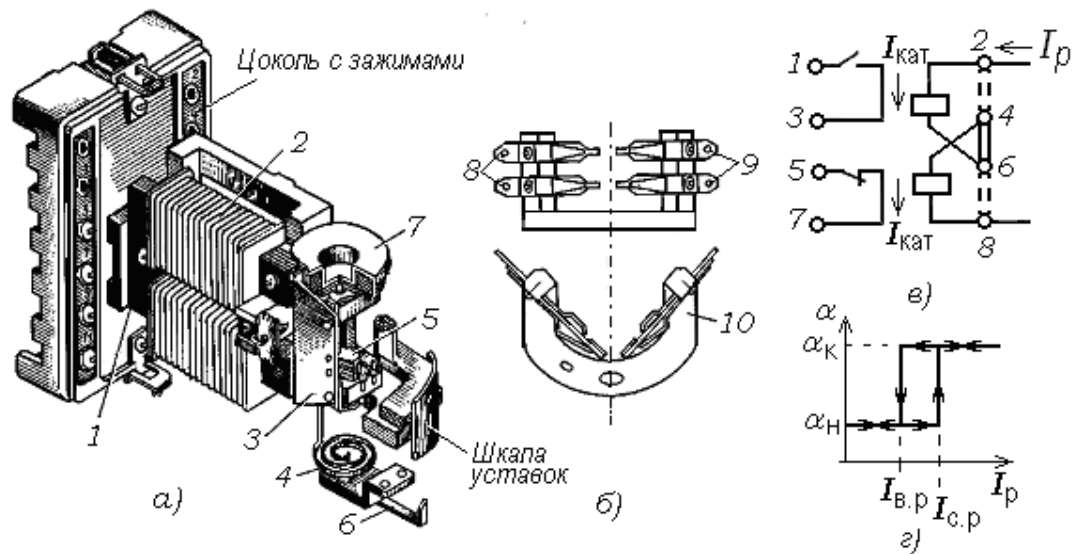


Рисунок 3.3 – Электромагнитное реле тока типа РТ-40:

а – конструкция реле; б – крепление неподвижных контактов; в – схема внутренних соединений, выводимых на цоколь реле; г – к пояснению релейного эффекта

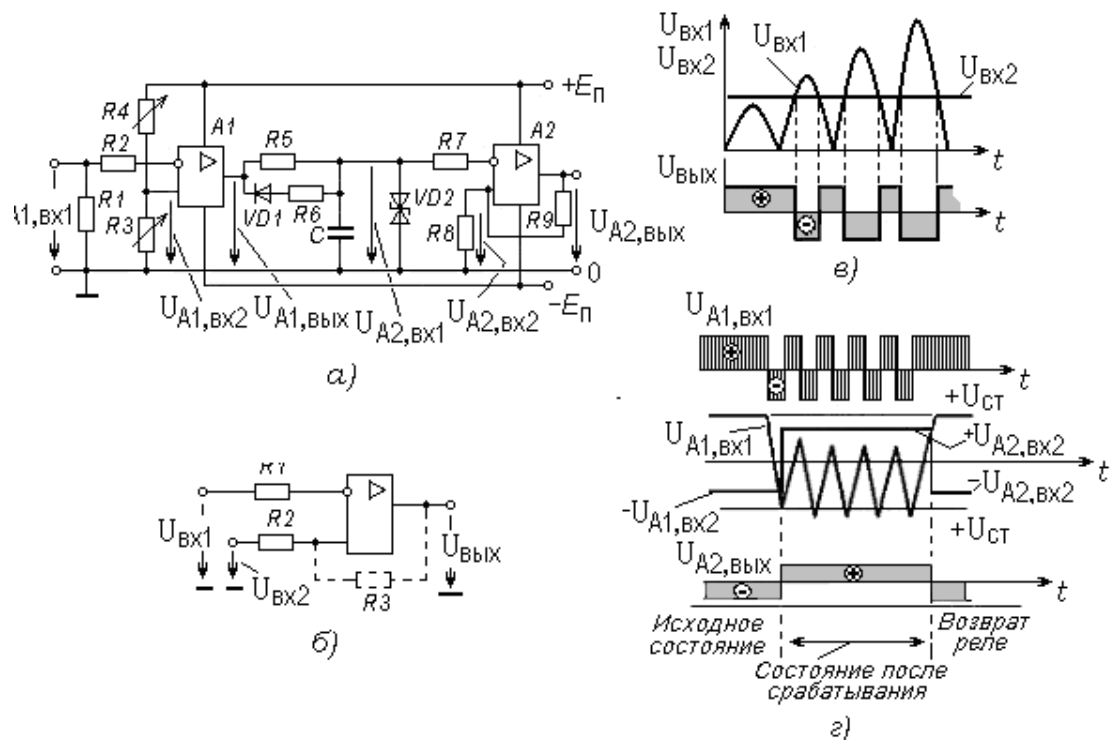


Рисунок 3.4 – Схема реле тока серии РСТ-14 (а) и поясняющая его работу схема компаратора (б); его работа (в); временные диаграммы работы реле (г)

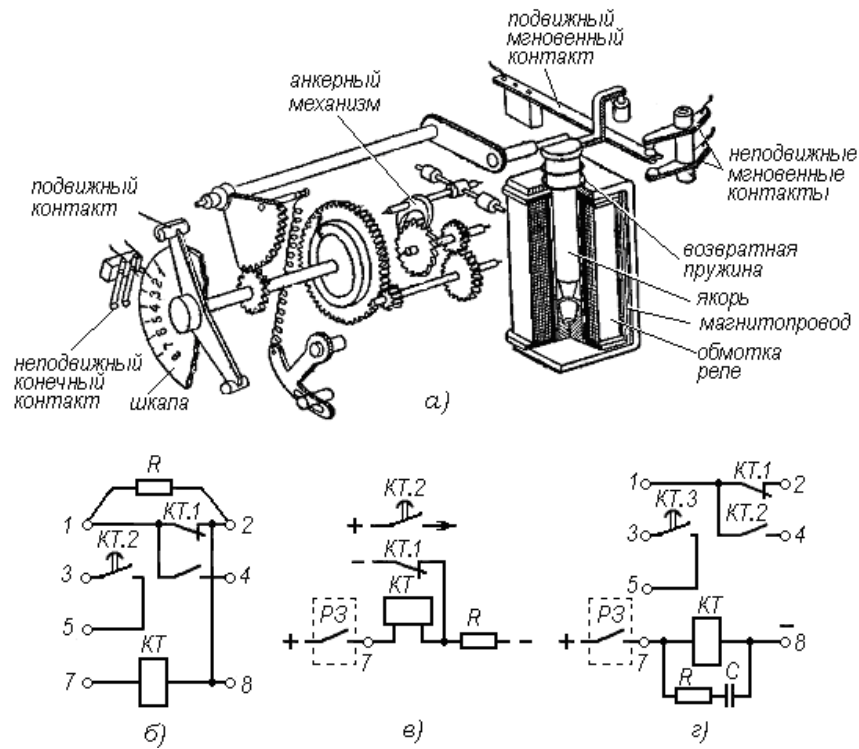


Рисунок 3.5 – Кинематическая схема реле РВ-100 (а).

Схема внутренних соединений: б – термически стойкое реле; в – схема, поясняющая работу термически стойкого реле; г – реле с искрогасящим контуром; РЗ – управляющий контакт релейной защиты

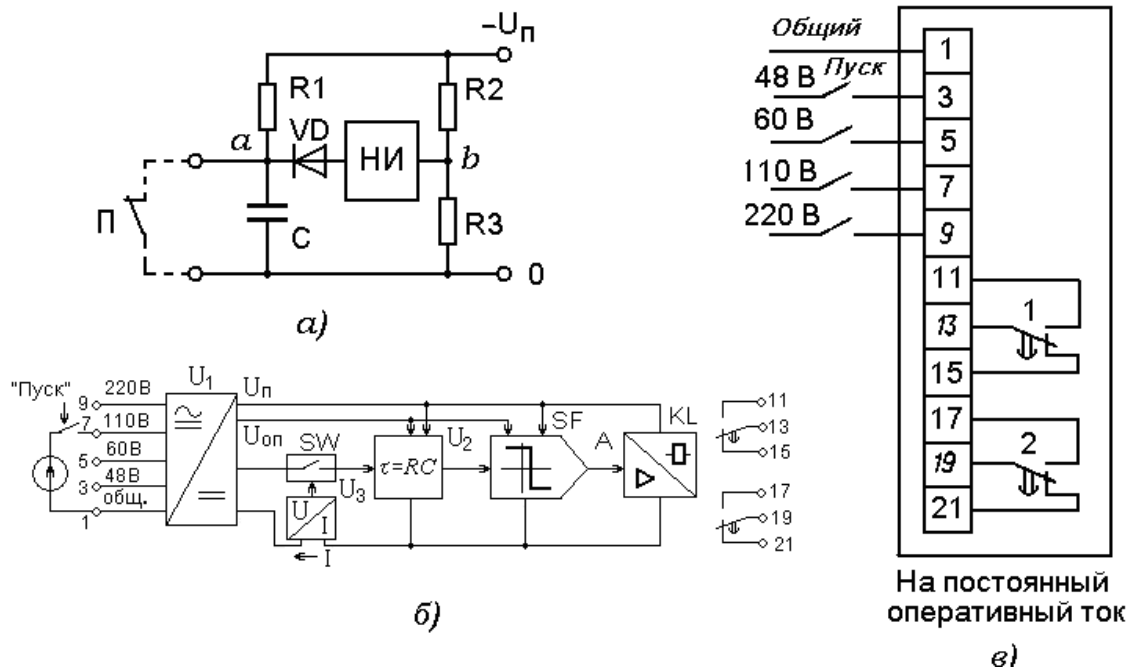


Рисунок 3.6 – Полупроводниковое реле времени типа РВ-01

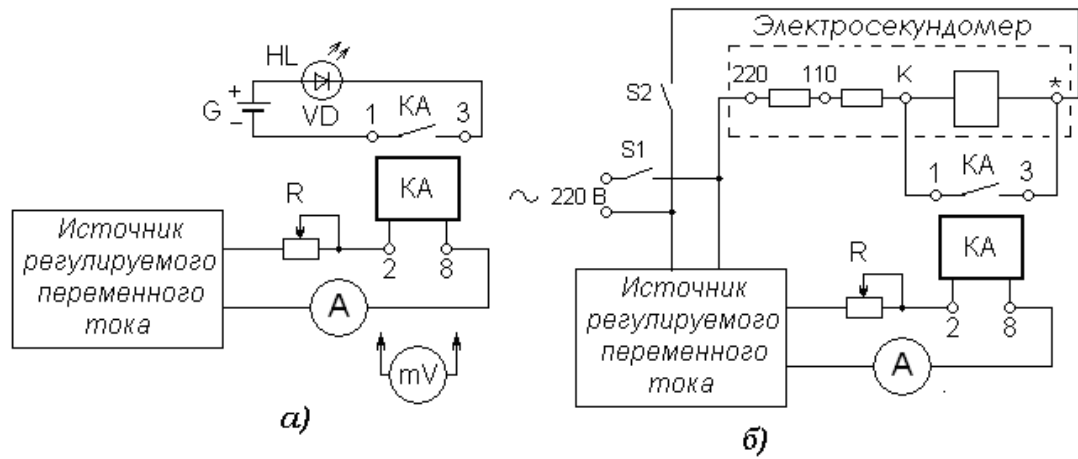


Рисунок 3.7 – Схемы снятия параметров токового реле

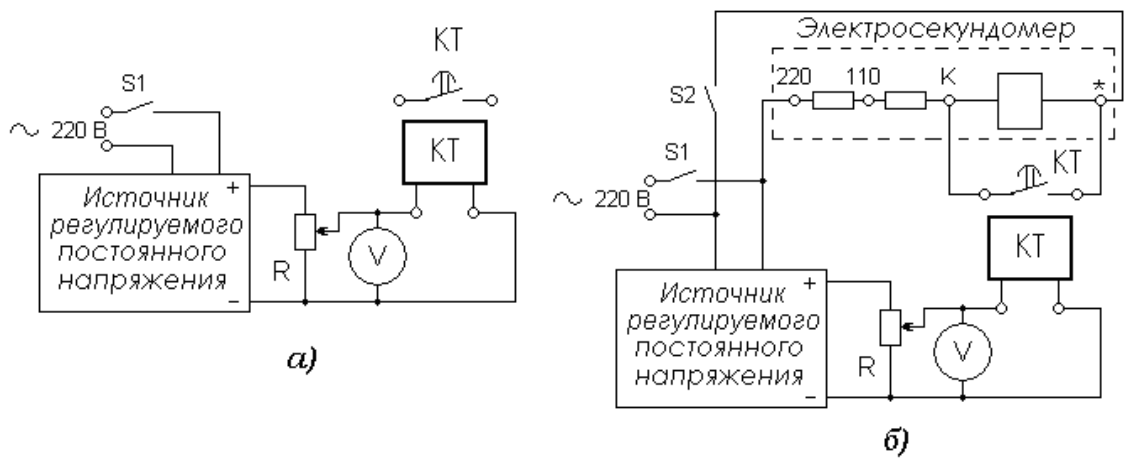


Рисунок 3.8 – Схемы экспериментального определения параметров реле времени постоянного тока

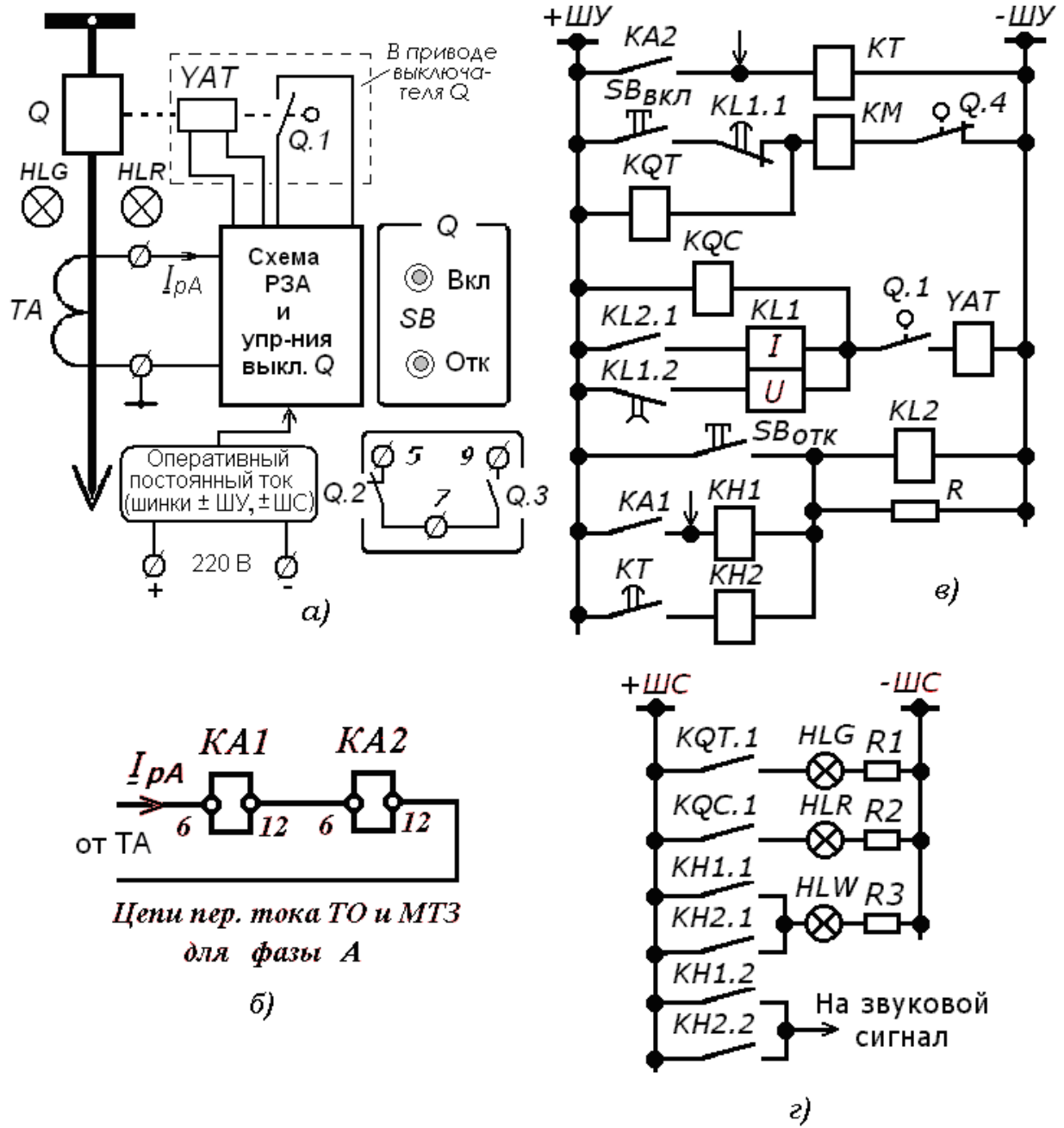


Рисунок 3.9 – Модель двухступенчатой токовой защиты (на стенде)

Лабораторная работа 4

Токовая защита на переменном оперативном токе

Цель работы: Изучение принципов построения токовых защит на переменном оперативном токе; изучение принципов получения оперативного тока для питания защит; изучение конструкций реле, используемых в схемах этих защит; освоение методики проверки реле; изучение работы лабораторной модели токовой защиты на переменном оперативном токе. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить принципы построения защит на переменном токе и используемую при этом аппаратуру.
2. Освоить методику проверки реле на переменном оперативном токе.
3. Выполнить проверку работы схем защиты на переменном оперативном токе.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики

электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

Токовые защиты на переменном оперативном токе

Источники питания защит на переменном оперативном токе Для питания аппаратуры релейной защиты, автоматики и управления в сетях 6 - 35 кВ и в отдельных случаях в сетях 110 кВ находит преимущественное применение энергия от источников переменного тока и напряжения.

Необходимо различать (рис. 4.1):

- использование для этих целей энергию, непосредственно вырабатываемую трансформаторами тока ТА, или энергию от измерительного трансформатора напряжения TV или от трансформатора собственных нужд Т;

- формирование оперативного постоянного тока для питания цепей РЗА на основе энергии, вырабатываемой трансформаторами тока ТА и трансформаторами напряжения TV или трансформатором Т собственных нужд.

Используются варианты комбинированного питания цепей РЗА.

Трансформаторы тока ТА (рис. 4.1а) являются весьма надежным источником питания оперативных цепей для защит от КЗ. При КЗ первичный ток I_1 в линии возрастает до величины $I_{кз}$, следовательно, до соответствующей ему величины возрастают ток $I_{2кз}$ во вторичной цепи ТА и напряжение U_2 на его выходных зажимах, к которым подключены токовые

цепи устройств РЗА, которые характеризуются сопротивлением $\underline{Z}_H$. Поэтому в момент срабатывания защиты выдаваемая в нагрузку мощность трансформатора тока ($S_{ТА} = \underline{I}_{2КЗ} \cdot U_2$) возрастает, что и обеспечивает надежное питание цепей защиты.

Однако ТА не обеспечивают необходимой мощности при повреждениях и ненормальных режимах, которые не сопровождаются увеличением тока на защищаемом присоединении. Поэтому их нельзя использовать для питания защит от замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, защит от витковых замыканий в трансформаторах и генераторах или защит от таких ненормальных режимов, как повышение или понижение напряжения и понижение частоты. Кроме того, в сетях с токами КЗ, сопоставимыми с первичным током срабатывания защиты, приходится использовать более сложные варианты построения РЗА и схем их питания.

Трансформатор напряжения TV и трансформатор собственных нужд Т непригодны для питания оперативных цепей защит от КЗ, так как при КЗ в сети напряжение на шинах U_m резко снижается и в неблагоприятных случаях может стать равным нулю, например, при КЗ в месте установки защиты. В то же время, при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся глубоким понижением напряжения $U_{ш}$, трансформатор напряжения TV и трансформатор Т собственных нужд могут использоваться для питания таких защит, как, например, защиты от перегрузки, от замыканий на землю, повышения напряжения и т. д.

Блоки питания. На подстанциях находят применение специальные устройства питания (блоки питания), первичная цепь которых подключается к цепям переменного тока (напряжения) и которые могут быть разделены на следующие виды (рис. 4.1):

- нестабилизированные блоки питания UGV, подключаемые к измерительным трансформаторам напряжения TV или к трансформаторам собственных нужд Т;
- стабилизированные блоки питания UGA, подключаемые к трансформаторам тока ТА;
- блоки питания и заряда конденсаторов (БПЗ) в сочетании с батареями конденсаторов (БК) (рис. 4.1б).

Таким образом, в качестве источников переменного оперативного тока служат трансформаторы тока ТА, измерительные трансформаторы напряжения TV и трансформаторы собственных нужд Т (рис. 4.1).

Блоки питания. Существует несколько типов блоков питания UGA, подключаемых к трансформаторам тока ТА, отличающихся отдаваемой в нагрузку мощностью. Все они содержат промежуточный насыщающийся трансформатор тока ПНТ (TLAT) (рис. 4.1в, г) и двухполупериодный выпрямитель VS на выходе. Использование насыщающегося трансформатора тока TLAT необходимо для поддержания достаточно стабильного напряжения на выходе блока питания при изменении тока i_2 в широких пределах. Однако из-за насыщения магнитопровода TLAT резко искажается форма кривой вторичного напряжения u_2 на зажимах обмотки w_2 , а его амплитуда при значительных нагрузках Z_H блока существенно возрастает. В связи с этим принимаются меры по ограничению амплитуды вторичного напряжения до приемлемых значений. Одной из мер стабилизации является включение параллельно вторичной обмотке TLAT конденсатора C_1 , обеспечивающего вместе с ветвью намагничивания этого трансформатора феррорезонансную стабилизацию напряжения u_2 на выходе блока. Вторичная обмотка w_2 имеет ответвления для подрегулировки тока наступления феррорезонанса и для получения требуемого номинального напряжения. Последовательное и параллельное включение секций первичной обмотки w_1 TLAT, а также наличие в них ответвлений позволяют изменять входное сопротивление блока и уставки по току наступления феррорезонанса.

Конденсаторные устройства. В устройствах релейной защиты и автоматики в качестве кратковременных источников оперативного тока применяются конденсаторы (C_2 на рис. 4.1б), которые могут быть объединены в блок конденсаторов БК, заряженные в нормальном режиме работы. Заряжаются конденсаторные батареи с помощью специальных зарядных устройств (УЗ).

Разрядный ток конденсатора, имеющий необходимую величину и продолжительность, может питать оперативную цепь в момент действия защиты независимо от характера повреждения или ненормального режима в сети. Предварительный заряд конденсатора обычно осуществляется в нормальном режиме от напряжения сети. При исчезновении напряжения на подстанции запасенная конденсатором энергия сохраняется. Поэтому заряженный конденсатор может использоваться также для питания защит и автоматов, которые должны работать при исчезновении напряжения на подстанции.

Однако для этой цели можно использовать блоки питания, если к выходу выпрямителя VS подключить диод VD и резистор R (на рис. 4.1б показано пунктиром). Для медленного заряда конденсатора C_2 он включается через резистор R . Диод VD исключает разряд C_2 при исчезновении тока на входе ТЛАТ. Такие блоки получили названия *блоков питания и заряда*. К ним относится блок типа БПЗ-402. Его мощность не превышает 200 Вт.

Блоки питания UGV, подключенные к трансформатору напряжения TV или трансформатору Т собственных нужд, содержат промежуточный трансформатор напряжения ПТН и выпрямитель VS. Первичная обмотка промежуточного трансформатора состоит из двух секций, а вторичная имеет ответвления. Соединяя секции параллельно или последовательно, можно блок питания включать на номинальные входные напряжения, например 110 и 220 В соответственно. Ответвления на вторичной обмотке позволяют иметь неизменный уровень выпрямленного напряжения при различных входных напряжениях.

Стабилизация вторичного напряжения промежуточного трансформатора предусматривается не всегда. Так, она отсутствует, например, в блоке питания и заряда БПЗ-401.

Блоки питания и заряда могут работать в двух режимах: в режиме постоянного питания устройств защиты и автоматики выпрямленным оперативным током или в режиме заряда конденсаторных батарей, используемых в качестве кратковременных источников оперативного тока для приведения в действие коммутационных аппаратов и устройств защиты и автоматики. В режиме заряда к блокам питания и заряда можно подключить и нагрузку небольшой мощности.

На рис. 4.1г приведен один из вариантов схемы подключения блоков питания и заряда VGA типа БПЗ-402 к измерительным трансформаторам тока ТА и UGV типа БПЗ-401 - к трансформаторам напряжения TV или к трансформаторам собственных нужд Т, причем на стороне постоянного тока используется вариант их параллельного включения.

Напряжение на выходе блока $U_{0.т}$ определяется током и напряжением сети. При КЗ необходимое значение выходного напряжения обеспечивается за счет трансформаторов тока ТА, а при повреждениях и ненормальных режимах с малым током - за счет трансформатора напряжения TV. Таким образом, комбинированный блок из UGA и UGV может питать защиты от всех видов повреждения и ненормальных режимов, и в то же время позволяет иметь на выключателе только одну катушку отключения YAT.

Блоки питания особенно удобны для питания защит, имеющих сложную схему оперативных цепей, состоящую из большого числа вспомогательных реле, причем используются в этом случае реле, работающие на постоянном токе.

Обращаем внимание, что включение токовых цепей измерительных органов релейной защиты и автоматики на трансформаторы тока, используемые для питания блоков питания UGA, не допускается. Отметим, что блоки VGA и UGV можно использовать так же отдельно.

Для питания цепей защиты находят применение также блоки питания серии БПТ-11 и БПН-11. Основная область их использования - элементы системы электроснабжения, оборудованные выключатели с легкими приводами, где они могут обеспечить питание электромагнита отключения выключателя с номинальной мощностью 20...25 Вт, а также питание устройств защиты сигнализации однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. Выпускаются также мощные блоки питания БПТ-1002 и БПН-1002, предназначенные для питания выпрямленным оперативным током аппаратуры релейной защиты, сигнализации и управления, выполненной на номинальное напряжение 110 или 220 В, и позволяющие в кратковременном режиме получить мощность 800... 1500 Вт.

Питание цепей управления выключателей. Дистанционное управление включением выключателей и их автоматическое включение от электрических схем АПВ или АВР должно производиться при любых нагрузках на присоединении и при отсутствии напряжения на шинах подстанции, что не обеспечивают трансформаторы тока ТА. Поэтому питание цепей дистанционного управления, АПВ и АВР производится от измерительных трансформаторов напряжения TV, трансформаторов собственных нужд Т и блока заряженных конденсаторов БК. Чтобы обеспечить производство операции по включению выключателя Q при отсутствии напряжения $U_{ш}$ на шинах, трансформатор Т, питающие цепи управления, подключается к линии, питающей подстанцию (рис. 4.1в), или на выключателях устанавливаются механические приводы, действующие за счет энергии поднятого груза или сжатой пружины, например таких, как ППМ-10, ПП-67, ВМПП и др.

Следовательно, каждый источник переменного оперативного тока имеет свою область применения. При этом возможность использования того или иного источника определяется мощностью, которую он может дать в

момент, когда работает релейная защита или возникают условия, связанные с производством операции отключения выключателя Q.

Мощность источника питания должна с некоторым запасом превосходить мощность, потребляемую оперативными цепями, основной составляющей которой является мощность, затрачиваемая приводом на отключение и включение выключателей.

Наибольшие затруднения из-за недостаточной мощности возникают при применении трансформаторов тока ТА и измерительных трансформаторов напряжения TV. Учитывая, что включение и отключение выключателей является кратковременной операцией, допускаются значительные перегрузки измерительных трансформаторов без ущерба для них.

В лабораторной работе изучаются реле и защиты на их основе, работающие только на переменном оперативном токе, в основном с непосредственным питанием от ТА.

Токовые защиты на переменном оперативном токе и используемые реле

Вторичные токовые реле прямого действия и вариант защиты

Отличительной особенностью вторичных реле прямого действия заключается в том, что при своем срабатывании они непосредственно воздействуют на механизм расцепления привода выключателя Q. На рис. 4.2а приведена типовая схема включения токовых реле КА типа РТВ максимальной токовой защиты с ограниченно зависимой выдержкой времени, т. е. выдержка срабатывания которых зависит от протекающего во время КЗ тока I_p через обмотку реле (рис. 4.2в).

С помощью вторичных реле прямого действия можно выполнить защиты в установках напряжением до 35 кВ.

Выпускает различные модификации вторичных реле тока КА (типов РТМ, РТВ) и реле напряжения KV (типа РН, РНВ) прямого действия с втягивающимся якорем. Они различаются некоторыми конструктивными деталями и параметрами. Реле устанавливаются непосредственно в

пружинные и грузовые приводы выключателей, например ППМ-10, ПП-67, ВМПП и др. Обмотки вторичных реле тока типов РТМ и РТВ включаются во вторичные цепи трансформаторов тока ТА (рис. 4.2а).

С помощью вторичных реле прямого действия выполняется большинство токовых защиты в установках напряжением до 35 кВ, так они отличаются простотой выполнения и надежностью. Реле типа РТВ имеют большое потребление мощности при своем срабатывании. Поэтому реле для питания этих реле используются сердечник класса «Р» трансформаторов тока ТА.

Максимальное реле тока с ограниченно зависимой выдержкой времени (РТВ) показано на рис. 4.2б. Выдержка времени создается с помощью часового механизма и может устанавливаться в независимой части в пределах до $t_{ср} = 4$ с помощью воздействующим на часовой механизм рычагом, который в свою очередь с помощью установочной пластины связан с установочным винтом. Выдержка времени в зависимой части характеристики (рис. 4.2в) определяется уставкой времени $t_{ср}$ реле в независимой части время-токовой характеристики. Для установки тока срабатывания токовая обмотка реле имеет ответвления, выведенные на переключатель.

Подвижная система реле состоит из подвижного сердечника и ударника (рис. 4.2б). Ударник жестко связан с часовым механизмом тягой. Связь сердечника с ударником, следовательно, и с часовым механизмом осуществляется пружиной, которая одним концом соединена с сердечником, а другим упирается в стопорное кольцо ударника. В зависимости от тока в обмотке реле эта связь может быть жесткой или гибкой.

При прохождении по обмотке реле тока I_p , равного или превышающего ток срабатывания ($I_p \geq I_{с.з} = I_y$), подвижный сердечник стремится притянуться к неподвижному полюсу, увлекая за собой ударник. При токах, меньших трехкратного тока срабатывания, электромагнитная сила, действующая на

сердечник, оказывается меньше противодействующей силы пружины; пружина не сжимается и действует как жесткая связь. При этом скорости перемещения сердечника и ударника одинаковы и определяются электромагнитной силой и часовым механизмом, поэтому с увеличением тока выдержка времени реле уменьшается, образуя зависимую часть на время-токовой характеристике (рис. 4.2в).

При токах, больших трехкратного тока срабатывания, сердечник мгновенно притягивается к неподвижному полюсу и сжимает пружину. При этом скорость движения ударника вверх не зависит от электромагнитной силы и определяется только часовым механизмом. Реле работает в независимой части время-токовой характеристики.

По заводским данным, реле РТВ при работе в независимой части характеристики имеет погрешность в выдержке времени $\Delta t_{\text{ср}} = \pm 0,3$ с, которая возрастает в два-три раза при работе реле в зависимой части характеристики и при токе срабатывания ($I_p/I_{\text{с.р}} = 1$) достигает нескольких секунд (рис. 4.2в). Большие временные погрешности реле ($\pm 0,3$ с) обуславливают необходимость ступень выдержки времени принимать равной $\Delta t = 0,8$ с (рис. 4.6).

Реле РТВ имеет сравнительно низкий коэффициент возврата, который меняется в зависимости от положения сердечника в пределах $0,4 < k_v < 0,8$. В расчетах рекомендуется принимать $k_v = 0,65$.

Максимальное реле тока мгновенного действия (РТМ) конструктивно отличается от реле РТВ тем, что не имеет часового механизма. Реле изготавливают на различные токи срабатывания. Например, реле, встроенное в привод выключателя типа ПРБА, позволяет установить ток срабатывания $I_{\text{ср}} = 5 \dots 15$ А. Время срабатывания реле РТМ зависит от кратности тока. При кратностях $I_p/I_{\text{с.р}} = 2 \dots 3$ время срабатывания $t_{\text{ср}} < 0,02$ с.

Следует отметить, что как реле РТВ, так и реле РТМ имеют сложную систему установки тока срабатывания. Переключатель витков

(переключатель уставок по току) сложен по своей конструкции и мало надежен в эксплуатации. В связи с этим используются также реле типа РТМ с обмотками без ответвлений. При этом установка тока срабатывания осуществляется путем аксиального изменения положения подвижного сердечника специальным винтом. Отметим, что реле РТМ часто используется в качестве катушки отключения УАТ в защитах на переменном оперативном токе с реле косвенного действия.

Минимальное реле напряжения с ограниченно зависимой выдержкой времени (РНВ), как и реле РТВ, имеет часовой механизм и имеет обмотку, включаемую на напряжения 110 или 220 В. В нормальном режиме, когда к обмотке реле подводится номинальное напряжение, реле находится в заведенном состоянии. Его сердечник притянут. При снижении напряжения до $U_p < 0,65 \cdot U_{ном}$ сердечник под действием собственного веса начинает опускаться с некоторой выдержкой времени. Его быстрому падению препятствует часовой механизм.

Выдержка времени устанавливается, как и у реле типа РТВ, в пределах $0 < t_{ср} < 4$ с. Она позволяет отстраивать защиту от кратковременных снижений напряжения. Однако реле имеет устойчивую выдержку времени лишь при напряжении $U_p < 0,35 \cdot U_{ном}$. Недостатками реле являются также отсутствие устройства установки напряжения срабатывания и сравнительно большая потребляемая мощность ($P_{ср} \approx 30$ В-А).

Минимальное реле напряжения мгновенного действия РН не имеет часового механизма, поэтому при срабатывании реле его сердечник перемещается без замедления. У реле РН напряжения срабатывания и возврата не могут изменяться и находятся в пределах $U_{с.р} = (0,35...0,65) \cdot U_{ном}$ и $U_{в.р} = (0,65...0,85) \cdot U_{ном}$.

Вторичное токовое реле косвенного действия (серия РТ-85) и вариант выполнения токовой защиты на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнита отключения привода выключателя

Устройство индукционного токового реле. Реле тока типа РТ-80 является комбинированным и состоит из двух элементов: индукционного с диском, создающего ограниченно зависимую характеристику выдержки времени, и электромагнитного мгновенного действия (отсечки). Схематический вид реле представлен на рис. 4.3а.

Индукционный элемент состоит из электромагнита 1 с короткозамкнутыми витками 2 на полюсах. Между полюсами магнита расположен алюминиевый диск 3, ось которого укреплена на подвижной рамке 4. При токах в обмотке реле, меньших тока срабатывания, рамка 4 оттянута пружиной 5 в крайнее положение, при этом червяк 7, насаженный на ось диска, не сцеплен с зубчатым сегментом 8.

При прохождении тока по обмотке реле в зазоре между полюсами создаются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , сдвинутые по фазе на некоторый угол ψ благодаря наличию короткозамкнутых витков на части магнитопровода. Потоки Φ_1 и Φ_2 , взаимодействия с токами I_1 и I_2 , индуцированными в диске, создают вращающий момент $M_{вр} = k_1 \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \psi$. Так как при отсутствии насыщения потоки Φ_1 и Φ_2 пропорциональны току, проходящему через обмотку реле, а угол ψ постоянен, то $M_{вр} = k \cdot I^2$.

Диск приходит во вращение при токе, равном 10—20% от тока срабатывания, но вращение диска не приводит к замыканию контактов 12, так как рамка 4 оттянута пружиной 5.

На вращающийся диск действуют две силы (рис. 4.3б): F_1 , создаваемая магнитной системой, и F_2 , создаваемая постоянным магнитом 6. Эти силы стремятся повернуть диск 3 вместе с рамкой 4 по часовой стрелке. Но этому препятствует пружина 5.

При увеличении тока в обмотке реле возрастает вращающий момент, действующий на диск, вследствие чего увеличиваются силы F_1 и F_2 . Когда равнодействующая этих сил станет больше силы пружины, диск вместе с

рамкой повернется по часовой стрелке и произойдет сцепление червяка с зубчатым сегментом.

Током срабатывания $I_{\text{ср}}$ индукционного элемента называют минимальный ток, при котором равнодействующая сил F_1 и F_2 преодолевает силу пружины 5, рамка 4 поворачивается и сегмент входит в зацепление с червяком 7.

Благодаря вращению диска сегмент поднимается и, дойдя до коромысла 9, приподнимает его и приближает якорь 10 к электромагниту 1. Якорь при этом притягивается к электромагниту, замыкая контакты 12.

При уменьшении тока в обмотке реле пружина 5 преодолевает равнодействующую сил F_1 и F_2 благодаря чему рамка поворачивается против часовой стрелки и сегмент выходит из зацепления с червяком.

Током возврата называют максимальное значение тока в обмотке реле, при котором сегмент выходит из зацепления с червяком.

Отношение тока возврата к току срабатывания называется коэффициентом возврата $k_{\text{в}} = I_{\text{в}} / I_{\text{ср}}$. Коэффициент возврата для рассматриваемого реле (индукционного элемента) должен быть не ниже 0,8.

Ток срабатывания индукционного элемента регулируют изменением числа витков обмотки, имеющей отпайки, выведенные на контактную колодку 14. Уставку времени срабатывания индукционного элемента регулируют по шкале 15 изменением пути, который проходит сегмент до встречи с рычагом 9. На шкале указаны уставки по времени t_y равные времени срабатывания реле при $I_p = 10 \cdot I_{\text{ср}}$, т. е. в независимой части характеристики. Время от момента сцепления червяка с зубчатым сегментом до момента замыкания контактов является временем срабатывания реле, его выдержкой времени. Это время при заданной уставке зависит от скорости подъема сегмента вверх, которая определяется скоростью вращения диска. Таким образом, создается логический элемент “*время*” без использования часового механизма.

При отсутствии насыщения магнитной системы, чем больше ток, тем больше скорость и меньше выдержка времени реле.

Магнитная система реле выполнена так, что примерно при шестикратном токе срабатывания она насыщается. Дальнейшее увеличение тока не приводит к увеличению магнитного потока, поэтому остается постоянным вращающий момент, скорость вращения диска и выдержка времени. Согласно принятой терминологии индукционное реле имеет ограниченно-зависимую характеристику выдержки времени. Примерная зависимость времени срабатывания реле от тока приведена на рис. 4.4в (при выведенной отсечки). Отметим, что на зависимой части характеристики при заданном числе оборотов диска выдержка времени примерно обратно пропорциональна квадрату тока, протекающего через токовую обмотку реле.

Якорь 10 с электромагнитом 1 образует электромагнитный элемент реле -отсечку, который обеспечивает срабатывание реле практически без выдержки времени (рис. 4.4б); $t_{отс}$ находится в пределах от 0,05 до 0,08 с). Этот якорь находится в магнитных полях рассеяния, создаваемых основным электромагнитом 1 реле. При токах, превышающих некоторое определенное значение, правый конец якоря 10 в результате воздействия магнитных полей рассеяния притягивается к сердечнику электромагнита 1 без участия червячной передачи и упор 11, поднимаясь вверх, замыкает контакты 12.

Величину тока, при которой отсечка приходит в действие, регулируют изменением величины воздушного зазора между правым концом якоря 10 и электромагнитом. Величина, зазора регулируется винтом 13. Уставка отсечки (кратность тока отсечки $k_{отс}$) выражается кратностью по отношению к уставке индукционного элемента и указана на ободке винта 11. Кратность тока срабатывания отсечки устанавливается в пределах 2...8.

Потребляемая мощность – не более 10 ВА при токе, равном току срабатывания индукционного элемента.

Примерный вид времятоковой характеристики реле с введенной отсечкой приведен на рис. 4.4б (сплошная линия).

Технические данные реле РТ-80.

Существует 12 модификаций реле серии РТ-80. Каждая из них выпускается в двух исполнениях: для выступающего монтажа с передним и задним присоединением и для утопленного монтажа. Кроме того, реле выпускаются в различных климатических исполнениях и в зависимости от условий работы - по категориям.

В обозначении реле цифра за дробной чертой указывает на диапазон уставок по току: 1 – диапазон уставок 4 – 10 А со ступенью 1 А; 2 – диапазон уставок 2 – 5 А со ступенью 0,5 А.

Схемы внутренних соединений реле серии РТ-80 и РТ-90 приведены на рис. 4.3з.

Реле типов РТ-81 – РТ-84 без переключающихся контактов (рис. 4.3з) предназначены для объектов, имеющих источник постоянного или выпрямленного оперативного напряжения (аккумуляторная батарея, блоки питания). Эти реле снабжены замыкающими контактами нормального исполнения, способными включать при замыкании ток до 5 А при напряжении до 250 В. Такая коммутационная способность достаточна для непосредственного замыкания цепи отключения выключателя. Однако размыкание цепи должно производиться вспомогательным контактом выключателя.

Реле типов РТ-81/1 и РТ-81/2 предназначены для защиты питающих и распределительных линий в сетях 6–35 кВ, а также для защиты трансформаторов. Реле имеют четырехзаходный червяк, которому соответствует шкала уставок по времени 0,5 – 4 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-82/1 и РТ-82/2 предназначены для защиты электродвигателей от междуфазных и витковых замыканий с действием без выдержки времени на отключение (отсечка) и для защиты от перегрузки, действующей с выдержкой времени также на отключение. В отличие от реле РТ-81 они имеют однозаходный червяк и

соответственную шкалу уставок по времени 2 – 16 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-83/1 и РТ-83/2 предназначены для защиты линий и трансформаторов, причем защита от междуфазных КЗ (отсечка) действует на отключение, а защита от перегрузки – с выдержкой времени на сигнал. Конструктивная особенность этих реле заключается в отсутствии механической связи между индукционным и электромагнитным элементами, т. е. в отсутствии толкателя. Сигнальные контакты, имеющиеся в реле, управляются хвостовиком зубчатого сектора, замыкаясь при его подъеме. Таким образом, электромагнитный элемент воздействует на главные контакты и сигнальный флажок, а индукционный – на сигнальные контакты. Замыкающие сигнальные контакты способны замыкать и размыкать цепь постоянного или выпрямленного тока до 0,2 А или переменного тока до 1 А при напряжении до 250 В. Так как часть хода зубчатого сектора тратится на перемещение сигнального контакта, шкала выдержек времени сокращена на одну минимальную уставку.

Аналогичную конструкцию контактной системы имеют реле типов РТ-84/1 и РТ-84/2. С их помощью выполняется защита электродвигателей от междуфазных и витковых замыканий (отсечка) с действием на отключение, а от перегрузки с действием на сигнал или технологическую разгрузку. Реле имеют пределы уставок по времени 4 – 16 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-85, РТ-86 используются в схемах защиты на переменном оперативном токе (рис. 4.4д, е).

Конструкция контактов усиленной мощности (главные контакты) и принцип их работы поясняются на рис. 4.3в. Эти контакты способны шунтировать и дешунтировать управляемую цепь (токовую катушку отключения УАТ выключателя) при токах до 150 А, если она питается от трансформатора тока ее полное сопротивление при токе 4 А не более 4 Ом, а токе 50 А не более 1,5 Ом. Отметим, что сопротивление катушки с

сердечником падает при возрастании тока из-за насыщения железа (рис. 4.4з).

Главные контакты реле типов РТ-85 и РТ-86 способны шунтировать и дешунтировать управляемую цепь при токах до 150 А, если она питается от трансформаторов тока и ее полное сопротивление при токе 4 А не более 4 Ом, а при токе 50 А не более 1,5 Ом.

Сигнальные контакты реле типов РТ-83, РТ-84 и РТ-86 могут замыкать и размыкать цепи постоянного тока до 0,3 А и переменного тока до 1 А при напряжении до 250 В.

Реле типов РТ-86/1 и РТ-86/2 (рис. 4.3з), предназначенные для защиты электродвигателей, имеют контакты усиленной мощности, управляемые только якорем отсечки, и сигнальные контакты, управляемые индукционным элементом. В этом они аналогичны реле РТ-84 и имеют такую же шкалу уставок.

Пределы шкалы уставок по току зависят от индекса в обозначении реле (1 – соответствует шкале по току 4-10 А при ступени в 1 А, 2 – соответствует шкале по току 2-5 А при ступени в 0,5 А).

Потребляемая мощность реле РТ-80 и РТ-90 при токе уставки – не более 10 В·А. После срабатывания отсечки потребляемая мощность увеличивается на 15%. Коэффициент возврата реле (*индукционного элемента*) – не менее 0,8. Переход время-токовой характеристики в независимую часть происходит при 8 – 10-кратном токе.

Инерция вращающегося диска послужила причиной двух нежелательных явлений: инерционного выбега, упомянутого ранее, и замедленного возврата. Инерционный выбег практически не зависит от тока и составляет около 40 мс. Время возврата реле при снижении тока с $5 \cdot I_{уст}$ до $0,7 \cdot I_{уст}$ не превышает 0,8 с.

Для защиты асинхронных двигателей большой мощности с тяжелым пуском (пусковые токи имеют большую кратность и длительное затухание)

разработаны реле серии РТ-90. Для отстройки защиты от пусковых токов возникла необходимость более раннего перехода характеристики в независимую часть. Эта задачи решена соответствующими конструктивными решениями этих реле.

Реле серии РТ-90 имеют четыре типоразмера. Реле типов РТ-91/1 и РТ-91/2 снабжены контактами нормального исполнения, а типов РТ-95/1 и РТ-95/2 - усиленными дешунтирующими контактами.

На рис. 4.4в приведены времятоковые характеристики реле РТ-81, РТ-83 и РТ-85, а на рис. 4.4б – кривая зависимости полного сопротивления обмотки реле РТ-85/2 от кратности тока для тока уставки в 2 А. Увеличение тока, протекающего через токовую обмотку КА реле приводит к насыщению магнитопровода, вследствие этого уменьшается индуктивность обмотки.

Статическое реле максимального тока типа РСТ-80 (рис. 4.5)

Реле реализовано на основе полупроводниковой техники и предназначено для применения в устройствах защиты и автоматики; является функциональным аналогом электромеханических реле РТ-80, 90.

Реле обеспечивает:

- токовую отсечку с выдержкой времени 70-100 мс или 150-200 мс;
- возможность блокировки токовой отсечки;
- МТЗ с характеристиками вида, приведенного на рис. 4.5в.

Реле обладает относительной погрешностью выдержки времени в $\pm 10\%$ в рабочем диапазоне температур (от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$); разброс тока срабатывания $\pm 1,5\%$; коэффициент возврата реле от 0,85 до 0,95.

Потребляемая мощность на минимальной уставке 1,5 ВА.

Реле выпускается пяти модификаций: РС80М-1 ... РС80М-5. Имеются и другие модификации, например РСТ-80АВ, которое обеспечивает создание защит как с зависимой, так и независимой выдержками времени.

Выходы реле способны шунтировать и дешунтировать управляемую цепь при токах до 150 А, если управляемая цепь питается от трансформатора тока и его импеданс при токе 4 А составляет не более 4 Ом, а при токе 50 А – не более 1,5 Ом.

Максимальная токовая защита с зависимой характеристикой времени срабатывания на электромеханическом реле РТ-85

В индукционном реле объединены: измерительный орган, логическая часть, включающая элемент времени, исполнительный орган и сигнальный элемент. Можно считать, что оно представляет полукomплект либо полный комплект двухступенчатой максимальной токовой защиты (токовую отсечку и МТЗ).

Реле нашло широкое применение в сетях 6-35 кВ для защиты питающих и распределительных линий, а также для защиты трансформаторов. Защита двигателей напряжением выше 1 кВ в большинстве случаев выполнялась с помощью индукционных реле.

Это обусловлено, прежде всего, обратной зависимостью времени срабатывания от тока. Такой же характер зависимости существует у предохранителей и расцепителей автоматических выключателей, которые обычно являются предыдущими защитами, т. е. расположенными дальше от источника питания. Это позволяет выполнить селективную защиту, имеющую достаточную чувствительность. Как уже отмечалось, в дополнение к индукционному элементу реле снабжено электромагнитным элементом – мгновенно действующей отсечкой.

На рис. 4.4д приведен вариант принципиальной схемы двухфазной двухрелейной максимальной токовой защиты на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнитов отключения YAT1 и YAT2 с помощью двух реле типа РТ-85 (КА1, КА2). Эта схема применяется для защиты в сетях 6-35 кВ, силовых трансформаторах.

Для защиты высоковольтных двигателей находит применение схема однорелейной максимальной токовой защиты с одним реле типа РТ-85 или

РТ-95 (рис. 4.4е), токовая обмотка КА которого включена на разность вторичных токов двух фаз трансформаторов тока ТА1 и ТА2.

В качестве катушек отключения УАТ используется максимальное реле тока мгновенного действия РТМ, которое является электромагнитным реле прямого действия. Реле РТМ поставляется вместе с приводом выключателя. Отметим, что наиболее распространенными являются приводы типов ПП-67 (в эксплуатации можно встретить приводы типа ПП-61) и привод, встроенный в выключатель типа ВМПП-10.

Так как реле РТМ в рассматриваемой защите используется совместно с реле РТ-85, то ток срабатывания РТМ выбирают минимальны, т. е. 5 А (используют реле типа РТМ-I). Отметим, что реле РТМ выпускаются четырех модификаций - I, II, III и IV с уставками по току срабатывания по отпайкам соответственно (5-15 А, 10-25 А, 30-60 А и 75-150 А).

Работа схем на рис. 4.4д, е основана на том, что при возникновении короткого замыкания на поврежденном объекте и после соответствующей отработки реле КА, его контакты дешунтируют катушку УАТ (рис. 4.3в). Через нее проходит ток I_p , УАТ (РТМ) срабатывает и отключает выключатель.

$$I_{сз} = \frac{k_{омс} \cdot k_{зан} \cdot k_{сх}^{(3)}}{k_{\epsilon}} \cdot I_{раб. max} \quad (4.1)$$

Ток срабатывания МТЗ выбирается по выражению

$k_{омс}$ — коэффициент надежности отстройки, учитывающий погрешность работы реле и необходимый запас; для реле серии РТ-80 принимается $k_{омс} = 1,2$.

Для нагрузок жилищно-коммунального (бытового) сектора, для большинства нагрузок в сельской местности, где преобладают осветительные и электронагревательные устройства, коэффициент самозапуска нагрузки $k_{зан}$ может приниматься в пределах 1,2-1,5. Отметим, что при наличии большой двигательной нагрузки этот коэффициент может доходить до 5.

$k_{\text{в}}$ – коэффициент возврата реле. Для реле РТ-80 принимается равным 0,8.

$I_{\text{раб.маx}}$ – максимальный ток нагрузки.

$k_{\text{сх}}^{(3)}$ – коэффициент схемы, характеризующий схему соединения вторичных обмоток трансформаторов тока ТА и токовых обмоток реле КА для трехфазного режима. Для схемы на рис. 4.4д он равен 1,0, а для схемы на рис. 4.4е – 1,73.

Выбор уставки выдержки времени t_y реле серии РТ-80, входящий в комплект защиты АК, выполняется расчетом с использованием карты селективности. Обычно карта селективности строится в координатах $t_{\text{с.з}} = f(I_{\text{перв}})$, где первичный ток $I_{\text{перв}}$ – ток, протекающий через токовую обмотку реле, приведенный к первичной обмотке ТА, т. е. с учетом коэффициента трансформации трансформатора тока ТА и схемы соединения вторичных токовых цепей защиты. Это объясняется тем, что в реальных условиях защиту линии приходится согласовывать с время токовыми характеристиками высоковольтных предохранителей (ПК на рис. 4.6), которыми защищаются потребительские силовые трансформаторы Т напряжением 6–10/0,4 кВ.

На рис. 4.6 для наглядности карта селективности построена в координатах удаленности точки КЗ от источника питания, т. е. $t_{\text{с.з}} = f(\ell_{\text{в.кз}})$. Там же приведены качественные зависимости изменения тока трех- и двухфазного КЗ по мере удаления точки КЗ от начала линии.

Если на линии W_A ввести отсечку с кратностью, равной двум, то в режиме трехфазного КЗ она будет работать при металлическом КЗ в пределах зоны, длиной $\ell_{\text{отс}}$. Считается, что отсечку целесообразно предусматривать в том случае, если имеет место соотношение $\ell_{\text{отс}} \geq \ell_{W_A}$,

При согласовании действия защит по времени и в конечном итоге выставляемых на индукционных реле уставок по времени используется

ступень времени Δt , которая должна учитываться в точках согласования по времени времятоковых характеристик индукционных реле тока соответствующих комплектов защиты АК. В случае применения индукционных реле ступень выдержки времени принимается равной $\Delta t = 0,6 \dots 0,7$ с.

Более подробно методику выбору уставок по току и времени при согласовании действия защит с зависимыми выдержками времени следует изучить по учебной литературе.

Максимальная токовая защита с независимой характеристикой времени срабатывания на переменном оперативном токе (с дешунтированием катушки отключения YAT)

На рис. 4.7а приведена однолинейная схема имитационной лабораторной модели высоковольтной линии с выключателем Q, управляемого приводом выключателя. Линия кнопками управления “Вкл” и “Отк” имитатора выключателя Q может условно быть включена под нагрузку или отключена. Токовая катушка отключения YAT в имитационной модели имитирует работу мгновенного реле тока типа РТМ (но с током срабатывания около 2 А), встраиваемого в привод выключателя. Положение выключателя контролируется блок-контактами привода Q.1, Q.2 и Q.3.

На рис. 4.7б–д приведена одноступенчатая максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени, выполняемая на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнитов отключения привода выключателя. Схема приведена для фазы А. На лабораторном стенде собирается эта схема. С полной схемой защиты (в двухфазном исполнении) смотрите в учебной литературе.

Схема включает (рис. 4.7):

- измерительное максимальное реле тока КА типа РТ-40 (электромагнитическое реле тока);
- реле времени КТ максимальной токовой защиты типа РВМ-13;

– промежуточное реле KL типа РП-341, имеющее специальные усиленные контакты, предназначенные для дешунтирования электромагнита отключения YAT (работа контактов реле $KL_{(4-2,6)}$ аналогична работе таких же контактов реле типа РТ-85);

– сигнальное (указательное) реле КН типа РУ-21.

Работу логической части и исполнительных органов защиты, выполненной по схеме рис. 4.7б–д, рассмотрим на примере короткого замыкания, когда должно сработать реле КА. После своего срабатывания оно замыкает свои контакты $KA_{(5-7)}$ (рис. 4.7з) и подключит обмотку w микромоторчика реле времени КТ к вторичной обмотке TL1 быстронасыщающегося промежуточного трансформатора тока реле КТ, у которого первичная обмотка $TL1_{(1-7)}$ (рис. 4.7б) включена на вторичный ток фазы А – I_{pA} . Микромоторчик начнет вращаться и приведет в действие механизм создания выдержки времени (рис. 4.7б). Реле времени с заранее заданной выдержкой времени замыкает свой контакт $KT_{(15-16)}$ и подключает катушку промежуточного реле KL через выпрямитель VS к вторичной обмотке быстронасыщающегося промежуточного трансформатора TL, первичная обмотка $TL_{(8-12)}$ которого включена на ток фазы А. Срабатывает промежуточное реле KL и переключает свои контакты $KL_{(4-6)}$ на $KL_{(4-12)}$. Электромагнит YAT дешунтируется, через него начинает протекать ток I_{pA} . Выключатель Q под воздействием YAT отключается. Отметим, что при срабатывании реле KL замыкается его контакт KL.1. Это обеспечивает самоудержание реле KL в сработавшем положении при размыкании контакта $KT_{(15-16)}$ реле времени раньше, чем произойдет отключение выключателя Q поврежденной линии.

Отметим, что когда замыкается контакт $KT_{(15-16)}$ от импульса тока срабатывает указательное реле КН. Его контакты $KN_{(3-5)}$ и $KN_{(4-6)}$ формируют световую и звуковую сигнализацию о срабатывании защиты.

Особенности построения схемы в двухфазном исполнении и ее работу изучите по литературе.

Защита от перегрузки на переменном оперативном токе

Вариант схемы защиты приведен на рис. 4.7е-ж. Так как при перегрузке переменное напряжение, например, на подстанции имеется, то в качестве оперативного напряжения можно использовать, например, вторичное напряжение от трансформатора собственных нужд подстанции (220 В) или от трансформаторов напряжения (100 В).

Так как перегрузка является симметричным режимом, то для контроля тока в линии достаточно устанавливать одно токовое реле (КА на рис. 4.7е).

На лабораторном стенде его токовая обмотка включена на ток фазы А. На практике обмотка токового реле от перегрузки обычно включается на ток фазы В.

Через нормально замкнутые контакты КА₍₉₋₁₁₎ запитывается обмотка реле времени КТ₍₉₋₁₀₎.

В качестве реле времени используется реле переменного напряжения типа ЭВ-235 (РВ-235). У этого реле в нормальном режиме электромагнит находится под напряжением, якорь реле втянут, а при исчезновении напряжения якорь отпадает и начинает работать часовой механизм. Реле имеет плавное регулирование времени срабатывания в диапазоне от 0,5 до 9 с. Реле имеет один проскальзывающий и один конечный замыкающие контакты с регулируемой выдержкой времени, а также один мгновенный переключающий контакт. Рассматриваемое реле времени на переменном токе являются термически стойкими, т.е. оно может длительно находиться под напряжением, на 10% превышающим номинальное напряжение.

При превышении тока I_{pa} уставки токового реле КА его контакт КА₍₉₋₁₁₎ размыкаются, обмотка КТ₍₉₋₁₀₎ теряет питание и часовой механизм реле времени запускается в работу. По истечении уставки по времени контакты КТ₍₅₋₇₎ замыкаются и на обмотку промежуточного реле КЛ₍₁₁₋₁₂₎ подается напряжение. Реле срабатывает и своими контактами КЛ₍₃₋₄₎ подает

напряжение на обмотку указательного реле $KH_{(1-2)}$. Указательное реле срабатывает.

Контакты $KH_{(3-5)}$ и $KH_{(4-6)}$ формируют соответствующие сигналы для оперативного персонала подстанции (рис. 4.7з).

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- специальная панель с расположенными на ней реле, используемыми для выполнения защит на переменном оперативном токе;
- источник регулируемого напряжения и тока;
- приборы: цифровые клещи, амперметры, вольтметры, прибор ВАФ-85М.

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

1. Испытание индукционного реле тока типа РТ-80

Определение токов срабатывания и возврата реле (электросекундомер не подключается!).

На шкале токов устанавливают минимальное значение тока уставки индукционного элемента, отсечку из действия выводят установкой винта 11 (рис. 4.3а) в положение, создающее максимальный зазор. Значение уставки по шкале времени принимают максимальное.

Движок реостата R источника питания устанавливают в крайнее положение, соответствующее нулевому значению тока. Подают напряжение на схему реостатом и изменение регулировок источника питания увеличивают ток в реле до величины, при которой диск вместе с рамкой повернется по часовой стрелке и произойдет сцепление червяка с зубчатым сегментом.

Для того, чтобы определить минимальное значение тока, при котором произойдет указанное взаимодействие элементов реле, необходимо непрерывное визуальное наблюдение за работой реле. Полученное минимальное значение тока принимается за ток срабатывания реле.

Для определения тока возврата сначала несколько увеличивают ток, а затем начинают плавно уменьшать до величины, при которой диск вместе с рамкой повернется против часовой стрелки и червяк выйдет из зацепления с сегментом.

Повторив опыт дважды и сняв напряжение, устанавливают следующее значение I_y по шкале тока и продолжают испытание реле.

Результаты испытания заносят в табл. 2.

Таблица 2

I_y, A	I_{cp}, A			$I_{в}, A$			$K_{в}$	$\Delta I_{cp}, \%$
	1-ое изме- рение	2-ое изме- рение	Среднее значе- ние	1-ое изме- рение	2-ое изме- рение	Среднее значе- ние		

По результатам опыта вычисляют коэффициент возврата $k_{в} = I_{в} / I_{cp}$, токовую погрешность $\Delta I_{cp} = 100 \cdot (I_{cp} - I_y) / I_y$ (%) и строят графики $I_{cp} = f(I_y)$; $k_{в} = f(I_y)$; $\Delta I_{cp} = f(I_y)$.

Снятие зависимости $t_{cp} = f(k)$

В схеме испытаний подключить электросекундомер ЭС (рис. 4.9). Питание на электросекундомер подается от специальных выделенных для этого на стенде зажимов. Обмотка секундомера шунтируется нормально разомкнутыми контактами испытуемого реле, время срабатывания которого необходимо определить.

На стенде установлено индукционное реле тока, в котором встроен дополнительный контакт $КА_{доп}$. Этим контактом и рекомендуется шунтировать обмотку секундомера.

Отметим, что в условиях эксплуатации при настройке индукционного реле используют его замыкающиеся контакты.

Временем срабатывания реле $t_{ср}$ называется промежуток времени с момента подачи на реле тока, равного или большего $I_{ср}$, до момента замыкания контактов; кратность отсечки – это $k_{отс} = I_p / I_y$ - отношение тока в реле к току уставки.

По заданию преподавателя устанавливают значение уставок по току и времени. В реле подается ток, равный $I_p = 1,1 \cdot I_y$, и определяется время срабатывания. Затем устанавливают ток, равный $1,5 \cdot I_y$, $2 \cdot I_y$, и т. д. (*предельное значение указывается преподавателем*), и при каждом значении тока определяют время срабатывания реле.

Результаты измерений записывают в табл. 3.

Таблица 3

Уставка			Ток в реле	k	$t_{ср}$		
t_y	I_y, A	$k_{отс}$			1-ое из- мерение	2-ое из- мерение	Среднее значение

Ввести отсечку (по заданию преподавателя устанавливают кратность отсечки или ток срабатывания отсечки).

Снять характеристику $t_{ср} = f(k)$.

Результаты измерений занести в табл. 3.

По результатам опытов строят зависимость $t_{ср} = f(k)$ при $I_y = const$ при выведенной и введенной отсечке.

2. Испытание схемы защиты на переменном оперативном токе с независимой выдержкой времени срабатывания (рис. 4.7)

Испытание схемы защиты включает два этапа. Первый связан с определением некоторых параметров входящих в схему реле с настройкой их на заданные параметры. Второй этап состоит в проверке работы собранной полной схемы защиты под током с проверкой полного времени отключения защитой выключателя Q. Собранная схема защиты проверяется вторичным током. Исследуемая схема защиты собирается путем вставки или в разъем с обозначением «Сх. 1» или «Сх. 2» съемного штекерного разъема.

3. Проверка реле, входящих в схему максимальной токовой защиты на переменном оперативном токе с независимой выдержкой времени.

Убедиться, что в разъемах «Сх. 1» или «Сх. 2» отсутствует съемный штекерный разъем. При отсутствии съемного разъема каждое из участвующих в схеме реле можно рассматривать как самостоятельное и его можно исследовать независимо от других. Для этого на стенде приведены схемы реле с возможностью присоединения к их зажимам схем испытания.

Ток уставки токового реле КА (реле типа РТ-40) задается преподавателем.

Проверка времени срабатывания реле времени КТ (РВМ-13 на схеме рис. 4.7в)

У реле РВМ-13 (рис. 4.8в) имеется две токовые обмотки, каждая состоящая из двух полуобмоток.

Отметим, что в полной схеме МТЗ одна полуобмотка КТ₍₁₋₇₎ этого реле включается на ток фазы А, а другая КТ₍₂₋₈₎ – на ток фазы С (рис. 6б). На стенде задействована токовая обмотка КТ₍₁₋₇₎, полуобмотки которой соединены последовательно (рис. 4.7в установлена перемычка между зажимами 3–5, уставка по току реле КТ – 2,5 А).

Подсоединить обмотку КТ₍₁₋₇₎ к нагрузочному устройству. Перемычкой замкнуть между собой клеммы реле КТ₍₉₋₁₁₎.

На шкале основных контактов реле времени выставить уставку по времени t_y согласно указанию преподавателя. Схема определения времени срабатывания реле аналогична схеме рис. 4.9.

Контакты реле $КТ_{(15-16)}$ подсоедините параллельно рабочей обмотке секундомера. Соответствующим тумблером отключите секундомер от напряжения.

Плавно увеличивая ток в токовой обмотке реле, убедитесь, что микродвигатель реле начал работать и привел к вращению поворотной контактной рамки реле. Зафиксируйте значение этого тока.

Проверьте время срабатывания реле времени, устанавливая следующие значения тока в обмотке реле: 2,5 А; 5 А и 7 А.

Время работы для каждого тока определите по два-три раза и запишите среднее значение каждого измерения.

Уменьшить ток до нуля и отключить нагрузочное устройство.

По полученным данным постройте график $t_{cp} = f(I)$. На основе полученного графика сделайте заключение об особенностях работы реле.

Определите среднее значение времени работы реле $t_{(cp)}$ на заданной уставке времени t_y для рассматриваемого диапазона токов.

Проверка работы промежуточного реле KL (РП-341 на рис. 4.7б)

Схема внутренних соединений реле типа РП-341 приведена на рис. 4.8а. Первичная токовая обмотка, состоящая из двух полуобмоток с выводами 8 – 12 и 10 – 14, расположена на сердечнике быстро насыщающегося трансформатора ТЛ. Эти обмотки могут быть соединены последовательно или параллельно на ток соответственно 2,5 А и 5 А. Вторичная обмотка трансформатора ТЛ через выпрямитель VS питает обмотку w промежуточного реле постоянного тока, входящего в конструкцию реле РП-341. При наличии тока в первичной обмотке трансформатора ТЛ реле и замыкании выходных зажимов 11 – 13 реле РП-341 происходит срабатывание промежуточного реле постоянного тока с обмоткой w . Происходит переключение вспомогательных контактов KL.1 и

силовых контактов KL.2 реле РП-341. Силовые контакты способны коммутировать ток до 150 А.

На стенде токовые полуобмотки соединены последовательно.

Выполнение эксперимента. Подсоедините токовую обмотку реле KL₍₈₋₁₄₎ к нагрузочному устройству. Перемычкой замкните между собой клеммы реле KL₍₁₁₋₁₃₎.

Контакты реле KL₍₄₋₂₎ подсоедините параллельно рабочей обмотке секундомера. С секундомера соответствующим тумблером снимите напряжение.

От нагрузочного устройства подайте ток в обмотку реле и, плавно его увеличивая, зафиксируйте момент надежного переключения и замыкания его силовых контактов KL₍₄₋₂₎ и размыкания KL₍₄₋₆₎.

Проверьте надежность работы реле при подачи в его обмотку полученного значения тока толчком. Если необходимо, то увеличьте ток до величины, при котором работа реле будет надежной.

Установите в токовой обмотке реле ток на 20-30% больше полученного тока срабатывания реле.

Подключите к напряжению секундомер и путем подачи на схему испытания напряжения определите среднее значение времени срабатывания $t_{ср}$ реле KL на основе двух-трех измерений.

Запишите это время.

Уменьшить ток до нуля и отключить нагрузочное устройство.

Отсоедините все внешние перемычки, идущие к реле.

4. Испытание полной схемы защиты на переменном оперативном токе с независимой выдержкой времени срабатывания (рис. 4.7)

Эксперимент выполняется под наблюдением преподавателя.

Вставьте в разъем “Сх.1” на стенде съемный штекерный разъем. В результате будет собрана схема защиты, приведенная по рис. 4.7б–д.

Работа защиты проверяется вторичным током. Для этого нагрузочное устройство подключите к вторичным зажимам трансформатора тока ТА (рис. 4.6а).

Для измерения полного времени срабатывания защиты с учетом времени работы выключателя Q (его имитатора) блок-контакта привода выключателя $Q_{(5-7)}$ подключите параллельно обмотке секундомера.

Используя нагрузочное устройство, установите во вторичной токовой цепи защита ток, соответствующий 1,5-кратному значению тока уставки, выставленному на реле КА. По мере увеличения тока должно сработать реле КА и запустить защиту в работу. Проследите за последовательностью работы реле, входящих в схему защиты. После срабатывания реле КЛ должно сработать указательное реле КН и загореться световая индикация о срабатывании защиты.

После установления требуемого значения тока снимите напряжение с нагрузочного устройства не изменяя положения регулировочного ЛАТРа.

С помощью поворотной кнопки на реле КН уберите световую индикацию о срабатывании защиты.

Кнопкой «**Вкл**» на стенде включите имитатор выключателя Q. Должна загореться красная световая индикация, свидетельствующая о нахождении выключателя Q во включенном положении.

Подайте на секундомер напряжение.

Включите нагрузочное устройство. Должна запустить защита и после отработки всех реле, входящих в схему защиты, должен пройти импульс тока через имитатор обмотки отключения YAT выключателя.

Выключатель Q отключается (загорается зеленая световая индикация HLG).

Блок-контакты $Q2_{(5-7)}$ останавливают работу секундомера.

Запишите показание секундомера.

Опыт с полной схемой защиты повторить два-три раза.

Получите среднее время срабатывания защиты.

Увеличьте ток в два, затем в три раза и для каждого тока запишите время работы защиты в полной схеме.

Убедитесь, что время работы защиты практически не зависит от тока, протекающего через токовые обмотки реле.

Полученное среднее время отключения выключателя Q сопоставьте с суммой средних времен срабатывания, входящих в схему защиты и полученных ранее.

Уменьшить ток до нуля и отключить нагрузочное устройство.

5. Проверка работа схемы защиты от перегрузки (рис. 4.7е–з)

Отключите секундомер от схемы испытания.

Переставьте съемный штекерный разъем с разъема «Сх. 1» в разъем «Сх. 2». Этим будет подано переменное оперативное напряжение на схему защиты от перегрузки (220 В на шинки 1ШУ и 2ШУ и шинки 1ШС и 2ШС на рис. 4.6ж. з).

Под руководством преподавателя разберитесь с взаимодействием входящих в схему реле.

Выставьте уставки по току и времени срабатывания защиты.

Проверьте взаимодействие входящих в схему реле после срабатывания токового реле КА либо от тока в его токовой обмотке либо при имитации его срабатывания (вариант указывает преподаватель).

Снимите все напряжения и разберите схемы испытаний.

6. Обработка экспериментальных данных

На основе выполненных экспериментов для всех пунктов, где это необходимо, согласно приведенным выше теоретическим выкладкам выполнить необходимые расчеты и оформить их согласно приведенным далее требованиям.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

6. Название и цель работы.
7. Используемые в экспериментах схемы.
8. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
9. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
10. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Какие источники энергии используются в качестве источников питания на переменном оперативном токе и в каких случаях каждый из них предпочтительно применять и почему?
2. Что понимается под блоком питания, какие варианты их выполнения и в каких случаях их целесообразно использовать.
3. Какие особенности имеются при организации питания цепей управления выключателями?
4. Какие реле используются в токовой защите с использованием реле прямого действия и нарисуйте схему защиты?
5. Какие имеются особенности у вторичных реле прямого действия? Как создается уставка реле по току и по времени? Какая время-токовая зависимость у реле РТВ?
6. Опишите конструкцию реле серии РТ-80? За счет чего создается выдержка времени у этих реле? Каким образом регулируется уставка срабатывания отсечки у этого реле?
7. Какая защита будет обеспечивать большую чувствительность – на реле РТВ или реле РТ-80 и почему?

8. Сопоставьте технические параметры реле РТВ и реле РТ-80.
9. Что означает такое словосочетание – защита с дешунтированием катушки отключения?. В каких реле защиты используется этот принцип? Приведите схему и поясните ее работу при различных видах КЗ (рассматривать сеть с изолированной нейтралью)
10. Предположим, что защита АК на линии WA (рис. 4.6a) выполнена на постоянном оперативном токе с независимой выдержкой времени, тогда поясните как она должна быть отстроена по времени от защит линии WB? В чем преимущество использования защит с зависимой выдержкой времени?
11. На рис. 4.6б приведена карта селективности. Эта карта построена в координатах для тока на стороне напряжения 35 кВ или 10 кВ?
12. Согласно приведенной на рис. 4.6б карте селективности на каких принципа могут быть выполнены защиты линий АК1 и АК2? Как изменится карта селективности (уставки по времени), если защиту АК2 выполнить с токозависимой временной характеристикой?
13. На какой из защит вы бы могли ввести отсечку (рис. 4.6б)?
14. Поясните работу реле типа РТВ. В чем плюсы и минусы использования в качестве реле защиты реле типов РТВ и РТМ?
15. Поясните принцип работы реле РТ-80? Как выставляются уставки на реле?
16. Поясните принцип работы реле РП-341 и в каких защитах это реле используется?
Поясните работу этого реле, используя схему на рис. 4.7.
17. Поясните принцип работы реле типа РВМ-13 и в каких защитах это реле используется? Поясните работу этого реле, используя схему на рис. 4.7.
18. Какова коммутационная способность переключающих контактов известных вам реле и используемых в защитах на переменном оперативном токе?

19. Какие аналоги электромеханическим измерительным органам тока и времени вам известны и какие задачи они решают при создании соответствующих релейных защит?

Литература:

Основная [1, 2]

Дополнительная [3, 4]

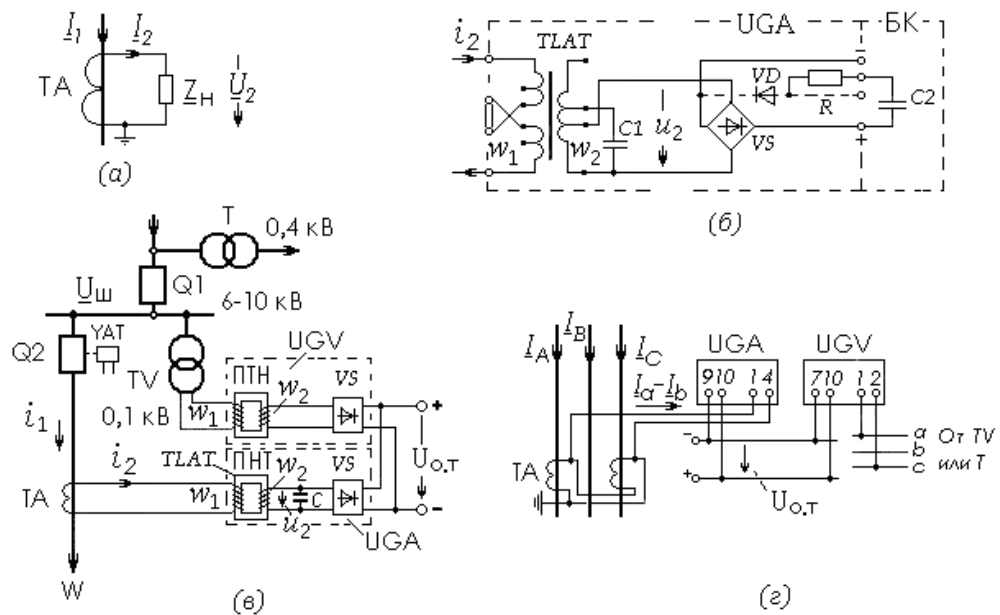


Рисунок 4.1 – Трансформатор тока, как источник питания РЗ (а); блок питания и заряда типа БЗП-402 (б); принципиальные схемы блоков UGV

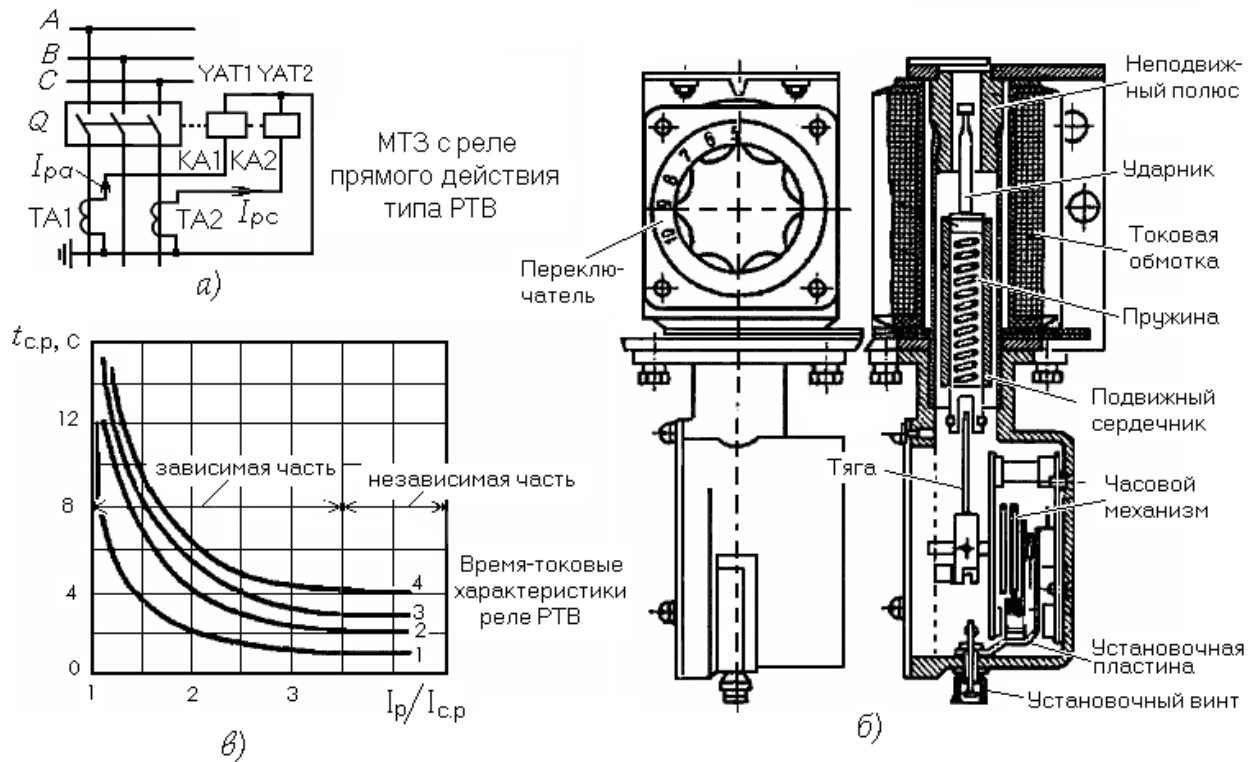


Рисунок 4.2 – Вторичное токовое реле прямого действия типа РТВ

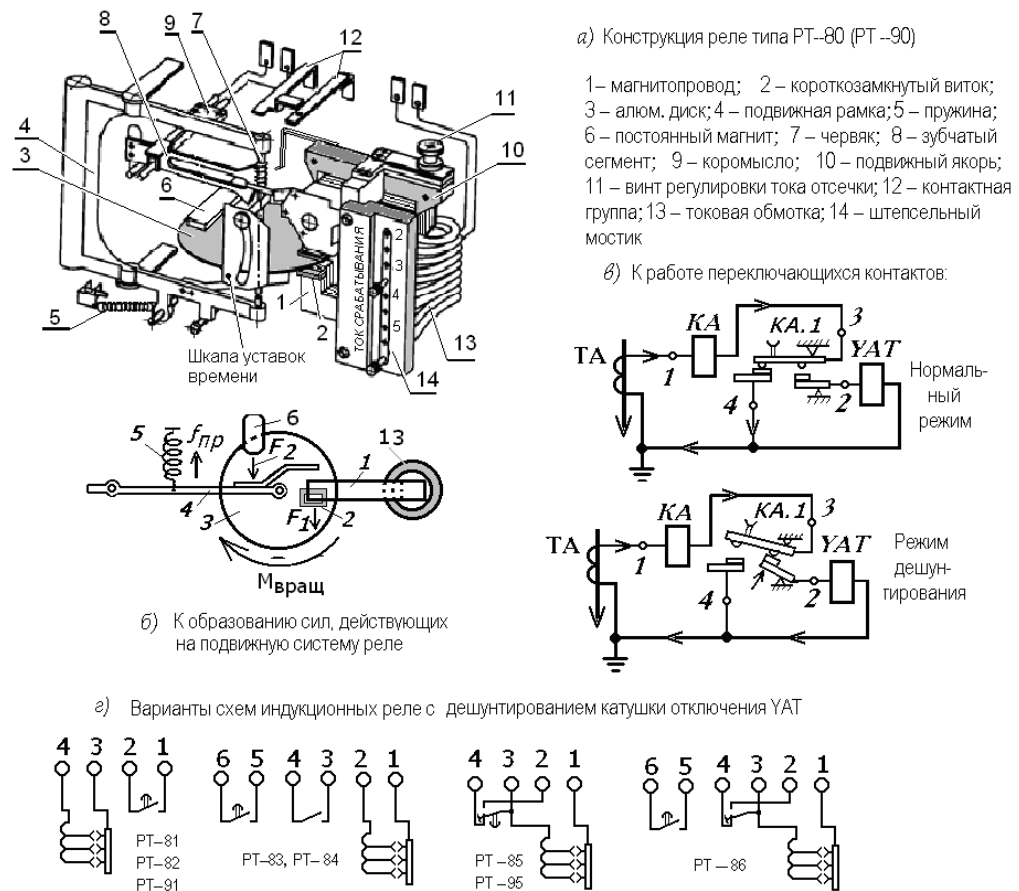


Рисунок 4.3 – Конструкция индукционного реле переменного тока типа РТ-80 (РТ-90)

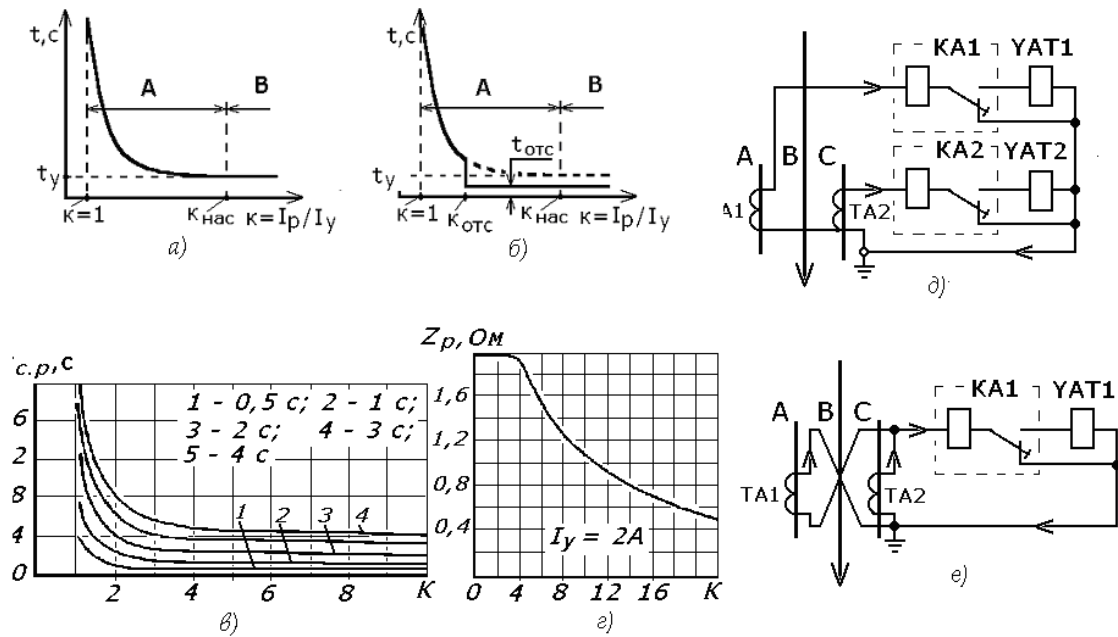


Рисунок 4.4 – Характеристики индукционно реле (а-г). Варианты выполнения максимальной токовой защиты (д-е)

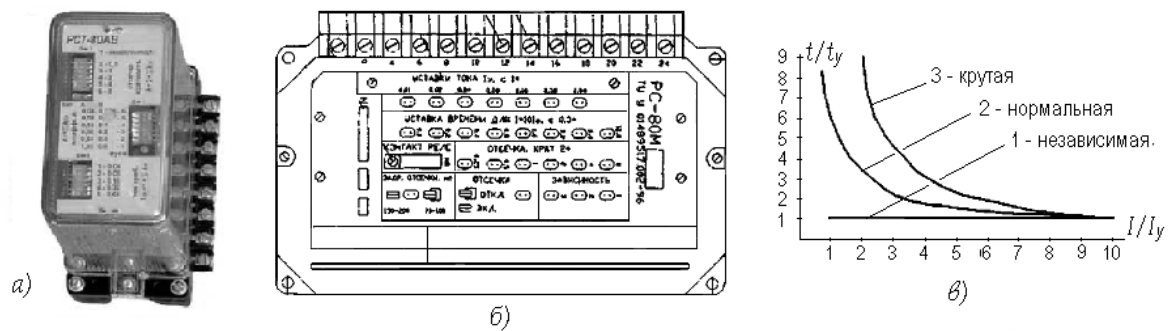
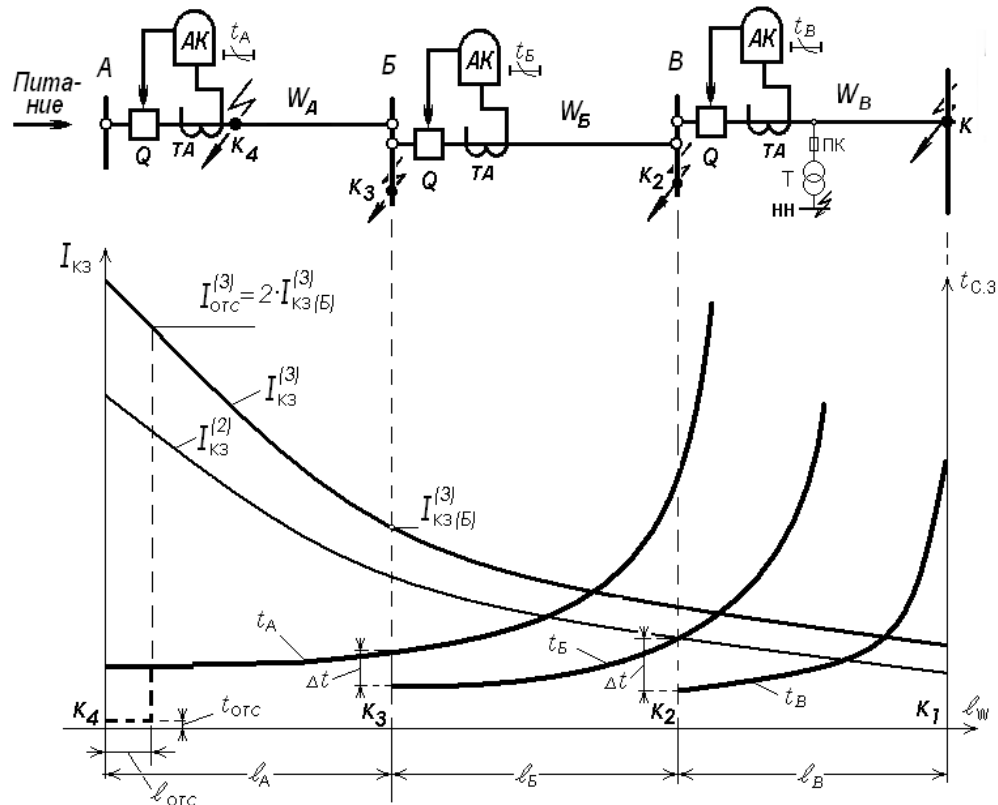
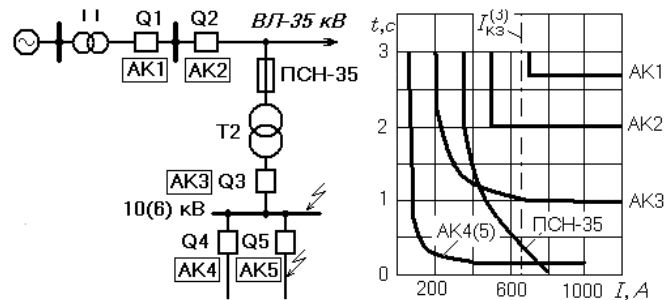


Рисунок 4.5 – Статистическое (полупроводниковое) реле тока типа РС-80: а – общий вид реле типа РСТ-80АВ; б – передняя панель реле РС-80М; в – время-токовые характеристики в относительных единицах



а) Согласование защит, выполненных только на индукционных токовых реле



б) Схема сети 35 кВ и карта селективности для проверки селективности работы предохранителей типа ПСН-35 кВ и релейной защиты питающих и отходящих элементов системы электроснабжения

Рисунок 4.6 – К вопросу согласования токовых защит с разными временными характеристиками срабатывания

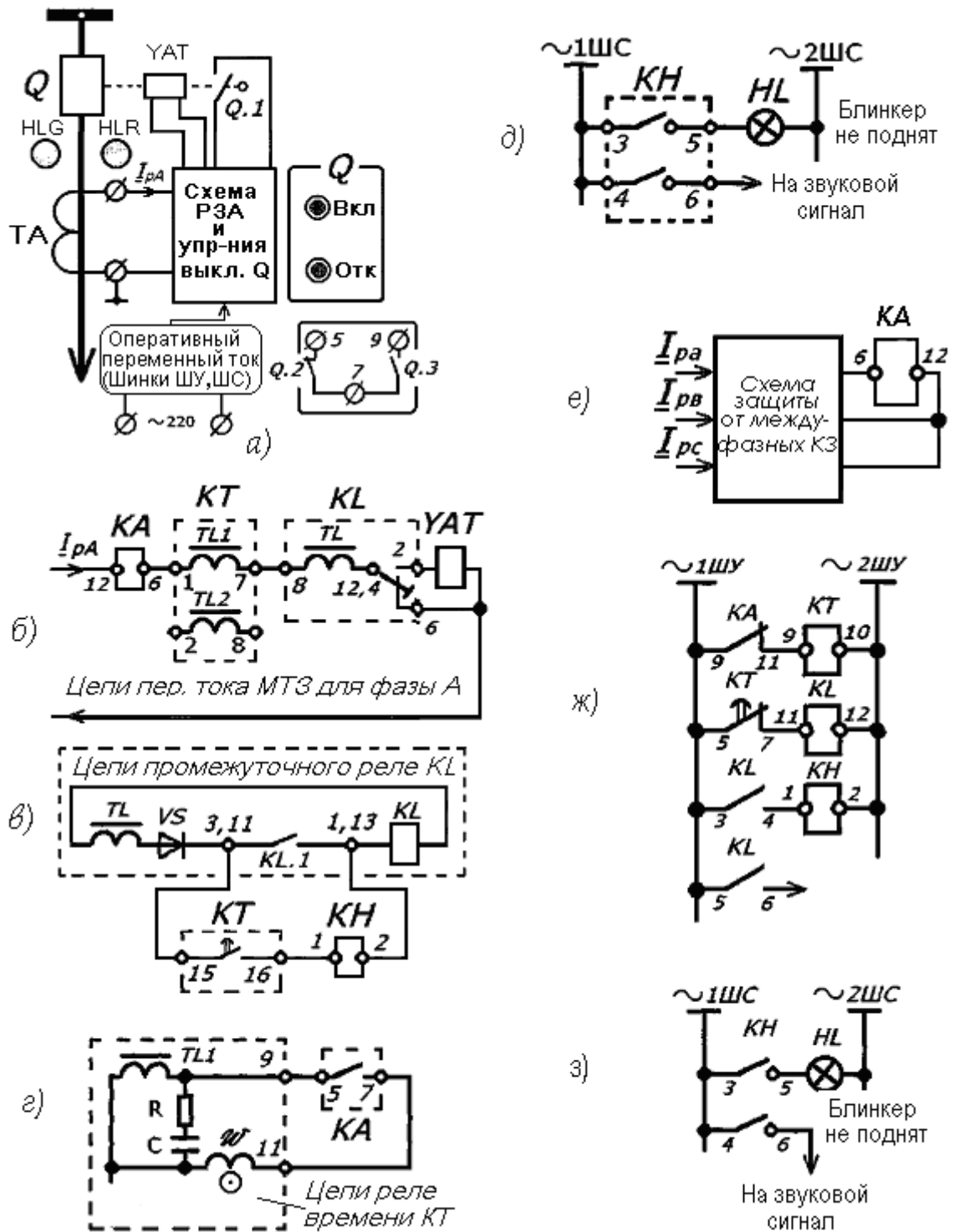


Рисунок 4.7 – Лабораторная модель токовой защиты с независимой выдержкой времени на переменном токе

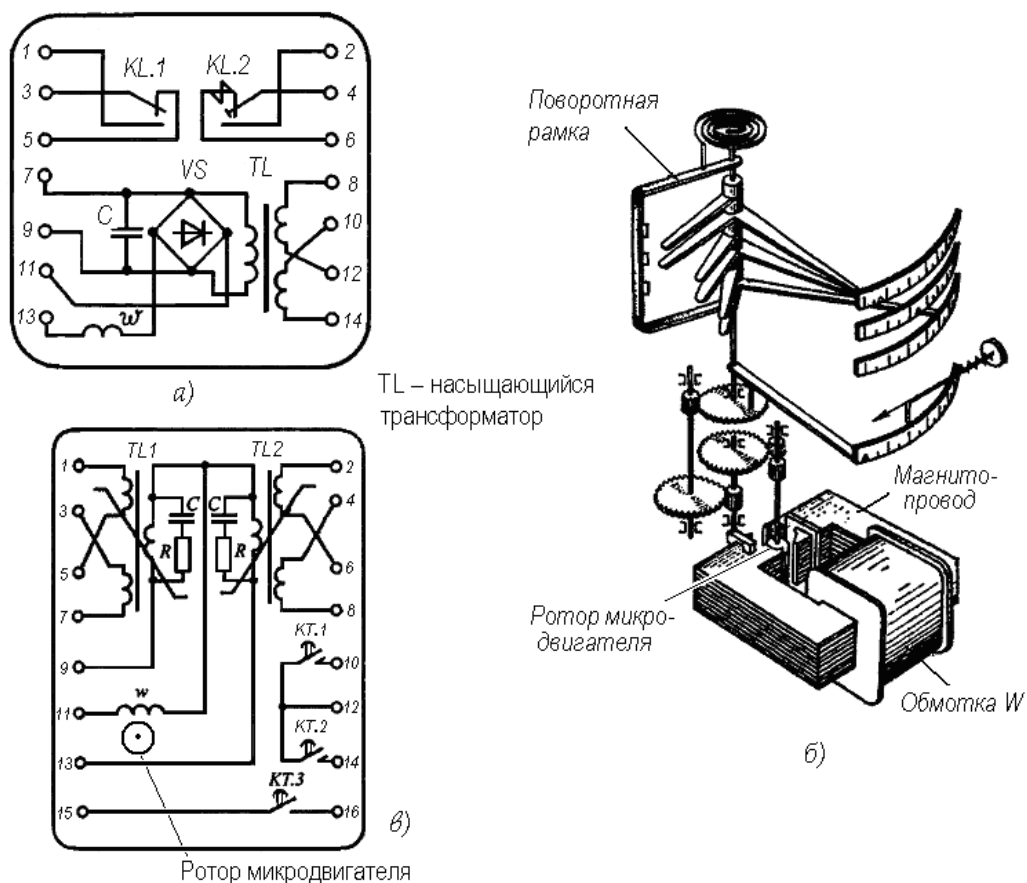


Рисунок 4.8 – Схема внутренних соединений промежуточного реле типа РП–341. Конструкция реле времени типа РВМ – 13(б) и его схема соединений (в)

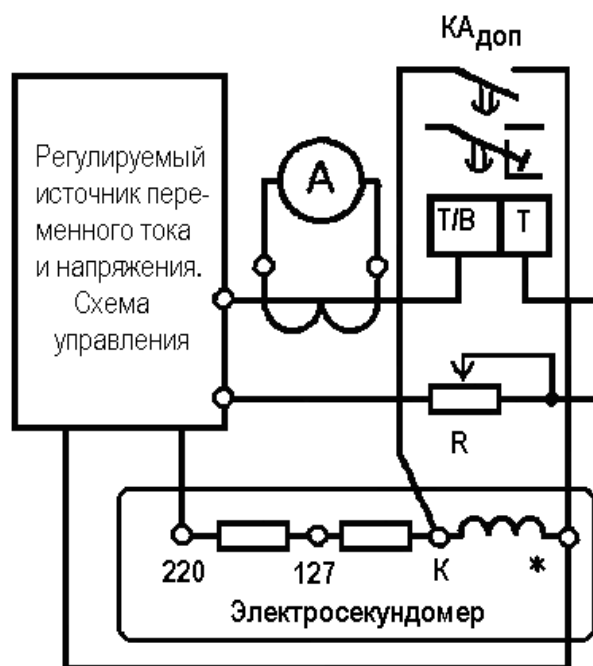


Рисунок 4.9 – Схема проверки индукционного реле типа РТ–80

Лабораторная работа 5

Направленная токовая защита

Цель работы: Изучение некоторых принципов выполнения направленной токовой защиты. Изучение с конструкцией и методами проверок основных электрических характеристик реле направления мощности. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Изучение назначения и принципов выполнения направленной токовой защиты.
2. Изучение реле направления мощности.
3. Освоение методики проверок реле направления мощности.
4. По учебной литературе изучение схем направленных токовых защит на постоянном и переменном оперативных токах.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики

электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

Понятие о токовой направленной защите

Критерий увеличения тока при КЗ, используемый токовыми защитами, не всегда позволяет решить проблемы обеспечения селективности и чувствительности РЗ. Если в радиальных сетях эти проблемы в большинстве случаев решаются, то уже в простейших сетях с двусторонним питанием обеспечить селективность путем использования только критерия превышения током заданных значений (уставок по току) и замедления действия (уставок по времени) на различных участках становится невозможным.

Указанное обусловлено тем, что в сети с двусторонним питанием к месту повреждения токи КЗ подтекают с обоих концов защищаемого участка. В этих случаях проблема в большинстве случаев может быть решена, если в алгоритме защиты предусмотреть возможность определения направления тока в линии.

Токовыми направленными называются защиты (НМЗ), реагирующие на ток, проходящий в защищаемом элементе, и фазу (направление) этого тока относительно напряжения в месте установки защиты, при этом за условные положительное направление тока принято направления от шин, где установлена защита, в глубь защищаемой зоны, т. е. токовая направленная защита должна «видеть КЗ». НМЗ находят применение в качестве основной защиты в сетях напряжением до 35 кВ с двусторонним питанием. В сетях 110

и 220 кв НМЗ применяется в основном как резервная, а иногда, в сочетании с отсечкой как основная.

Необходимость в применении направленных защит возникает в сетях, где точка КЗ подпитывается с двух сторон, что, например, имеет место в сетях с двусторонним питанием (рис. 5.1а). Защита в таких сетях должна не только реагировать на появление тока КЗ, но и должна учитывать направление мощности КЗ в защищаемой линии, или как отмечено выше, фазу тока в линии относительно напряжения на шинах, к которым подключена линия. Этим обеспечивается селективность направленной защиты.

Принцип функционирования направленной токовой защиты и ее размещение в сети поясняется на примере радиальной сети с двусторонним питанием и размещение НМЗ.

В сетях с двусторонним питанием (рис. 5.1а) направление тока и мощности КЗ зависит от места возникновения повреждения и может иметь два противоположных значения. Как следует из рис. 5.1а, при КЗ на линии W2 в точке К1 через защиту 5 проходит ток I_{K1C2} от источника питания С2 к точке КЗ, а через защиту 4 проходит ток I_{K1C1} от источника питания С1. Это КЗ эти защиты 4 и 5 «видят». Кроме того, согласно принципу действия направленной защиты КЗ в точке К1 должна видеть защита 2 со стороны источника С1 и защита 7 со стороны источника С2 как обеспечивающая дальнейшее резервирование.

При КЗ на линии W3 в точке К2 через защиту 7' проходит ток I_{K2C2} от источника питания С2 к точке КЗ, а через защиту 6' проходит ток I_{K2C1} от источника питания С1. Эти защиты «видят» это КЗ. Кроме того, согласно принципу действия направленной защиты КЗ в точке К2 должны «видеть» защиты 2' и 4' со стороны источника С1.

Обратите внимание, что при КЗ в точке К2 на линии W3 ток I_{K2C1} , проходящий по линии W2 через защиту 5, направлен от источника C1 и противоположен I_{K1C2} .

Если принять, что в первом случае I_{K1} (рис. 5.1б) отстает от напряжения $U_{ш}$ на шинах подстанции 3 на угол φ_{K1} , а мощность КЗ (активная P и реактивная Q) положительна и направлена от шин в линию, то во втором случае ток I_{K2} сдвинут на 180° относительно I_{K1} , а соответствующая этому мощность КЗ (как это видно из рис. 5.1б) отрицательна и поэтому направлена из линии к шинам. Таким образом, действительно направление мощности КЗ, проходящей по линии, характеризует, где возникло повреждение: на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.

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

Для правильного действия направленных защит они согласуются по времени срабатывания. На рис. 5.1б показаны соотношения выдержек времени срабатывания защит $t_{с.з.}$, работающих при одном направлении мощности КЗ защит (от источника C1 или от источника C2). Они должны согласовываться между собой по ступенчатому принципу со ступенью Δt , нарастая в направлении к источнику питания, от тока которого действует рассматриваемая защита.

Максимальную направленную защиту можно рассматривать как обычную МТЗ, но дополненную реле направления мощности KW . Упрощенная схема НМЗ для одной фазы приведена на рис. 5.1г и состоит из трех основных элементов (называемых также органами МНЗ):

В общем случае направленная защита должна устанавливаться с обеих сторон каждой линии и действовать при направлении мощности от шин в линию.

– измерительного органа тока (ИОТ), аналогичного используемому в токовых защитах токовому реле КА, и реагирующего на появление тока КЗ (пусковой орган защиты);

– измерительного органа направления тока ИОНТ (или его фазы), разрешающие токовой защите действовать лишь при направлении тока, совпадающем с его принятым положительным направлением относительно вектора напряжения $\underline{U}_{ш}$. ИОНТ еще называют реле направления мощности KW;

– реле времени КТ (орган времени), формирующий время срабатывания защиты $t_{с.з.}$.

В качестве реле направления мощности используются или электромеханические реле или статические реле (с применением полупроводников и микросхем). Поведение этих реле зависит от знака подведенной к их зажимам мощности S_p и в общем случае определяется выражением:

$$S_p = U_p \cdot I_p \cdot \sin(\alpha + \varphi_p), \quad (5.1)$$

где угол α – внутренний (конструктивный) параметр реле, является постоянной величиной, равной 0° или 90° или находится в интервале: $90^\circ > \alpha > 0^\circ$; φ_p – угол между векторами напряжения $\underline{U}_p$ и тока $\underline{I}_p$, подводимыми к зажимам реле (рис. 5.1г, д).

Сочетание углов α и φ_p , при котором выражение (5.1) имеет максимальное значение, т. е. $S_p = S_{p.max}$ соответствует условию максимальной чувствительности реле направления мощности.

Это имеет место при

$$\alpha + \varphi_p = 90^\circ, \text{ или } \alpha = 90^\circ - \varphi_p \quad (5.2)$$

При КЗ на защищаемой линии или на следующих за ней участках токовые реле КА и реле направления мощности KW замыкают свои контакты

и приводят в действие реле времени КТ (рис. 5.12). Через установленную выдержку времени $t_{с.з}$ его контакты замыкаются, подавая напряжение на катушку отключения УАТ, которая и вызывает отключение выключателя Q. При КЗ на других присоединениях, отходящих от данной подстанции, мощность КЗ направлена к шинам, поэтому контакты реле мощности KW размыкаются, не позволяя защите действовать на отключение выключателя Q хотя при этом контакты реле КА могут быть замкнуты. В нормальном режиме при направлении мощности нагрузки S_H от шин в линию реле направления мощности KW могут замыкать свои контакты, однако срабатывание защиты в этом случае предотвращается пусковым реле КА, контакты которого остаются разомкнутыми. С этой целью пусковые реле КА отстраиваются от тока $I_{н.мах}$ максимальной нагрузки линии. В тех случаях, когда по условию чувствительности при КЗ токовые реле КА не удастся отстроить от максимальной нагрузки $I_{н.мах}$, применяется блокировка действия НМЗ от реле минимального напряжения KV. Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения, приведенная на рис. 5.10.

В сетях с изолированной нейтралью МНЗ устанавливается на двух одноименных фазах во всей сети. В сетях с глухозаземленной нейтралью защита устанавливается на трех фазах; если же защита служит для действия только при междуфазных повреждениях, то она устанавливается на двух фазах.

Токовые направленные защиты выполняются как на постоянном, так и на переменном оперативном токе. На переменном токе она выполняется с использованием промежуточных реле РП-341, дешунтирующих своими мощными контактами катушку отключения УАТ привода выключателя, и с токовыми реле времени типа РВМ-13 (подробно смотрите в учебной литературе).

Недостатком НМЗ является то, что при нарушении цепей напряжения одной или двух фаз, питающих реле направления мощности KW , при КЗ защита может подействовать неправильно. Поэтому для своевременного выявления повреждения цепей напряжения, идущих от трансформатора напряжения TV , в защите предусматривается специальная схема, контролирующая их исправность.

Обращаем внимание на особенности использования НМЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью. Защита может неправильно сработать при $K^{(1)}$ из-за срабатывания реле KW той фазы, в которой произошло $K^{(1)}$. Отметим, что для отключения однофазных КЗ обычно применяются защиты, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности (защиты нулевой последовательности). Поэтому МНЗ, включаемая на фазные токи, используется только в качестве защиты от междофазных замыканий. При $K^{(1)}$ НМЗ от междофазных КЗ блокируется (т. е. автоматически выводится из действия) посредством токового реле, включенного в нулевой провод трансформаторов тока, соединенных в звезду (токовый фильтр нулевой последовательности). Размыкающийся контакт этого реле включается последовательно с контактами реле KA и KW (рис. 5.12). При замыканиях на землю срабатывает это токовое реле срабатывает и свои размыкающимся контактом разрывает цепь запуска реле времени KT , лишая МНЗ от междофазных КЗ возможности действовать на отключение.

Отметим, что при наличии блокировки при замыканиях на землю ток срабатывания пусковых реле KA выбирается из условия отстройки от тока нагрузки I_n , проходящего в неповрежденной фазе во время двухфазных КЗ. Необходимость в учете тока повреждения отпадает, благодаря чему повышается чувствительность защиты и упрощается выбор тока срабатывания пусковых реле.

Схемы включения реле направления мощности

Сочетание фаз тока $\underline{I}_p$ и напряжения $\underline{U}_p$, питающих реле KW, определяет схему его включения. Эта схема должна быть такой, чтобы реле правильно определяло знак мощности КЗ при всех возможных случаях и видах повреждений в том числе и с учетом возможного переходного активного сопротивления в месте короткого замыкания, а также удаленности места КЗ. Во всех случаях для надежного срабатывания реле к нему должна подводиться наибольшая мощность $S_p = U_p \cdot I_p$. Имеется несколько вариантов схем включения реле направления мощности, но по ряду причин в МНЗ от междуфазных КЗ в основном применяют реле направления мощности смешанного типа, например с углом $\alpha = +45^\circ$, с включением обмоток реле по так называемой 90-градусной схеме (рис. 5.2а).

Отметим, что схемы именуются по углам φ_p между током $\underline{I}_p$ и $\underline{U}_p$, подводимым к реле в симметричном трехфазном режиме при условии, что токи в фазах совпадают с одноименными фазными напряжениями.

При трехфазных КЗ (рис. 5.2а) за пределами «мертвой» зоны угол $\varphi_e^{(3)}$ изменяется от $\varphi_e^{(3)} = \pi/2$ при отсутствии переходного сопротивления до $\varphi_e^{(3)} = 0$, когда в месте повреждения имеется значительное активное переходное сопротивление $R_{п}$. Из диаграммы видно, что при положительном токе $\underline{I}_p = \underline{I}_a^{(3)}$ угол φ_p относительно напряжения $\underline{U}_p$ изменяется в пределах $-\pi/2 < \varphi_p' < 0$. При КЗ в противоположном направлении, когда $\underline{I}_p = \underline{I}_p^{(3)}$ и реле KW не должен срабатывать, $\pi > \varphi_p'' > \pi/2$ (углы положительные от напряжения к току по часовой стрелке).

При замыкании между двумя фазами пределы изменения угла φ_p зависят как от значения $R_{п}$, так и от удаленности повреждения от места включения ИОНТ.

В результате анализа векторных диаграмм при двухфазных КЗ с учетом всех возможных условий и при положительном токе $\underline{I}_p$ изменение угла оказывается ограниченным пределами $-2\pi/3 < \varphi_p < \pi/6$. При противоположном направлении тока $\underline{I}_p$ при этих же условиях $\pi + \pi/6 > \varphi_p > \pi/3$.

В неповрежденной фазе ток нагрузки может быть направлен как к шинам, так и в противоположном направлении. Поэтому работа КВ обычно контролируется реле тока КА, отстроенного от наибольших токов нагрузки. Отсюда следует, что диапазон изменения сдвига фаз при К⁽³⁾ входит в диапазон при К⁽²⁾ и, следовательно, необходимо учитывать пределы $-2\pi/3 < \varphi_p < \pi/6$.

При 90-градусной схеме реле направления мощности включается на следующее сочетание подводимых электрических величин $\underline{I}_p$ и $\underline{U}_p$ (рис. 5.2б, в):

- реле КВ1 – на сочетания $\underline{I}_p = \underline{I}_a, \underline{U}_p = \underline{U}_{bc}$;
- реле КВ2 – на сочетание $\underline{I}_p = \underline{I}_b, \underline{U}_p = \underline{U}_{ca}$;
- реле КВ3 – на сочетание $\underline{I}_p = \underline{I}_c, \underline{U}_p = \underline{U}_{ab}$.

Отметим, что для правильного включения реле КВ у него соответствующие входные зажимы помечены звездочками и считаются *полярными*.

90-градусная схема включения реле КВ характеризуется следующим:

1) Знак момента в направлении действия реле при всех видах КЗ в зоне положителен, а при повреждениях вне зоны - отрицателен, т. е. реле четко срабатывает при всех видах КЗ при включении токовой обмотки реле на ток поврежденной фазы.

2) Величина момента, вращающего подвижную систему реле (его подвижные контакты) в диапазоне возможных изменений угла φ_p остается значительной и достаточной для действия реле.

3) Напряжение U_p при симметричных КЗ имеет максимально возможное значение, обеспечивающее минимальную величину так называемой *мертвой зоной*.

К недостаткам 90–градусной схемы относят:

- наличие так называемой *мертвой зоны* только при трехфазных КЗ (рис. 5.3з);

- может неправильно сработать при КЗ за трансформатором с соединением обмоток звезда–треугольник. Однако считается, что такие неправильные действия маловероятны;

- может неправильно сработать при двухфазных и однофазных коротких замыканиях на землю (реле, включенное на ток неповрежденной фазы). В этом случае для исключения неправильного действия всей защиты применяется так называемый *пофазный* пуск, а токи срабатывания наиболее чувствительной третьей ступени выбираются с учетом отстройки от токов неповрежденных фаз.

Отметим, что реле направления мощности относится к реле с двумя подводимыми электрическими величинами и проверка их работоспособности имеет свои специфические особенности. На практике можно встретить как реле направления мощности электромеханического действия на так называемом *индукционном* принципе, так и *статические* в полупроводниковом исполнении с использованием микроэлектронных компонентов.

Принципы выполнения реле направления мощности

Индукционное реле направления мощности

Конструкция индукционного реле направления мощности серии РБМ-170 (РБМ-270) показана на рис. 5.3а. Магнитопровод 1, набранный из листов стали, имеет четыре выступающих полюса. Между полюсами для уменьшения сопротивления магнитному потоку расположен неподвижный стальной сердечник 2. В воздушный зазор, образованный полюсами и

сердечником, помещается подвижный элемент реле - алюминиевый полый цилиндр 3 (барабанчик), поворачивающийся вокруг оси. Токовая обмотка реле состоит из двух секций 5, расположенных на противоположных полюсах. Секции соединены последовательно. Токовая обмотка реле питается от трансформатора тока ТА (рис. 5.1з), установленного в цепи защищаемой линии. Обмотка напряжения реле выполняется из четырех секций 4, соединенных последовательно. Секции расположены на ярме. Такое расположение по сравнению с расположением обмотки на полюсах позволяет увеличить общее число витков обмотки. Это приводит к увеличению МДС этой обмотки и, следовательно потока Φ_U , а, следовательно, и к повышению чувствительности реле.

Обмотка напряжения реле питается от трансформатора напряжения TV шин подстанции, к которым подключена защищаемая линия (рис. 5.1з). Реле направления мощности в зависимости от назначения могут иметь один или два контакта (реле одностороннего или двустороннего действия). Первые используются в схемах токовых направленных защит для определения знака мощности при КЗ (реле типов РБМ-171, РБМ-177, РБМ-178), вторые - в схемах поперечных дифференциальных токовых направленных защит параллельных линий для определения поврежденной линии (реле типов РБМ-271, РБМ-277, РБМ-278).

Кроме того, реле направления мощности отличаются по обмоточным данным (обмотки тока рассчитываются на 5 или 1 А) и добавочным устройствам, предусмотренным в цепи обмотки напряжения для получения различных углов между векторами тока $\underline{I}_U$ в этой цепи и подведенного к реле напряжения $\underline{U}_p$ (рис. 5.3д). Схемы внутренних соединений реле одностороннего действия показаны на рис. 5.3а, б.

При включении реле токи $\underline{I}_p$ и $\underline{I}_U$, проходящие по его обмоткам, создают магнитные потоки Φ_I и Φ_U , сдвинутые в пространстве на 90° за счет расположения обмотки на магнитопроводе (рис. 5.3а) и по фазе на

некоторый угол ψ (рис. 5.3д). Каждый из потоков дважды, пронизывает алюминиевый цилиндр и индуцирует в нем вихревые токи. Вращающий момент, действующий на подвижную систему, определяется выражением

$$M_{\text{вр}} = k' \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \sin \psi, \quad (5.3)$$

При отсутствии насыщения магнитной системы поток Φ_I будет пропорционален току в токовой обмотке I_p , а поток Φ_U - напряжению U_p , тогда

$$M_{\text{вр}} = k \cdot I_p \cdot U_p \cdot \sin \psi, \quad (5.4)$$

Векторная диаграмма реле направления мощности представлена на рис. 5.3д. Пренебрегая потерями в стали, векторы потоков Φ_I и Φ_U можно представить совпадающими по фазе с векторами соответствующих токов I_p и I_U . Значение угла φ_U (угла между векторами тока в обмотке напряжения I_U и подводимого к ней напряжения I_p) определяется только параметрами цепи напряжения и для каждого типа реле является неизменным. Угол φ_U называется внутренним углом реле. В зависимости от взаимного положения вектора I_p по отношению к вектору U_p создаются две области, характеризующиеся положительными и отрицательными значениями момента (5.4). Линия перехода от положительных моментов к отрицательным будет при $\psi = 0$ и $\psi = 180^\circ$, когда вектор тока I_p оказывается совпадающим или в противофазе с вектором I_U (на рис. 5.3д вектор I_p для рассматриваемого случая показан пунктиром). При этих углах, как следует из выражения (5.3), значение вращающего момента оказывается равным нулю:

$$M_{\text{вр}} = 0, \quad (5.5)$$

Поэтому линия изменения знака момента иначе называется линией нулевых моментов.

На векторной диаграмме угол α дополняет до 90° угол φ_U . Угол ψ может быть выражен как $\psi = 90^\circ - \alpha - \varphi_p$ или $\psi = 90^\circ - (\varphi_p + \alpha)$. Тогда выражение (5.4) вращающего момента примет вид

$$M_{\text{вп}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi_p + \alpha), \quad (5.6)$$

В зависимости от значения угла φ_U различаются три типа реле:

– реле активного типа (косинусное реле) при $\varphi_U = 90^\circ$, т. е. при $\alpha = 0$.

Для такого реле

$$M_{\text{вп}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi_p, \quad (5.7)$$

– реле реактивного типа (синусное реле) при $\varphi_U = 0$, т. е. при $\alpha = 90^\circ$,

$$M_{\text{вп}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin \varphi_p, \quad (5.8)$$

– реле смешанного типа ($0 < \varphi_U < 90^\circ$), для которого

$$M_{\text{вп}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin(\varphi_p + \alpha), \quad (5.9)$$

направлен в сторону замыкания контактов - реле работает и замыкает свои контакты ($M_{\text{вп}} > 0$ - зона действия). Если поток Φ_I отстает по фазе от потока Φ_U , момент направлен в сторону размыкания контактов - реле не действует ($M_{\text{вп}} < 0$ - зона недействия, зона «заклинивания»)

На рис. 5.3д приведена векторная диаграмма для реле смешанного типа. Контактная система реле выполняется так, что в случае, когда поток Φ_I опережает по фазе поток Φ_U , как показано на рис. 2, вращающий момент

Как следует из выражения (5.6), если $\varphi_p = -\alpha$, т. е. когда вектор тока I_p опережает вектор напряжения U_p на угол α , при одних и тех же значениях тока и напряжения вращающий момент реле наибольший (вектор тока I_p для данного случая показан штрихпунктирной линией и совпадает с направлением линии максимальных моментов):

$$M_{\text{вп}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos 0 = k \cdot U_p \cdot I_p = M_{\text{вп. max}}, \quad (5.10)$$

Угол, при котором создается максимальный вращающий момент на реле, называется *углом максимальной чувствительности* и обозначается $\varphi_{м.ч}$, а линия, проходящая под этим углом по отношению к вектору напряжения $\underline{U}_p$, называется линией максимальных моментов.

Для реле типа РБМ-171 при подключении их к трансформатору напряжения зажимами 8-7 (рис. 5.3в) последовательно с обмоткой напряжения 4 реле оказывается включенным только резистор $R1$. В этом случае $\varphi_U = 60^\circ$ и $\alpha = 90 - \varphi_U = 90 - 60 = 30^\circ$. Угол максимальной чувствительности оказывается равным $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$.

Если реле подключено к трансформатору напряжения зажимами 8-1, то последовательно с обмоткой напряжения реле будут включены два резистора $R1$ и $R2$. В этом случае угол $\varphi_U = 45^\circ$, а $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$. Такие же значения углов максимальной чувствительности имеет реле двустороннего действия типа РБМ-271.

Реле типов РБМ-171 и РБМ-271 входят в комплект защиты от междуфазных КЗ, где они используются в качестве органа направления мощности.

В комплектах защит нулевой последовательности от замыканий на землю в сетях с большим током замыкания на землю используются реле типов РБМ-177, РБМ-178. РБМ-277, РБМ-278. Угловые характеристики этих реле вследствие изменения внутренней схемы резко отличаются от характеристик предыдущих типов реле. Внутренний угол реле φ_U вследствие наличия в цепи обмотки напряжения конденсатора C , причем $X_C > X_L$ оказывается отрицательным $\varphi_U = -20^\circ$, выражение вращающего момента для этих реле (рис. 5.2з) имеет вид:

$$M_{вр} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin(\varphi_p + 20^\circ), \quad (5.11)$$

Полярность обмоток реле указана заводом так, что положительный момент на реле будет в том случае, когда вектор потока обмотки напряжения Φ_U оказывается опережающим относительно вектора потока Φ_I токовой обмотки (соответствует замыканию на землю на защищаемой и предыдущих линиях). Следовательно, угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = +70^\circ$

Существенным недостатком рассматриваемой электромеханического реле мощности является возможность появления *самохода*. Самоходом называется возникновение дополнительного вращающего момента, вызывающего перемещение подвижной системы реле при наличии питания только одной обмотки, когда основной вращающий момент отсутствует. Различаются *самоход от тока* (например, при обрывах цепи напряжения) и *самоход от напряжения* (например, при отсутствии тока на защищаемой линии). Причиной возникновения «паразитного» момента является асимметрия магнитной системы. При идеально выполненном реле, когда воздушный зазор между всеми полюсами и сердечником на всем участке одинаковый и сердечник расположен точно в центре, т. е. магнитная система симметрична, самоход отсутствует. Направление момента, обусловленного самоходом, может быть в сторону, как замыкания контактов, так и размыкания. В первом случае самоход может привести к неселективному действию защиты, например при близком расположении места КЗ на смежном участке, когда $U_p \approx 0$, а мощность КЗ направлена от линии к шинам. Во втором случае вследствие заглубления реле возможен отказ в действии защиты. Самоход у реле должен быть устранен совсем или сведен к минимуму.

Отсутствие самохода выясняется имитацией указанных выше режимов, когда к реле подводится только одна из электрических величин: ток или напряжение.

Методика устранения самохода излагается в инструкции к реле.

Реле направления мощности на основе аналоговых интегральных микросхем

Аналогом электромеханических реле направления мощности являются более совершенные статические реле направления мощности на основе аналоговых интегральных микросхем, например реле РМ-11. В нем раздельно сравнивается время совпадения мгновенных значений электрических величин в положительном полупериоде с временем несовпадения и время совпадения этих величин с временем их несовпадения в отрицательном полупериоде. Этим достигается отстройка реле от апериодических составляющих во входных сравниваемых величинах. Функциональная схема реле приведена на рис. 5.4а, а на рис. 5.5в приведен временные диаграммы.

Реле содержит фазоповоротные устройства 1 и 2, с помощью которых обеспечивается заданное значение угла $\varphi_{м.ч}$ максимальной чувствительности. С выхода фазоповоротных устройств синусоидальные сигналы A_i и B_i положительной полярности поступают на схему сравнения 3, а сигналы отрицательной полярности - на схему сравнения 4. Здесь они преобразуются в положительные прямоугольные импульсы a и b . Далее эти импульсы интегрируются соответствующими интеграторами 5 и 6 и преобразуются в напряжения U_1 и U_2 , изменяющиеся пилообразно на выходе. Эти напряжения ограничиваются ограничителем 7 до пределов $U_{огр}$ и $U'_{огр}$, они суммируются сумматором 8, на выходе которого формируется суммарное напряжение U_{Σ} . Это напряжение поступает на вход порогового элемента 9. При достижении мгновенного значения напряжения U_{Σ} значения напряжения срабатывания $U_{ср}$ порогового элемента 9 оно на своем выходе формирует выходной сигнал $U_{вых}$ такой полярности, который вызывает срабатывание выходного органа 10. Функциональная схема реализована с использованием микроэлектронной элементной базы.

Параметры реле: минимальное напряжение срабатывания не превышает 0,25 В, потребляемая мощность во входных цепях тока при $I_{\text{ном}}$ не более 0,5 В·А, во входных цепях напряжения при $U_{\text{ном}}$ – не более 3 В·А; угол максимальной чувствительности $(-30 \pm 5)^\circ$; $(-45 \pm 5)^\circ$.

Более подробно работу реле можно изучить по [1, с. 165-167].

Основные характеристики реле направления мощности

Мощность срабатывания. Срабатывание реле происходит при условии, что электромагнитный момент $M_{\text{вр}}$ (5.3) преодолевает сопротивление пружины $M_{\text{пруж}}$ (9 на рис. 5.2) и трения $M_{\text{тр}}$.

Наименьшая мощность на зажимах реле, при которой оно срабатывает, называется *мощностью срабатывания* $S_{\text{с.р}}$.

У индукционных реле направления мощности мощность срабатывания при угле максимальной чувствительности $\varphi_{\text{м.ч}}$ колеблется от 0,2 до 4 В·А. У статических реле она находится в пределах 0,25 В·А.

Зависимость мощности срабатывания от тока $I_{\text{р}}$ и угла $\varphi_{\text{р}}$ принято оценивать характеристикой чувствительности, т. е. зависимостью $U_{\text{с.р}}(I_{\text{р}})$, и угловой характеристикой, представляющей зависимость $U_{\text{с.р}}(\varphi_{\text{р}})$,

Характеристика чувствительности представляет собой зависимость $U_{\text{с.р}}(I_{\text{р}})$ при неизменном $\varphi_{\text{р}}$ (рис. 5.2ж), где $U_{\text{с.р}}$ - наименьшее напряжение, необходимое для действия реле (при данных значениях $I_{\text{р}}$ и $\varphi_{\text{р}}$).

Обычно характеристика снимается при $\varphi_{\text{р}}$, равном углу максимальной чувствительности $\varphi_{\text{м.ч}}$, т. е. для случая когда $\sin(\alpha - \varphi_{\text{р}}) = 1$. Теоретическая характеристика чувствительности представляет гиперболу, но в действительности за счет насыщения стали магнитопровода при больших

токах I_p напряжение $U_{c.p}$ остается неизменным и кривая чувствительности $U_{c.p}(I_p)$ идет параллельно оси токов.

Угловая характеристика, представляет собой зависимость $U_{c.p}(\varphi_p)$, при неизменном значении I_p . Эта зависимость может быть получена аналитически или построена по данным экспериментов над реле направления мощности. На рис. 5.2е приведена характеристика для реле смешанного типа с $\alpha = +45^\circ$. Угловая характеристика позволяет определить:

- изменение чувствительности реле (характеризуемое величиной U_{cp}) при разных значениях угла φ_p ;
- минимальную величину $U_{cp.min}$ и наиболее выгодную зону углов φ_p , в пределах которой U_{cp} близко к $U_{cp.min}$;
- при каких углах φ_p меняется знак электромагнитного момента и пределы углов φ_p , которым соответствуют положительные и отрицательные моменты.

Время действия реле мощности зависит от величины мощности на зажимах реле, характеризуемой отношением $S_p/S_{c.p}$. Характер этой зависимости для индукционного реле приведен на рис. 5.2д. При мощностях S_p , близких к $S_{c.p}$, выдержки времени достаточно велики, и только при $S_p/S_{c.p} \geq 3 \dots 4$ реле работает с минимальным временем.

Мертвая зона токовой направленной защиты.

Действие реле направления мощности определяется углом сдвига фаз φ_p . Однако для срабатывания реле необходимо, чтобы подводимое к нему напряжение было не меньше $U_{cp.min}$ (рис. 5.2е, ж). Соответствующим включением реле это обеспечивается при всех несимметричных коротких замыканиях в любой точке защищаемой линии. Мертвая зона практически

образуется только при металлических трехфазных коротких замыканиях на небольшом участке $\ell_{м.з.}$, расположенном у места включения реле.

Оценить длину мертвой зоны можно по формуле

$$\ell_{м.з.} \approx \frac{k_U \cdot U_{c.p\min}}{\sqrt{3} \cdot I_{\kappa}^{(3)} \cdot z_{1y\partial} \cdot \cos(\varphi_p - \varphi_{м.ч})}, \quad (5.12)$$

Наличие мертвой зоны является недостатком направленной защиты, хотя длина этой зоны, как правило, невелика.

Современные (статические) КВ имеют относительно небольшие $U_{c.p\min}$ (доли вольт) и незначительные $\ell_{м.з.}$.

Необходимо отметить, что микропроцессорная элементная база позволяет выполнить направленную защиту без мертвой зоны.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- реле направления мощности: а) электромеханическое; б) статическое;
- фазорегулятор, трансформатор, нагрузочные устройства, фазометр, ВАФ-85М;
- цифровые клещи для измерения токов.

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

Примечание. По изложенной ниже методике выполняются эксперименты над электромеханическим реле направления мощности.

Эксперименты над статическим реле могут быть выполнены по сокращенной программе.

Проверка электрических характеристик реле направления мощности производится по схеме, представленной на рис. 5.5а. При сборке схемы следует обращать особое внимание на включение реле и фазометра; токи в их обмотках должны совпадать и быть направлены от «начала» обмоток (генераторные зажимы) к «концам» обмоток.

Для проверки отсутствия витковых замыканий в обмотках тока и напряжения следует определить мощность, потребляемую обмотками реле при номинальных данных (обмотки тока при $I_p = 5 \text{ A}$ (1 A), обмотки напряжения – при $U_p = 100 \text{ B}$):

$$S_U = U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}}; \quad S_I = I_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}. \quad (5.12)$$

Полученные результаты сравниваются со значениями, указанными в каталоге.

Определение зоны срабатывания реле, т. е. определение диапазона углов φ_p , при которых контакты реле находятся в замкнутом состоянии, проводится при номинальных значениях тока и напряжения в его обмотках. При изменении с помощью фазорегулятора угла сдвига фаз тока I_p и напряжения U_p от 0 до 360° фиксируются значения углов φ_p , при которых контакты реле замыкаются и размыкаются. Определяется зона срабатывания, которая должна находиться в пределах $175\text{—}180^\circ$. Полусумма значений углов (с учетом их знака) дает значение угла максимальной чувствительности $\varphi_{\text{м.ч.}}$. Так, например, при проверке реле направления мощности смешанного типа при изменении угла φ_p от 0 до 360° могут получиться следующие результаты: $\varphi_{p,\text{разм}} = +60^\circ$; $\varphi_{p,\text{зам}} = +240^\circ = -120^\circ$ (рис. 5.5б). Зона срабатывания такого реле $60^\circ + 120^\circ = 180^\circ$. Угол максимальной чувствительности

$$\varphi_{\text{м.ч}} = \frac{+60^\circ - 120^\circ}{2} = -30^\circ$$

Полученные значения $\varphi_{\text{м.ч}}$ должны совпадать с указанными заводом-изготовителем; допускается отклонение не более чем на $\pm 5^\circ$.

При проверке реле следует определить его мощность Срабатывания $S_{\text{с.р}}$, В-А. Наиболее удобно производить измерения при номинальном токе в обмотке тока ($I_{\text{р}} = I_{\text{ном}}$) и при угле максимальной чувствительности $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{м.ч}}$:

$$S_{\text{с.р}} = I_{\text{ном}} \cdot U_{\text{мин}}, \quad (5.13)$$

где $U_{\text{мин}}$ — минимальное напряжение, подводимое к реле, при котором реле срабатывает. Коэффициент возврата реле определяется выражением

$$k_{\text{в}} = S_{\text{в}} / S_{\text{с.р}}, \quad (5.14)$$

где $S_{\text{в}} = I_{\text{ном}} \cdot U_{\text{мах}}$; $U_{\text{мах}}$ - максимальное напряжение, подводимое к реле, при котором происходит возврат реле.

Полученные результаты сравниваются со значениями, указанными в каталоге.

Экспериментальная часть:

1. Ознакомиться с устройством проверяемого реле мощности; начертить схему внутренних соединений; записать паспортные данные реле.
2. Подобрать аппаратуру для проверки электрических характеристик реле. Собрать схему, приведенную на рис. 5.5а.
3. Измерить мощность, потребляемую обмотками реле при номинальных данных; сравнить полученные результаты со значениями, указанными в каталоге.
4. Проверить отсутствие у реле самохода от тока (при значении, тока, указанном преподавателем, и закороченной обмотке напряжения) и от напряжения (при отсутствии тока в токовой обмотке).

5. Установить в токовой цепи ток $I_p = I_{\text{ном}}$, в цепи напряжения $U_p = U_{\text{ном}}$ и, изменяя угол φ_p от 0 до 360° , определить зону срабатывания реле. По данным опыта построить векторную диаграмму, указав на ней зону срабатывания, зону «заклинивания», линии максимальных и минимальных моментов и угол максимальной чувствительности $\varphi_{\text{м.ч}}$,

6. Проверить состояние контактов реле при условиях: $I_p = I_{\text{ном}}$; $U_p = U_{\text{ном}}$, $\varphi_p = \varphi_{\text{м.ч}}$. По состоянию контактов, учитывая тип реле, убедиться, что маркировка однополярных зажимов выполнена правильно.

7. Определить мощность срабатывания реле, для чего при $I_p = I_{\text{ном}}$ и $\varphi_p = \varphi_{\text{м.ч}}$, плавно увеличивая напряжение, подводимое к реле, зафиксировать значение минимального напряжения, при котором реле замыкает контакты U_{min} . Уменьшая напряжение, определить мощность, при которой контакты реле размыкаются. По данным опыта определить коэффициент возврата реле k_B .

8. По программе, предложенной преподавателем, выполнить проверку работы статического реле направления мощности.

6. Указания к проведению работы

9. При регулировании угла между током и напряжением при помощи фазорегулятора и измерении этого угла фазометром, имеющим переключатель квадрантов для отсчета углов, целесообразно использовать круговую шкалу фазорегулятора, заранее проградуировав ее и установив «нуль» отсчета. Допускается возможность использования прибора ВАФ-85М.

10. Проверку реле типа РБМ-171 по п. 5 методики следует выполнить дважды при использовании одного и двух резисторов, включаемых последовательно с обмоткой напряжения (зажимы 8-7 и 8-1).

11. Проверку правильности проведенных измерений можно выполнить путем построения угловой характеристики $U_{\text{с.р}} = f(\varphi_{\text{м}})$ при $I_p = I_{\text{ном}} = \text{const}$;

минимальное значение напряжения срабатывания должно соответствовать углу максимальной чувствительности.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

11. Название и цель работы.
12. Используемые в экспериментах схемы.
13. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
14. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
15. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.
16. Самостоятельно, по учебной литературе изучить схемную реализацию токовых защит на постоянном и переменном оперативных токах.

Контрольные вопросы

1. Что такое угол максимальной чувствительности?
2. С какой целью указывается маркировка однополярных выводов обмоток реле?
3. Как из реле с характеристикой $M_{вр} = k \cdot I_p \cdot U_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$ получить реле с характеристикой, близкой к характеристике реле реактивного (синусного) типа?
4. Как следует включить в трехфазную цепь потенциометр и реле, если при отсутствии фазорегулятора необходимо получить угол сдвига между векторами тока I_p и напряжения U_p $\varphi_p = -45^\circ$.

5. Будет ли срабатывать реле мощности при трехфазном металлическом КЗ в начале защищаемой линии?

6. Что такое самоход у реле мощности, его причина и к чему самоход может привести?

7. Пояснить работу статического реле направления мощности и в чем его преимущество перед электромеханическим?

8. В каких случаях приходится прибегать к НМЗ и какие имеются особенности выполнения этих защит в сетях с глухозаземленной нейтралью? Поясните на примере схем, приведенных на рис. 5.2.

Литература

Основная [1, 2]

Дополнительная [3, 4]

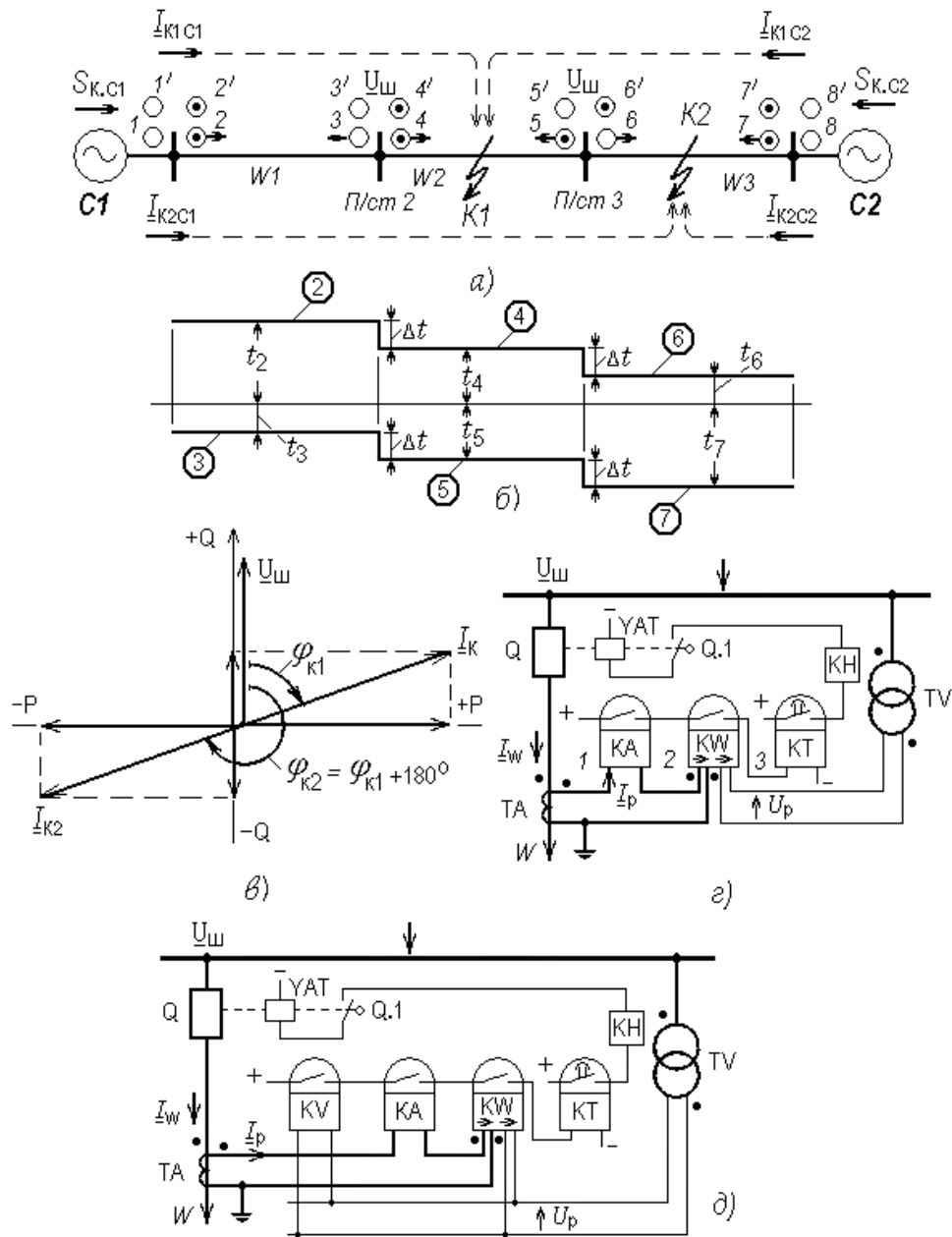


Рисунок 5.1 – Функционирование направленной токовой защиты (НМЗ)

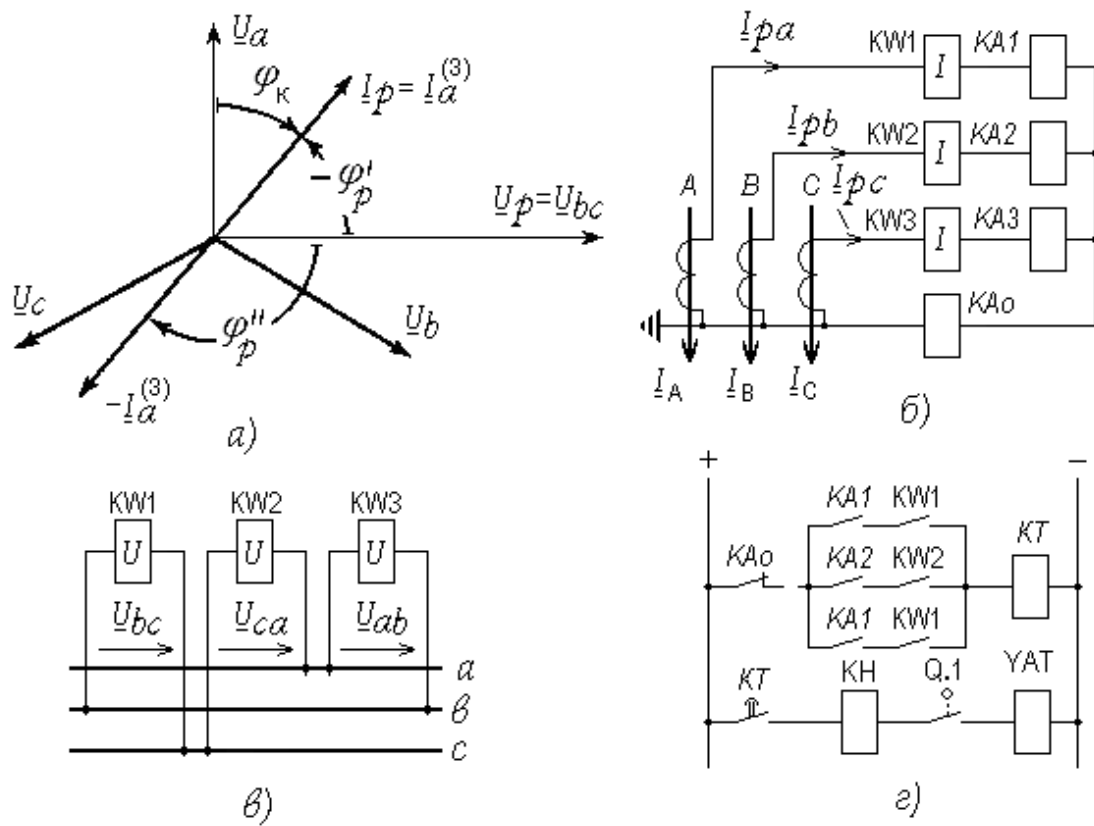


Рисунок 5.2 – 90-градусная схема включения реле направления мощности KW и развернутая схема НМЗ с ненаправленной блокировкой при замыкании на землю

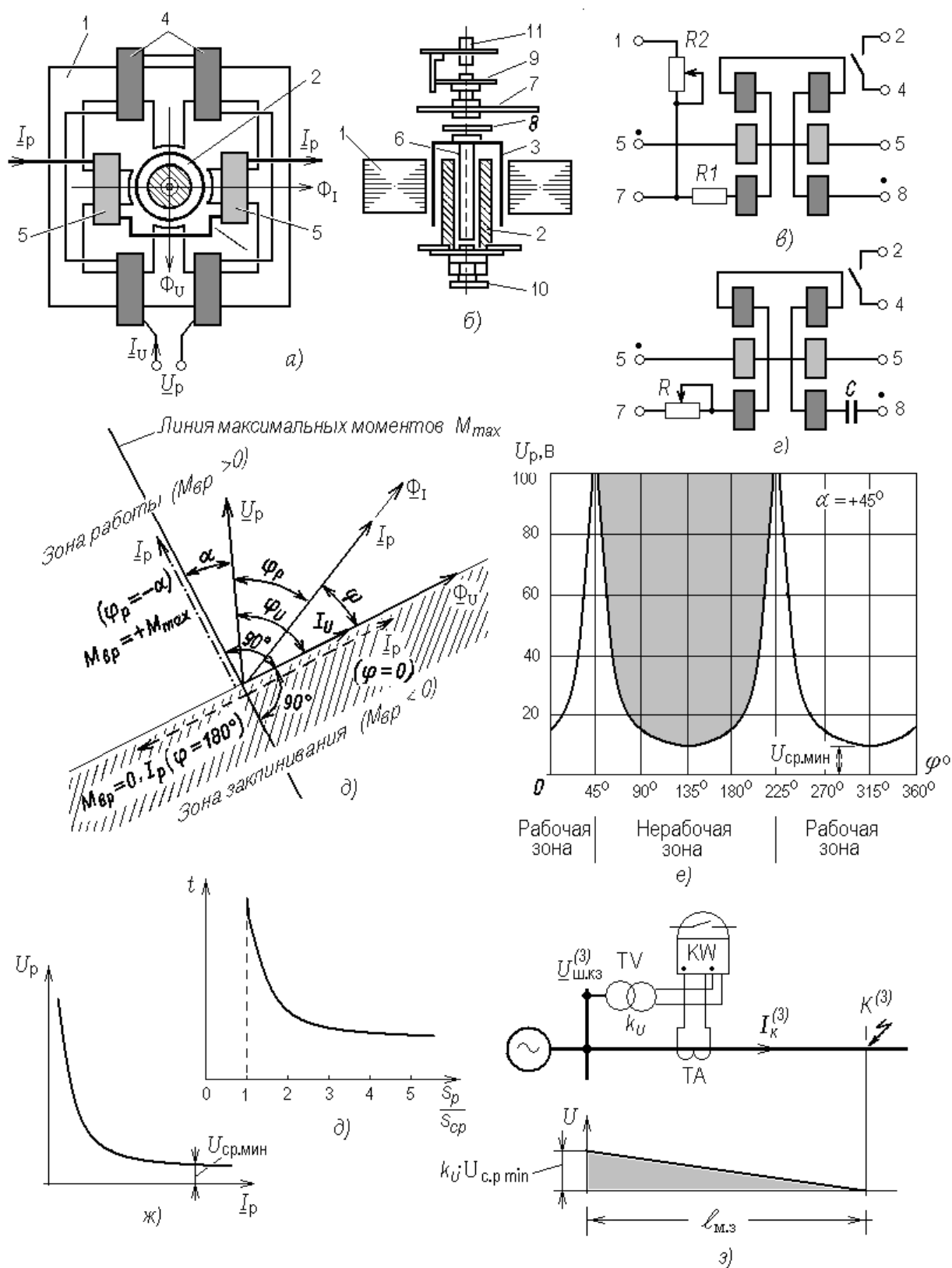


Рисунок 5.3 – Электромеханическое реле направления мощности и его характеристики

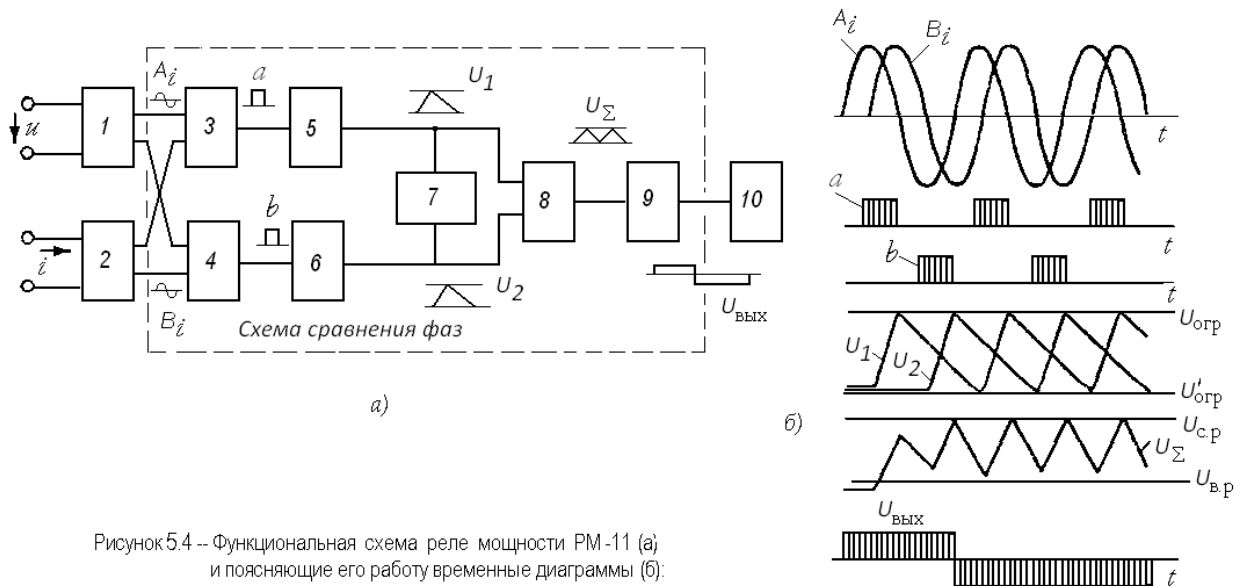


Рисунок 5.4 – Функциональная схема реле мощности РМ-11 (а) и поясняющие его работу временные диаграммы (б)

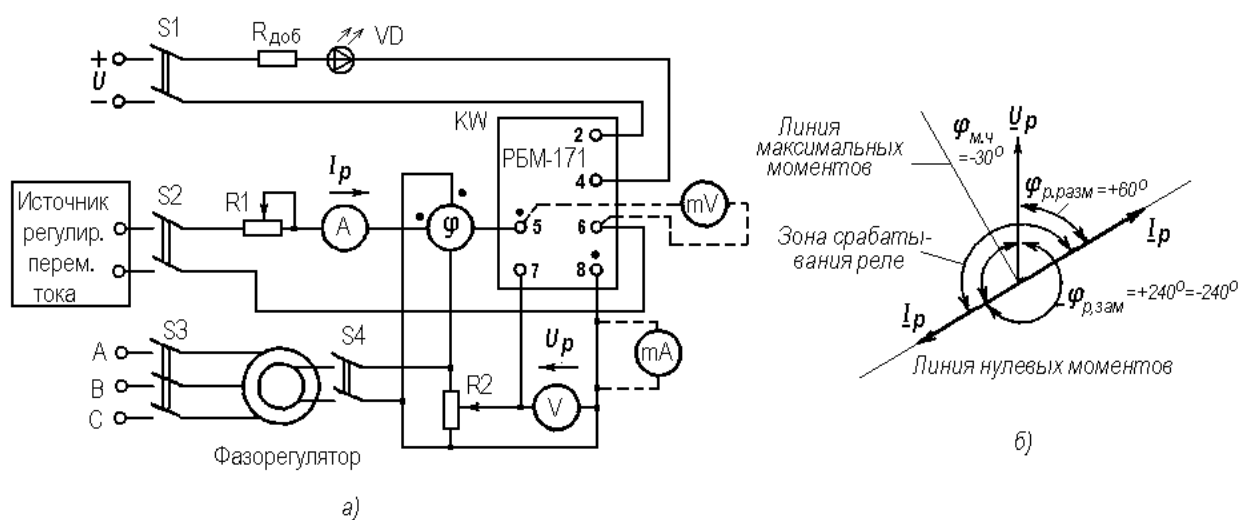


Рисунок 5.5 – Схема проверки реле направления мощности типа РБМ-171 (а); Определение угла максимальной чувствительности графическим способом (б)

Лабораторная работа 6

Дифференциальная защиты силового трансформатора

Цель работы: Ознакомление с принципами построения защит силового трансформатора. Изучение конструкции и методами проверок основных электрических характеристик дифференциального реле. Исследование работы дифференциальной защите трехфазного силового трансформатора. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Состав защит силового трансформатора.
2. Варианты выполнения дифференциальной защиты трансформатора.
3. Изучение дифференциального реле.
4. Освоение методики его проверок.
5. Проверка работы схемы дифзащиты трансформатора.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Теоретическая часть

Общие положения

Виды повреждений и ненормальных режимов работы силовых трансформаторов

Виды повреждения силовых трансформаторов

К основным видам повреждения трансформаторов относятся:

- трехфазные и двухфазные КЗ между обмотками внутри бака (корпуса) трансформатора или между наружными выводами обмоток, расположенными на крышке бака;
- однофазные замыкания обмотки или ее наружного вывода на корпус трансформатора, т. е. на землю; возможны также двухфазные к. з. на землю (для трансформаторов, работающих в сети с глухозаземленной нейтралью) и двойные замыкания на землю в двух разных точках, из которых одна - в трансформаторе или на его наружном выводе (для сетей с изолированной или компенсированной нейтралью);
- замыкания между витками одной фазы обмотки, называемые витковыми замыканиями.

Анализ повреждений трансформаторов говорит о том, что наибольшее число повреждений имеют место на наружных выводах, из-за нарушений витковой изоляции обмоток, из-за ненадежной работы переключателей ответвлений обмоток. Причинами КЗ на наружных выводах обмоток, называемых высоковольтными вводами, могут быть перекрытия внутренней изоляции из-за увлажнения трансформаторного масла, которым заполнен ввод, а также перекрытия по внешней стороне высоковольтного ввода из-за загрязнения его поверхности, случайного попадания посторонних предметов или животных, атмосферных перенапряжений.

Наиболее опасными для самого трансформатора и для элементов прилегающей электрической сети являются междофазные КЗ - трехфазные $K^{(3)}$ и двухфазные $K^{(2)}$. Они сопровождаются большими токами, как правило, во много раз превосходящими номинальный ток трансформатора, и могут вызывать глубокие понижения напряжения в сети. При возникновении таких повреждений трансформатор должен быть немедленно отключен от всех источников питания, чтобы предотвратить дальнейшее развитие повреждения и, в особенности, возникновение пожара трансформатора. Наряду с этим быстрое отключение поврежденного трансформатора предотвращает распространение аварии на другие участки сети, обеспечивает

сохранение электроснабжение потребителей. Для этих целей все трансформаторы оборудуются устройствами защиты либо в виде плавких предохранителей, либо в виде релейной защиты.

Междуфазные КЗ наиболее вероятны на наружных выводах обмоток трансформатора. Двухфазное КЗ, а в особенности трехфазное КЗ, внутри бака трансформатора считается весьма маловероятным из-за достаточно большой прочности междуфазной изоляции.

Однофазные КЗ в сетях с глухозаземленными нейтралями (110 кВ и выше) также сопровождаются большими токами, соизмеримыми с токами трехфазных КЗ. В сетях с изолированной или компенсированной нейтралью (6-35 кВ) замыкания на землю сопровождаются малыми токами (как правило, не более 30 А).

Значения токов при витковых замыканиях зависят от числа замкнувшихся витков. Чем меньше число замкнувшихся витков, тем меньше ток повреждения, приходящий со стороны источника питания. При малой доле замкнувшихся витков по отношению к общему числу витков обмотки ток повреждения может быть меньше номинального тока трансформатора I_n . Например, при замыкании одного витка ток КЗ со стороны источника питания может находиться в пределах 0,4...0,7 от номинального тока трансформатора. Поэтому витковые замыкания трудно обнаружить. В настоящее время из всех применяемых стандартных защит трансформаторов только *газовая* защита реагирует на витковые замыкания, поскольку они сопровождаются, как правило, горением электрической дуги или местным нагревом, а это приводит к разложению трансформаторного масла и изоляционных материалов, образованию летучих газов. Эти газы вытесняют масло из бака трансформатора в его расширитель и вызывают действие специально предусматриваемой для этого газовой защиты.

Причинами возникновения витковых замыканий могут быть частые междуфазные КЗ в питаемой сети (внешние КЗ или сквозные, как их называют), во время которых динамическое действие больших токов

вызывает деформацию обмоток трансформатора и механическое разрушение витковой изоляции. Причиной повреждения витковой изоляции также может быть длительная перегрузка трансформатора током выше номинального. Перегрузки и внешние КЗ относятся к ненормальным режимам, которые рассматриваются ниже.

Виды ненормальных режимов работы трансформаторов

Ненормальными режимами работы трансформаторов являются:

- сверхтоки при перегрузках;
- сверхтоки, вызванные внешними КЗ;
- понижение уровня масла (для масляных трансформаторов);
- повышение напряжения (для сетей 110 кВ и выше).

Сверхтоки при перегрузках. В соответствии с инструкцией по эксплуатации трансформаторов допустимые значения тока перегрузки и длительность его прохождения через трансформатор определяются по-разному для перегрузок, вызванных неравномерностью графика нагрузки, и аварийными ситуациями.

Аварийные перегрузки допускаются в исключительных случаях, например при выходе из строя одного из параллельно работающих трансформаторов подстанции или при срабатывании устройств АВР на подстанции или в сети, в результате чего к работающему трансформатору подключается дополнительная нагрузка. Допустимые аварийные перегрузки, в отличие от режимных, указываются вне зависимости от предшествующей нагрузки, температуры охлаждающей среды, места установки и системы охлаждения трансформатора. В таблице 1 приведены допустимые аварийные перегрузки масляных трансформаторов. У сухих трансформаторов длительность допустимой аварийной перегрузки значительно меньше, чем у масляных.

Таблица 1 – Допустимые аварийные перегрузки масляных трансформаторов

Перегрузка по току, %	30	45	60	75	100
Допустимая длительность перегрузки, мин	120	80	45	20	10

Для выявления и предотвращения недопустимых перегрузок выполняется максимальная токовая защита (МТЗ^{IV}), действующая при увеличении тока через трансформатор сверх заданного значения тока срабатывания защиты. Учитывая, что перегрузка является, как правило, симметричным режимом, т. е. во всех трех фазах трансформатора проходят одинаковые токи перегрузки, эта защита выполняется с помощью одного максимального реле тока, включенного на ток одной из фаз трансформатора.

На подстанциях с дежурным персоналом защита от перегрузки действует на сигнал, а на подстанциях без постоянного дежурства - должна действовать на разгрузку трансформатора путем автоматического отключения части менее ответственных потребителей.

Сверхтоки, вызванные внешними КЗ. При близких КЗ на элементах питаемой сети низшего или среднего напряжения через понижающий трансформатор проходят токи, намного превышающие его номинальный ток. Эти токи, называемые *сверхтоками* КЗ, оказывают вредное термическое и динамическое воздействие на обмотки трансформатора. Для ограничения длительности термического воздействия тока КЗ необходимо отключать трансформатор, причем тем быстрее, чем больше значение сверхтока внешнего КЗ. Эту задачу выполняет *максимальная токовая защита* (МТЗ^{III}) или плавкие предохранители.

Согласно ГОСТ 11687-75, для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками допустимая длительность прохождения тока при повреждении за трансформатором определяется выражением

$$t_{\text{дон}} \leq 1500 / k_{\text{расч}}^2, \quad (6.1)$$

но не более 4 с для трансформаторов 35 кВ и ниже и не более 3 с для трансформаторов 110 кВ и выше.

В приведенном выражении расчетная кратность тока $k_{рас}$ для трансформаторов мощностью менее 1 МВ·А определяется через максимальное расчетное значение тока трехфазного КЗ за трансформатором ($I_{к.вн.мах}^{(3)}$), связанного со значением напряжения КЗ ($u_k\%$), которое всегда указывается на паспортном щитке трансформатора, а также в соответствующих ГОСТ и справочниках, т. е.:

$$k_{расч} = I_{к.вн.мах}^{(3)} / I_{т.ном}, \text{ где } I_{к.вн.мах}^{(3)} = \frac{100}{u_k\%} \cdot I_{т.ном} \quad (6.2)$$

Для трансформаторов мощностью 1 МВА и более значение $I_{к.вн.мах}^{(3)}$ определяется с учетом влияния сопротивления питающей системы, которое уменьшает ток КЗ.

Отметим, что значения $t_{доп}$ для сухих трансформаторов устанавливаются техническими условиями на конкретные типы и группы этих трансформаторов.

Уставки по времени МТЗ трансформаторов ($t_{МТЗ}$) и время срабатывания плавких предохранителей, защищающих трансформатор, не должны превышать приведенных выше значений $t_{доп}$. Как правило, значение $t_{с.з} = 4$ с достаточны для обеспечения селективности действия МТЗ трансформаторов 110/35/6-10 кВ, 35/10 кВ и т.п.

Отметим, что частые внешние КЗ представляют большую опасность для трансформаторов.

Дифференциальная защита силового трансформатора и вариант ее выполнения

Наиболее эффективной защитой для силового трансформатора является *продольная дифференциальная защита*, обладающая абсолютной селективностью. В соответствии с ПУЭ эта защита должна устанавливаться на трансформаторах мощностью 6,3 МВ·А и более, а также на

трансформаторах 4 МВ·А при их параллельной работе. Дифференциальная защита устанавливается на трансформаторах мощностью 1...2,5 МВ·А в тех случаях, когда токовая отсечка (ТО^I) не удовлетворяет требованиям чувствительности, а максимальная токовая защита (МТЗ_{III}) имеет время срабатывания более 0,6 с. Дифференциальная защита предусматривается также для трансформаторов 1-2,5 МВ·А, эксплуатируемых в районах, подверженных землетрясениям, так как газовая защита здесь может использоваться только с действием на сигнал).

Сущность функционирования продольной дифференциальной защиты (в дальнейшем будем опускать слово «*продольная*») с циркулирующими токами показана на рис. 6.1а, б для одной фазы любого защищаемого элемента (ЗЭ) системы электроснабжения в предположении, что ЗЭ имеет в начале и в конце одинаковые по значению первичные токи ($I_{1-1} = I_{1-2}$). С обеих сторон защищаемого элемента установлены трансформаторы тока 1ТА и 2ТА, ограничивающие зону действия дифференциальной защиты, которая и является зоной абсолютной селективности дифзащиты. Вторичные обмотки 1ТА и 2ТА соединяются последовательно (конец И2 трансформатора тока 1ТА с началом И1 трансформатора тока 2ТА), а токовое реле дифференциальной защиты КА подключается к ним параллельно. Такая схема питания ИО называется схемой питания ИО на *циркуляцию* токов. Отметим, что имеется вариант включения ИО на *равновесие* напряжений.

При КЗ в точке К за пределами зоны действия дифзащиты (такое КЗ называется внешним или сквозным), а также в нормальном режиме нагрузки вторичные токи трансформаторов тока соответственно I_{2-1} и I_{2-2} циркулируют по соединительным проводам (плечам) защиты (рис. 6.1 а). При одинаковых коэффициентах трансформации трансформаторов тока 1ТА и 2ТА и их работе без погрешностей вторичные токи I_{2-1} и I_{2-2} равны между собой, а направления их в реле КА - противоположны. Следовательно, в рассматриваемом идеальном случае ток в реле КА

$$I_p = I_{2-1} - I_{2-2} . \quad (6.2)$$

Таким образом, по принципу действия дифференциальная защита не реагирует на повреждения вне ее зоны действия, т. е. на соседних элементах (линиях, двигателях и т.п.), и поэтому может быть выполнена без выдержки времени.

Практически в режиме нагрузки, и особенно при внешнем КЗ, ток в реле КА не может быть равен нулю, поскольку трансформаторы тока 1ТА и 2ТА имеют разные значения погрешностей, и даже при равных первичных токах вторичные токи I_{2-1} и I_{2-2} не равны между собой. Ток в реле КА в режимах нагрузки и внешнего КЗ называется током небаланса $I_{нб}$. Тогда выражение (6.2) следует изменить:

$$I_p = I_{2-1} - I_{2-2} = I_{нб} . \quad (6.3)$$

Для обеспечения несрабатывания дифференциальной защиты в этих режимах ток срабатывания реле КА выбирается большим, чем ток небаланса:

$$I_{с.р} \geq k_n \cdot I_{нб} . \quad (6.4)$$

где k_n - коэффициент надежности для современных дифференциальных защит принимается равным 1,3.

При КЗ в зоне действия дифференциальной защиты (рис. 6.1б) в случае двустороннего питания защищаемого элемента, направления первичного тока I_{1-2} и вторичного тока I_{2-2} изменяются на 180° . При этом в реле КА проходит сумма токов КЗ: $I_{р.к} = I_{2-1} - I_{2-2}$. Реле КА срабатывает на отключение поврежденного элемента от источников питания. В случае одностороннего питания в реле КА проходит один из токов КЗ: I_{2-1} или I_{2-2} . При этом дифференциальная защита также должна срабатывать на отключение.

Режим одностороннего питания является расчетным при оценке чувствительности дифференциальной защиты. Коэффициента

чувствительности определяется из выражения (6.5) и он должен быть не менее двух, т. е.:

$$k_{\text{ч}} = I_{\text{р.мин}} / I_{\text{с.р}} \geq 2, \quad (6.5)$$

где $I_{\text{р.мин}} = I_{2-1}$ или I_{2-2} (рис. 6.1б).

Особенности выполнения дифференциальной защиты трансформаторов

Силовой трансформатор, в отличие от линии, генератора, двигателя, имеет несколько характерных особенностей, влияющих на выполнение его продольной дифференциальной защиты.

В силовом трансформаторе в обмотке со стороны источника питания проходит ток намагничивания $I_{\text{нам}}$, отсутствующий в других обмотках и поэтому попадающий в реле $КА$ как ток небаланса.

В нормальном режиме значение тока намагничивания не превышает нескольких процентов номинального тока. Например, для трансформаторов 110 кВ ток намагничивания находится в пределах от 1,5 до 0,55% номинального тока. Но при включении трансформатора под напряжение или при восстановлении напряжения после отключения близкого КЗ. бросок тока намагничивания $I_{\text{нам.мах}}$ может в 5-8 раз превысить номинальный ток $I_{\text{н}}$ трансформатора (рис. 6.1г). Поэтому отстройка дифференциальной защиты (обеспечение ее несрабатывания) от бросков тока намагничивания является одной из задач, которая должна быть решена при использовании дифференциального принципа для защиты трансформатора.

В трехобмоточном силовом трансформаторе первичные токи обмоток $ВН$, $СН$ и $НН$ не равны между собой, а коэффициенты трансформации стандартных трансформаторов тока таковы, что практически невозможно с их помощью сделать равными между собой вторичные токи в плечах дифференциальной защиты (I_{2-1} и I_{2-2} на рис. 6.1е). Неравенство значений вторичных токов вызывает ток небаланса, как это видно из выражения (6.3).

Неравенство значений вторичных токов и ток небаланса могут также возникнуть за счет:

- различных погрешностей, с которыми работают разнотипные трансформаторы тока (1ТА и 2ТА на рис. 6.1а);
- регулирования напряжения на одной из сторон трансформатора, на которой и будут изменяться значения первичного и вторичных токов при неизменных значениях токов на других сторонах;
- углового сдвига между первичными токами в фазных выводах трансформатора при стандартной группе соединения обмоток Y/Δ-11; если не принять специальных мер, этот же угловой сдвиг будет и между вторичными токами.

Перечисленные особенности силового трансформатора определяют и особенности его дифференциальной защиты, для выполнения которой должны быть решены две основные задачи:

- отстройка от бросков тока намагничивания, возникающих при включении трансформатора;
- отстройка от токов небаланса при внешних КЗ.

Способы отстройки от бросков тока намагничивания при включении под напряжение

Максимальное значение мгновенное броска ток намагничивания при включении силового трансформатора под напряжение может достигать, как уже указывалось, 5-8-кратного значения номинального тока, но ток намагничивания быстро затухает и через 0,5...1 с становится уже намного меньше номинального. Эта особенность использовалась для выполнения грубых, но быстродействующих дифференциальных защит - так называемых дифференциальных отсечек. Ток срабатывания дифотсечки выбирается в 3...5 раза больше номинального тока трансформатора. Благодаря такой грубой настройке и с учетом некоторого замедления срабатывания (собственного времени выходного промежуточного реле) дифференциальную отсекку отстраивают от бросков тока намагничивания, но при этом заметно

снижается чувствительности защиты при КЗ в зоне действия. Поэтому дифференциальная отсечка применяется крайне редко.

Наиболее широко применяются дифференциальные защиты, в которых для отстройки от бросков тока намагничивания используются особенности несинусоидальной формы кривой тока в дифференциальной ветви защиты (рис. 6.12) при включении силового трансформатора под напряжение, а именно:

- смещение кривой броска тока намагничивания в одну сторону от нулевой линии и отсутствие обратных полуволн (рис. 6.1e);
- наличие в броске тока намагничивания бестоковых пауз $t_{\text{п}}$ длительностью около 7-10 мс именно за счет отсутствия обратных полуволн в токах намагничивания;
- большое содержание в броске тока намагничивания четных гармоник (главным образом второй), обусловленных с односторонним смещением мгновенного значения тока $i_{\text{нам}}$ относительно оси времени.

Подавляющее большинство дифференциальных защит выполнено на реле серий РНТ и ДЗТ, в которых для отстройки от бросков тока намагничивания используется первая из перечисленных особенностей. В этих реле исполнительный орган (токовое реле K_A) включен в дифференциальную цель защиты через промежуточный трансформатор, работающий с повышенной индукцией в магнитопроводе. Когда в первичную обмотку такого трансформатора тока подается однополярный ток (рис. 6.1a, б), апериодическая составляющая этого тока вызывает глубокое насыщение магнитопровода, весь первичный ток становится током намагничивания и, таким образом, в идеальном случае во вторичную его обмотку не трансформируется. Следовательно, исполнительный орган, включенный на вторичную обмотку насыщенного трансформатора тока, не может сработать. Такой трансформатор называется быстронасыщающимся трансформатором тока (БНТ) или насыщающимся (НТТ).

Если происходит КЗ в зоне действия защиты и через первичную обмотку НТТ проходит синусоидальный (двухполярный) ток КЗ (рис. 6.1ж), то НТТ трансформирует этот ток во вторичную обмотку и обеспечивает срабатывание исполнительного органа КА реле РНТ или ДЗТ. Надо отметить, что ток КЗ также может иметь аperiodическую составляющую, которая насыщает НТТ и препятствует трансформации периодической составляющей. Но аperiodическая составляющая тока КЗ быстро затухает, после чего реле срабатывает за счет периодической составляющей. Полное время срабатывания защиты с НТТ при самых неблагоприятных условиях не превышает 0,12 с.

В отличие от описанного идеального случая реальный НТТ трансформирует часть однополярного тока намагничивания. Кроме того, при включении трехфазного трансформатора под напряжение в одной из фаз может отсутствовать аperiodическая составляющая броска тока намагничивания (так называемый периодический бросок тока намагничивания, который хорошо трансформируется НТТ). Такая форма кривой тока на входе НТТ может иметь место и в том случае, если основные трансформаторы тока дифференциальной защиты работают с большими погрешностями и трансформируют только периодическую составляющую броска тока намагничивания. Все эти возможные случаи не позволяют выполнить с помощью НТТ высокочувствительную дифференциальную защиту силовых трансформаторов.

Практически ток срабатывания для реле принимается:

- РНТ равным $I_{с.з} \geq 1,3 \cdot I_{ном тр}$, а для
- ДЗТ – $I_{с.з} \geq 1,5 \cdot I_{ном тр}$, т. е. больше номинального тока защищаемого трансформатора.

Устранение углового сдвига между вторичными токами в плечах дифференциальной защиты.

В трансформаторах со схемой соединения обмоток Y/Δ-11 имеется угловой сдвиг на 30° между первичными токами соответствующих фаз на сторонах ВН и НН (рис. 6.1в, з), для упрощения анализа коэффициент трансформации силового трансформатора принят условно равным единице ($n = 1$). Поэтому коэффициенты трансформации трансформаторов тока 1ТА – 6ТА одинаковы. Для устранения подобного сдвига между вторичными токами, который является причиной очень большого тока небаланса, принято вторичные обмотки трансформаторов тока 1ТА–3ТА, установленных на стороне ВН (рис. 6.1в), соединять в такой же треугольник, как и обмотка НН, а вторичные обмотки 4ТА–6ТА - в такую же звезду, как и обмотка ВН защищаемого трансформатора. При правильной сборке схемы трансформаторов тока создается сдвиг вторичных токов $I_{2ВН}$ фаз в плече ВН на такой же угол 30° , как и соответствующих первичных токов $I_{1НН}$ в фазах стороны НН (рис. 6.1д). Этим обеспечивается совпадение по фазе вторичных токов, подводимых к дифференциальным реле КА соответствующих фаз (рис. 6.1в). Поэтому ток в дифференциальных реле I_p всех фаз при отсутствии других причин возникновения тока небаланса равен нулю: $I_p = I_{2ВН} + I_{2НН} = 0$.

Правильность сборки токовых цепей дифференциальной защиты трансформатора обязательно проверяется перед включением трансформатора и затем после его включения под нагрузку.

Устранение неравенства абсолютных значений вторичных токов в плечах дифференциальной защиты.

Для того чтобы устранить или свести к минимуму ток небаланса $I_{нб}$, возникающий по причине неравенства вторичных токов, применяются следующие способы:

– выравнивание величин вторичных токов в плечах дифзащиты путем подбора коэффициента трансформации трансформаторов тока на первичной и вторичной сторонах силового трансформатора. Коэффициенты трансформации выбираются таким образом, чтобы вторичные токи в плечах

защиты были, по возможности близкими (рис. 6.1а, $I_{2-1} \approx I_{2-2}$) или совпадали. При соединении обмоток силового трансформатора в Y/Y желательно, чтобы соотношение между коэффициентами трансформации трансформаторов тока определялись из выражения

$$k_{iII} / k_{iI} = n, \quad (6.6)$$

где n – коэффициент трансформации силового трансформатора.

При соединении обмоток силового трансформатора по схеме Y/Δ отношение коэффициентов трансформации трансформаторов тока было связано соотношением

$$k_{iIII} / k_{iII} = n / \sqrt{3} \quad (6.7)$$

Исходя из номинального тока соответствующей обмотки силового трансформатора, из стандартного ряда можно подобрать подходящий коэффициент трансформации, например k_{iII} . Тогда, используя приведенные выше соотношения, можно найти расчетное значение второго k_{iI} . Этот коэффициент в большинстве случаев оказывается нестандартным. Выбирают ближайший к расчетному. Это уже предопределяет возникновение токов небаланса из-за дискретности в выборе коэффициентов трансформации трансформаторов тока. Тогда, с целью снижения тока небаланса, возможно использование следующих способов, выполняемых на уровне самой схемы дифзащиты.

Это выравнивание вторичных токов, подводимых к дифференциальному реле, с помощью промежуточных трансформаторов тока, включенных в плечи дифференциальной защиты. Этот способ имеет ряд недостатков и сейчас практически не применяется.

Выравнивание в самом дифференциальном реле магнитодвижущих сил (МДС), создаваемых неодинаковыми по значению токами плеч дифференциальной защиты. Этот способ широко используется благодаря тому, что в дифференциальных реле серий *RHT-560* и *ДЗТ-10* предусмотрены специальные уравнивательные обмотки с большим числом ответвлений. Их

использование поясним на следующем. Если, например, у двухобмоточного трансформатора имеются два значения вторичных токов: 3 и 5 А (ток небаланса равен 2 А), то, подобрав для стороны с током 3 А число витков уравнивающей обмотки, равное 10, а для стороны с током 5 А - число витков, равное 6, получим равенство абсолютных значений МДС, представляющих произведение числа витков данной обмотки и проходящего по ней тока:

$$w_{\text{уп1}} \cdot I_{2-1} = 10 \cdot 3 = w_{\text{уп2}} \cdot I_{2-2} = 6 \cdot 5$$

Поскольку магнитодвижущие силы имеют такие же условные направления, что и создающие их токи, разность этих сил в обеих уравнивающих (первичных) обмотках НТТ равна нулю (рис. 6.2а), ток в его вторичной обмотке w_2 равен нулю и, следовательно, ток небаланса в исполнительном органе КА также равен нулю.

В реле серий РНТ-560 и ДЗТ-10 могут быть установлены лишь целые числа витков уравнивающих обмоток, поэтому точного равенства МДС удается добиться далеко не всегда. Оставшееся неравенство (небаланс) МДС приводит к появлению тока небаланса, который должен учитываться при выборе тока срабатывания защиты.

Ограничение тока небаланса, вызванного полной погрешностью трансформаторов тока.

ПУЭ требуют, чтобы все трансформаторы тока в схемах релейной защиты работали с полной погрешностью не более 10%. Для дифференциальных защит 10%-ная погрешность должна обеспечиваться при максимальном значении тока внешнего КЗ.

В ряде случаев можно добиться, чтобы погрешность трансформаторов тока была ниже 10%, путем:

- уменьшения сопротивления вторичной нагрузки (главным образом при увеличении сечения соединительных проводов), или
- последовательного включения двух трансформаторов тока на фазу, или

– идти на увеличение коэффициентов трансформации трансформаторов тока, чтобы снизить кратность ток (однако, при этом необходимо, чтобы коэффициент чувствительности дифзащиты удовлетворял требованиям ПУЭ).

В общем случае полностью устранить ток небаланса, вызванный погрешностью трансформаторов тока, невозможно. Поэтому он должен учитываться при выборе тока срабатывания защиты.

Отстройка от тока небаланса.

В дифференциальных защитах трансформаторов отстройка от тока небаланса с целью обеспечения несрабатывания защиты при внешних КЗ осуществляется в основном двумя способами:

– путем выбора тока срабатывания большим, чем максимальное расчетное значение тока небаланса $I_{нб}$, по условию (6.4); этот способ используется для защит с реле серии РНТ-560;

– путем торможения (загрубления) дифференциальной защиты вторичным током внешнего КЗ, циркулирующим в плечах защиты; этот способ используется для защит с реле серии ДЗТ-10.

И в том и в другом случаях, необходимо определить максимальное расчетное значение тока небаланса при внешнем КЗ.

Расчетное значение тока небаланса.

Расчетный ток небаланса в дифференциальных защитах трансформаторов принято представлять в виде суммы трех составляющих:

$$I_{нб} = I'_{нб} + I''_{нб} + I'''_{нб} \quad (6.8)$$

где $I'_{нб}$ - составляющая, обусловленная разностью намагничивающих токов трансформаторов тока в плечах дифференциальной защиты; в практических расчетах ее принято считать равной току намагничивания или полной погрешности ε худшего из трансформаторов тока защиты; $I''_{нб}$ - составляющая, обусловленная регулированием напряжения и, следовательно, изменением первичного тока только на регулируемой стороне

трансформатора; $I_{\text{нб}}^{///}$ - составляющая, вызванная неточностью выравнивания МДС с помощью уравнительных обмоток реле с НТТ. Подробно методику определения расчетного тока небаланса смотрите в учебной литературе.

Оценка реальных значений тока небаланса.

Анализ, в частности, показывает, что, так как у современных понижающих *трехобмоточных* трансформаторов 110 кВ предусматривается регулирование напряжения под нагрузкой (*РПН*) на стороне ВН в пределах $\pm 16\%$, а на стороне СН (35 кВ) - регулирование напряжения на отключенном трансформаторе (*ПБВ*) в пределах $\pm 5\%$, то ожидаемое значение тока небаланса $I_{\text{нб}}$ будет равно $0,21 \cdot I_{\text{к. макс. вн}}$ (при КЗ на стороне СН). Если принять $I_{\text{нб}} = 0,1 \cdot I_{\text{к. макс. вн}}$ и условно считать $I_{\text{нб}} = 0,04 \cdot I_{\text{к. макс. вн}}$, то ожидаемое значение тока небаланса составит $I_{\text{нб}} \approx 0,35 \cdot I_{\text{к. макс. вн}}$.

Если учесть, что стандартное значение напряжения КЗ между обмотками ВН и СН трехобмоточного трансформатора составляет $u_{\text{к(ВН-СН)}} \approx 10\%$, то ориентировочное значение тока КЗ будет равно

$$I_{\text{к. макс. вн}} \approx 10 \cdot I_{\text{ном. Тр}} .$$

Следовательно, расчетное значение тока небаланса составит

$$I_{\text{нб}} \approx 3,5 \cdot I_{\text{ном. Тр}} .$$

Если используются реле серии РНТ-560, то ток срабатывания дифференциальной защиты должен быть выбран по условию отстройки от тока небаланса (6.4), а именно:

$$I_{\text{с.з}} \geq 1,3 \cdot 3,5 \cdot I_{\text{ном. Тр}} = 4,5 \cdot I_{\text{ном. Тр}}$$

Дифференциальная защита с такой уставкой считается чрезвычайно грубой и, следовательно, малоэффективной даже в том случае, если для нее будет получен по выражению (6.5) предусмотренный ПУЭ минимальный коэффициент чувствительности, равный 1,5. Поэтому для трансформаторов 110 кВ, выпускаемых преимущественно с *РПН* ($\Delta U = \pm 16\%$), как правило, целесообразнее применять реле серии ДЗТ-10, которые обеспечивают отстройку (несрабатывание) дифференциальной защиты от токов небаланса

при внешних КЗ с помощью торможения циркулирующим в плечах защиты током КЗ. Такая защита практически всегда может иметь ток срабатывания не более $1,5 \cdot I_{\text{ном Тр}}$.

Для двухобмоточных трансформаторов 35 и 110 кВ в ряде случаев достаточная чувствительность защиты обеспечивается и при использовании реле РНТ. Поэтому реле серии РНТ-560 продолжают находить применение наряду с реле серии ДЗТ-10. Однако, согласно рекомендациям дифзащиту трансформатора желательно выполнять с реле ДЗТ-10.

В лабораторной работе используется реле РНТ-565. Поэтому все дальнейшее изложение привязано к этому реле.

Дифференциальная защита с реле серии РНТ-560 (дифзащита без торможения)

Устройство реле серии РНТ-560

Принципиальная схема устройства реле РНТ-565 приведена на рис. 6.2б, а на рис. 6.2е - схеме его внутренних соединений.

Реле состоит из трехстержневого трансформатора НТТ и исполнительного органа - электромагнитного реле КА. Трансформатор имеет следующие обмотки: дифференциальную $w_{\text{диф}}$, две уравнивательные $w_{\text{ур1}}$ и $w_{\text{ур2}}$, вторичную w_2 и короткозамкнутую обмотку w_k . Обмотки $w_{\text{диф}}$ и w_2 являются основными. Дифференциальную обмотку $w_{\text{диф}}$ включают в дифференциальную цепь защиты, а ко вторичной w_2 подключают исполнительный орган – токовое электромагнитное реле РТ-40/0,2. Обмотки $w_{\text{ур1}}$ и $w_{\text{ур2}}$ предназначены для компенсации неравенства вторичных токов в плечах защиты трансформатора.

Короткозамкнутая обмотка w_k позволяет усиливать или ослаблять подмагничивающее действие апериодического тока, т. е. регулировать степень отстройки реле от апериодической составляющей тока, попадающей в обмотку w_k . Действие короткозамкнутой обмотки (рис. 6.2б) объясняют тем, что переменный ток, протекающий по обмотке w_k , трансформируется в

обмотки w_2 и w_k стержня A , откуда поступает в обмотку w_k стержня B . В стержне B появляется поток того же направления, что и в стержне A . Потоки стержней A и B суммируются под некоторым углом, зависящим от соотношения реактивного и активного сопротивлений обмотки w_k , и направляются в стержень B , на котором намотана обмотка w_2 . Таким образом, часть тока, протекающего по w_k , попадает в w_2 путем двойной трансформации. Аперриодическая составляющая броска тока или тока небаланса ослабляет двойную трансформацию и этим достигается увеличение тока срабатывания реле при наличии аперриодической составляющей.

Доля тока двойной трансформации, следовательно, и степень загробления реле может регулироваться изменением активного сопротивления в ее контуре с помощью сопротивления R_k . При использовании реле РНТ-565 для защиты трансформаторов устанавливается $R_k \approx 3 \dots 4$ Ом.

При предельной загрузке трансформаторов тока дифференциальной защиты рекомендуется установить $R_k \approx 0,8 \dots 1$ Ом, что улучшает отстройку от бросков тока намагничивания. Надежность отстройки дифференциальной защиты от бросков тока намагничивания проверяется опытным путем, – пятикратным включением трансформатора под напряжение со стороны основного питания. При этих испытаниях в условиях реальной эксплуатации дифзащита переводится из режима аварийного отключения силового трансформатора на режим с действием на сигнал.

Степень загробления реле от неустановившихся токов с аперриодической составляющей характеризуется кривыми $E = f(k_E)$, приведенными на рис. 6.22, где E – коэффициент загробления;

$k_E = I_{ап} / I_{ср0}$ – коэффициент смещения; $I_{ср0}$ – ток срабатывания реле при отсутствии аперриодической составляющей; $I_{ср}$ – переменная составляющая тока срабатывания при наличии постоянной составляющей; $I_{ап}$ – постоянная составляющая тока в реле.

Ток срабатывания реле регулируется изменением числа витков дифференциальной или уравнительных обмоток. Кроме того, предусмотрена возможность небольшой подрегулировки сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 6.2в).

Имеется разъем (накладка) 11-12 для измерения тока небаланса в токовой обмотке исполнительного органа КА (рис. 6.2в).

Полные схемы дифференциальной защиты трансформаторов с реле серии РТН-565.

В общем случае необходимо отметить, что схема дифзащиты трансформатора зависит от его числа обмоток, от схемы их соединения. Некоторые из вариантов схем дифзащиты силового трансформатора приведены на рис. 7а–г.

В руководящих указаниях по защите трансформаторов приводятся типовые варианты схемы дифференциальных защит понижающих трансформаторов, которыми и следует пользоваться при реальном проектировании дифзащиты трансформатора.

Отметим, что схема на рис. 7б с использованием трех обмоток может обеспечить получение лучшей остроты от токов небаланса.

Для трехобмоточного трансформатора используются все три секции обмотки дифреле (рис. 7г). Уравнительные обмотки включаются в плечи защиты с меньшими вторичными токами, плечо с большим током подсоединяется к дифференциальной обмотке реле. Необходимо отметить также, что в случае применения реле РНТ на трехобмоточных трансформаторах на стороне НН должны быть обязательно установлены три трансформатора тока, а в схеме защиты - три реле. Последнее требование объясняется тем, что на трехобмоточных трансформаторах со схемами соединения обмоток $Y/Y/\Delta$ или $Y/\Delta/Y$ трехрелейная схема имеет в два раза более высокую чувствительность, чем двухрелейная при двухфазных КЗ на стороне НН или СН, где обмотка трансформатора соединена в Y . Для трансформаторов Y/Δ двухрелейная и трехрелейная схемы защиты имеют

одинаковую чувствительность при КЗ на стороне, где обмотка трансформатора соединена в Δ .

Рассматриваемая в лабораторной работе схема дифференциальной защиты с реле РНТ с двумя трансформаторами тока на стороне *НН* может применяться только на двухобмоточных трансформаторах и при условии, что установлено два реле РНТ (рис. 9).

Ток срабатывания дифференциальной защиты трансформаторов, выполненной на реле *РНТ-565*, как правило, определяется в соответствии с выражением (6.4). Значение этого тока практически всегда больше, чем ток, выбранный по условию отстройки от броска тока намагничивания трансформатора ($1,3 \cdot I_{\text{ном.Тр}}$). Ток срабатывания реле определяется по выражению (6.4). Для того чтобы обеспечить этот ток срабатывания, необходимо на рабочей (дифференциальной) обмотке реле РНТ-565 установить число витков, определяемое по выражению:

$$w_p = F_{c.p} / I_{c.p} \quad (6.9)$$

где $F_{c.p}$ - магнитодвижущая сила, необходимая для срабатывания реле, А; для реле РНТ-565 она равна 100 ± 5 А.

Технические характеристики реле РНТ-565:

- намагничивающая сила (ампервитки срабатывания) – 100 ± 5 А;
- пределы изменения уставки I_{cp} : а) при использовании только обмотки $w_{\text{диф}}$ – от 2,87 до 12,5 А; б) при использовании $w_{\text{диф}}$ и $w_{\text{ур}}$ – от 1,45 до 12,5 А.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- дифференциальные реле;
- силовой блок в составе: ЛАТР, силовой трансформатор с трансформаторами тока в его первичной и вторичной цепях;
- источник регулируемого постоянного тока;
- измерительные приборы, в том числе ВАФ-85М;

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А

Указания по порядку выполнения работы

Выполнение лабораторной работы состоит из двух частей:

- испытания дифференциального реле РНТ-565;
- исследование токораспределения в схеме дифзащиты двухфазного двухобмоточного силового трансформатора;
- испытание дифзащиты с реле РНТ-565 при постановке силового трансформатора под напряжение, токами нагрузки, токами КЗ вне зоны работы дифзащиты и внутри этой зоны.

Примечание. Конкретный объем экспериментально выполняемой работы определяет преподаватель.

1. Испытание дифференциального реле РНТ-565

Принципиальная схема испытания приведена на рис. 8. Изменение величины I_p переменного тока в дифференциальной обмотке производится от регулируемого источника переменного напряжения с включенным в токовую цепь реостата $R1$. Этим реостатом обеспечивают синусоидальность тока, протекающего в дифференциальной обмотке.

Наличие апериодической составляющей в токе переходного процесса имитируют пропуском через одну из уравнильных обмоток $w_{ур}$ постоянного тока, подаваемого в схему от регулируемого источника постоянного напряжения. Реостат $R2$ также используется для регулирования этого тока. Для измерения переменного и постоянного токов в схеме используются амперметр электромагнитной системы $A1$ и амперметр магнитоэлектрической системы $A2$.

Определение намагничивающей силы срабатывания реле.

Отключить уравнильную обмотку от источника постоянного напряжения. Для нескольких заданных чисел витков дифференциальной

обмотки $w_{\text{диф}}$ определяют ток уставки дифреле I_y по формуле $I_y = 100 / w_{\text{диф}}$.

Принимаемые в эксперименте числа витков $w_{\text{диф}}$ устанавливают штепсельными винтами на панельке НТТ. Подают питание переменного тока на схему и плавно его увеличивая, по замыканию контакта реле КА определяют истинный ток срабатывания дифреле $I_{\text{с.р}}$. Результаты записывают в таблицу 1.

Т а б л и ц а 1

Число витков диф. обмотки $w_{\text{диф}}$			
Расчетный ток уставки I_y (6.9)			
Реальный ток срабатывания дифреле $I_{\text{с.р}}$ (эксперимент)			
Реальное значение ампервитков срабатывания дифреле			

Снятие зависимости $E = f(k_E)$ (рис. 6.2г).

Для реле РНТ-565 эта зависимость снимается для двух случаев:

- для полностью введенного активного сопротивления $R_{\text{к}}$, и
- для полностью выведенного активного сопротивления $R_{\text{к}}$.

Для одной из заданных уставок по току срабатывания устанавливают соответствующее число витков дифференциальной (можно воспользоваться данными табл. 1).

Число витков уравнительной обмотки задает преподаватель.

Т а б л и ц а 2

$I_{\text{ап}}$	0	1	2	3	4	5
$R_{\text{к. макс}}$						
$I_{\text{ср}}$						
E						
k_E						
$R_{\text{к. мин}}$						
$I_{\text{ср}}$						
E						

k_E						
-------	--	--	--	--	--	--

В схему подают постоянный и переменный ток. Постоянный ток $I_{ап}$ устанавливают в пределах от 0 до 5 А.

Для каждого значения постоянного тока определяют ток срабатывания реле $I_{с.р.}$.

По полученным данным определяют коэффициент загробления E и коэффициент смещения k_E :

$$E = I_{с.р.} / I_{с.р.0} \quad \text{и} \quad k_E = I_{ап} / I_{с.р.}$$

где $I_{с.р.0}$ – ток срабатывания реле при отсутствии апериодической составляющей ($I_{ап} = 0$); $I_{с.р.}$ – переменная составляющая тока срабатывания при наличии постоянной составляющей; $I_{ап}$ – постоянная составляющая тока в реле.

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 2.

На основе экспериментальных данных построить зависимость $E = f(k_E)$.

Снятие характеристики намагничивания $U_p = f(AW)$ (рис. 6.2д)

Характеристика намагничивания представляет собой зависимость напряжения на обмотке исполнительного органа KA от первичной намагничивающей силы. Характеристику снимают с использованием только цепи переменного тока. С целью уменьшения величины тока в первичной обмотке можно включить сразу полное число витков дифференциальной и уравнивающей обмоток, например, для реле РНТ-565 (рис. 6.2в):

$$AW = w_{диф} + w_{ур1} = 35 + 34 = 69,$$

что соответствует току срабатывания $I_{ср} = 100 / 69 = 1,45$ А.

Конкретное значение устанавливаемых витков определяет преподаватель!

Параллельно обмотке исполнительного органа (зажимы 10, 11) включают вольтметр с внутренним сопротивлением не менее 100 кОм на пределе 3 В. Характеристику снимают при плавном изменении тока для значений 1; 2; 3; 4 и $5 \cdot I_{\text{ср}}$.

Правильность настройки исполнительного органа и исправность НТТ качественно характеризуют коэффициентом надежности $k_{\text{над}}$, который представляет собой отношение напряжений на обмотке реле при прохождении по первичной обмотке НТТ токов, равных $5 \cdot I_{\text{ср}}$ и $1 \cdot I_{\text{ср}}$:

$$k_{\text{над}} = \frac{U_p(5I_{\text{ср}})}{U_p(1I_{\text{ср}})}.$$

Коэффициент надежности должен быть не менее 1,35.

2. Экспериментально исследование схемы защиты трехфазного двухобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11

Схема защиты приведена на рис. 6.3.

Обратите внимание на то, чтобы вторичные зажимы трансформатора тока 5ТА на стенде были закорочены.

Данные экспериментальной схемы:

– в лабораторной модели дифзащиты используются трансформаторы тока ТА с нестандартными коэффициентами трансформации. Поэтому их коэффициенты k_{II} и k_{III} определяются экспериментально;

– расчетная номинальная мощность силового трансформатора $S_{\text{н}}$ указывается преподавателем;

– номинальные напряжения – 220/40 В, схема соединения Y/Δ.

В качестве нагрузки используется нагрузочный блок из трех активных резисторов, соединенных в треугольник

Со стороны питающего напряжения и на стороне низкого напряжения силового трансформатора имеются два блока ключей соответственно SA1 – SA3 и SA4 – SA6. С помощью этих ключей можно создавать неполнофазные режимы работы силового трансформатора как со стороны источника питания, так и со стороны, к которой подключается нагрузка.

Определение коэффициентов трансформации $k_{I\text{I}}$ и $k_{I\text{II}}$ и токораспределения в токовых цепях дифференциальной защиты.

На дифференциальных реле *TLAT* (рис. 8) на уравнительных обмотках установите число витков, равное нулю, а на дифференциальной обмотке установите число витков, равное 8 (для этого должны быть ввернуты штифты в гнезда с числами 8 и 0).

Вместо короткой перемычки в дифференциальных реле *TLAT1* и *TLAT2* (рис. 8) между зажимами 2 и 4, по которой протекает дифференциальный ток, установите длинные гибкие перемычки.

В результате таких переключений схема токовых цепей окажется в режиме, соответствующему схеме на рис. 6.1в, но без токовых реле *KA* и при соединении трансформаторов тока на стороне НН силового трансформатора в неполную звезду.

Для измерения токов в ветвях дифзащиты и их фазовых соотношений используется прибор ВАФ-85М.

Подключите коммутационными ключами SA4–SA6 нагрузочный блок на вторичные зажимы силового трансформатора.

Эксперименты по токораспределению выполняются для двух режимов: симметричного и несимметричного (при наличии либо продольной, либо поперечной несимметрии – режим определяет преподаватель).

А) Симметричный режим. Все ключи SA1 – SA6 на стенде должны находиться в положении «**Вкл**».

С помощью ЛАТРа стенда поднимите напряжение на первичной обмотке трансформатора до 220 В.

Определение коэффициентов трансформации k_{I1} и k_{I2}

С помощью прибора ВАФ-85М для одной фазы, например, А, определите необходимые значения токов для вычисления коэффициентов трансформаторов k_{I1} и k_{I2} ; рассчитайте эти коэффициенты.

Определение правильности сборки токовых цепей дифзащиты.

Правильность сборки вторичных токовых цепей дифзащиты можно проверить по сопоставлению направлений векторов токов I_p в токовых цепях, подходящих к соответствующим уравнительным обмоткам дифференциальных реле TLAT1 и TLAT2.

С помощью прибора ВАФ-85 для решения задачи выполните измерения токов I_p и их фазовых сдвигов φ_p в соответствующих токовых цепях дифзащиты. Определите величины дифференциальных $I_{нб}$ токов и их фазовые сдвиги $\varphi_{нб}$ в дифференциальных цепях соответственно реле TLAT1 и TLAT2. Данные записать в табл. 3.

Если с помощью прибора ВАФ-85М на пределе 1 А будет невозможно четко зафиксировать ток небаланса $I_{нб}$, то можно через клещи прибора пропустить несколько витков установленной между зажимами 2 и 4 дифреле гибкой перемычки. Тогда истинное значение тока небаланса будет равно показанию прибора, деленному на число пропущенных через клещи витков.

Сделать вывод о правильности соединения трансформаторов тока и токовых цепей дифзащиты силового трансформатора.

На основе данных таблицы построить векторные диаграммы токов, протекающих в уравнительных обмотках соответствующих дифреле. На основе соответствующих построений векторные диаграммы токов

определите параметры во вторичных цепях трансформаторов тока и в их первичных цепях. Результаты записать в таблицу 3.

Б) Несимметричный режим. Выполнить соответствующие измерения для указанного преподавателем несимметричного режима.

Данные записать в таблицу 3.

Примечание. Необходимость выполнения данного режима определяется преподавателем.

Т а б л и ц а 3

Токи и их фазы в первичных цепях ТА на стороне ВН силового трансформатора			Токи и их фазы, подтекающие к ТЛАТ со стороны ТА, соединенных в Δ			Токи и их фазы, подтекающие к ТЛАТ со стороны ТА, соединенных в неполную Y			Ток неба- ланса
Расчет			Эксперимент						
$I_{2A},$ φ_{2A}	$I_{2B},$ φ_{2B}	$I_{2C},$ φ_{2C}	$I_{pA},$ φ_{pA}	$I_{pB},$ φ_{pB}	$I_{pC},$ φ_{pC}	$I_{pa},$ φ_{pa}	$I_{pb},$ φ_{pb}	$I_{pc},$ φ_{pc}	$I_{нб},$ $\varphi_{нб}$
а) симметричный режим									
б) несимметричный режим (указать какой)									

Исследование схемы дифференциальной защиты трансформатора с реле РНТ-565

Исследуемый вариант схемы дифзащиты для двухобмоточного трансформатора приведен на рис. 6.2д.

Используя полученные в процессе эксперимента значения токов, протекающих в цепях уравнительных обмотках и дифференциальной ветви и выражение для баланса МДС (например, для реле фазы А)

$$I_{pA} \cdot w_{yp1} - I_{pa} \cdot w_{yp2} = I_{диф} \cdot w_{диф},$$

подберите числа витков $w_{ур}$ обмоток уравнивающих и $w_{диф}$ дифференциальной обмоток и установите их на дифреле.

Примечание. В реальных условиях числа витков по соответствующей методике рассчитываются аналитически.

Сопротивление R_k установите в среднее положение.

Контакты дифреле соедините параллельно и подсоедините к цепям управления светодиода.

а) Проверка действия дифзащиты при включении силового трансформатора.

Внимание. Как этот эксперимент, так все последующие выполняются под наблюдением преподавателя!

Путем пятикратной постановки силового трансформатора под номинальное напряжение 220 В в режиме ХХ проверьте, что дифзащита трансформатора не запускается в работу, т. е. светодиод не загорается.

б) Проверка работы дифзащиты при симметричной нагрузке.

Включите трансформатор под напряжение с симметричной трехфазной нагрузкой (используйте нагрузочный блок).

С помощью прибора ВАФ-85М определите токи небаланса в дифференциальных ветвях диф.реле TLAT1 и TLAT2.

Определите напряжение на обмотке реле КА дифреле и ток, протекающий в этой обмотке.

в) Проверка работы дифзащиты при несимметричной нагрузке (вид несимметрии задает преподаватель).

Программа та же, что и п. 5.2.2а.

Примечание. Данный эксперимент проводится по указанию преподавателя.

г). Проверка работы дифзащиты при имитации техфазного КЗ на стороне НН силового трансформатора в зоне ее действия.

Внимание. Эта проверка проводится на пониженном напряжении на первичной обмотке силового трансформатора.

Уменьшите с помощью ЛАТРа напряжение на первичной обмотке трансформатора до нуля. Отключите напряжение.

С помощью закоротки имитируйте короткое замыкание $K^{(3)}$ на низком напряжении в зоне действия дифзащиты.

Подайте на схему напряжение и постепенно поднимая его ЛАТРом на первичной обмотке трансформатора и, одновременно отслеживая

– величину тока ток $I_{\text{диф}}$ в дифференциальных ветвях дифреле TLAT1 и TLAT2, и

– величину первичных токов в фазах силового трансформатора, зафиксируйте момент срабатывания одного из дифреле (укажите, какое сработало) и запишите значения указанных выше токов, соответствующих этому моменту, а также величину напряжения на первичной обмотке трансформатора.

Уменьшите ЛАТРом напряжение до нуля и снимите напряжение со стенда (с трансформатора).

Используя выражение (6.9) определите общее число витков w_p и сопоставьте вычисленное значение с выставленными на дифреле значениями витков соответствующих обмоток, вызвавших срабатывание дифреле.

Пересчитайте полученный ток срабатывания дифзащиты на номинальное напряжение и сопоставьте его с номинальным током соответствующей обмотки трансформатора.

д). Проверка работы дифзащиты при имитации двухфазного КЗ на стороне НН силового трансформатора в зоне действия защиты.

Вид двухфазного КЗ указывается преподавателем.

С помощью закоротки имитируйте короткое замыкание $K^{(3)}$ на низком напряжении в зоне действия дифзащиты.

Подайте на схему напряжение и выполните эксперимент в той же последовательности, что и в предыдущем пункте (п. 5.2.2г).

Запишите полученные данные. Оставьте положение ЛАТРа в том, в котором экспериментально определялось срабатывание дифзащиты. Снимите с трансформатора напряжение.

Определите коэффициент чувствительности дифзащиты для участвующего в эксперименте трансформатора, приняв для него напряжение короткого замыкания, равны $u_k\% = 10\%$.

е). Проверка работы дифзащиты при имитации двухфазного КЗ на стороне НН силового трансформатора вне зоны действия защиты.

Перенесите закоротку вне зоны действия дифзащиты. Подайте на трансформатор напряжение и убедитесь, что дифзащита не работает.

После выполнения эксперимента уменьшите ЛАТРоМ напряжение до нуля, снимите напряжение со стенда и удалите установленную закоротку.

Примечание. На стенде имеется возможность вывести действие дифзащиты трансформатора на цепи отключения питания стенда, что позволяет продемонстрировать действие дифзащиты при имитации КЗ в зоне ее действия, например, при подаче напряжения на трансформатор, или при имитации КЗ в зоне действия, но находящемся под напряжением трансформаторе.

Данный эксперимент может быть выполнен только преподавателем!

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Используемые в экспериментах схемы.
3. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
4. Письменные выводы и ответы на поставленные в соответствующих пунктах экспериментальной части вопросы.
5. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из приведенного в п. 6 перечня вопросов для защиты лабораторной работы.
6. По учебной литературе изучить схемную реализацию полной защиты силового трансформатора на постоянном и переменном оперативных токах.

Контрольные вопросы

1. К каким типам защиты относится дифференциальная защита трансформатора и в чем ее особенности?
2. Что понимается под дифференциальной ветвью дифзащиты, как определяется ток при повреждении в зоне действия защиты и вне ее при: а) питании точки КЗ с одной стороны; б) при питании точки КЗ от двух источников напряжения.
3. Какие имеются особенности схем соединения вторичных цепей ТА, когда одна из обмоток силового трансформатора соединена в Δ , а другая в звезду и почему так необходимо делать?
4. От чего необходимо отстраивать дифзащиту трансформатора?

5. Что понимается под быстронасыщающимся трансформатором и какие функции он выполняет?
6. Какие реле вы знаете и в чем их особенности?
7. Как настроить реле типа РНТ-565 на заданный ток срабатывания и чему равны у этого реле ампервитки срабатывания?
8. Назначение уравнительных обмоток в реле типа РНТ-565.
9. Можно ли в реле использовать уравнительные обмотки без дифференциальных?
10. Что понимается под коэффициентом чувствительности реле типа РНТ-565?
11. Почему дифзащита с реле РНТ-565 не срабатывает при постановке трансформатора под напряжение?
12. Каким образом в реле типа РНТ-565 производится отстройка от бросков намагничивающего тока?
13. Чем обусловлено некоторое замедления в действии дифзащиты с реле РНТ при КЗ в зоне защиты по сравнению со схемой дифзащиты только с токовыми реле (рис. 6.1в)?
14. Каково назначение резисторов $R_{ш}$, R_k в схеме реле типа РНТ-565?
15. Допустима ли работа реле типа РНТ-565 с разомкнутой цепью короткозамкнутой обмотки?
16. Нейтраль первичной обмотки силового трансформатора (рис. 6.1в) заземлена (сеть с глухозаземленной нейтралью). Как поведет себя дифзащита трансформатора, если в сети будет КЗ типа $K^{(1)}$?

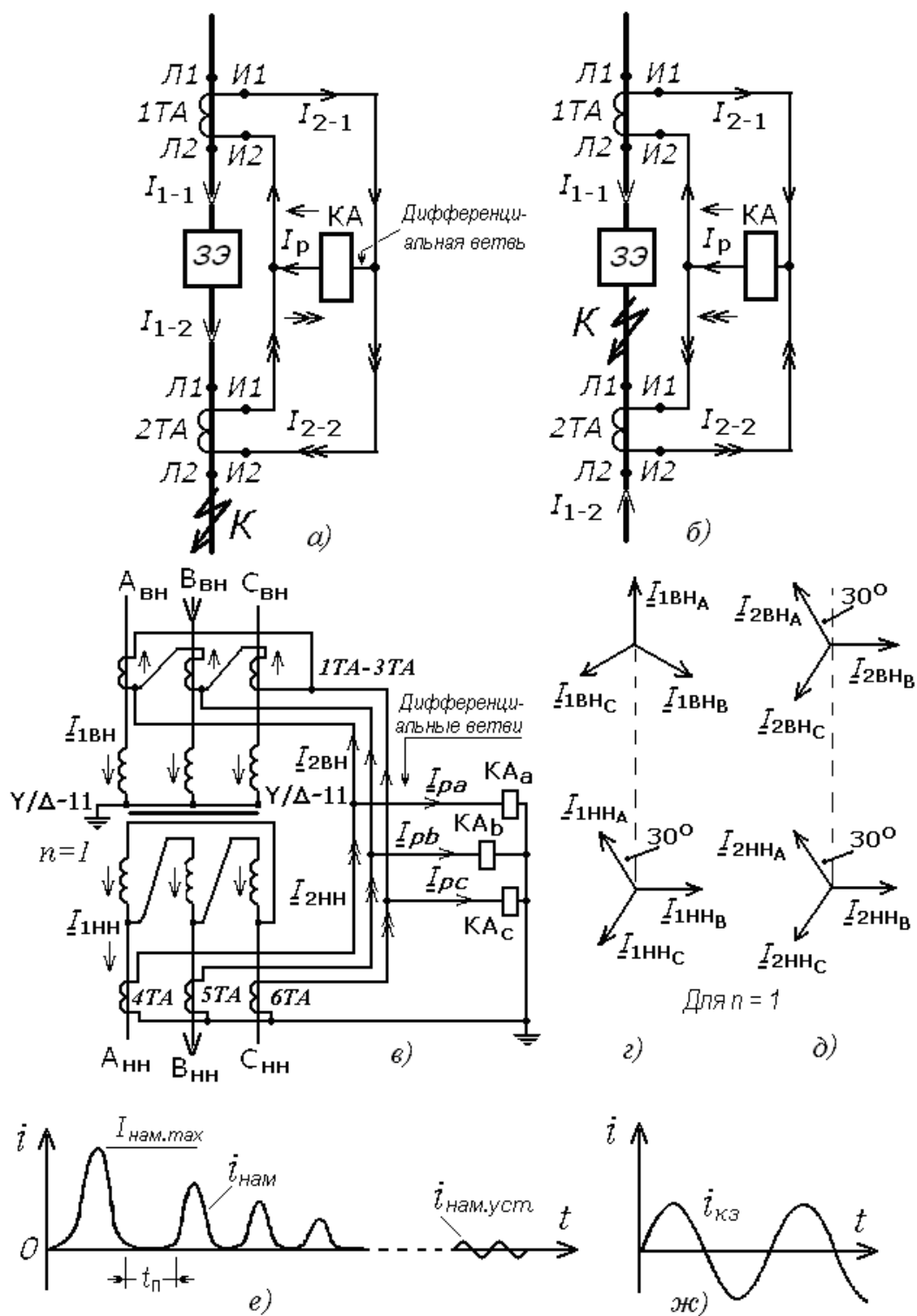


Рисунок 6.1 – К использованию дифференциального принципа для защиты силового трансформатора

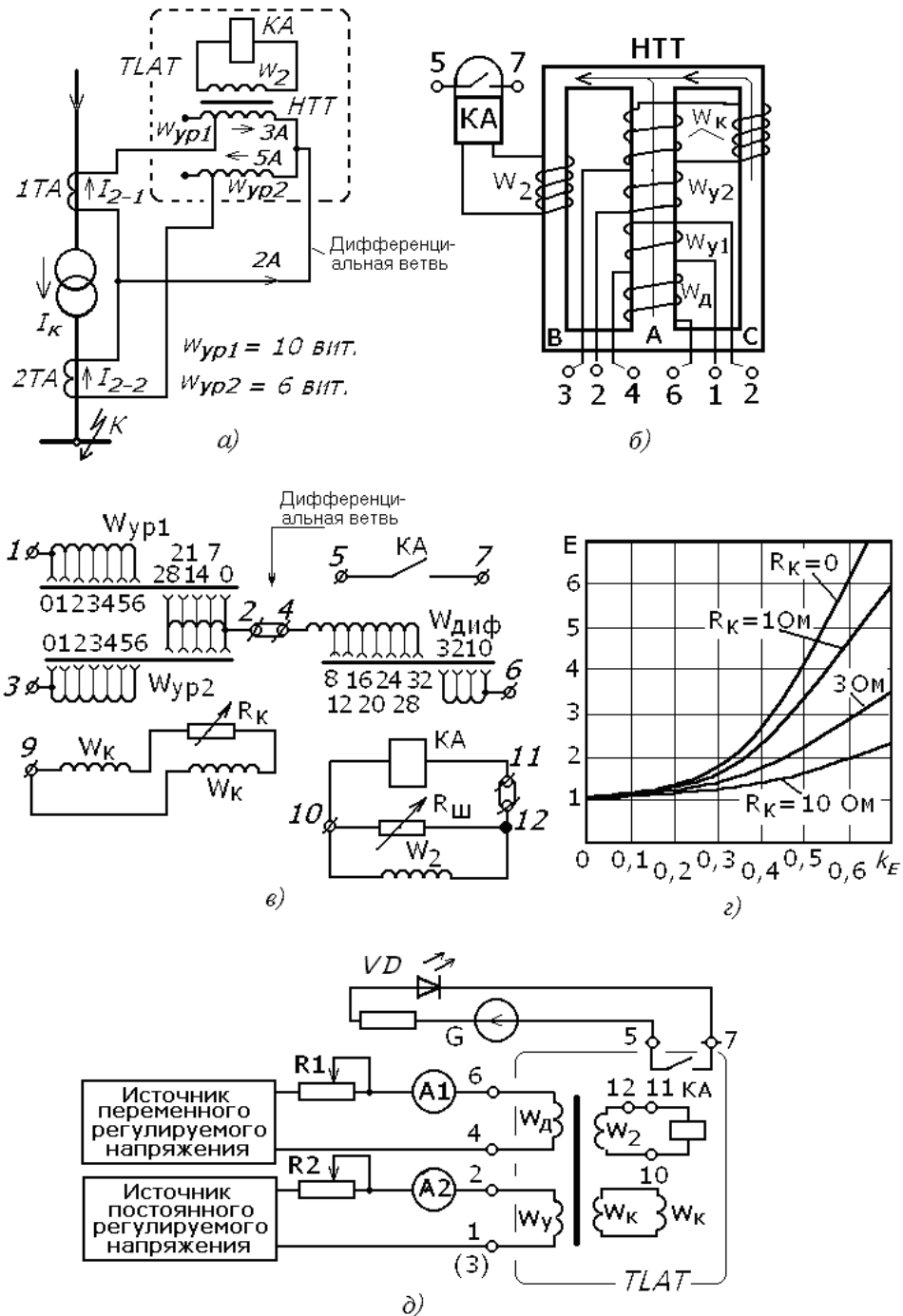


Рисунок 6.2 – Дифференциальное реле РНТ-565: а – к уравниванию МДС; б – конструкция магнитной системы с обмотками; в – схема внутренних соединений; г – характеристика отстройки от апериодической составляющей; д – схема снятия зависимости $E=f(k_E)$

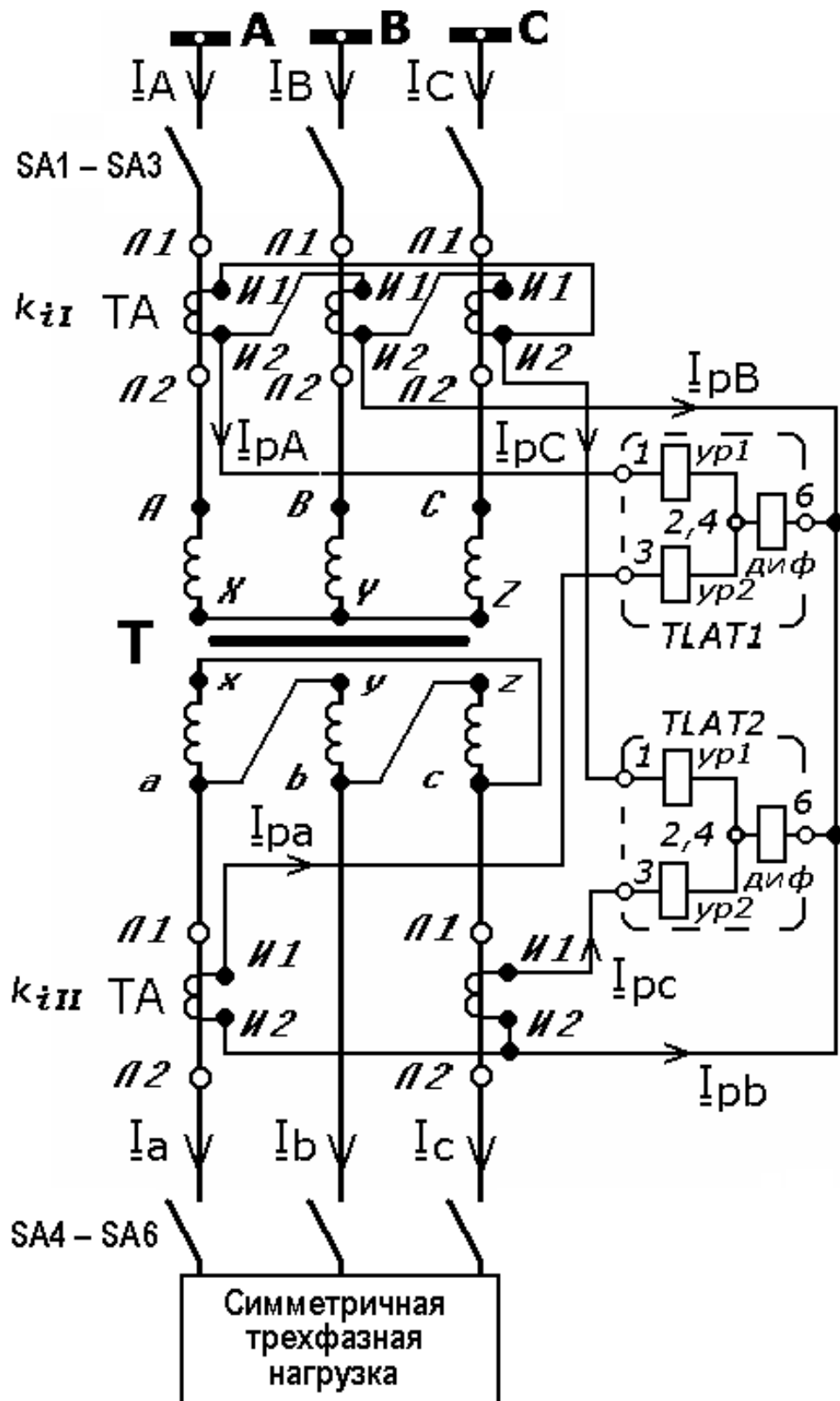


Рисунок 6.3 – Экспериментальная схема проверки дифференциальной защиты силового трансформатора

Лабораторная работа 7

Испытание фильтровых реле тока и напряжения

Цель работы: ознакомление с устройствами фильтров тока и напряжения обратной последовательности и проверка их основных электрических характеристик. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1. Ознакомление с теоретическими основами функционирования реле обратной последовательности тока и напряжения и областью их применения.
2. Изучение конструкций реле.
3. Изучение методики испытания реле-фильтров.
4. Выполнение экспериментов с реле-фильтрами с целью определения их электрических характеристик.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

Общие положения

Фильтр-реле состоит из фильтра тока или напряжения обратной последовательности (ФТОП или ФНОП), к выходным зажимам которого присоединено реагирующее реле. Фильтр-реле могут представлять собой электрически и магнитно-связанные компоненты, обеспечивающие получение соответствующего вида симметричные составляющие тока (напряжения), и выходное реле в виде электромеханического реле или реле, построенного на полупроводниковой основе посредством которого фиксируется факт появления соответствующей составляющей. Имеются исполнения, когда задача выделения симметричных составляющих решается с привлечением операционных усилителей.

Фильтром тока (напряжения) обратной последовательности называется такое устройство, при подведении к которому системы трехфазных несимметричных токов (напряжений) на выходе появляется ток (напряжение), пропорциональный только составляющей тока (напряжения) обратной последовательности на входе фильтра. Так, для фильтра напряжений обратной последовательности

$$\underline{U}_{вых,x} = m_x \underline{U}_{вх2}, \quad (7.1)$$

где $\underline{U}_{вых,x}$ – напряжение холостого хода на выходе фильтра (нагрузка не подключена), измеренное вольтметром с большим внутренним сопротивлением; $\underline{U}_{вх2}$ – составляющая обратной последовательности напряжений, подводимых к входным зажимам фильтра; m_x – некоторый

комплексный коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом холостого хода.

Для фильтра токов обратной последовательности аналогично

$$I_{\text{вых}} = \underline{m}_\kappa I_{\text{вх}2} \quad (7.2)$$

где $I_{\text{вых}}$ - ток на выходе фильтра в режиме КЗ (выходные зажимы замкнуты); $I_{\text{вх}2}$ - составляющая обратной последовательности токов, подводимых к входным зажимам фильтра; $\underline{m}_\kappa$ - так же в общем случае комплексный коэффициент пропорциональности.

Далее рассматриваются фильтрреле, которые уже в практике находят ограниченное применение, но на основе этих реле можно достаточно четко уяснить функционирование устройств подобного типа.

Отметим, что в микропроцессорных защитах задача выявления симметричных составляющих решается программно на основе решения известных соответствующих уравнений (см., например, МУ к лабораторным работам 1 и 2, часть 1 по дисциплине РЗАСЭ).

Фильтр-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М.

Фильтр-реле предназначен для использования в схемах защиты и автоматики в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричного КЗ и в начальный момент времени при трехфазном КЗ.

Схема фильтр-реле РНФ-1М представлена на рис. 7.1,а. Устройство использует двуплечий активно-емкостный фильтр. К входным зажимам фильтра 2, 4, 6 подводятся междуфазные напряжения $\underline{U}_{ab}$ и $\underline{U}_{bc}$ не содержащие составляющей нулевой последовательности. К выходным зажимам 9, 12 посредством выпрямительного моста VS , собранного на кремниевых диодах, подключается исполнительный орган KV - реле типа РН-50. Шкала реле отградуирована в значениях междуфазных напряжений обратной последовательности.

Анализ работы; фильтра ведется с помощью топографических диаграмм (рис. 7.1б, в) при XX, т. е. при отсутствии нагрузки на его выходе (накладка 11—12 снята) и при поочередной подаче на фильтр системы симметричных напряжений прямой и обратной последовательностей.

Как следует из топографической диаграммы (рис. 7.1б), равенство потенциалов выходных зажимов фильтра (точка M совпадает с точкой N , т. е. $\underline{U}_{MN} = 0$) обеспечивается при подведении к фильтру системы напряжений прямой последовательности при условии, что

$$R_{R1} = \sqrt{3}X_{C1}; \quad X_{C2} = \sqrt{3}R_{R2}, \text{ т. е. имеет место соотношение} \quad (7.3)$$

$$R_{R2}/X_{C2} = X_{C1}/R_{R2}$$

При этом вектор тока $\underline{I}_{ab1}$ в плече A опережает вектор напряжения $\underline{U}_{ab1}$ на 60° .

Практически напряжение на выходе фильтра при подведении к нему системы напряжений прямой последовательности бывает отличным от нуля. Это напряжение принято называть напряжением небаланса; $U_{mn1} = U_{нб}$. Наличие напряжения небаланса обусловлено несоответствием параметров фильтра их расчетным значениям или наличием *высших гармонических составляющих в подаваемых* на фильтр напряжениях. Напряжение небаланса ограничивает применение чувствительных реле на выходе фильтра. При напряжении небаланса, соизмеримом с напряжением срабатывания реле, оно может сработать в нормальном режиме; при напряжении небаланса, соизмеримом с напряжением возврата, реле не вернется в исходное положение при исчезновении несимметрии в сети после срабатывания реле. Следовательно, напряжение возврата реле должно быть больше напряжения небаланса. Отметим, что все дальнейшие теоретические выкладки приведены в предположении, что в схеме действуют одночастотные гармонические электрические сигналы.

Если к фильтру подведена система симметричных напряжений обратной последовательности, то потенциалы точек M и N оказываются неравными; на выходе фильтра появляется некоторое напряжение $\underline{U}_{MN}$ (рис. 7.1в). Если за исходное в качестве входного напряжения $\underline{U}_{вх2}$ принять междуфазное напряжение $\underline{U}_{ab2}$, т. е. $\underline{U}_{вх2} = \underline{U}_{ab2}$, то

$$\underline{U}_{MN.x} = 1,5e^{j60^\circ} \underline{U}_{ab2}, \quad (7.4)$$

где $1,5e^{j60^\circ} = \underline{m}_x$ – коэффициент, показывающий, что на выходе фильтра при подведении к нему системы междуфазных напряжений обратной последовательности появится напряжение, в 1,5 раза большее междуфазного напряжения $\underline{U}_{ab2}$ и сдвинутое по фазе относительно него на угол 60° (в сторону опережения).

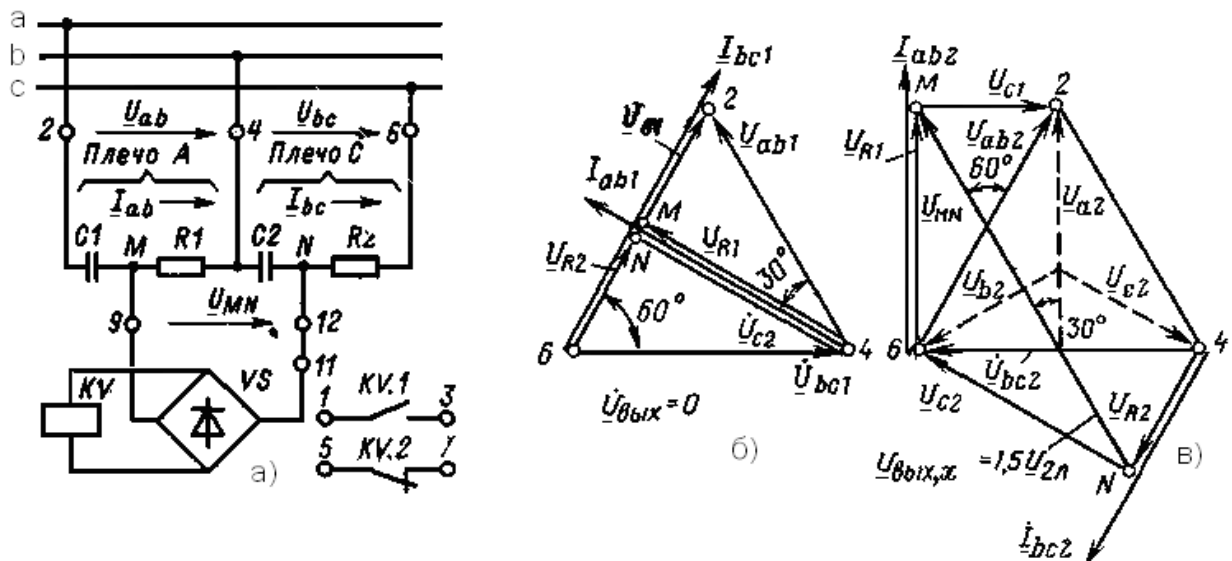


Рисунок 7.1 – Фильтр-реле напряжения обратной последовательности РНФ-1Ф: а – схема внутренних соединений; б – топографическая диаграмма ФНОП при подведении системы междуфазных напряжений прямой последовательности; в – то же обратной последовательности

Если же за входное принять фазное напряжение $\underline{U}_{вх} = \underline{U}_{a2}$, то

$$\begin{aligned}\underline{U}_{MN.x} &= 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot \underline{U}_{a2} \\ \underline{m}_x &= 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ}\end{aligned}\quad (7.5)$$

При несимметричных КЗ в цепи защищаемого объекта напряжения могут быть представлены в общем случае геометрической суммой составляющих напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

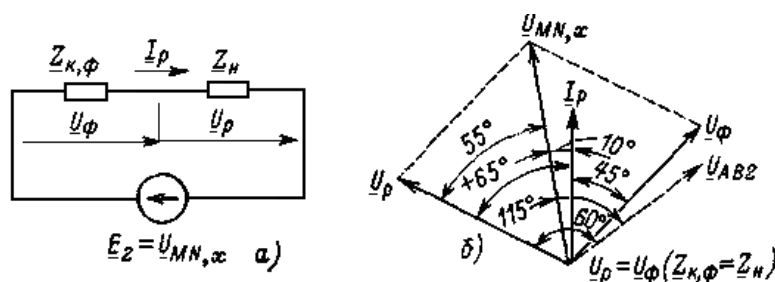


Рисунок 7.2 – Работа фильтра напряжения обратной последовательности под нагрузкой: а – схема замещения нагруженного фильтра; б – векторная диаграмма для случая $Z_{к.ф}=Z_H$

Но так как система напряжений прямой последовательности не вызывает появления напряжения на выходе данного фильтра, а подводимые к фильтру междуфазные напряжения не содержат составляющих нулевой последовательности, то при несимметричных КЗ напряжение на выходе будет определяться только составляющей обратной последовательности.

Работа фильтра при подключении к нему нагрузки несколько изменяется. При использовании метода наложения схема замещения нагруженного фильтра принимает вид, представленный на рис. 7.2а.

Нагрузка (например, реле) с сопротивлением Z_H подключается к выходным зажимам фильтра, который заменен сопротивлением КЗ $Z_{н.ф}$, представляющим собой сопротивление самого фильтра, измеренное со стороны выходных зажимов при закороченных входных зажимах (сопротивлением источников по сравнению с внутренним сопротивлением фильтра, можно пренебречь); включенная в цепь нагрузки ЭДС $\underline{E}_2$ равна

напряжению х.х. фильтра (равны абсолютное значение и фаза). Из рис. 7.2а видно, что

$$U_p = U_{MN.x} \cdot Z_n / |Z_{к,ф} + Z_n| \quad (7.6)$$

Максимальная чувствительность схемы фильтр-реле достигается, когда $Z_n = Z_{к.ф}$ е. когда сопротивление реле равно сопротивлению КЗ фильтра. Векторная диаграмма нагруженного фильтра показана на рис. 7.2б. Если принять угол полного сопротивления фильтра $Z_{к.ф}$ равным -45° (характер сопротивления емкостный), а угол полного сопротивления нагрузки $\varphi_n = +65^\circ$ (сопротивление нагрузки имеет индуктивный характер), то из построения окажется, что фаза напряжения на реле будет сдвинута относительно фазы подведенного напряжения $\underline{U}_{AB2}$ на угол $60 + 55 = 115^\circ$, где 60° - угол сдвига $\underline{U}_{MNx}$ относительно вектора $\underline{U}_{AB2}$, а 55° - угол сдвига $\underline{U}_{MNx}$ относительно вектора $\underline{U}_p$. Данное положение следует учитывать в тех случаях, когда работа реле определяется не только значением $\underline{U}_p$, но и его фазой по отношению к току, подводимому к реле.

Значение напряжения на обмотке реле также несколько уменьшается. Так, для фильтр-реле типа РНФ-1М отношение напряжения на обмотках выходного реле к междуфазному напряжению обратной последовательности, подаваемому на входные зажимы фильтра, составляет 1,1, т. е.

$$U_{\delta} = 1,1 \cdot U_{i\delta 2}$$

Фильтр-реле тока обратной последовательности типов РТФ-7.1, РТФ-7.2

Фильтр-реле типов РТФ-7/1 и РТФ-7/2 предназначены для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных КЗ и перегрузках токами обратной последовательности. Устройства РТФ-7 содержат двуплечий активно-емкостный фильтр токов обратной последовательности.

Питание фильтра осуществляется от цепи трехфазного тока при помощи двух промежуточных трансформаторов тока $TA1$, $TA2$, соединенных по схеме, исключающей попадание в фильтр составляющих нулевой последовательности. Принципиальная схема фильтра и векторные диаграммы, поясняющие его работу в режиме КЗ, когда М и N соединены между собой, приведены на рис. 7.3.

Диаграммы построены для случая, когда коэффициенты трансформации трансформаторов тока равны единице. Сопротивления в плечах фильтра удовлетворяют соотношениям

$$R_A = \sqrt{3}X_A; X_B = \sqrt{3}R_B \quad (7.7)$$

Из векторных диаграмм следует, что при прохождении по цепи токов прямой последовательности ток на выходе

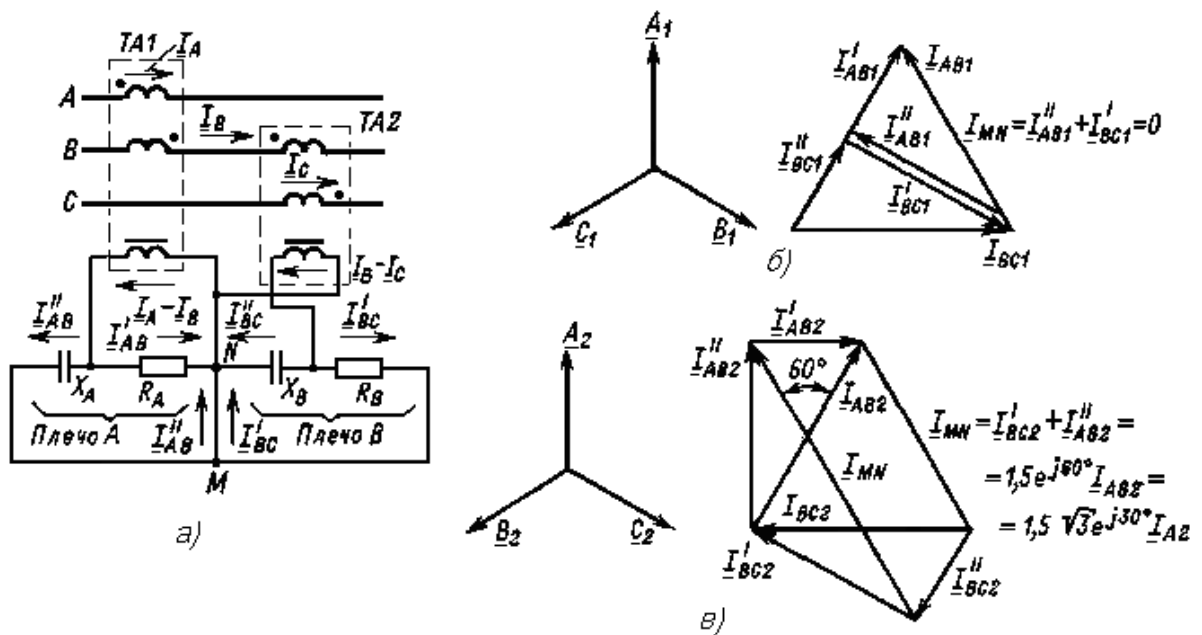


Рисунок 7.3 – Фильтр тока обратной последовательности: а – схема фильтра ФТОП; б – векторная диаграмма при включении фильтра на систему токов прямой последовательности; в – то же, но обратной последовательности

фильтра в цепи MN отсутствует. Если же по цепи проходит ток обратной последовательности, то на выходе появится ток

$$\underline{I}_{MN} = 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \cdot \underline{I}_{A2} \quad (7.8)$$

и коэффициент $\underline{m}_k$ в соответствии с рис. 7.3

$$\underline{m}_k = 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot e^{j30^\circ} \quad (7.9)$$

Так же как у фильтров напряжения обратной последовательности, максимальная мощность на выходе фильтра будет в том случае, когда

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_{\phi.x} \quad (7.10)$$

где $Z_{\phi.x}$ - сопротивление XX (внутреннее сопротивление самого фильтра, измеренное со стороны выходных зажимов при разомкнутых входных зажимах).

Полная схема фильтр-реле РТФ-7/1 показана на рис. 7.4.

Помимо фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) устройство содержит: схему выпрямления – четырехплечий мост VS , элемент ограничения - стабилитроны $VD1$, $VD2$, элемент сглаживания – конденсатор $C3$, схему измерения тока обратной последовательности – миллиамперметр, сигнальный орган $K1$, отключающий орган — поляризованное реле $K2$.

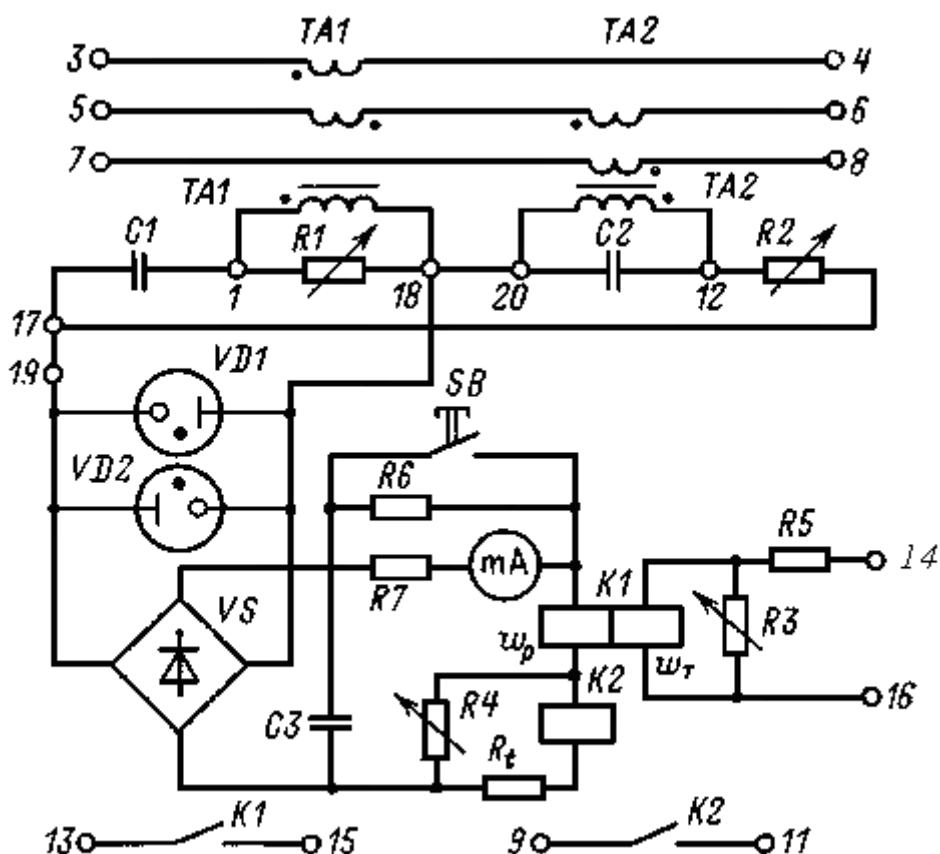


Рисунок 7.4 – Схема внутренних соединений фильтр-реле РТФ-7/1

Регулирование токов срабатывания производится резисторами $R3$ – для сигнального элемента, $R4$ – для отключающего. Шкалы уставок градуируются в относительных единицах. Цифры показывают, какую долю номинального тока реле составляет ток обратной последовательности при срабатывании сигнального или отключающего органа,

$$I_{уст2*} = I_2 / I_{ном} \quad (7.11)$$

где $I_{уст2*}$ - уставка по шкале по току обратной последовательности.

Для повышения коэффициента возврата более чувствительного реле $K1$ использовано торможение от сети постоянного оперативного тока. Поляризованное реле $K1$ имеет две обмотки: рабочую w_p и тормозную w_t . Рабочая обмотка включена непосредственно в цепь выпрямленного выходного тока фильтра, а тормозная подключена к сети оперативного постоянного тока через резистор $R5$, предназначенный для ограничения тока

в тормозной обмотке. Принцип действия и схема внутренних соединений фильтр-реле типа РТФ-7/2 аналогичны принципу и схеме РТФ-7/1. Разница заключается в значениях номинальных токов и диапазонов уставок сигнального и отключающего органов.

Оборудование и материалы

Для выполнения лабораторной работы используются:

- трехфазный трансформатора, нагрузочные устройства;
- прибор ВАФ-85М, цифровые клещи для измерения токов и напряжений.

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

Примечание. Возможны три варианта выполнения лабораторной работы, отличающиеся объемом лабораторных экспериментов:

- исследование реле-фильтра напряжения обратной последовательности;
- исследование реле-фильтра тока обратной последовательности;
- исследование обоих реле-фильтров.

Вариант выполнения лабораторной работы определяется преподавателем.

1 Исследование фильтр-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М

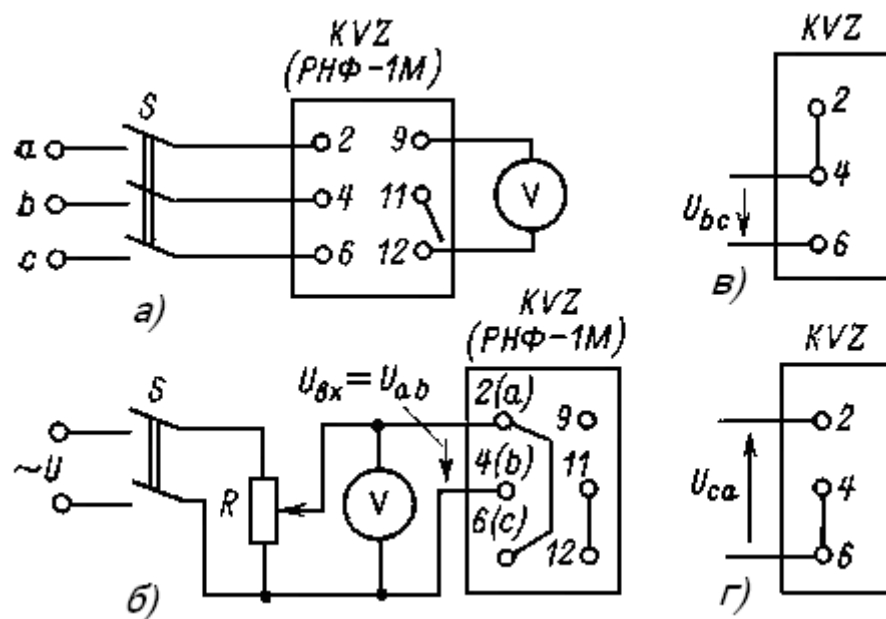


Рисунок 7.5 – Испытание фильтр-реле напряжения обратной последовательности:

- a* – определение напряжения небаланса ФНОП;
б – имитация двухфазного КЗ между фазами АС;
в – то же АВ; *г* – то же ВС

- 1) Ознакомиться с устройством фильтр-реле напряжения обратной последовательности; начертить схему внутренних соединений; записать паспортные данные.
- 2) Проверить с-помощью фазоуказателя порядок чередования фаз питающей цепи, междуфазные напряжения которой должны быть 100 В.
- 3) Измерить значение трех междуфазных напряжений. Их значения могут отличаться друг от друга не больше чем на 1,5 В.
- 4) Измерить значение напряжения небаланса ненагруженного фильтра $U_{нб,ф}$ (перемычка 11—12 снята) при подведении к нему системы междуфазных напряжений прямой последовательности (рис. 7.5*a*); к выходным зажимам фильтра подключить вольтметр с большим внутренним сопротивлением ($R_v > 1000 \text{ Ом/В}$). Полученное значение не должно

превышать 1 В. Настройка фильтра производится (только с разрешения преподавателя) с помощью регулируемых резисторов $R1$, $R2$ (см. рис. 7.1а).

5) По той же схеме питания фильтра измерить распределение напряжений на его элементах ($C1$, $R1$, $C2$, $R2$) поочередным подключением вольтметра соответственно к зажимам 2-9, 9-4, 4-12, 12-6; с помощью прибора ВАФ-85М *определить* фазу каждого из измеренных напряжений (относительно вектора U_{ab}).

6) По полученным значениям построить в масштабе векторную диаграмму ФНОП. Убедиться, что отношение падений напряжений на элементах фильтра в плечах равно U_3 .

7) Подать на фильтр- систему междупазных напряжений обратной последовательности тех же значений, что и в п. 4, и измерить значение и фазу напряжения на его выходе. Определить значение коэффициента n_{2x} ; построить векторную диаграмму.

8) Проверить напряжение срабатывания и возврата реле на рабочей (заданной преподавателем) уставке подачей на вход фильтра напряжения, имитирующего двухфазное КЗ в месте установки защиты между фазами АС (рис. 7.4б). Напряжение срабатывания определяется при плавном повышении напряжения от нуля до срабатывания реле, напряжение возврата - при плавном снижении напряжения от номинального значения до возврата реле. Определить значение коэффициента возврата.

9) Проверить напряжение срабатывания реле на той же рабочей уставке при имитации других вариантов двухфазного КЗ (рис. 7.5в, г).

10) Сделать вывод о пригодности испытуемого фильтр-реле в эксплуатации.

Дополнительные указания к проведению работы.

1. Векторная диаграмма напряжений при имитации двухфазного КЗ между фазами АС и разложение их на симметричные составляющие прямой и

обратной последовательностей показаны на рис. 7.6а. Междофазные напряжения прямой и обратной последовательностей "будут равны

$$\underline{U}_{ab1} = \underline{U}_{ab} e^{-j30^\circ} / \sqrt{3} \quad (7.12)$$

$$\underline{U}_{ab2} = \underline{U}_{ab} e^{-j30^\circ} / \sqrt{3} \quad (7.13)$$

Отсюда следует, что междофазное напряжение обратной последовательности при срабатывании устройства ($U_{c,y}=U_v$) определяется по формуле

$$U_{\text{мф2с.р}} = U_{\text{с.у}} / \sqrt{3} \quad (7.14)$$

2. Настройка фильтра напряжений обратной последовательности РНФ-1М оценивается по идентичности его работы при имитации различных сочетаний двухфазных КЗ;

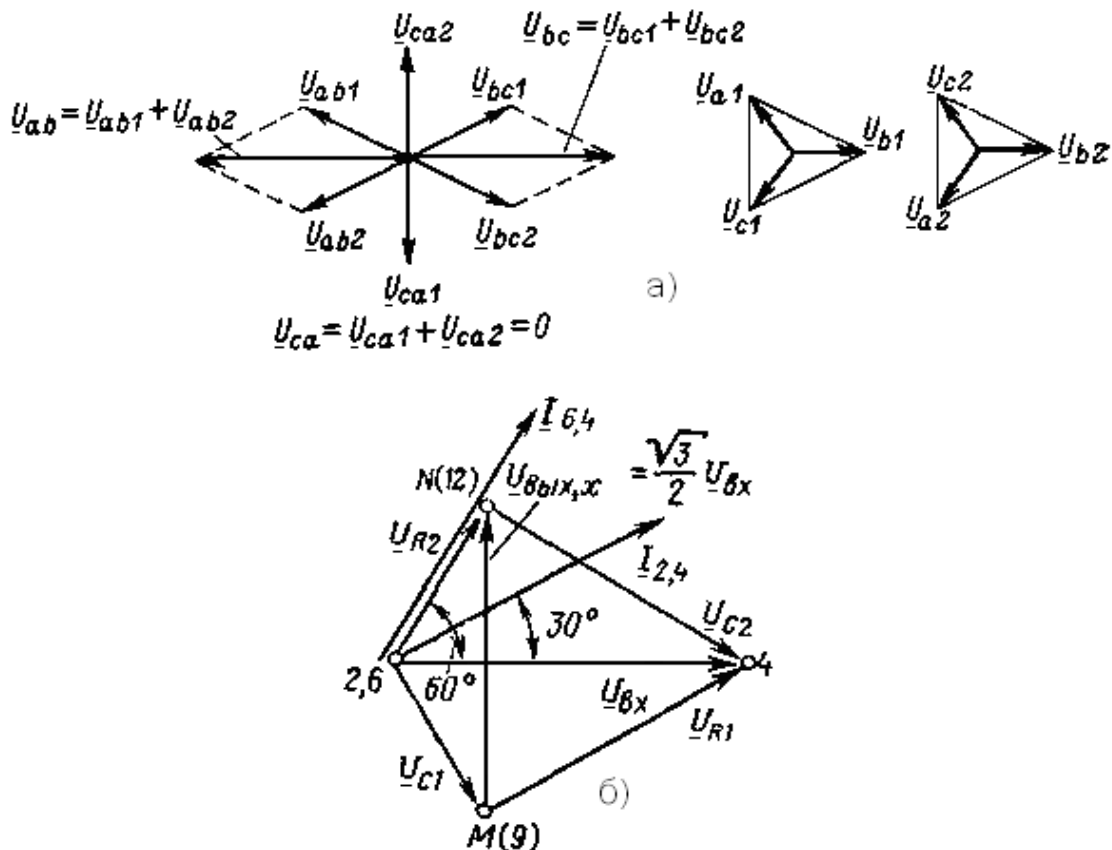


Рисунок 7.6 – Векторные диаграммы при имитации двухфазного КЗ между фазами АС: а – разложение междофазных напряжений на симметричные составляющие; б – диаграмма ненагруженного ФНОП

ФНОП считается настроенным удовлетворительно, если полученные значения напряжений срабатывания при этих режимах не будут отличаться от своего среднего значения более чем на 2–3%.

3. При отсутствии трехфазной симметричной системы проверка настройки фильтра напряжений обратной последовательности может производиться при использовании однофазной схемы - аналогично имитации двухфазного КЗ между фазами AC (рис. 7.5). К входным зажимам фильтра 2—4 подается напряжение $U_{вх} = 100 \text{ В}$; перемычка 11—12 снята. Производятся измерения напряжений на элементах фильтра и его выходе. В соответствии с векторной диаграммой напряжений, построенной для фильтра при указанной схеме его питания (рис. 7.5,б), значения напряжений на элементах фильтра и его выходе в этом случае должны быть соответственно равны $U_{2-9} = U_{6-12} = 50 \text{ В}; U_{9-4} = U_{4-12} = 86,5 \text{ В}; U_{\dot{a}\dot{u}\dot{o}9-12} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\dot{a}\dot{o}} = 86,5 \text{ В}$

4. Так как увеличенное значение напряжения небаланса может быть вызвано наличием высших гармоник в рабочем напряжении, настройку фильтра желательно производить с помощью электронного осциллографа. Электронный осциллограф дает возможность обнаружить присутствие высших гармоник, отфильтровать эти гармоники и настроить фильтр обратной последовательности на основную гармонику; определить максимальное значение небаланса основной гармоники.

Предварительно перед настройкой фильтра от постороннего источника на вход Y (*Вертикальное усиление*) осциллографа должно быть подано синусоидальное напряжение, изменяющееся с частотой 50 Гц. Воздействуя на рукоятку *Частота плавно*, произвести регулировку так, чтобы на экране установился один период кривой вспомогательного напряжения. Не изменяя положения, всех рукояток осциллографа, снять с пластин U вспомогательное напряжение и подвести напряжение с выходных зажимов фильтра. Для получения на экране достаточной амплитуды проверяемого напряжения следует воздействовать на рукоятку *Вертикальное усиление*. По полученной

на экране кривой можно судить о наличии высших гармоник - кривая напряжения не будет чисто синусоидальной. Настройкой следует стремиться свести к нулю амплитуду первой гармоники в кривой напряжения небаланса.

2 Исследование фильтр-реле тока обратной последовательности типов РТФ-7/1, РТФ-7/2.

1) Ознакомиться с устройством фильтр-реле тока обратной последовательности типа РТФ-7; начертить схему внутренних соединений; записать паспортные данные.

2) Проверить настройку фильтра токов обратной последовательности (ФТОП), для чего собрать схему, представленную на рис.7.7а; снять перемычку 17—19; к зажимам 17—18 {17—11) подключить миллиамперметр. Подавая на вход фильтра систему токов прямой последовательности, равных $1,5U_{ном}$, измерить значение тока небаланса на его выходе. Полученное значение не должно превышать 1,5 мА. Настройка фильтра при $I_{нб} > 1,5$ мА осуществляется с помощью регулируемых резисторов $R1, R2$ (см. рис. 7.7б).

3) Проверить уставки срабатывания сигнального $K1$ и отключающего $K2$ органов. Проверка осуществляется по схеме; имитирующей двухфазное КЗ между фазами A и B (рис. 7.7б). Измерение токов срабатывания производится при крайних и рабочей (заданной преподавателем) уставках по шкале. Ток обратной последовательности при срабатывании реле может отличаться от уставки не более чем на 10%. Как следует из векторных диаграмм токов прямой и обратной последовательностей и полученных путем их сложения векторов токов повреждения $\underline{I}_A^{(2)}, \underline{I}_B^{(2)}$ (рис. 7.7в), ток обратной последовательности, при котором должно сработать реле $I_{A2c,p}$ определяется выражением

$$I_{A2c,p} = I_{Ac,p} / \sqrt{3}$$

где $I_{A2C,P}$ показания амперметра при срабатывании реле.

4) Для сигнального органа при тех же уставках определить значение коэффициента возврата. Сравнить с допустимыми значениями $k_B \geq 0,7$ на первой уставке; $k_B \geq 0,85$ - на последней.

5) Сделать вывод о пригодности испытуемого устройства.

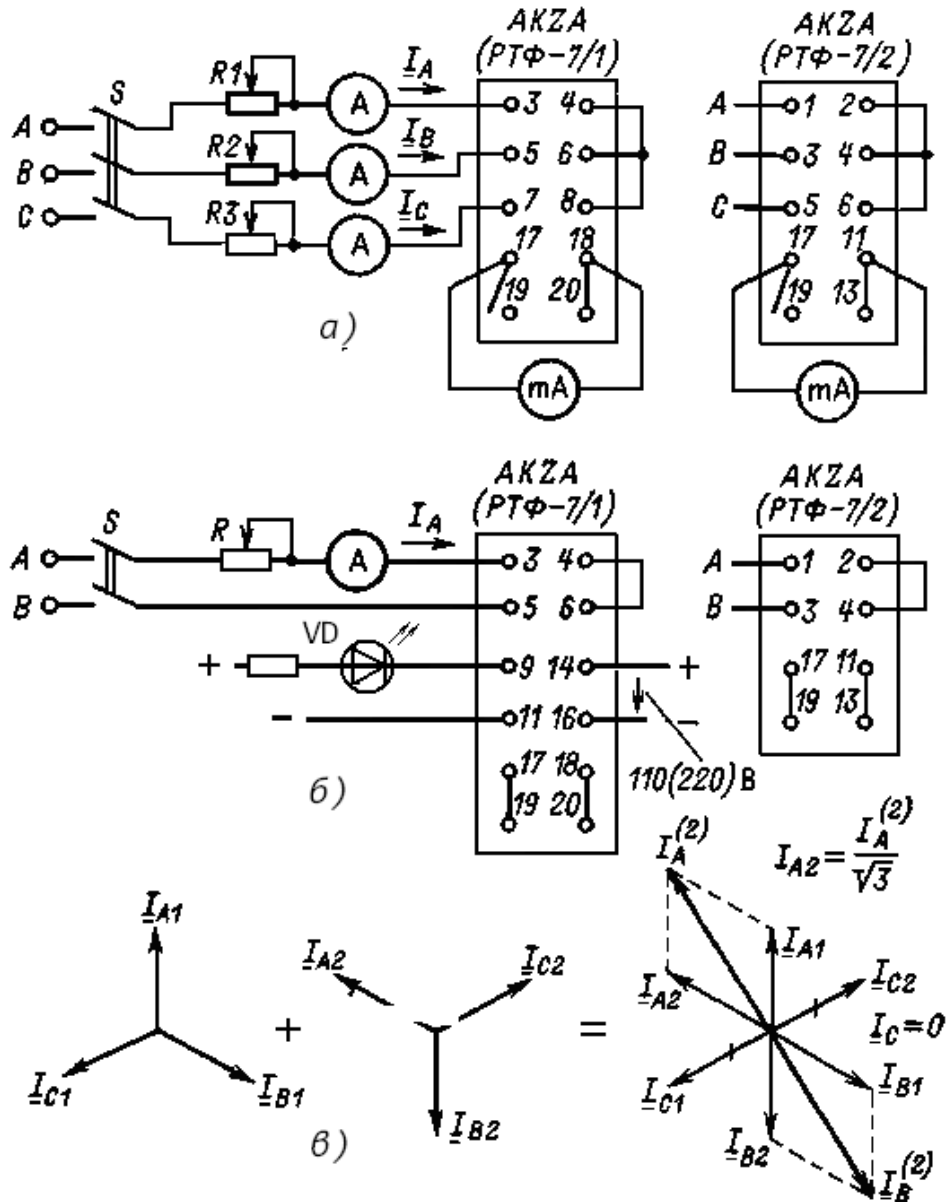


Рисунок 7.7 – Проверка фильтр-реле тока обратной последовательности типов РТФ-7/1 и РТФ-7/2: а – измерение тока небаланса ФТОП; б – имитация двухфазного КЗ между фазами А и В; в – векторные диаграммы симметричных составляющих и токов в фазах при имитации двухфазного КЗ между фазами А и В

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

17. Название и цель работы.
18. Используемые в экспериментах схемы.
19. Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.
20. Письменные выводы и ответы на поставленные в работе вопросы.
21. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.
22. Самостоятельно, по учебной литературе изучить схемную реализацию токовых защит на постоянном оперативном токе.

Контрольные вопросы

1. В каких защитах используются фильтр-реле тока и напряжения обратной последовательности?
2. Почему к фильтру напряжения обратной последовательности целесообразно подавать систему междуфазных, а не фазных напряжений?
3. Почему при отключении частоты от 50 Гц напряжение небаланса активно-емкостного фильтра возрастает?
4. В каких случаях и зачем необходимо знать угол сдвига между векторами $\underline{U}_{AB2}$ и U_p ?
5. Почему измерение величины U_{MNx} должно производиться с помощью вольтметра, имеющего большое внутреннее сопротивление?
6. Доказать, что при взаимной перемене зажимов 2 и 6 (см. рис. 7/1) устройство будет представлять собой фильтр напряжения прямой последовательности.

7. Какое напряжение будет на выходе фильтра напряжения обратной последовательности при перегорании предохранителя (срабатывании автоматического выключателя) в фазе В?

8. Каковы должны быть параметры прибора, используемого для измерений I_{H6} и I_{MNK} при испытании фильтра тока обратной последовательности?

9. Каково назначение промежуточных трансформаторов тока, используемых в устройствах фильтр-реле типов РТФ-7?

10. Как проверяется чувствительность защит, использующих фильтры тока и напряжения обратной последовательности?

Литература:

Основная [1, 2]

Дополнительная [3, 4]

Лабораторная работа 8

Исследование принципов работы дистанционной защиты

Цель работы: знакомство с принципом действия дистанционной защиты высоковольтной линии электропередачи. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- изучение назначения и принципа действия дистанционной защиты линии электропередачи;
- изучение особенностей построения простейшего измерительного органа полного сопротивления;
- исследование принципа функционирования дистанционной защиты линии электропередачи.

Знания, умения и владения, приобретаемые обучающимся в результате освоения тем в рамках освоения компетенций: способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования (ПК-3); способность рассчитывать режимы работы объектов профессиональной деятельности (ПК-6).

Знать: Принципы построения и функционирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Принципы оценки и расчета нормальных и аварийных режимов работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Уметь: Составлять схемы для реализации релейной защиты и автоматики электроэнергетического оборудования (ПК-3); Рассчитывать уставки релейной защиты и автоматики на основе данных о нормальных и аварийных режимах работы электроэнергетического оборудования (ПК-6)

Владеть: Навыками проверки и определения параметров устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем (ПК-3); Навыками выбора и построения систем релейной защиты и автоматики объектов электроэнергетических систем (ПК-6)

Теоретическая часть

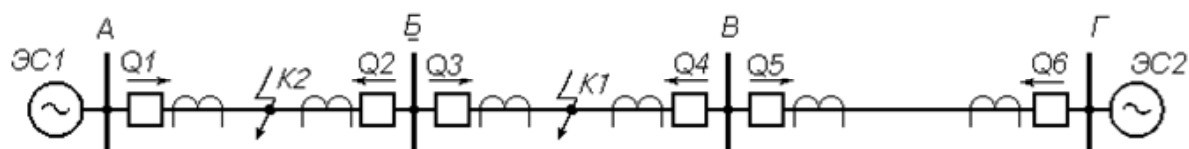
Общие положения

Общие сведения о дистанционной защите

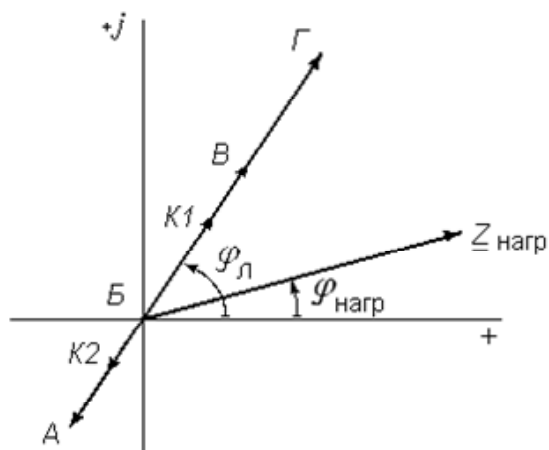
Основным недостатком токовых защит является зависимость зоны их действия от тока короткого замыкания, что не позволяет в ряде случаев иметь достаточную чувствительность токовой защиты, особенно быстродействующих ее ступеней.

Дистанционная защита реагирует на отношение подведенных к измерительному органу защиты напряжения и тока, т.е. на сопротивление. Режим короткого замыкания отличается от нормального режима работы сети пониженным значением напряжения и повышенным значением тока. Следовательно, сопротивление на входе измерительного органа защиты при коротком замыкании меньше, чем в нормальном режиме. Это обстоятельство и используется для выявления КЗ.

Таким образом, дистанционная защита представляет собой защиту минимального сопротивления. Если на вход измерительного органа минимального сопротивления подается разность напряжений замкнувшихся фаз и разность токов этих фаз, то сопротивление на входе измерительного органа оказывается равным сопротивлению линии от места установки защиты (начало линии) до места короткого замыкания $Z_p = Z_{уд} \ell_k$, где $Z_{уд}$ - удельное сопротивление линии; ℓ_k - расстояние до места короткого замыкания.



а) ЭС1, ЭС2 – питающие энергосистемы; Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6 – выключатели соответственно линий АБ, БВ, ВГ.



б) Векторы сопротивления на входе измерительного органа минимального сопротивления дистанционной защиты

Рисунок 8.1 – К понятию о дистанционной защите

Так как $Z_{уд}$ - величина постоянная, защита реагирует на расстояние до места короткого замыкания, что и обусловило ее название.

Сопротивление на входе измерительного органа защиты представляет собой комплексную величину. Сопротивление на входе защиты (например, защиты 3 на рис. 8.1а) в комплексной плоскости при коротком замыкании в точке K1 есть вектор BK1 (рис. 8.1б), сопротивление линии БВ и суммарное сопротивление линий БВ и ВГ - векторы BV и BG, а сопротивление до точки K2 и линии AB - векторы BK2 и BA.

Угол наклона φ_l этих векторов сопротивления определяется активным и реактивным сопротивлением защищаемых линий.

Сопротивление на входе защиты в рабочем режиме работы электрической сети отображается вектором сопротивления нагрузки, получающей питание по защищаемой линии ($Z_{нагр}$, на рис. 8.1б). Этот вектор отличается от вектора сопротивления короткого замыкания не только по величине, но и по фазе, так как коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_{нагр} \approx 0,8 - 0,95$.

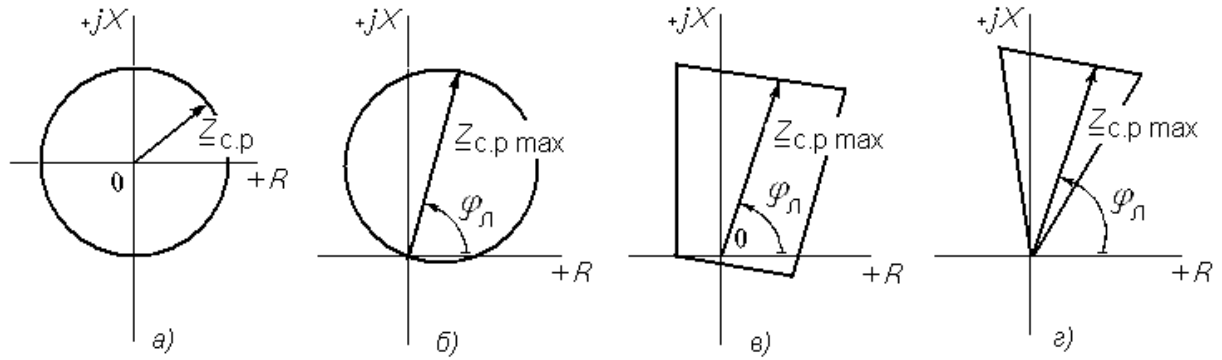


Рисунок 8.2 – Примеры характеристик срабатывания минимального реле сопротивления

Первоначально дистанционная защита выполнялась с помощью реле сопротивления, реагирующих только на абсолютную величину сопротивления до точки КЗ. По мере увеличения протяженности линий электропередачи и роста передаваемой по ним нагрузки абсолютные значения сопротивлений при КЗ в конце линий стали соизмеримы с сопротивлениями при аварийной нагрузке на линиях электропередачи. В таких условиях реле сопротивления, реагирующие на абсолютные значения сопротивления, уже не могли точно отличить КЗ от нагрузки. В связи с этим дистанционные защиты выполняют реагирующими не только на абсолютную величину сопротивления, но и на величину угла $\varphi = \arctan \frac{x}{r}$ (здесь x и r – соответственно реактивное и активное сопротивления от точки КЗ до места установки защиты), т. к. при КЗ и при передаче больших потоков мощности углы сопротивлений различаются. Для этой цели были разработаны реле сопротивления, у которых сопротивление срабатывания реле $Z = f(z, \varphi)$. Такая зависимость называется характеристикой срабатывания реле

С целью повышения чувствительности защиты, т.е. наилучшей отстройки защиты как от внешних коротких замыканий, так и от режима

нагрузки, используются реле минимального сопротивления с различными характеристиками срабатывания (рис. 8.2).

Характеристики на рис. 8.2а и б имеют соответственно ненаправленное и направленное реле полного сопротивления. Угол максимальной чувствительности у направленного реле, соответствующий максимальному значению сопротивления срабатывания реле $Z_{с.р.мах}$, равняется $\varphi_{л}$.

Характеристика на рис. 8.2 в позволяет обеспечить чувствительность защиты при коротком замыкании через переходное сопротивление, а характеристика на рис. 8.2г - оптимальным образом отстроить защиту от сопротивления нагрузки.

Структура дистанционной защиты и принципы выбора уставок дистанционных защит

Дистанционная защита выполняется, как правило, трехступенчатой. Первая ступень не имеет выдержки времени (рис. 8.3), а сопротивление срабатывания принимается несколько меньшим сопротивления защищаемой линии. Например, для защиты I линии AB $Z_{с.з1}^I = k_{отс} Z_{AB}$.

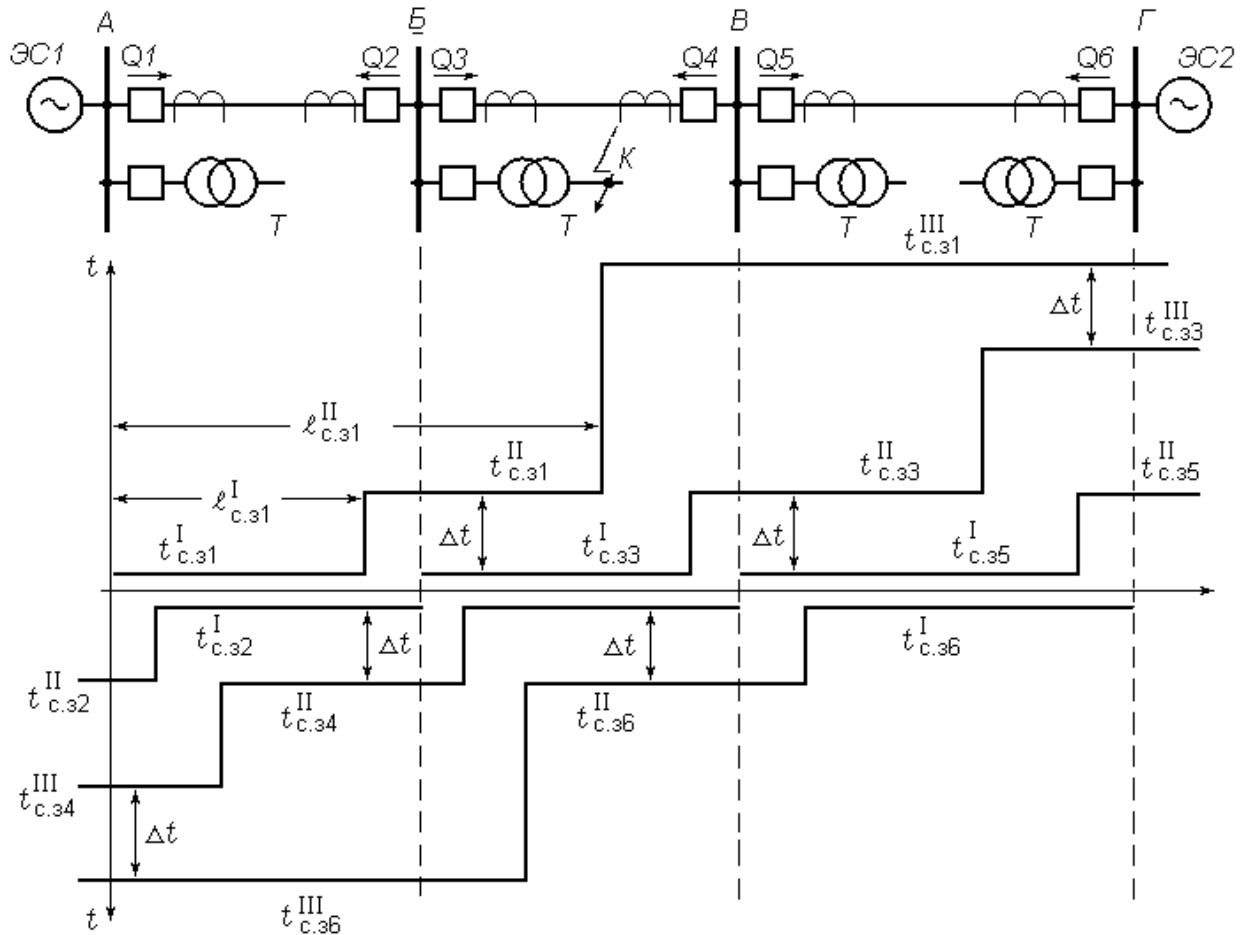


Рисунок 8.3 – Время срабатывания трехступенчатой направленной дистанционной защиты в электрической сети с двухсторонним питанием ЭС1, ЭС2 – питающие энергосистемы; $t_{c.31}^I, t_{c.31}^{II}, t_{c.31}^{III}$ – время срабатывания I, II и III ступеней защиты; $l_{c.31}^I, l_{c.31}^{II}$ – зоны действия I и II ступеней защиты; Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6 – выключатели соответственно линий АБ, БВ, ВГ; Т – Трансформаторы на подстанциях А, Б, В, Г; Δt – ступени селективности

Коэффициент отстройки $k_{отс} = 0,8—0,9$ учитывает погрешности трансформаторов тока и напряжения, к которым подключено реле сопротивления, и погрешность самого реле сопротивления. Аналогично определяются сопротивления срабатывания первых ступеней всех защит.

Сопротивления срабатывания вторых ступеней защит отстраиваются от суммарного сопротивления защищаемой линии и сопротивления сра-

батывания первой ступени защиты смежной линии, а также от короткого замыкания за трансформатором приемной подстанции, например:

$$\begin{aligned} Z_{с.31}^{\text{II}} &= k_{\text{отс}}(Z_{AB} + k'_{\text{отс}}Z_{с.33}^{\text{I}}); \\ Z_{с.31}^{\text{II}} &= k_{\text{отс}}(Z_{AB} + k_{\text{T}}Z_{\text{T}}), \end{aligned} \quad (8.1)$$

где $k_{\text{T}} = I_{\text{к}} / I_{\text{к1}}$ - коэффициент токораспределения, равный отношению суммарного тока короткого замыкания за трансформатором приемной подстанции к току в защищаемой линии, проходящему в направлении действия защиты.

Время срабатывания второй ступени защиты принимается на ступень селективности больше времени срабатывания первой ступени защиты смежной линии, т.е. $t_{с.31}^{\text{II}} = t_{с.33}^{\text{I}} + \Delta t$ (рис. 8.3).

Назначением третьей ступени защиты является резервирование отказов защит и выключателей смежных элементов электрической сети. Сопротивление срабатывания третьей ступени определяется по условию обеспечения чувствительности при КЗ в конце смежной линии и за трансформатором приемной подстанции, а также по условию возврата защиты в исходное состояние после отключения внешнего короткого замыкания, например:

$$\begin{aligned} Z_{с.31}^{\text{III}} &\geq (Z_{AB} + Z_{BB})k_{\text{ч}}; \\ Z_{с.31}^{\text{III}} &\geq (Z_{AB} + k_{\text{T}}Z_{\text{T}})k_{\text{ч}}; \\ Z_{с.31}^{\text{III}} &\leq \frac{Z_{\text{раб. min}}}{k_{\text{отс}}k_{\text{в}}} \end{aligned} \quad (8.2)$$

где $k_{\text{ч}} > 1,2$ - коэффициент чувствительности; $k_{\text{в}} = Z_{\text{вр}}/Z_{с.р} = 1,1-1,15$ - коэффициент возврата, равный отношению сопротивления возврата к сопротивлению срабатывания реле сопротивления; $k_{\text{отс}} = 1,1-1,2$ - коэффициент отстройки.

При этом по первому условию вектор сопротивления $Z_{с.3}^{\text{III}}$ имеет угол $\varphi_{\text{л}}$, а по второму условию $\varphi_{\text{нагр}}$ (см. рис. 8.1б).

Время срабатывания третьей ступени защиты отстраивается от времени срабатывания третьей ступени защиты смежной линии (см. рис. 8.3).

Дистанционная защита может сработать ложно при качаниях в энергосистеме, а также при неисправностях в цепях трансформатора напряжения, приводящих к снижению напряжения на входе измерительного органа защиты. Поэтому в комплект дистанционной защиты обычно входит устройство блокировки защиты при качаниях (БК) и неисправностях в цепях напряжения (БН).

Дистанционная защита по сравнению с токовыми защитами обладает большей чувствительностью, имеет стабильную зону действия, однако она значительно более дорогая и технически сложная.

Принципы построения современных дистанционных защит

При использовании электронной элементной базы выполнение различных ИО релейной защиты оказалось одинаково. Поэтому в схемах современных дистанционных защит, выполненных на ИМС, в трехступенчатых дистанционных защитах используются девять ИОС, жестко включенных на токи и напряжения, что упростило логическую часть и повысило ее надежность. Такое построение схем исключило необходимость в пусковых органах.

Однако в схемах дистанционных защит по-прежнему необходимы БК и БН. В настоящее время схемы строятся таким образом, что БК вводит логическую часть защиты в работу, как принято говорить, пускает защиту. Поэтому часто БК называют пусковым органом. При использовании в БК измерительных органов тока обратной последовательности при неисправностях в цепях напряжения защита не будет введена в работу, что исключает ее ложное срабатывание. Этим объясняется то, что БК вводит все ступени, даже отстроенные от качаний по времени. К БН предъявляется требование лишь подавать сигнал о неисправности, а значит, не является актуальным быстрдействие БН. При использовании в БК измерительных органов напряжения обратной последовательности защита при неисправностях в цепях

напряжения будет введена, что может привести к ее ложному срабатыванию. Поэтому требуются БН с высоким быстродействием для обеспечения вывода защиты. В общем случае схемы строятся таким образом, что для действия защиты на отключение необходима информация БК и БН (рис. 8.4).

Для защиты от междофазных КЗ измерительный орган сопротивления ИОС всех ступеней включены на соответствующие токи и напряжения (рис. 8.4): ИОС (AB); ИОС (BC) и ИОС (CA).

Входные элементы (трансформаторы, трансреакторы, автотрансформаторы) ИОС первой, второй и третьей ступеней включены следующим образом: ИОС (AB): $\underline{I}_p = \underline{I}_{2A} - \underline{I}_{2B}$, $\underline{U}_p = \underline{U}_{2AB}$; напряжение подпитки от третьей фазы $\underline{U}_{под} = \underline{U}_{2C}$ позволяет исключить «мертвую» зону при $K^{(2)}_{AB}$ в месте установки защиты, когда $\underline{U}_{2AB} = 0$; ИОС (BC): $\underline{I}_p = \underline{I}_{2B} - \underline{I}_{2C}$, $\underline{U}_p = \underline{U}_{2BC}$, $\underline{U}_{под} = \underline{U}_{2A}$; ИОС (CA): $\underline{I}_p = \underline{I}_{2C} - \underline{I}_{2A}$, $\underline{U}_p = \underline{U}_{2CA}$, $\underline{U}_{под} = \underline{U}_{2B}$.

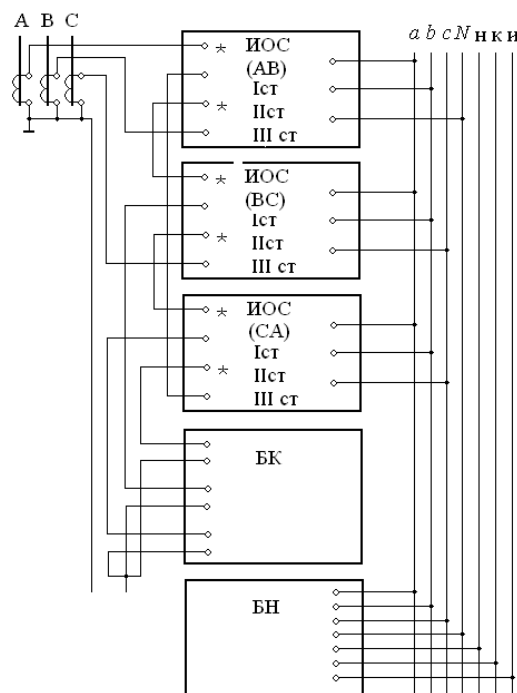


Рисунок 8.4 – Цепи тока и напряжения дистанционной защиты

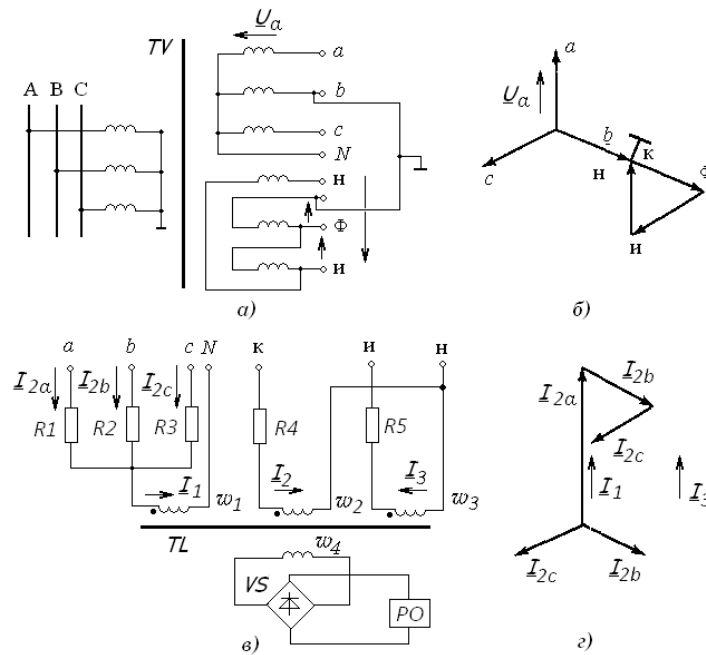


Рисунок 8.5 – Схема блокировки защиты при нарушениях цепей напряжения

Блокировка при качаниях БК реагирует на приращение вектора тока (или напряжения) обратной последовательности.

Блокировка при неисправностях цепей напряжения БН выполнена в соответствии с рис. 8.5. С функционированием БН можно познакомиться по учебной литературе.

В последнее время все большее применение находят дистанционные защиты, выполненные с использованием цифровой техники, в которой задачи функционирования этого типа защиты решаются программно, при этом могут использоваться отличные от используемых ранее алгоритмов построения измерительных органов защиты, что обеспечивает цифровым дистанционным защитами большую гибкость и универсальность. Это определяет их преимущественное применение как при выполнении защит на новых вводимых в эксплуатацию высоковольтных линиях электропередачи, так и при модернизации защит находящихся в эксплуатации линий электропередачи.

Некоторые понятия о принципах выполнения измерительного органа сопротивления на основе интегральной схемотехники

Обычно используются минимальные измерительные органы сопротивления (ИОС) с характеристиками срабатывания в комплексной плоскости сопротивления $\underline{Z}$ в виде замкнутых линий, ограничивающих область значений $\underline{Z}$, при которых ИОС должен срабатывать.

Обычно используются минимальные измерительные органы сопротивления (ИОС) с характеристиками срабатывания в комплексной плоскости сопротивления $\underline{Z}$ в виде замкнутых линий, ограничивающих область значений $\underline{Z}$, при которых ИОС должен срабатывать.

Обычно используются минимальные измерительные органы сопротивления (ИОС) с характеристиками срабатывания в комплексной плоскости сопротивления $\underline{Z}$ в виде замкнутых линий, ограничивающих область значений $\underline{Z}$, при которых ИОС должен срабатывать.

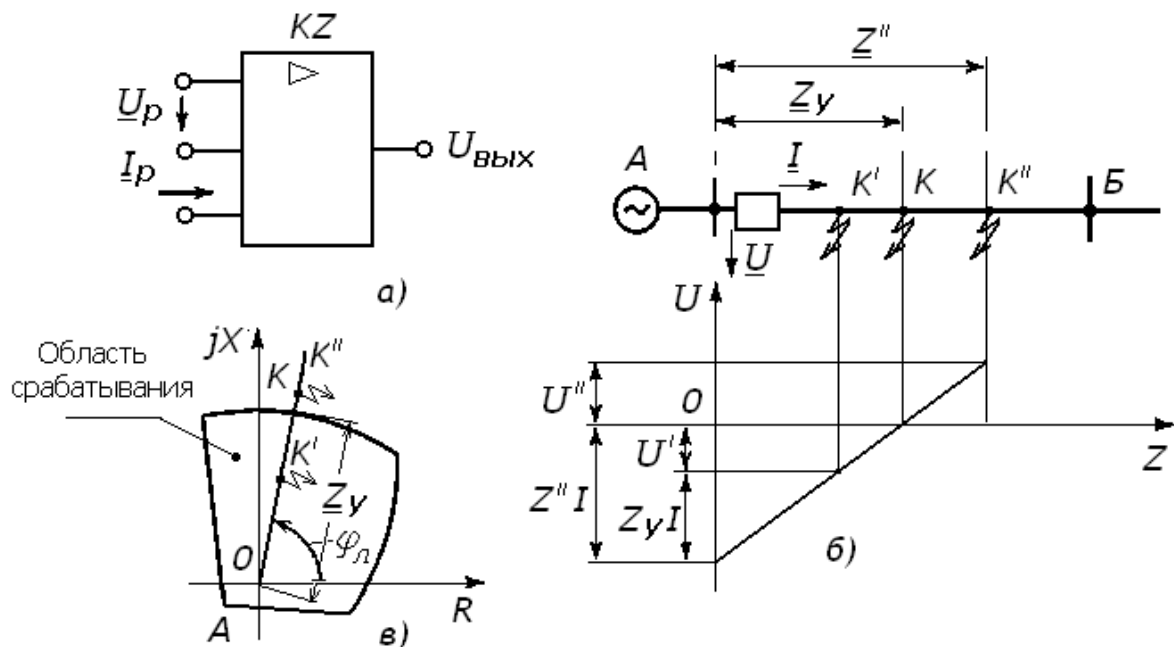


Рисунок 8.6 – Условное обозначение измерительного органа минимального сопротивления прямого действия (а); схема линии электропередачи и зависимость компенсированного напряжения от места КЗ (б), область характеристики срабатывания измерительного органа (в)

Из определения функций и характеристик ИОС очевидна возможность их осуществления как путем непосредственного вычисления составляющих R и jX отношения $\underline{Z}_p = \underline{U}_p / \underline{I}_p$, что возможно, например, при использовании этих измерительных органов элементов вычислительной техники с последующим определением их расположения относительно заданной характеристики срабатывания, так и с использованием компенсационного метода, который используют, например, при реализации соответствующих измерительных органов сопротивления на основе элементов аналоговой электронной техники.

На рис. 8.6 в, где место установки защиты совмещено с началом координат, под углом $\varphi_{\text{л}}$ указано направление сопротивления линии $\underline{Z}_{\text{л}} = Z_{\text{л}} e^{j\varphi_{\text{л}}}$ и обозначено сопротивление уставки $\underline{Z}_y$, определяющее зону срабатывания ИОС.

Алгоритм компенсационного метода основан на понятии компенсированного напряжения. Компенсированное напряжение $\underline{U}'$ - остаточное напряжение в точке, соответствующей сопротивлению уставки $\underline{Z}_y$, при КЗ в произвольной точке линии:

$$\underline{U}' = \underline{U}_p - \underline{Z}_y \underline{I}_p = \underline{I}_p (\underline{Z}_p - \underline{Z}_y), \quad (8.3)$$

где $\underline{U}_p = \underline{I}_p \cdot \underline{Z}_p$ - остаточное напряжение в месте включения измерительного органа на шинах А (рис. 8.6б) при коротком замыкании за сопротивлением $\underline{U}_p$, $\underline{I}_p$ - ток в линии, подведенный от вторичных зажимов измерительных трансформаторов напряжения и тока; $\underline{Z}_y = \underline{Z}_{\text{с.р}}$ - сопротивление срабатывания, установленное в измерительном органе.

При перемещении точки КЗ через границу зоны (K' - в зоне срабатывания, K'' - вне зоны срабатывания), определяемой сопротивлением Z_y (точка K),

компенсированное напряжение $\underline{U}'$ меняет фазу на угол π , а при $Z_p = Z_y$ становится равным нулю. Эта особенность обычно и используется в алгоритмах функционирования измерительных органов сопротивления компенсационного типа.

Принцип выполнения измерительного органа полного сопротивления (ИОПС)

Наиболее простым является непосредственное сравнение абсолютных значений слагаемых в компенсированном напряжении $\underline{U}'$ [см. (8.3)], когда для срабатывания минимального ИО сопротивления достаточно выполнения условия (рис. 8.7а)

$$|\underline{U}_p| < |\underline{I}_p Z_p| \quad (8.4)$$

При этом получается минимальный ИОПС с граничной характеристикой (характеристикой срабатывания идеального реле) $Z_{гр} = Z_{с.р}(\varphi_p)$, определяемой уравнением

$$Z_{с.р} = (|\underline{U}_p| / |\underline{I}_p|)_{с.р} = Z_y. \quad (8.5)$$

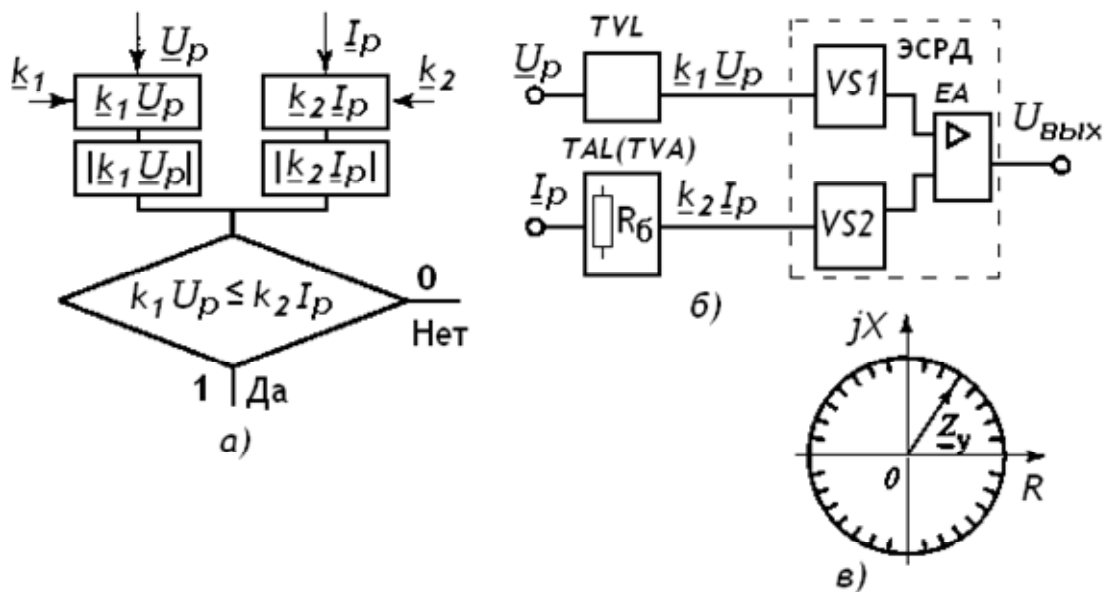


Рисунок 8.7 – Алгоритм (а), функциональная схема (б) и характеристика срабатывания (в) минимального измерительного органа

Характеристика $Z_{c.p}(\varphi_p)$ в плоскости $\underline{Z}$ - окружность с центром в начале координат (рис. 8.7в).

При реализации алгоритма (8.4) к элементу сравнения релейного действия ЭСРД, в частности состоящему из выпрямителей $VS1$, $VS2$ и релейного компаратора EA (рис. 8.7б), от вторичных измерительных преобразователей должны подводиться две однородные величины $\underline{E}_1 = k_1 \underline{U}_p$ и $\underline{E}_2 = k_2 \underline{I}_p$, где $\underline{k}_1$ и $\underline{k}_2$ - коэффициенты преобразования вторичных измерительных преобразователей.

Если $\underline{k}_1$ обычно не имеет размерности (коэффициент трансформации K_U трансформатора или автотрансформатора напряжения TVL), то $\underline{k}_2$ должен иметь размерность сопротивления. В качестве преобразователя применяются вторичные измерительные трансформаторы тока TAL , нагруженные балластным резистором R_b , или трансреакторы TAU .

При срабатывании идеального ИОС, если потери в элементах схемы отсутствуют, $|k_1 \underline{U}_p| = |k_2 \underline{I}_p|$ и, следовательно, сопротивление Z_p на его входе равно уставке Z_y :

$$Z_p = Z_{c.p} = \left| \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} \right| = k_2 / k_1 = Z_y \quad (8.6)$$

Таким образом, в ИОС компенсационного типа сопротивление уставки задается отношением коэффициентов k_2/k_1 преобразования вторичных измерительных преобразователей амплитуд напряжения и тока.

С принципом построения направленного измерительного органа сопротивления (НИОС), например, с характеристикой срабатывания по рис. 8.2б можно познакомиться по учебной литературе.

Оборудование и материалы

Перечень аппаратуры

Исследование принципа функционирования дистанционной защиты линии электропередачи выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием аппаратуры приведенной в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Перечень используемого оборудования

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 х 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
A3, A9	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A5	Линейный реактор	314.2	220/380 В; 50 Гц; 0,3 А; 0,5 Гн/10 Ом
A6	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50Гц; 3×0...40 Вар;
A7	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3×0...50 Вт;
A8	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50Гц; 3×0...40 Вар;
A10	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A11	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
A12	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A13	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A14	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

Модель линии.

На основе компонентов, входящих в комплект универсального стенда создается экспериментальная модель из восьми последовательно соединенных линий электропередачи ($L1-L4, L1'-L4'$), питающихся с двух сторон от двух источников $G1, G2$ (см. рис.). К шинам этих линий подсоединены различные электрические нагрузки ($P, Q_L, Q_C, P', Q_L', Q_C'$). Выключатель Q включен между линиями $L4$ и $L4'$.

Существует возможность устраивать короткие замыкания в шести точках схемы ($K1, K2, K3, K1', K2', K3'$) на разных расстояниях и с разных сторон от выключателя Q (рис. 8.8).

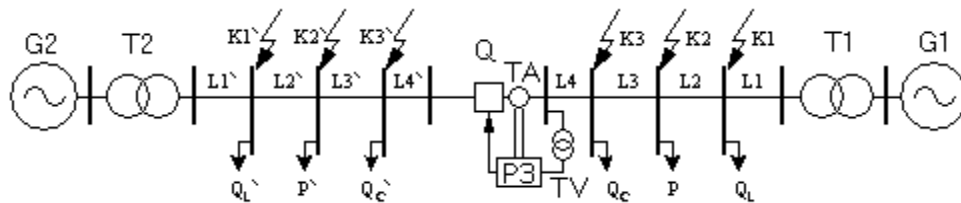


Рисунок 8.8 – Однолинейная модель экспериментальной системы электроснабжения с двумя источниками питания $G1$ и $G2$

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

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

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

Указания по технике безопасности

Указания по технике безопасности приведены в приложении А.

Указания по порядку выполнения работы

1 Описание электрической схемы соединений экспериментального стенда

Электрическая схема соединений представляет собой замкнутую кольцевую сеть (рис. 8.9), собранную в однофазном исполнении и образованную двумя последовательно соединенными моделями линий электропередачи А2 и А4, фазы каждой из которых в свою очередь также соединены последовательно. Кроме того, в кольцевую сеть включены две фазы линейного реактора А5 и выключатель А3, являющийся исполнительным органом моделируемой дистанционной защиты. Сеть получает питание от трехфазного источника G1 через два однофазных трансформатора блока А1.

От кольцевой сети питаются две активных, индуктивных и емкостных нагрузки, включенные на разных расстояниях и с разных сторон от моделируемой дистанционной защиты. Нагрузки представлены отдельными фазами блоков активной (А7), индуктивной (А6) и емкостной (А8) нагрузок соответственно.

С помощью выключателя А9, который может быть включен между «нулем» схемы и любой из точек К1-К6, моделируются короткие замыкания на различном расстоянии и с разных сторон от выключателя А3. Причем, соединяя точки К0-К1, К0-К3, К0-К5, можно моделировать замыкания «впереди защиты», в то время как замыкание точек К0-К2, К0-К4, К0-К6 имитирует короткие замыкания *«за ее спиной»*.

Ток и напряжение вблизи выключателя АЗ фиксируются с помощью включенных в схему измерительных трансформаторов тока и напряжения блока А10.

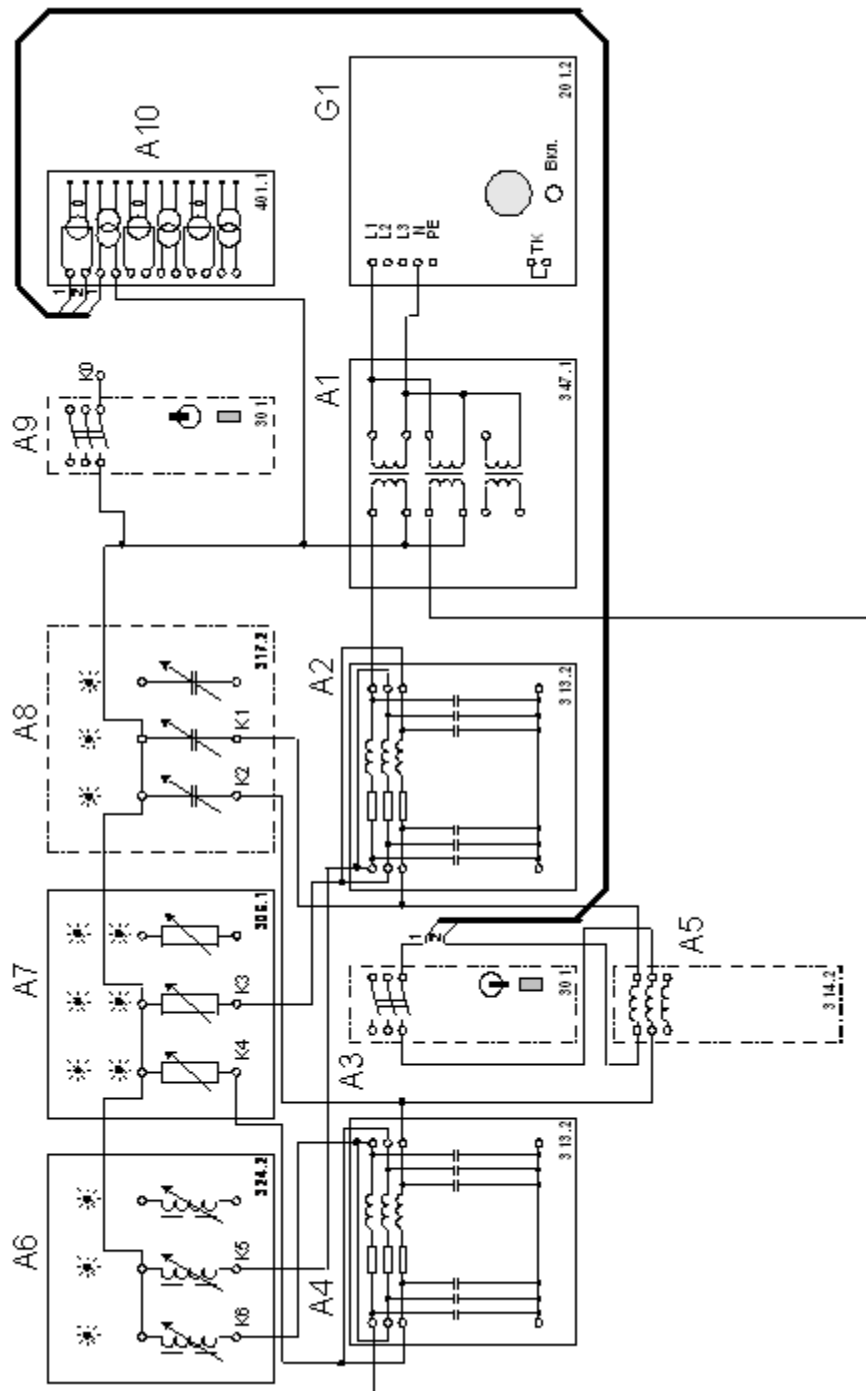
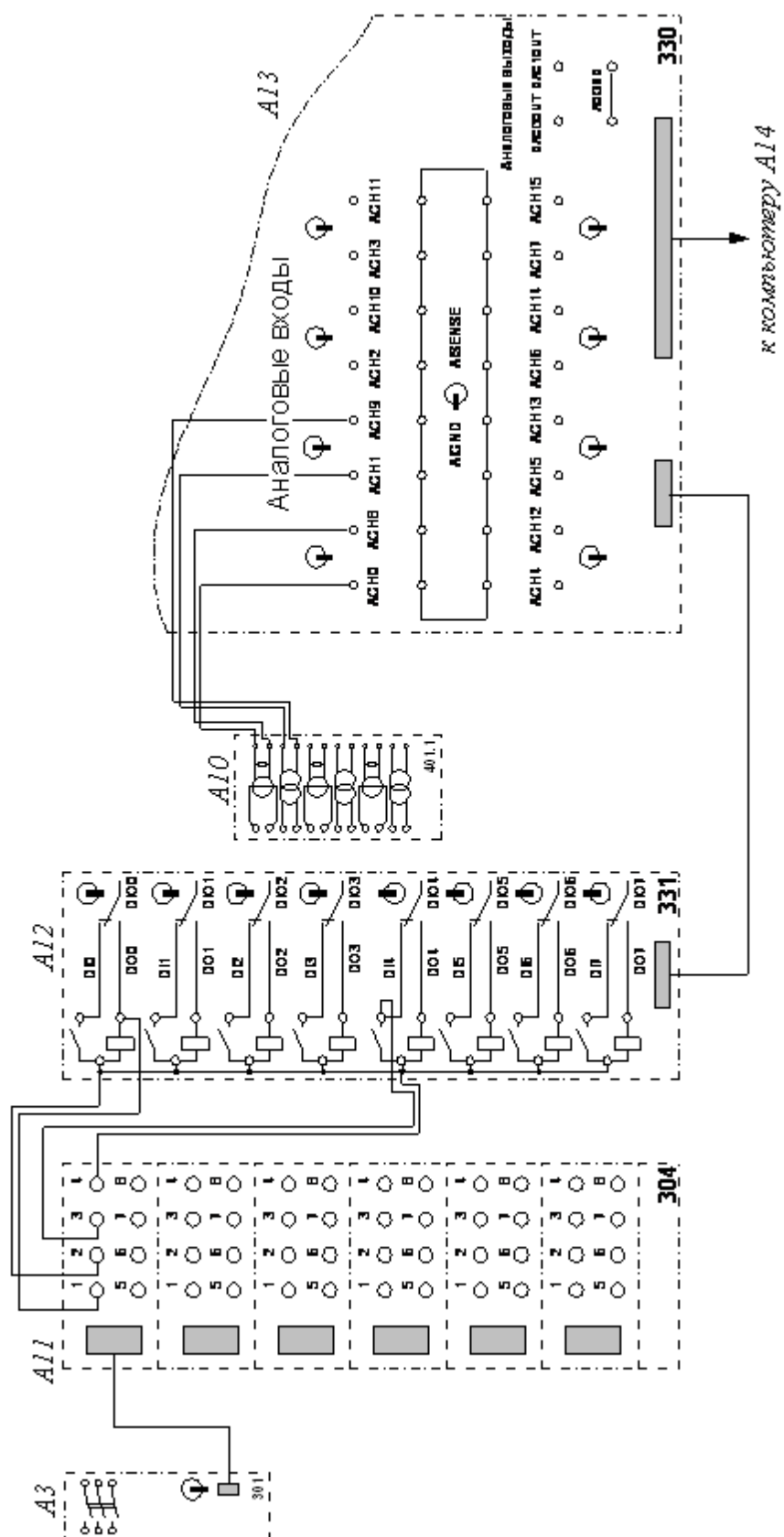


Рисунок 8.9 – Электрическая схема соединений



Продолжение схемы на рисунке 8.9

Вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения блока A10 подключены к аналоговым входам коннектора A13, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода PCI6024E персонального компьютера A14.

Розетка «УПР.» трехполюсного выключателя A3 гибким кабелем подключена к розетке терминала A11, гнезда которого соединены с гнездами блока A12 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

2 Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда «ТК» источника G1.
- Соедините гнезда защитного заземления "» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений.
- Переключатель режима работы трехполюсного выключателя A3 установите в положение «АВТ.», выключателя A9 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока A1 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линий электропередач A2 и A4 переключателями установите, например, следующими: $R = 100 \text{ Ом}$, $L/R_L = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C1 = C2 = 0 \text{ мкФ}$.
- Выберите мощность активной нагрузки A7, например 10% от 50 Вт в первой фазе, 100% - во второй.
- Выберите мощность индуктивной нагрузки A6, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 80% - во второй.
- Выберите мощность емкостной нагрузки A8, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 20% - во второй.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

- Включите выключатели **«СЕТЬ»** выключателей А3, А9 а также блока А12 ввода-вывода цифровых сигналов.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А14, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу **«Дистанционная защита.exe»**.
- Используя главное меню, выберите режим работы программы **«Осциллограф»**. В этом режиме релейная защита на выключатель не воздействует, зато имеется возможность в реальном времени посмотреть ток, напряжение и вектор сопротивления дистанционной защиты. Произвольным образом изменяйте величины нагрузок сети и наблюдайте изменение длины и фазы вектора комплексного сопротивления. Некоторые примеры значений нагрузок и получающиеся при их использовании картинки на экране приведены в приложении.
- Задайте характеристики защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте характеристики, заданные по умолчанию.
- Установите первоначальные значения всех нагрузок схемы.
- Смоделируйте короткое замыкание. Например, соедините точки К0 и К1 между собой и включите выключатель А9. Аналогичным образом имитируйте другие короткие замыкания, соединяя точки К1-К6 с точкой К0. Обратите внимание на изменение вектора комплексного сопротивления, а также на то, в какую область срабатывания при каком коротком замыкании попадает вышеупомянутый вектор. Для точного определения факта попадания вектора в ту или иную область ориентируйтесь на круглые индикаторы в правом нижнем углу экрана.
- Выберите режим работы программы **«Защита»**.
- Нажмите на виртуальную кнопку **«Начать запись»**, введите защиту нажатием на соответствующую кнопку. Смоделируйте одно из вышеописанных шести коротких замыканий. После отключения защитой «повреждения» проанализируйте осциллограммы токов и напряжений, а

также положение вектора сопротивления в различные моменты времени. При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

- Масштабирование осциллограммы токов и напряжений производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
- Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
- Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
- Масштабировать векторные диаграммы, а также графики зон срабатывания защит в окне задания уставок можно путем нажатия на соответствующие кнопки в правом нижнем углу графика.
- На экране также отображается состояние выключателя АЗ.
- В режиме работы «*Осциллограф*» выключатель АЗ можно включить, нажав на соответствующую виртуальную кнопку (после нажатия кнопка исчезнет).
- В режиме «*Защита*» после срабатывания защиты можно посмотреть вектор сопротивления в любой момент времени. Для этого необходимо щелкнуть по интересующему моменту времени на графике осциллограмм тока и напряжения, одновременно удерживая нажатой клавишу «*Shift*».
- Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.
- Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Параметры буфера, а именно его полную длину и длину «*эпилога*» (фактически – время записи после свершения интересующего события, в данном случае – срабатывания защиты)

можно изменять в пункте меню «*Настройки*». Например, если срабатывание защиты ожидается через 2 секунды после начала короткого замыкания, то для того, чтобы увидеть предаварийный режим, режим короткого замыкания и режим после отключения повреждения длину буфера в целом можно принять равной 5-и секундам, а длину эпилога (по сути, это длина записи режима после отключения КЗ) – 0,5–1 секунде.

- По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «*СЕТЬ*» блоков А3, А9, А12.

Содержание отчета

Отчет должен иметь титульный лист с указанием темы лабораторной работы, ФИО студента, номер группы и дату выполнения работы.

Отчет должен содержать:

7. Название и цель работы.
8. Привести рисунки 8.2, 8.6, 8.7 и уметь пояснить их смысл.
9. Кратко изложите назначение дистанционной защиты. Изложите назначение ее основных компонентов (рис. 8.4, 8.5).
10. Приведите изменение положения вектора входного сопротивления линии при перемещении точки короткого замыкания вдоль линии (рис. 8.8) и дайте пояснения.
11. Приведите краткие выводы и ответы по содержанию лабораторной работы.
12. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.
13. Самостоятельно, по учебной литературе изучить принципы построения схем и выбор уставок дистанционной защиты.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях используется дистанционная защита и в чем заключается принцип ее функционирования?
2. Как решается функционирование дистанционной защиты в замкнутых сетях?
3. Приведите примеры характеристик срабатывания дистанционных органов. Поясните преимущественную область применения каждого из них.
4. Используя характеристики на рис. 8.2*а* и *б* на одной комплексной плоскости сопротивлений приведите характеристики срабатывания ступеней измерительных органов дистанционной защиты по рис. 8.4 в предположении, что первая и вторая ступени имеют характеристики вида, приведенного на рис. 8.2*б*, а третья ступень – вида рис. 8.2*а*.
5. Имеются ли существенные отличия в выборе времен срабатывания ступеней дистанционной защиты от выбора времени срабатывания ступеней направленной токовой защиты?
6. Поясните назначение блоков БК и БН, входящих в структуру дистанционной защиты.
7. Какой из блоков БК или БН может быть исключен из структуры дистанционной защиты, если она используется, например, для защиты линии с односторонним питанием и почему?
8. Почему дистанционный измерительный орган с характеристикой вида на рис. 8.2*г* обеспечивает лучшую отстройку от входного сопротивления линии в условиях ее нагрузки? Покажите на рис. 8.2*г* возможные положения вектора входного сопротивления линии при нагрузке в условиях, что через линию возможны разные направления перетоков активной и реактивной мощностей.

9. Каким недостатком обладает направленные измерительные органы с характеристиками, например, вида рис. 8.2б и з, в сравнении с характеристиками вида рис. 8.2в или рис. 8.6в?
10. Дайте пояснения принципа построения ненаправленного измерительного органа полного сопротивления с характеристикой срабатывания вида рис. 8.2а.
11. Почему характеристика вида рис. 8.2в обеспечивает необходимую чувствительность защиты при коротком замыкании через переходное сопротивление? Учтите, что в месте КЗ возникающее переходное сопротивления можно принять чисто активным.

3. Список рекомендуемой литература

Основная [1, 2]

Дополнительная [3, 4, 5]

Литература

Основная учебная литературы:

1. Андреев В.А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения: Учебник для вузов / В.А. Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. (или ранних лет издания)
2. Басс Э. М., Дорогунцев В.Г. Релейная защита электро-энергетических систем: Учебное пособие Под ред. А. Ф. Дьякова – М.: Издательство МЭИ. 2002

Дополнительная учебная литература:

3. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов. М.: Энергоатомиздат, 1998.
4. Электротехнический справочник: В. 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. (гл. ред. А. И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002.
5. Елфимов В. М. Векторные диаграммы в релейной защиты. М., «Энергия». 1967.
6. Барзам А. Б., Пояркова Т. М. Лабораторные работы по релейной защите и автоматике: Учеб. пособие для техникумов. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984

**Инструкция
по технике безопасности
при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных
электроэнергетических систем и электроснабжения»**

Перед началом лабораторной работы

1. Изучить инструкцию по охране труда при работе студентов в электротехнических лабораториях.
2. Пройти инструктаж на рабочем месте. Ознакомиться с безопасными методами выполнения лабораторной работы.
3. Изучить теоретические положения требований методики проведения лабораторной работы.
4. Получить допуск у преподавателя на выполнение лабораторной работы.
5. Ознакомиться с приборами тушения пожара и правилами обращения с огнетушителями ОУ-03, ОП-05, ОВЭ-6(з)-АВЕ-01.
6. Внимательно осмотреть лабораторный стенд, наличие и соответствие предохранителей, приборов и крепление деталей и узлов.

Требования безопасности во время работы

1. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.
2. Перед началом сборки цепи следует убедиться в том, что стенд обесточен.
3. Сборку схемы осуществлять исправными соединительными проводами, используя при этом приведенные в лабораторной работе принципиальные схемы экспериментов.
4. Собранная цепь проверяется преподавателем и может включаться только по его разрешению. О включении напряжения предупреждают всех

членов бригады, выполняющих работу.

5. При работе с регулируемыми источниками питания не следует превышать допустимый уровень напряжения.

6. Изменения схемы производят только при выключенном напряжении на стенде, а вновь собранная схема перед подачей на нее напряжения проверяется преподавателем.

7. По окончании испытания или при перерыве в работе схему отключают от напряжения питания. Разборку схему осуществляют по разрешению преподавателя. Запрещается оставлять включенную схему без наблюдения.

8. Запрещается включение лабораторного стенда в сеть в присутствии легковоспламеняющихся жидкостей или в атмосфере, содержащей горючие газы.

9. При возникновении неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или компонентов, следует незамедлительно прекратить работу с лабораторным стендом, выключив его из сети, известить об этом преподавателя и обратиться к обслуживающему персоналу.

10. По окончании экспериментов установить тумблеры в положение «отключено», а рукоятки регулируемых источников в нулевое положение. Разобрать схему и сдать соединительные провода. Разборку схемы осуществляют по разрешению преподавателя.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

1. В ситуации, угрожающей аварией (скачке тока в цепи; появлении дыма или запаха горящей изоляции или др.) обучающийся должен:

1.1. Немедленно прекратить выполнение работы.

1.2. Обесточить прибор, установку (лабораторный стенд), выключив тумблер СЕТЬ.

2. В нестандартной ситуации - выключить автоматический выключатель (или рубильник) на распределительном щите лаборатории.

Требования безопасности по окончании выполнения лабораторной работы

1. Записать результаты измерений в отчет по лабораторной работе.
2. Получить разрешение на выключение лабораторного стенда.
3. Привести в порядок рабочее место и лабораторный стенд.
4. Убрать электроизмерительные приборы в отведенное место.
5. Сдать лабораторный стенд лаборанту.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания по выполнению
практических занятий по дисциплине
"Релейная защита и автоматизация
электроэнергетических систем"

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и
электротехника
направленность (профиль) "Электроснабжение"

Квалификация выпускника бакалавр
Изучается в 6,7 семестре

Печатается по решению
Учебно-методического совета
Северо-Кавказского федерального
университета

В настоящих методических указаниях приведены методика и порядок решения задач на практических занятиях и выполнения лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Предисловие

Целью дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» является формирование согласно ООП ВО профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению 13.03.02. Электроэнергетика и электротехника. Дисциплина относится к базовой части профессионального цикла и предполагает знание студентами следующих дисциплин: «Теоретические основы электротехники», «Техника высоких напряжений», «Высшая математика», «Физика», «Химия». В результате выполнения практикума у студента формируются указанные выше компетенции, приобретаются знания по основам релейной защиты и автоматики, методам расчета уставок.

Практическое занятие №1

Расчет уставок максимальных токовых защит (МТЗ) в сети с односторонним питанием

Задание

Для МТЗ 1–6 в сети, изображенной на рис. 2.1, определить токи срабатывания $I_{с.з.}$ и времена срабатывания $t_{с.з.}$ (МТЗ с независимой характеристикой выдержки времени) от междуфазных КЗ. Принять коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,2$; коэффициент возврата $k_v = 0,9$; коэффициент запуска двигательной нагрузки $k_3 = 1,5$ и степень селективности $\Delta t = 0,5$ с.

Максимальные рабочие токи нагрузок I–XIV приведены в табл. 2.1, а выдержки времени максимальных токовых защит потребителей I–XIV – в табл. 2.2.

Методические указания

Максимальная токовая защита является последней (третьей) ступенью токовых защит линий (см. упражнение 4). В ряде случаев МТЗ используется самостоятельно и выполняет функции основной и резервной защиты линий, поскольку обладает так называемой относительной селективностью.

Выдержки времени МТЗ выбираются по ступенчатому принципу, согласно которому время срабатывания МТЗ участка сети $t_{с.з.}$ должно быть больше максимальной выдержки времени защит предыдущих (смежных) участков $t_{с.з.см\ max}$ на степень селективности Δt :

$$t_{с,з} = t_{с,з,см,мах} + \Delta t . \quad (2.1)$$

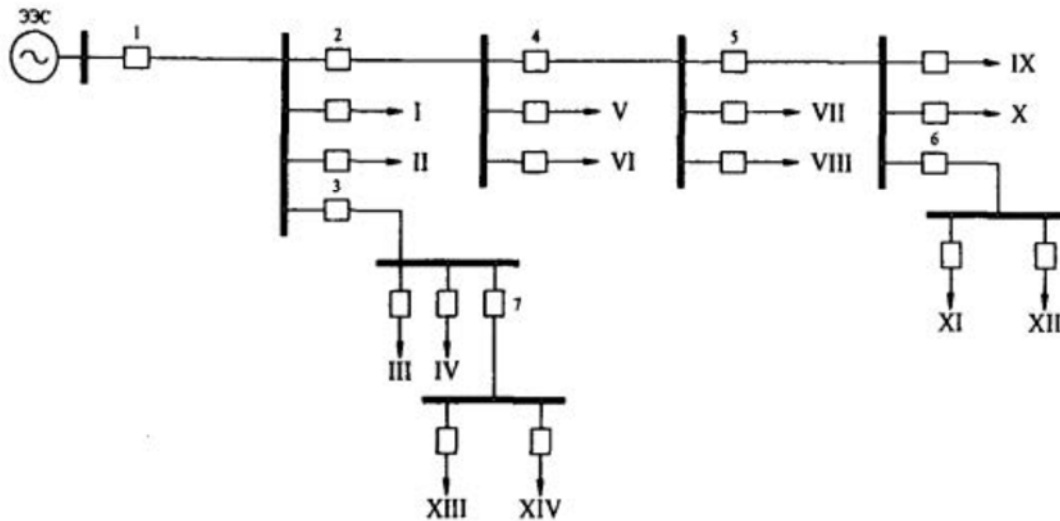


Рис. 2.1. Схема сети

Выбор выдержек времени МТЗ всегда начинается с защит наиболее удаленных от источника питания участков сети (на рис. 2.1 – с участков 6, 7).

Ток срабатывания МТЗ в общем случае выбирается по наибольшему значению, определяемому тремя условиями.

1. Ток срабатывания МТЗ $I_{с,з}$ должен быть больше максимального рабочего тока $I_{раб,мах}$ в защищаемой линии:

$$I_{с,з} = k_{отс} I_{раб,мах} . \quad (2.2)$$

Ток $I_{раб,мах}$ определяется как сумма максимальных рабочих токов всех присоединений на смежном участке, т.е.

$$I_{раб,мах} = \sum I_{раб,мах,см} . \quad (2.3)$$

Например, в соответствии с рис. 2.1

$$I_{раб,мах\ 6} = I_{раб,мах\ XI} + I_{раб,мах\ XII};$$

$$I_{раб,мах\ 7} = I_{раб,мах\ XIII} + I_{раб,мах\ XIV};$$

$$I_{раб,мах\ 5} = I_{раб,мах\ 6} + I_{раб,мах\ IX} + I_{раб,мах\ X} \text{ и т.д.}$$

2. Ток срабатывания МТЗ выбирается по условию возврата защиты после отключения внешнего КЗ (на смежном участке) при самозапуске оставшихся в работе электродвигателей :

$$I_{c,3} = \frac{k_{отс} k_3}{k_n} I_{раб\ max} . \quad (2.4)$$

3. Ток срабатывания МТЗ должен быть выбран таким образом, чтобы каждая последующая защита была не более чувствительна, чем предыдущая на смежном участке, т.е.

$$I_{c,3} \geq I_{c,3,см\ max} \text{ или } I_{c,3} = k'_{отс} I_{c,3,см\ max} , \quad (2.5)$$

где $k'_{отс} = 1,1$.

Невыполнение 3-го условия может привести к неселективному действию защиты данного участка. Например, при КЗ на смежном участке через переходное сопротивление при токе КЗ, равном $I_{c,3,см} = I_k$ защита смежного участка находится на грани срабатывания и может отказать (не сработать), в то время как защита рассматриваемого участка излишне сработает.

Пример расчета по варианту а).

I. Времена срабатывания МТЗ:

$$\begin{aligned} t_{c,3,7} &= t_{c,3,XIV} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ с;} \\ t_{c,3,6} &= t_{c,3,XII} + \Delta t = 1,0 + 0,5 = 1,5 \text{ с;} \\ t_{c,3,5} &= t_{c,3,6} + \Delta t = 1,5 + 0,5 = 2,0 \text{ с;} \\ t_{c,3,4} &= t_{c,3,5} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ с;} \\ t_{c,3,3} &= t_{c,3,7} + \Delta t = 2,5 + 0,5 = 3,0 \text{ с;} \\ t_{c,3,2} &= t_{c,3,4} + \Delta t = 2,5 + 0,5 = 3,0 \text{ с;} \\ t_{c,3,1} &= t_{c,3,2(3)} + \Delta t = 3,0 + 0,5 = 3,5 \text{ с.} \end{aligned}$$

II. Токи срабатывания МТЗ:

Участок 7:

$$1) I_{c,3,7} = k_{отс} I_{раб\ max,7},$$

$$\text{где } I_{раб\ max,7} = I_{раб\ max,XIII} + I_{раб\ max,XIV} = 20 + 15 = 35 \text{ А.}$$

$$I_{c,3,7} = 1,2 \cdot 35 = 42 \text{ А;}$$

$$2) I_{c,3,7} = \frac{k_{отс} k_3}{k_n} I_{раб\ max,7} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,9} 35 = 70 \text{ А;}$$

3) третье условие не рассматривается, т.к. неизвестны токи срабатывания защит XIII, XIV.

Выбираем $I_{c,3,7} = 70 \text{ А.}$

Аналогично определяем

$$I_{c,3,6} = 58 \text{ А; } I_{c,3,5} = 176 \text{ А; } I_{c,3,4} = 230 \text{ А;}$$

$$I_{c,3,3} = 146 \text{ А; } I_{c,3,2} = 290 \text{ А; } I_{c,3,1} = 490 \text{ А.}$$

Таблица 2.1

Максимальные рабочие токи нагрузок, А

Параметр Вариант	I_I	I_{II}	I_{III}	I_{IV}	I_V	I_{VI}	I_{VII}	I_{VIII}	I_{IX}	I_X	I_{XI}	I_{XII}	I_{XIII}	I_{XIV}
а)	15	12	13	18	19	11	10	17	19	11	19	10	20	15
б)	24	10	12	10	14	18	15	13	16	12	15	11	17	18
в)	11	15	16	15	11	16	13	14	12	16	14	12	15	11
г)	17	11	14	12	10	15	11	16	10	17	16	13	10	13

Таблица 2.2

Времена срабатывания токовых защит нагрузок (потребителей), с

Параметр Вариант	t_I	t_{II}	t_{III}	t_{IV}	t_V	t_{VI}	t_{VII}	t_{VIII}	t_{IX}	t_X	t_{XI}	t_{XII}	t_{XIII}	t_{XIV}
а)	1,5	2,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	2,0
б)	2,0	1,0	1,5	2,5	1,0	1,5	0,5	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	2,5	3,0
в)	2,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	2,0	0,5	0,0	1,5	0,5	3,0	2,5
г)	1,0	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,0	0,5	0,5	1,0	2,0	1,5

Практическое занятие №2.

Расчет уставок и проверка чувствительности МТЗ в сети с односторонним питанием. Выбор схем защит

Задание

Для МТЗ 1 и 2 в сети, изображенной на рис. 3.1:

- 1) определить токи срабатывания $I_{с.з.1}$ и $I_{с.з.2}$, времена срабатывания $t_{с.з.1}$ и $t_{с.з.2}$, а также токи срабатывания реле тока $I_{с.р.1}$ и $I_{с.р.2}$ этих защит;
- 2) выбрать схему включения реле тока МТЗ 1 и 2 и оценить чувствительность МТЗ 1 и 2.

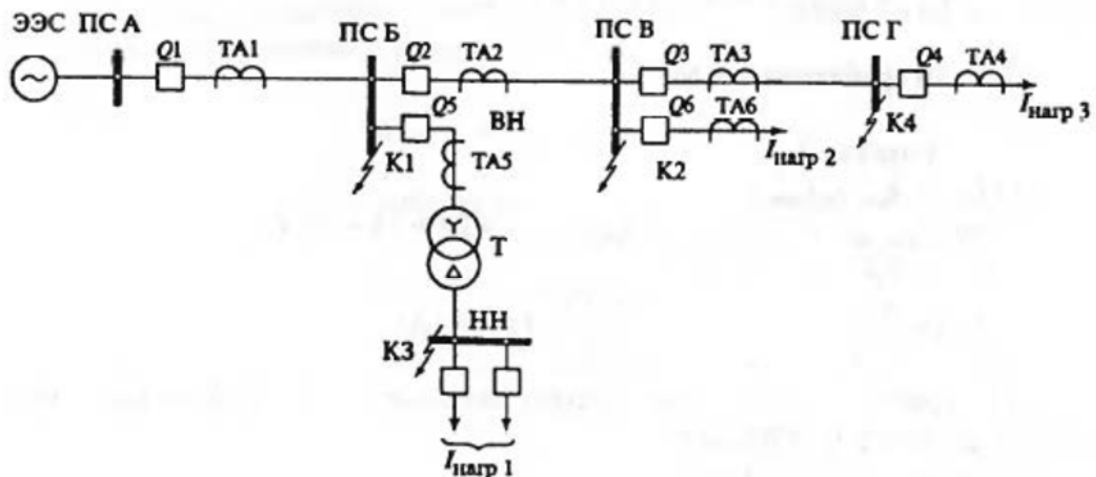


Рис. 3.1. Схема сети

В расчетах принять коэффициент отстройки $k_{отс} = 1, 2$; коэффициент возврата $k_v = 0,9$; коэффициент запуска двигателей нагрузки $k_z = 1,5$; ступень селективности $\Delta t = 0,5$ с.

Максимальные рабочие токи нагрузок, токи трехфазных КЗ и времена срабатывания МТЗ 3–6 приведены в табл. 3.1.

Трансформаторы тока (ТА) выбираются в соответствии со шкалой первичных номинальных токов $I_{ном}$ и коэффициентов трансформации K_1 (табл. 3.2).

Методические указания

К п. 1). Токи и времена срабатывания МТЗ 1 и 2 выбираются в соответствии с выражениями (2.1) – (2.5), приведенными в методических указаниях к упражнению 2.

После определения тока срабатывания защиты рассчитывается ток срабатывания реле $I_{с.р.}$, значение которого зависит от схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока и его коэффициента трансформации:

$$I_{с.р.} = I_{с.з} \frac{k_{сх}^{(3)}}{K_I}, \quad (3.1)$$

где $k_{сх}^{(3)}$ – коэффициент схемы в симметричном режиме (определяется как отношение тока в обмотке реле к вторичному току ТА); K_I – коэффициент трансформации трансформатора тока (определяется как отношение первичного номинального тока $I_{ном}$ к вторичному номинальному току 5 А).

Трансформаторы тока для защит следует выбирать с первичными номинальными токами, большими соответствующих максимальных рабочих токов ($I_{раб\ max\ 1}$ и $I_{раб\ max\ 2}$), т.е.

$$I_{ном\ 1} \geq I_{раб\ max\ 1} \text{ и } I_{ном\ 2} \geq I_{раб\ max\ 2}. \quad (3.2)$$

Значения $k_{сх}^{(3)}$ зависят от схемы соединения ТА и цепей тока защит, варианты выполнения которых приведены на рис. 3.2.

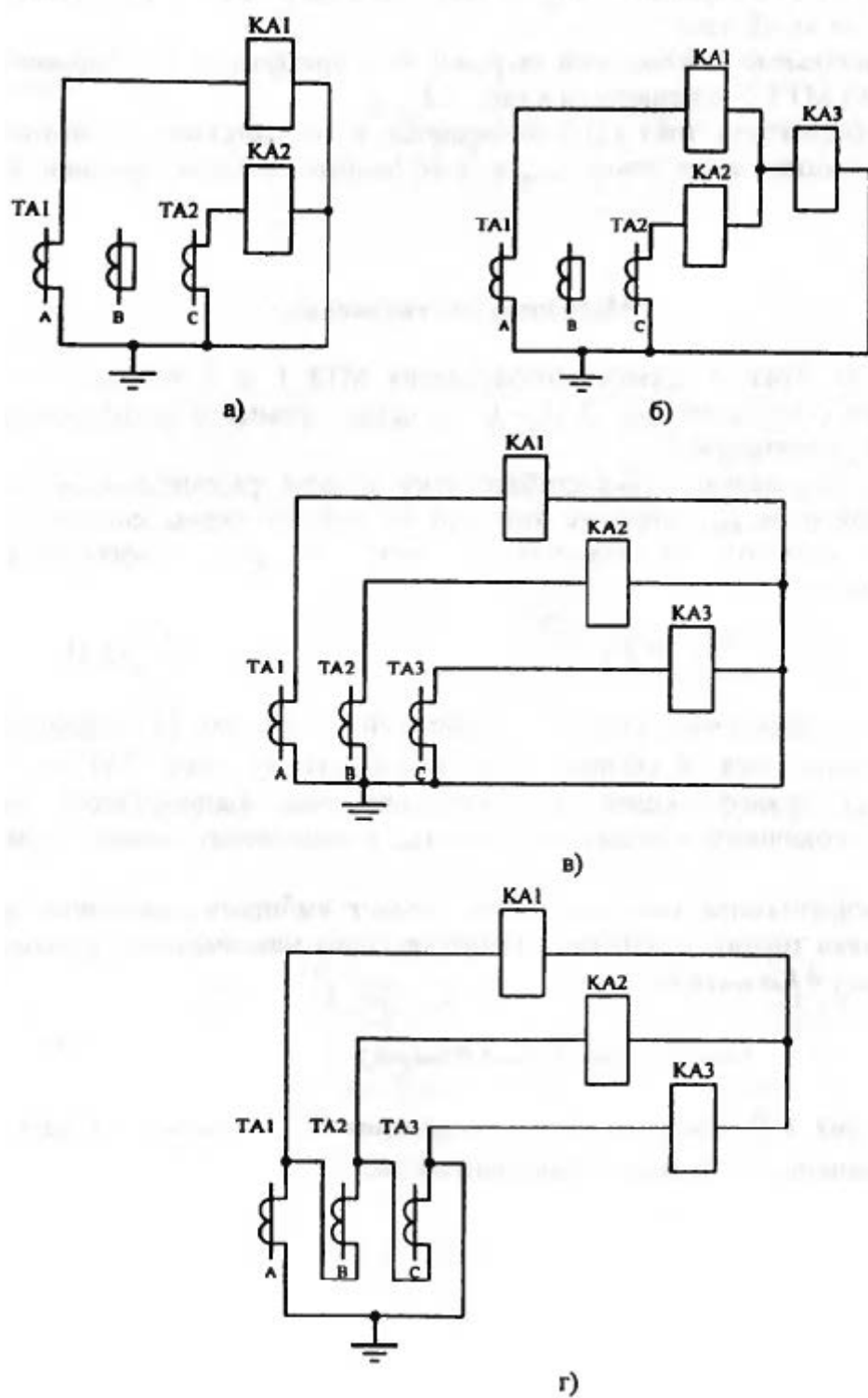


Рис. 3.2. Варианты выполнения схем токовых защит от междуфазных КЗ

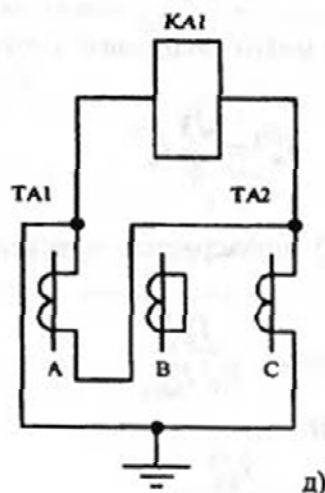


Рис. 3.2. (окончание)

К п. 2). В сетях с $U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ, в которых не бывает однофазных КЗ, защиты линий целесообразно выполнять с двумя ТА (двухфазные схемы), обычно включаемыми во всей сети в одноименные фазы (А и С). В сетях с $U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ, которые работают с глухозаземленными нейтралями трансформаторов (автотрансформаторов), для защит необходимо иметь ТА во всех трех фазах (трехфазные схемы) для обеспечения их работы и при однофазных КЗ. На практике применяются следующие схемы токовых защит, приведенные на рис. 3.2: а – неполная звезда (двухфазная с двумя реле тока КА1 и КА2); б – неполная звезда (двухфазная с тремя реле тока, в которой третье реле тока КА3 включено на сумму токов двух фаз); в – полная звезда (трехфазная с тремя реле тока); г – полный треугольник (трехфазная с тремя реле тока); д – неполный треугольник (двухфазная с одним реле тока).

Для реализации защит от междуфазных КЗ используют двухфазные схемы. На участке 2 следует рассмотреть возможность использования схемы неполного треугольника (см. рис. 3.2, д), как наиболее простой. В случае недостаточной ее чувствительности следует перейти к схеме неполной звезды (см. рис. 3.2, а).

Чувствительность защиты 2 оценивается коэффициентом чувствительности

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{р min}}}{I_{\text{с.р}}}, \quad (3.3)$$

где $I_{\text{р min}}$ – минимальный ток, протекающий в реле тока при КЗ в конце защищаемого участка (точка К2) и в конце резервируемого участка (точка К4).

Минимальное значение тока $I_{\text{р min}}$ имеет место при двухфазном КЗ, поскольку в месте КЗ имеет место следующее соотношение:

Минимальное значение тока $I_{p,min}$ имеет место при двухфазном КЗ, поскольку в месте КЗ имеет место следующее соотношение:

$$I_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_K^{(3)}. \quad (3.4)$$

При КЗ в точке К2 проверяется чувствительность защиты 2 как основной:

$$k_{ч,осн} = \frac{I_{K2}^{(2)}}{K_I I_{с,р 2}}, \quad (3.5)$$

а в точке К4 – как резервной:

$$k_{ч,рез} = \frac{I_{K4}^{(2)}}{K_I I_{с,р 2}}. \quad (3.6)$$

Согласно ПУЭ [3] необходимо иметь $k_{ч,осн} \geq 1,5$ и $k_{ч,рез} \geq 1,2$.

Если схема неполного треугольника для защиты 2 не удовлетворяет требованиям ПУЭ, следует перейти к схеме неполной звезды (см. рис. 3.2,а), коэффициенты чувствительности которой при КЗ в тех же точках будут больше в $\sqrt{3}$ раз. Это связано с тем, что для этой схемы $k_{сх}^{(3)} = 1$, а значит в соответствии с выражением (3.1) ее ток $I_{с,р}$ будет меньше в $\sqrt{3}$ раз по сравнению со схемой неполного треугольника.

Для схемы защиты 1 головного участка следует рассмотреть схему неполной звезды с двумя реле (см. рис. 3.2,а), если ее чувствительность окажется достаточной при КЗ за понижающим трансформатором Т (точка КЗ), или с тремя реле (см. рис. 3.2,б) в противном случае. Схема с тремя реле тока при двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ-11 в 2 раза более чувствительна, чем схема с двумя реле (см. рис. 1.5, упражнение 1).

Из векторных диаграмм рис. 1.8 и 1.11 следует невозможность использования схемы неполного треугольника для защиты 1.

В результате расчета коэффициентов чувствительности защиты 1 при КЗ в точке К1 (как основной) и в точках К2 и К2 (как резервной) выбирается приемлемая схема.

Пример расчета МТЗ 1 и 2 по варианту а).

1. Определяем $I_{раб\ max\ 2}$ и $I_{раб\ max\ 1}$:

$$I_{раб\ max\ 2} = I_{нагр\ 2} + I_{нагр\ 3} = 30 + 20 = 50\ A;$$

$$I_{раб\ max\ 1} = I_{раб\ max\ 2} + I_{нагр\ 1} = 50 + 50 = 100\ A.$$

2. Определяем токи срабатывания МТЗ:

$$I_{с.з 2} = \frac{k_{отс} k_3}{k_{\theta}} I_{\text{раб max } 2} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,9} 50 = 100 \text{ A};$$

$$I_{с.з 1} = \frac{k_{отс} k_3}{k_{\theta}} I_{\text{раб max } 1} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,9} 100 = 200 \text{ A}.$$

3. Определяем времена срабатывания защит:

$$t_{с.з 2} = t_{с.з.3(6)\text{max}} + \Delta t = 1,0 + 0,5 = 1,5 \text{ с};$$

$$t_{с.з 1} = t_{с.з.2(5)\text{max}} + \Delta t = 2,5 + 0,5 = 3,0 \text{ с}.$$

4. Выбираем по табл. 3.2 ТА для защит 1 и 2 $-K_I = 100/5$.

5. Принимаем для защиты 2 схему неполного треугольника ($k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$) и определяем ток срабатывания реле:

$$I_{с.р 2} = \frac{k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{с.з 2} = \frac{\sqrt{3}}{100/5} 100 = 8,66 \text{ A}.$$

6. Проверяем чувствительность МТЗ 2 в точках К2 и К4:

$$k_{ч К2} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 400}{100/5 \cdot 8,66} = 2,0 > 1,5; \quad k_{ч К4} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 300}{100/5 \cdot 8,66} = 1,5 > 1,2,$$

т.е. МТЗ 2 выполняется по схеме неполного треугольника.

7. Принимаем для защиты 1 схему неполной звезды ($k_{сх}^{(3)} = 1$) и определяем ток срабатывания реле:

$$I_{с.р 1} = \frac{k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{с.з 1} = \frac{1 \cdot 200}{100/5} = 10 \text{ A}.$$

8. Проверяем чувствительность МТЗ 1 в точках К1, К2 и К3:

$$k_{ч К1} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 600}{100/5 \cdot 10} = 2,6 > 1,5; \quad k_{ч К2} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 400}{100/5 \cdot 10} = 1,73 > 1,2;$$

$$k_{ч,КЗ} = \frac{\frac{1}{2} 250}{100/5 \cdot 10} = 0,625 < 1,2,$$

т.е. МТЗ 1 должна быть выполнена по схеме неполной звезды с тремя реле, у которой

$$k_{ч,КЗ} = \frac{250}{100/5 \cdot 10} = 1,25 > 1,2.$$

Таблица 3.1

Максимальные рабочие токи нагрузок, токи КЗ и времена срабатывания защит 4–6

Параметр Вариант	$I_{нагр,1}^{*)}$, А	$I_{нагр,2}^{*)}$, А	$I_{нагр,3}^{*)}$, А	$t_{с.з.4}$, с	$t_{с.з.5}$, с	$t_{с.з.6}$, с	$I_{К1}^{(3)*}$, А	$I_{К2}^{(3)*}$, А	$I_{К3}^{(3)*}$, А	$I_{К4}^{(3)*}$, А
А	50	30	20	0,5	2,5	1,0	600	400	250	300
Б	60	45	55	1,0	2,0	1,5	900	450	600	350
В	140	45	100	1,5	1,5	2,0	2000	800	1200	700
Г	45	25	75	1,0	1,0	2,5	1000	400	600	400

^{*)} Токи нагрузок и токи трехфазных КЗ приведены к стороне ВН.

Таблица 3.2

Первичные номинальные токи и коэффициенты трансформации трансформаторов тока

$I_{ном},$ А	100	200	300	400	600	800	1000
K_I	100/5	200/5	300/5	400/5	600/5	800/5	1000/5

Практическое занятие №3

Расчет трехступенчатой токовой защиты от многофазных КЗ в сети с односторонним питанием. Разработка разнесенных схем защиты

Задание

Для сети по рис. 4.1,а:

- 1) определить параметры срабатывания и оценить чувствительность ступеней трехступенчатой токовой защиты I от междуфазных КЗ;
- 2) разработать разнесенные схемы защиты I на постоянном оперативном токе.

В расчетах принять $k_{отс} = 1,2$; $k_n = 0,9$; $k_z = 1,5$ и $\Delta t = 0,5$ с. Другие необходимые данные приведены в табл. 4.1.

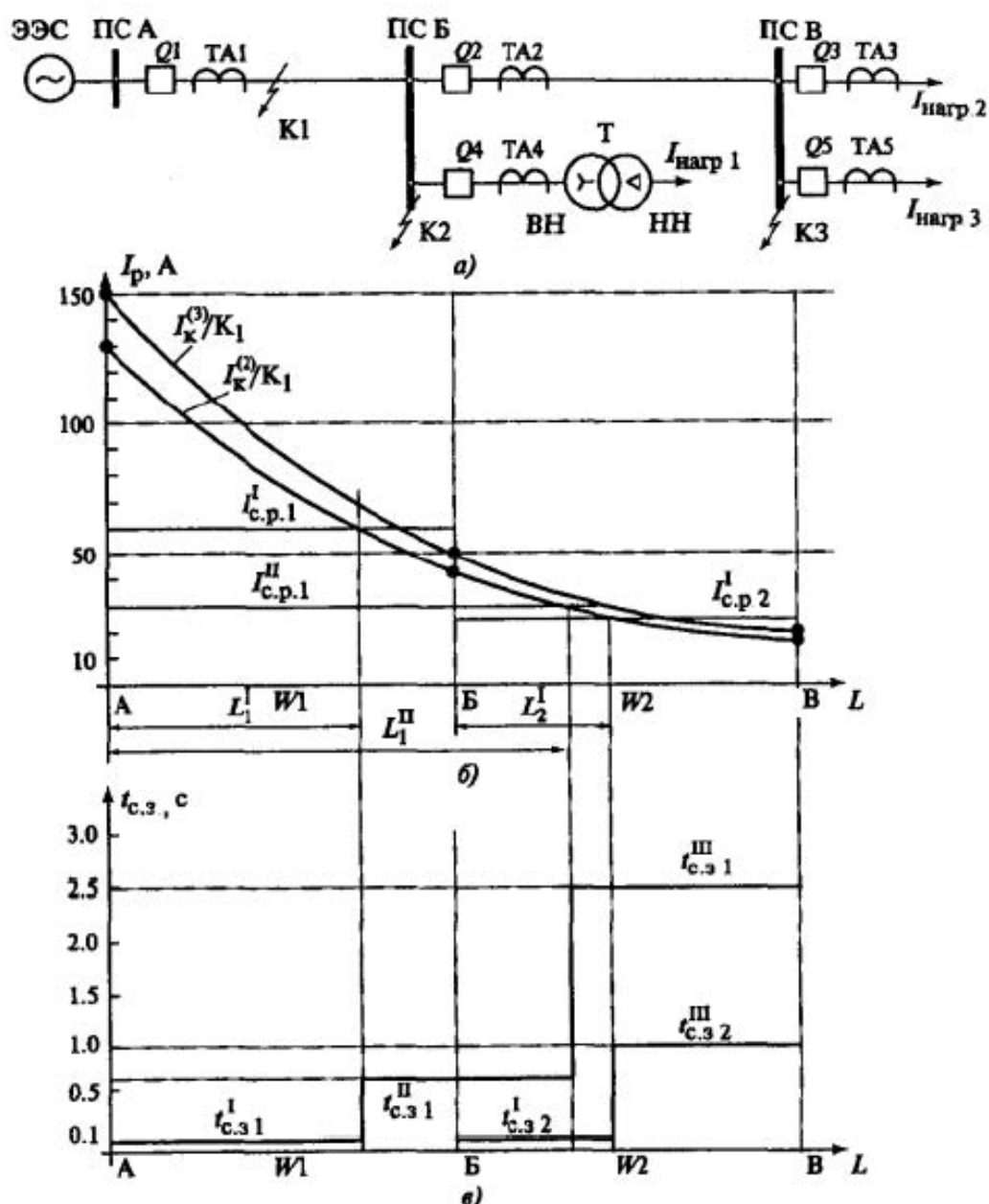


Рис. 4.1. Выбор параметров срабатывания первой и второй ступеней токовой защиты сети:
 а – схема сети; б – зависимость $I_p = f_1(\ell)$; в – зависимость $t_{c.z} = f_2(\ell)$

Методические указания

К п. 1). Токовые защиты от многофазных КЗ со ступенчатыми характеристиками реализуются, как правило, по схеме неполной звезды.

На участке 1 предусмотреть установку трехступенчатой, а на участке 2 – двухступенчатой защиты.

Расчет параметров ступенчатой защиты сводится к определению тока срабатывания, выдержки времени и оценке защитоспособности каждой из ее ступеней. При этом необходимо осуществить расчет защит 1 и 2, т. к. параметры защиты 2 необходимы для расчета параметров защиты 1.

Первая ступень – токовая отсечка без выдержки времени – реализуется с помощью двух реле тока.

Ток срабатывания реле первой ступени $I_{с.р}^I$ выбирается, исходя из условия обеспечения несрабатывания при внешних КЗ, и поэтому должен быть больше максимально возможного тока в защите в указанных условиях

$$I_{с.р}^I = \frac{I_{с.з}^I k_{сх}^{(3)}}{K_I} = \frac{k_{отс}^I k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{к.вн\ max}^{(3)}, \quad (4.1)$$

где $I_{с.з}^I = k_{отс}^I I_{к.вн\ max}^{(3)}$ – первичный ток срабатывания первой ступени защиты; $k_{отс}^I = 1,2 - 1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий неточность расчета тока КЗ, погрешности ТА и реле тока, а также влияние апериодической слагающей в токе $I_{к}^{(3)}$; $k_{сх}^{(3)} = 1$ – коэффициент схемы неполной звезды; K_I – коэффициент трансформации ТА; $I_{к.вн\ max}^{(3)}$ – максимальный ток в защите при трехфазных КЗ в начале смежных участков.

Коэффициенты трансформации K_I ТА1 и ТА2 выбираются, исходя из соответствующих максимальных рабочих токов $I_{раб.маx,1}$ и $I_{раб.маx,2}$ и шкалы их номинальных первичных токов, приведенных в табл. 3.2 Номинальный вторичный ток ТА1 и ТА2 равен 5 А. Для определения зоны ℓ^I , защищаемой первой ступенью защиты, следует построить на основании данных табл. 4.1 график зависимости токов в реле при трехфазных и двухфазных КЗ в функции расстояния ℓ , т.е.

$$I_p = \frac{I_{к}^{(3)} k_{сх}^{(3)}}{K_I} = f(\ell)$$

с учетом того, что в месте КЗ $I_{к}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{к}^{(3)}$.

Зона ℓ^I определяется в долях от длины защищаемой линии. Рассчитанную ступень целесообразно использовать, если ее зона $\ell^I > 0$, хотя бы при трехфазных КЗ.

Эффективность действия I ступени оценивается также коэффициентом чувствительности k_q^I при повреждениях в начале защищаемого участка.

Время срабатывания первой ступени $t_{сз}^I \leq 0,1$ с. Это замедление необходимо для отстройки от искусственных кратковременных КЗ, создаваемых трубчатыми разрядниками, устанавливаемыми в сетях с $U_{ном} \leq 35-110$ кВ.

Вторая ступень – отсечка с выдержкой времени – реализуется с помощью двух реле тока и реле времени и предназначена для защиты той части участка, где не работает первая ступень, и для защиты шин приемной подстанции. Исключение излишних срабатываний этой ступени при КЗ на

смежных участках обеспечивается выбором времени срабатывания $t_{с.з}^{II}$ и тока срабатывания $I_{с.з}^{II}$.

Времена срабатывания $t_{с.з}^{II}$ выбираются у всех защит одинаковыми и принимаются на ступень селективности $\Delta t = 0,5$ с большими, чем время срабатывания $t_{с.з.см}^I$ быстродействующих защит (первых ступеней или дифференциальных токовых), установленных на смежных элементах:

$$t_{с.з}^{II} = t_{с.з.см}^I + \Delta t \approx (0,5-0,6) \text{ с.} \quad (4.2)$$

Для схемы (см. рис. 4.1,а) $t_{с.з.1}^{II} = t_{с.з.2}^I + \Delta t$ и $t_{с.з.1}^{II} = t_{с.з.т}^I + \Delta t$ ($t_{с.з.т}^I$ – время срабатывания дифференциальной защиты или токовой отсечки трансформатора). Выбирается большее из полученных значений. При таком выборе $t_{с.з}^{II}$ ток срабатывания этой ступени во избежание излишних срабатываний должен быть больше тока в защите при таких КЗ на смежных элементах, которые защитами этих элементов отключаются с выдержками времени. Такими КЗ являются повреждения в конце зон, защищаемых первыми ступенями защит смежных участков, или на шинах низшего напряжения за трансформаторами (К4), где уже не работает их быстродействующая защита:

$$I_{с.р}^{II} \geq \frac{k_{отс}^{II} k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{с.з.см}^{(3)}; \quad (4.3)$$

$$I_{с.р}^{II} \geq \frac{k_{отс}^{II} k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{к, транс, max}, \quad (4.4)$$

где $k_{отс}^{II} = 1,1-1,2$ – коэффициент отстройки II ступени; $I_{с.з.см}^I$ – ток срабатывания I ступени защиты смежного участка; $I_{к, транс, max}$ – максимальный ток через рассматриваемую защиту при КЗ за понижающим трансформатором Т; $k_{сх}^{(3)} = 1$ – коэффициент схемы неполной звезды; K_I – коэффициент трансформации ТА.

Рассчитанную по большему из значений $I_{с.р}^{II}$ вторую ступень целесообразно использовать, если ее коэффициент чувствительности $k_{\psi}^{II} \geq 1,2$ при повреждениях в конце защищаемого участка, поскольку II ступень резервируется более чувствительной третьей. Коэффициент чувствительности определяется как отношение минимального тока в реле $I_{р min}$ к его току срабатывания $I_{с.р}$:

$$k_{\text{ч}}^{\text{II}} = \frac{I_{\text{p min}}}{I_{\text{с.р}}^{\text{II}}} \quad (4.5)$$

Третья ступень, предназначенная для резервирования, выполняется как максимальная токовая защита (МТЗ) с независимой характеристикой выдержки времени. Она включает в себя два или три реле тока (для повышения чувствительности при КЗ за трансформатором) и реле времени. Ее несрабатывание при внешних КЗ обеспечивается выбором времени срабатывания $t_{\text{с.з}}^{\text{III}}$ большим, чем время срабатывания резервной защиты (или III ступени) на смежном элементе $t_{\text{с.з.см}}^{(\text{рез})}$:

$$t_{\text{с.з}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з.см}}^{(\text{рез})} + \Delta t. \quad (4.6)$$

Ток срабатывания III ступени выбирается исходя из условий несрабатывания в режимах без КЗ, рассмотренных в упражнении 2, т.е. (2.2), (2.4) и (2.5). Как правило, определяющим является условие обеспечения возврата реле тока ступени после отключения внешних КЗ:

$$I_{\text{с.р}}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}}^{\text{III}} k_{\text{з}} k_{\text{сх}}^{(3)}}{k_{\text{в}} K_{\text{I}}} I_{\text{раб max}}, \quad (4.7)$$

где $k_{\text{отс}}^{\text{III}} = 1,0 - 1,2$ – коэффициент отстройки для III ступени; $I_{\text{раб max}}$ – максимальный рабочий ток защищаемого участка.

Коэффициент чувствительности III ступени проверяется в соответствии с ее назначением:

как основной – в конце своего участка

$$k_{\text{ч.осн}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{п min}}}{I_{\text{с.р}}^{\text{III}}} \geq 1,5, \quad (4.8)$$

и как резервной – в конце смежных участков

$$k_{\text{ч.рез}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{п min}}}{I_{\text{с.р}}^{\text{III}}} \geq 1,2. \quad (4.9)$$

Если чувствительность третьей ступени с двумя реле тока окажется недостаточной к повреждениям за трансформатором, то следует использовать дополнительное третье реле тока, включенного на сумму токов фаз А и С (см. рис. 3.2,б), и проверить $k_{\text{ч}}$ схемы с тремя реле.

Пример расчета ступенчатых токовых защит по варианту а).

1. Определяется $I_{\text{раб max 2}}$ и $I_{\text{раб max 1}}$:

$$I_{\text{раб max 2}} = I_{\text{нагр 2}} + I_{\text{нагр 3}} = 30 + 20 = 50 \text{ A};$$

$$I_{\text{раб max 1}} = I_{\text{раб max 2}} + I_{\text{нагр 1}} = 50 + 50 = 100 \text{ A}.$$

2. Выбирается по табл. 3.2 ТА1 и ТА2 для защит 1 и 2 – $k_T = 100/5$.

3. Определяется ток срабатывания I ступени защиты 2:

$$I_{\text{с.р 2}}^I = \frac{k_{\text{отс}}^I k_{\text{сх}}^{(3)}}{K_I} I_{\text{К3}}^{(3)} = \frac{1,2 \cdot 1}{100/5} 400 = 24 \text{ A}.$$

4. Определяется $k_{\text{ч 2}}^I$ при КЗ в начале участка 2:

$$k_{\text{ч 2}}^I = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{К2}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р 2}}^I} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 1000}{100/5 \cdot 24} = 1,8 > 1,$$

т.е. установка I ступени на участке 2 целесообразна.

5. Определяется ток срабатывания реле I ступени защиты 1:

$$I_{\text{с.р 1}}^I = \frac{k_{\text{отс}}^I k_{\text{сх}}^{(3)}}{K_I} I_{\text{К2}}^{(3)} = \frac{1,2 \cdot 1}{100/5} 1000 = 60 \text{ A}.$$

6. Определяется $k_{\text{ч 1}}^I$ при КЗ в начале участка 1:

$$k_{\text{ч 1}}^I = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{К1}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р 1}}^I} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 3000}{100/5 \cdot 60} = 2,16 > 1,$$

т.е. установка I ступени на участке 1 целесообразна.

7. Принимаются времена срабатывания I ступеней защит 1 и 2 $t_{\text{с.з 1(2)}}^I = 0,1 \text{ с}$ и строятся зависимости токов в реле защит 1 и 2 при двухфазных и трехфазных КЗ в функции расстояния $I_p = f(\ell)$, на которые наносятся линии, соответствующие токам $I_{\text{с.р 1}}^I$ и $I_{\text{с.р 2}}^I$ (рис. 4.1,б). Поскольку длины участков 1 и 2 не заданы, зоны ℓ_1^I и ℓ_2^I определяются качественно. Из рис. 4.1,б видно, что $\ell_1^I > 0$ и $\ell_2^I > 0$, т.е. установка первых ступеней на участках 1 и 2 целесообразна.

8. Определяется ток срабатывания реле II ступени защиты I (по двум условиям (4.3) и (4.4):

$$I_{с.р. I}^{II} = \frac{k_{отс}^{II} k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{с.з. 2}^I = \frac{1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 400}{100/5} = 1,2 \cdot 24 = 28,8 \text{ A},$$

$$I_{с.р. I}^{II} = \frac{k_{отс}^{II} k_{сх}^{(3)}}{K_I} I_{K4}^{(3)} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{100/5} \cdot 300 = 18 \text{ A}.$$

Выбираем $I_{с.р. I}^{II} = 28,8 \text{ A}$.

9. Оцениваем чувствительность II ступени защиты I:

$$k_{ч. I}^{II} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{K2}^{(3)}}{K_I I_{с.р. I}^I} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 1000}{100/5 \cdot 28,8} = 1,5 > 1,2.$$

10. Зона ℓ_1^{II} , защищаемая II ступенью определяется также как и ℓ_1^I с использованием зависимости $I_p = f(\ell)$.

11. Определяется время срабатывания II ступени защиты I:

$$t_{с.з. I}^{II} = t_{с.з. 2}^I + \Delta t = 0,1 + 0,5 = 0,6 \text{ с}.$$

12. Определяются $I_{с.р. 2}^{III}$ и $I_{с.р. I}^{III}$ по соотношению (4.7):

$$I_{с.р. 2}^{III} = \frac{k_{отс}^{III} k_z k_{сх}^{(3)}}{k_b K_I} I_{раб. max. 2} = \frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 1,0}{0,9 \cdot 100/5} 50 = 5 \text{ A};$$

$$I_{с.р. I}^{III} = \frac{k_{отс}^{III} k_z k_{сх}^{(3)}}{k_b K_I} I_{раб. max. I} = \frac{1,2 \cdot 1,5 \cdot 1,0}{0,9 \cdot 100/5} 100 = 10 \text{ A}.$$

13. Определяются $k_{ч. 2}^{III}$ и $k_{ч. I}^{III}$:

$$k_{ч. 2. осн.}^{III} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{K3}^{(3)}}{K_I I_{с.р. 2}^{III}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 400}{100/5 \cdot 5} = 3,46 > 1,5;$$

$k_{ч. 2. рез.}^{III}$ – не проверяется из-за отсутствия данных;

$$k_{\text{ч1 осн}}^{\text{III}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{K2}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р1}}^{\text{III}}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 1000}{100/5 \cdot 10} = 4,3 > 1,5;$$

$$k_{\text{ч1 рез}}^{\text{III}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{K3}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р1}}^{\text{III}}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} 400}{100/5 \cdot 10} = 1,73 > 1,2;$$

$$k_{\text{ч1 рез}}^{\text{III}} = \frac{\frac{1}{2} I_{\text{K4}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р1}}^{\text{III}}} = \frac{\frac{1}{2} 300}{100/5 \cdot 10} = 0,75 < 1,2,$$

т.е. необходимо применить для III ступени защиты 1 схему неполной звезды с тремя реле (см. рис. 3.2,б), что увеличивает $k_{\text{ч1 рез}}^{\text{III}}$ при КЗ за трансформатором (точка К4) в два раза:

$$k_{\text{ч1 рез}}^{\text{III}} = \frac{I_{\text{K4}}^{(3)}}{K_I I_{\text{с.р1}}^{\text{III}}} = \frac{300}{100/5 \cdot 10} = 1,5 > 1,2.$$

14. Определяются времена срабатывания $t_{\text{с.з1}}^{\text{III}}$ и $t_{\text{с.з2}}^{\text{III}}$ МТЗ 1 и 2 участков:

$$t_{\text{с.з2}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з3}}^{\text{III}} + \Delta t = 0,5 + 0,5 = 1,0 \text{ с};$$

$$t_{\text{с.з1}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з4}}^{\text{III}} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ с}.$$

15. Зависимость $t_{\text{с.з}} = f_2(\ell)$ приведена на рис. 4.1,в.

К п. 2). Схема цепей тока трехступенчатой защиты 1 (рис. 4.2) включает в себя три ступени: I ступень (два реле тока КА1 и КА2), II ступень (два реле тока КА3 и КА4) и III ступень (три реле тока КА5, КА6 и КА7).

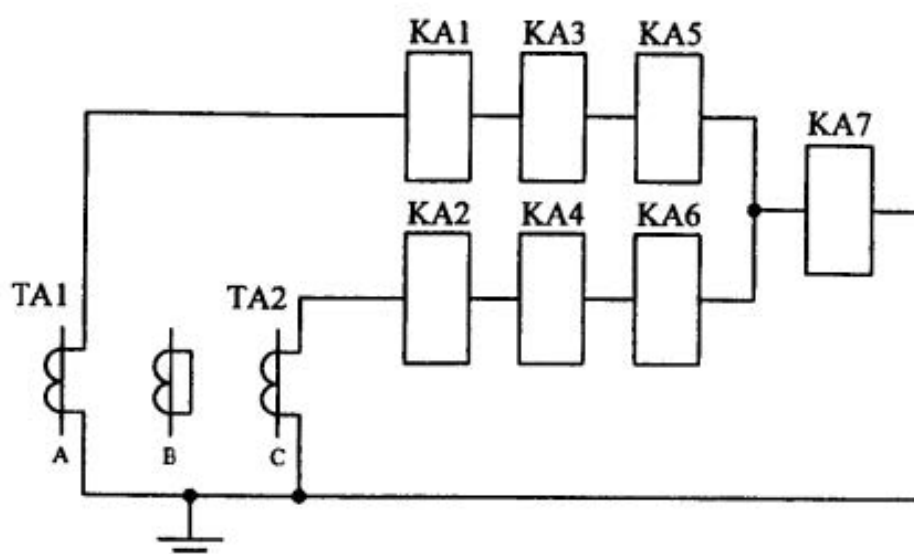


Рис. 4.2. Цепи переменного тока трехступенчатой токовой защиты участка I

Схема оперативных цепей постоянного тока разрабатывается в соответствии с рис. 4.8, приведенным в [4], из которого необходимо исключить цепи защит от КЗ на землю (реле тока КА8 и КА9).

В табл. 4.2 приведены варианты заданий для самостоятельной работы студентов.

Таблица 4.1

Максимальные рабочие токи нагрузок, токи КЗ и времена срабатывания защит 3–5

Параметр Вариант	$I_{\text{нагр 1}}^*)$, А	$I_{\text{нагр 2}}^*)$, А	$I_{\text{нагр 3}}^*)$, А	$t_{\text{сз 3}}$, с	$t_{\text{сз 4}}$, с	$t_{\text{сз 5}}$, с	$I_{\text{К1}}^{(3)*}$, кА	$I_{\text{К2}}^{(3)*}$, кА	$I_{\text{К3}}^{(3)*}$, кА	$I_{\text{К4}}^{(3)*}$, кА
а)	50	30	20	0,5	2,0	1,0	3,0	1,0	0,4	0,3
б)	40	40	40	1,5	1,0	0,5	15	6	2	2,7
в)	35	60	45	1,0	2,5	1,5	12	5	1,5	1,5
г)	60	45	50	1,2	2,0	2,0	16	7	3	2

^{*)} Токи нагрузок и токи трехфазных КЗ приведены к стороне ВН.

Таблица 4.2

Варианты заданий для самостоятельной работы

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$I_{\text{нагр 1}}$	а	б	в	г	а	а	б	в	г	а	а	г	в
$I_{\text{нагр 2}}$	б	б	в	г	в	а	б	в	г	б	в	в	в
$I_{\text{нагр 3}}$	в	б	в	г	г	б	а	а	а	в	б	б	в
$t_{\text{сз 3}}$	а	б	в	г	а	б	б	в	а	г	г	а	г
$t_{\text{сз 4}}$	б	б	в	г	в	г	б	в	г	а	г	г	г
$t_{\text{сз 5}}$	в	б	в	г	г	г	а	а	г	б	в	в	г

Продолжение табл. 4.2

K1 ⁽³⁾	а	б	в	г	а	а	б	в	а	в	б	б	а
K2 ⁽³⁾	б	б	в	г	в	а	б	в	а	г	а	а	б
K3 ⁽³⁾	в	б	в	г	г	б	в	б	г	а	б	г	а
K4 ⁽³⁾	г	б	в	г	б	б	г	а	г	б	в	в	г

Продолжение табл. 4.2

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
I _{нагр 1}	б	б	в	в	б	в	г	а	в	б	а	б
I _{нагр 2}	в	б	в	г	а	б	а	г	г	г	г	а
I _{нагр 3}	б	г	б	г	г	а	г	в	в	а	в	б
t _{с.з 3}	а	а	в	б	г	б	а	б	б	а	а	а
t _{с.з 4}	а	б	г	в	б	б	а	б	в	в	г	б
t _{с.з 5}	а	в	б	а	б	в	а	в	а	в	в	а
K1 ⁽³⁾	в	г	в	г	г	а	в	в	в	б	а	б
K2 ⁽³⁾	в	а	г	б	г	а	в	б	г	г	г	а
K3 ⁽³⁾	а	б	б	в	б	г	в	б	а	а	в	б
K4 ⁽³⁾	в	а	б	а	б	г	в	а	б	а	а	а

Практическое занятие №4

Расчет токовой защиты нулевой последовательности в сети с глухозаземленной нейтралью

Задание

Для сети, изображенной на рис. 5.1 определить:

- 1) токи и времена срабатывания МТЗ на участках 1–3 от междуфазных КЗ;
- 2) токи и времена срабатывания ступенчатых токовых защит нулевой последовательности на тех же участках.

Оценить чувствительность рассчитанных ступеней МТЗ и ступенчатых защит нулевой последовательности при однофазных КЗ.

Варианты исходных данных приведены в табл. 5.1, а варианты заданий для самостоятельной работы – в табл. 5.2.

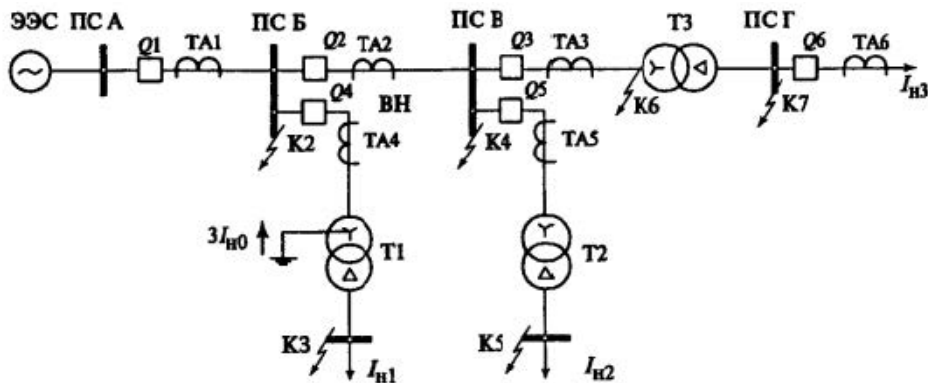


Рис. 5.1. Схема сети

Таблица 5.1

Исходные данные														
	I_{H1}	I_{H2}	I_{H3}	$t_{с.з.4}$	$t_{с.з.5}$	$t_{с.з.6}$	$I_{K2}^{(1)}$	$I_{K4}^{(1)}$	$I_{K6}^{(1)}$	$3I_{0(K1)}$	$3I_{0(K2)}$	$I_{K3}^{(3)}$	$I_{K5}^{(3)}$	$I_{K7}^{(3)}$
	А			с			кА							
а)	60	40	30	2,5	2,0	2,0	2,5	1,5	1,0	0,3	0,4	1,1	0,8	0,5
б)	50	70	35	1,5	2,5	2,5	3	1,7	1,1	0,2	0,3	1,5	1,0	0,7
в)	40	55	45	2,0	1,0	1,5	3,5	2,0	1,2	0,25	0,35	1,0	0,7	0,6

$k_{отс}$	k_b	k_3	$\Delta t, с$	ϵ
1,2	0,9	1,5	0,5	0,05

Таблица 5.2

Варианты заданий

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I_{H1}	б	в	а	б	в	а	б	а	б	б	а	в	в
I_{H2}	б	в	б	в	а	в	а	а	а	б	б	а	б
I_{H3}	б	в	в	а	б	б	в	а	а	б	б	а	а
$t_{с.з.4}$	б	в	а	б	в	а	б	б	б	в	а	в	в
$t_{с.з.5}$	б	в	б	в	а	в	а	б	а	в	б	а	б
$t_{с.з.6}$	б	в	в	а	б	б	в	б	а	в	б	а	а
$I_{K2}^{(1)}$	б	в	а	б	в	а	б	а	б	а	а	в	в
$I_{K4}^{(1)}$	б	в	б	в	а	в	а	а	а	а	б	а	б
$I_{K6}^{(1)}$	б	в	в	а	б	б	в	а	а	а	б	а	а
$3I_{0(K1)}$	б	в	а	б	в	а	б	б	б	б	а	в	в
$3I_{0(K2)}$	б	в	б	в	а	в	а	б	а	б	б	а	б
$I_{K3}^{(3)}$	б	в	в	а	б	б	в	б	а	б	б	а	а
$I_{K5}^{(3)}$	б	в	а	б	в	а	б	а	б	в	а	в	в
$I_{K7}^{(3)}$	б	в	б	в	а	в	а	а	а	в	б	а	б

Вариант	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
I_{H1}	в	б	б	в	б	в	а	а	в	в	б	в
I_{H2}	в	а	в	б	б	а	в	в	б	а	в	б
I_{H3}	в	б	в	а	в	в	в	а	б	б	в	а
$t_{с.3.4}$	б	б	а	б	в	в	в	б	в	б	в	б
$t_{с.3.5}$	б	а	б	в	в	а	в	а	б	а	в	б
$t_{с.3.6}$	б	б	б	а	б	в	а	б	б	в	б	в
$I_{K3}^{(1)}$	а	б	в	а	а	в	б	в	в	в	а	в
$I_{K4}^{(1)}$	а	а	а	в	а	а	б	б	а	б	а	в
$I_{K6}^{(1)}$	а	б	а	б	в	в	в	а	а	а	в	б
$3I_{0(K1)}$	б	б	в	в	б	в	в	а	б	а	б	а
$3I_{0(K2)}$	б	а	б	б	б	а	в	в	б	а	б	а
$I_{K3}^{(3)}$	б	б	б	а	в	в	б	а	в	б	а	в
$I_{K3}^{(3)}$	а	б	а	б	в	в	а	б	б	в	в	б
$I_{K3}^{(3)}$	а	а	в	в	в	а	а	а	в	в	в	а

Методические указания

К п.1). Как известно, МТЗ от междуфазных КЗ, выполненные по трехфазной схеме с тремя реле (см. рис. 3.2,в) могут осуществлять защиту сетей с глухозаземленной нейтралью и от однофазных КЗ. Однако токи срабатывания таких МТЗ, рассчитанные по соотношению (2.4) оказываются значительными ($I_{с.3} = 2,5 - 3I_{\text{раб max}}$), а времена срабатывания должны быть отстроены от времени срабатывания МТЗ потребителей низкой стороны понижающих трансформаторов.

Иными словами, при наиболее часто встречающихся в сетях 110 кВ и выше однофазных КЗ МТЗ от междуфазных КЗ обладает невысокими коэффициентами чувствительности и значительными выдержками времени. Расчет параметров МТЗ для заданной сети ведется в соответствии с выражениями (2.1) – (2.5), а чувствительность проверяется по соотношениям (3.5) – (3.6), рассматриваемым в упражнениях 2 и 3.

К п.2). В заданной сети для защиты от однофазных КЗ на каждом участке устанавливается защита, выполненная в виде отдельного комплекта включенного на ток нулевой последовательности.

В зависимости от схемы сети такая защита может быть одно-, двух- или трехступенчатой. Расчет параметров защиты сводится к определению тока срабатывания, времени срабатывания и оценки защитоспособности каждой из ее ступеней.

Первая ступень – отсечка без выдержки времени. Ток срабатывания реле тока выбирается, исходя из условий обеспечения несрабатывания при внешних коротких замыканиях, и потому должен быть больше максимально возможного утроенного тока нулевой последовательности при однофазных или двухфазных на землю коротких замыканиях. Ступень предназначена для отключения коротких замыканий в начале защищаемого участка. Ток срабатывания первой ступени рассчитывается по выражениям

$$I_{с.з}^I \geq k_{отс}^I 3I_0, \quad (5.1)$$

где $k_{отс}^I = 1,2$ – коэффициент отстройки, учитывающий случайные погрешности, а также наличие в токе КЗ апериодической составляющей; $3I_0$ – максимальный ток нулевой последовательности, протекающий в защите при КЗ на шинах подстанции, на которой эта защита установлена;

$$I_{с.з}^I \geq k_{отс}^I 3I_0', \quad (5.2)$$

где $3I_0'$ – максимальный ток нулевой последовательности, протекающий в защите при КЗ в конце защищаемого участка. Условие (5.1) вводится только при наличии заземленной нейтрали на примыкающих ПС, когда через защиту протекает ток при КЗ на землю «за спиной».

Из полученных значений выбирается большее. Если определяющим явилось первое условие, то для повышения чувствительности первой ступени ее можно сделать направленной и учитывать только второе условие.

Вторая ступень – отсечка с выдержкой времени. Предназначена для защиты участка защищаемого элемента, который не защитила первая ступень. Параметры настройки второй ступени выбираются из условия исключения излишних срабатываний этой ступени при КЗ на смежных элементах. Для этого время срабатывания принимается на ступень селективности Δt большим, чем время срабатывания быстродействующих защит (первых ступеней или дифференциальных), установленных на смежных элементах $t_{с.з}^{II} = t_{с.з}^I + \Delta t = 0,5$ с. При выбранном $t_{с.з}^{II}$ ток срабатывания этой ступени должен быть больше тока в защите при таких коротких замыканиях на смежных элементах, которые защитами этих элементов отключаются с выдержками времени. Такими короткими замыканиями, как правило, являются повреждения в конце зон, защищаемых первыми ступенями защит смежных участков. В связи с этим выражение для тока срабатывания второй ступени имеет вид

$$I_{с.з}^{II} = k_{отс}^{II} k_{ток} I_{с.з(см)}^I, \quad (5.3)$$

где $k_{отс}^{\text{II}} = 1,1$ – коэффициент отстройки для второй ступени; $k_{ток} = I_{\text{защ}}/I_{\text{см}}$ – коэффициент, учитывающий различие тока в защитах смежных элементов при КЗ в конце зоны, защищаемой первой ступенью защиты смежного элемента; $I_{\text{с.з}}^{\text{I}}$ – ток срабатывания первой ступени защиты смежного элемента.

Рассчитанную вторую ступень целесообразно использовать, если ее коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} \geq 1,3$ при КЗ на землю в конце защищаемого участка. Коэффициент чувствительности определяется отношением минимального тока к его току срабатывания $k_{\text{ч}} = I_{\text{р. min}}/I_{\text{с.р}}$. Как правило, достаточно обеспечить чувствительность к однофазным замыканиям на землю, имея в виду, что при двухфазных КЗ на землю может быть чувствительна защита от междуфазных замыканий. Дополнительно необходимо отстроить вторую ступень от тока небаланса при КЗ на стороне низшего напряжения трансформаторов примыкающей подстанции

$$I_{\text{с.з}}^{\text{II}} \geq k_{отс} \varepsilon I_{\text{расч}}, \quad (5.4)$$

где $I_{\text{расч}}$ – максимальный ток через трансформаторы тока защиты при междуфазных КЗ за трансформаторами, примыкающими к подстанции; ε – коэффициент небаланса, учитывающий различие в погрешностях трансформаторов тока фильтра тока нулевой последовательности.

Обычно определяющим является первое условие.

Третья ступень предназначена для резервирования и выполняется как чувствительная токовая защита нулевой последовательности с независимой выдержкой времени. Ее несрабатывание при внешних КЗ обеспечивается выбором времени срабатывания большим, чем время срабатывания резервной защиты (или ступени) на смежном элементе:

$$t_{\text{с.з}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з(см)}}^{\text{III}} + \Delta t. \quad (5.5)$$

Ток срабатывания выбирается по следующим условиям:

– условию отстройки от тока небаланса при КЗ на стороне низшего напряжения трансформаторов примыкающей подстанции:

$$I_{\text{с.з}} \geq k_{отс} \varepsilon I_{\text{расч}}, \quad (5.6)$$

где $I_{\text{расч}}$ – максимальный ток через трансформаторы тока защиты при междуфазных КЗ за трансформаторами, примыкающими к подстанции; ε – коэффициент небаланса, учитывающий различие в погрешностях трансформаторов тока фильтра токов нулевой последовательности;

– условию согласования по чувствительности с третьими ступенями защит от КЗ на землю смежных участков:

$$I_{с.з.}^{III} \geq k_{отс} k_{ток} I_{с.з.}^{III}(см); \quad (5.7)$$

– условию обеспечения возврата реле тока после отключения внешних КЗ по выражению

$$I_{с.з.}^{III} \geq \frac{k_{отс}}{k_{в}} (\varepsilon k_3 I_{раб\ max} + 3I_{0н.р}), \quad (5.8)$$

где $I_{раб. max}$ – максимальный рабочий ток линии; k_3 – коэффициент, учитывающий увеличение тока при самозапуске двигателей; $k_{в}$ – коэффициент возврата; $I_{0н.р}$ – ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе в рабочем режиме (в данном упражнении $I_{0н.р} = 0$).

Чувствительность третьей ступени оценивается коэффициентом чувствительности при КЗ на землю в конце смежных элементов: $k_q \geq 1,2$.

Пример расчета по варианту а) (табл. 5.1)

При расчете следует учесть, что значения токов однофазных коротких замыканий, приведенные в задании, даны в месте КЗ, а несимметрия в токах фаз отсутствует: $I_{0н.р} = 0$.

Защита 3

Устанавливается только третья ступень, выдержка времени которой равна нулю.

III ступень. Ток срабатывания отстраивается от тока небаланса при 3-фазном КЗ за трансформатором:

$I_{с.з.}^{III} = k_{отс} \varepsilon I_{К7}^{(3)}$, $I_{с.з.}^{III} = 1,2 \cdot 0,05 \cdot 0,5 = 0,03$ (кА). Проверим чувствительность третьей ступени в конце линии (точка К6):

$k_q = \frac{I_{К6}^{(1)}}{I_{с.з.}^{III}} = \frac{1,0}{0,03} = 33,4$. Рассчитанный коэффициент чувствительности

показывает, что первая ступень защиты 3 защищает всю линию.

Резервировать на 3-ем участке нечего, кроме самой III ступени, поэтому можно произвести аппаратное резервирование, т.е. установку 2-х комплектов защит III ступени.

Защита 2

Данный комплект защит содержит 2 ступени.

I ступень. Отстраивается от тока нулевой последовательности при КЗ в конце зоны защищаемого участка (точка К4): $I_{с.з.2}^I = k_{отс} I_{К4}^{(1)}$, $I_{с.з.2}^I = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ кА}$.

II ступень. Отстраивается от защит смежных участков (III ступень защиты 3 и защита Т2).

$$1 \text{ условие: } I_{с.з.2}^{II} \geq k_{отс} I_{с.з.3}^I, \quad I_{с.з.2}^{II} \geq 1,2 \cdot 0,03 = 0,036 \text{ кА};$$

$$2 \text{ условие: } I_{с.з.2}^{II} \geq k_{отс} \varepsilon I_{К5}^{(3)}, \quad I_{с.з.2}^{II} \geq 1,2 \cdot 0,05 \cdot 0,8 = 0,048 \text{ кА}.$$

Выбирается максимальное значение $I_{с.з.2}^{II} = 0,048 \text{ кА}$. Рассчитанную ступень целесообразно использовать при условии, если $k_q \geq 1,3$. Чувствительность второй ступени проверяется в конце защищаемого участка (точка К4).

$$k_q = \frac{I_{К4}^{(1)}}{I_{с.з.2}^{II}} = \frac{1,5}{0,048} = 31,25.$$

Проверим чувствительность ступени в точке К6 для возможности использования ее в качестве резервной для защиты 3.

$$k_q = \frac{I_{К6}^{(1)}}{I_{с.з.2}^{II}} = \frac{1,0}{0,048} = 20,83.$$

Поскольку $k_q \geq 1,2$, то использование этой ступени как резервной для участка ВГ оправдано. Выдержка времени второй ступени $t_{с.з.1}^{II} = 0,5 \text{ с}$. В связи с вышесказанным установка III ступени нецелесообразна.

Защита 1

Данный комплект защит содержит 3 ступени.

I ступень. Отстраивается от тока нулевой последовательности при КЗ в конце зоны защищаемого участка (точка К2) и от КЗ «за спиной» (точка К1). Для расчета уставки по току первой ступени найдем величину тока, протекающего в защите 1 при КЗ в точке К2. Схема замещения (рис. 5.2) в этом случае выглядит следующим образом:

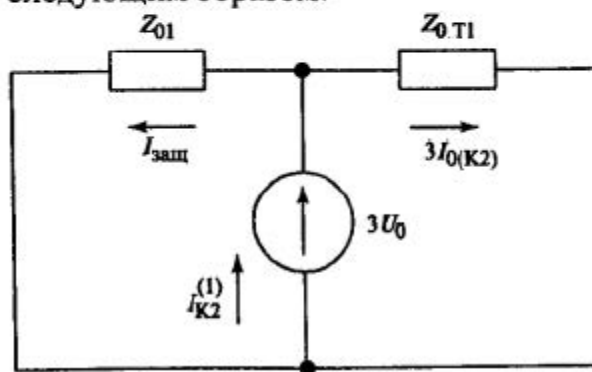


Рис. 5.2. Схема замещения

По закону Кирхгофа $I_{\text{защ}} = I_{K2}^{(1)} - 3I_{0(K2)}$, $I_{\text{защ}} = 2,5 - 0,4 = 2,1$ кА. Так как $I_{\text{защ}} > 3I_{0(K1)}$, ток $I_{с.з.1}^I = k_{\text{отс}} I_{K2}^{(1)}$, $I_{с.з.1}^I = 1,2 \cdot 2,1 = 2,52$ кА. Также найдем коэффициент токораспределения, который пригодится далее при расчете II ступени: $k_{\text{ток}} = \frac{I_{\text{защ}}}{I_{K2}^{(1)}} = \frac{2,1}{2,5} = 0,84$. Следует отметить, что коэффициент

токораспределения не зависит от места возникновения КЗ на смежном элементе. Рассмотрим схему замещения при КЗ на смежном элементе (рис. 5.3), где Z_{01} – суммарное сопротивление нулевой последовательности линии АБ и системы; Z_{0T1} – сопротивление нулевой последовательности трансформатора Т1; Z_0 – сопротивление нулевой последовательности линии БВ до места возникновения КЗ. Ток в защите 1 определяется выражением

$$I_{\text{защ.1}} = I_{\text{защ.2}} \frac{Z_{0T1}}{Z_{01} + Z_{0T1}}. \quad \text{Преобразуем выражение к виду}$$

$$k_{\text{ток}} = \frac{I_{\text{защ.1}}}{I_{\text{защ.2}}} = \frac{Z_{0T1}}{Z_{01} + Z_{0T1}}. \quad \text{Отсюда следует, что } k_{\text{ток}} \text{ не зависит от величины}$$

Z_0 , т.е. остается неизменным в зависимости от места возникновения КЗ на смежном элементе. Поэтому для нахождения $k_{\text{ток}}$ нужно рассмотреть только один режим, например, как в данном случае, КЗ в точке К2.

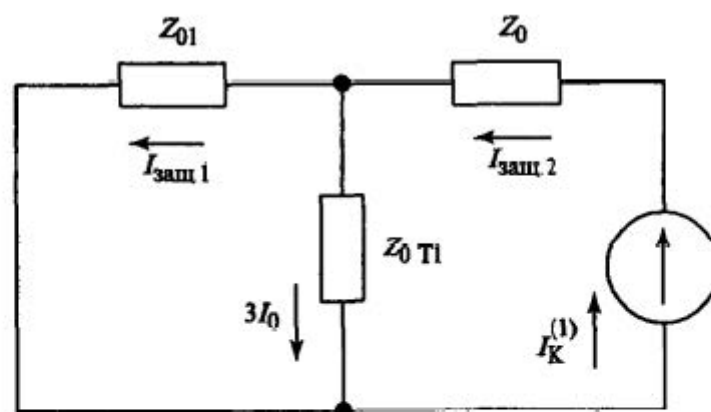


Рис. 5.3. Схема замещения

II ступень. Отстраивается от быстродействующих защит смежных участков (I ступень защиты 2 и защита Т1) по следующим условиям:

$$1 \text{ условие: } I_{с.з.1}^{II} \geq k_{\text{отс}} k_{\text{ток}} I_{с.з.2}^I, \quad I_{с.з.1}^{II} \geq 1,2 \cdot 0,84 \cdot 1,8 = 1,815 \text{ кА};$$

$$2 \text{ условие: } I_{с.з.1}^{II} \geq k_{\text{отс}} \varepsilon I_{K3}^{(3)}, \quad I_{с.з.1}^{II} \geq 1,2 \cdot 0,05 \cdot 1,1 = 0,066 \text{ кА}.$$

Так как при КЗ в конце зоны действия первой ступени защиты 2 в защите 1 протекает ток, не равный току в защите 2 по причине наличия заземленной нейтрали трансформатора Т1, то при расчете необходимо учесть это, введя в условие 1 коэффициент токораспределения. Из полученных значений выбирается максимальное. Таким образом, уставка по току для второй ступени защиты 1 равна $I_{с.з1}^{\text{II}} = 1,815 \text{ кА}$. Чувствительность второй ступени проверяется в конце защищаемого участка (точка К2):

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{защ}}}{I_{с.з1}^{\text{II}}} = \frac{2,1}{1,815} = 1,157. \text{ Коэффициент чувствительности недостаточен:}$$

$k_{\text{ч}} \leq 1,3$. Выдержка времени второй ступени – $t_{с.з1}^{\text{II}} = 0,5 \text{ с}$. В этом случае для защиты конца линии с требуемым $k_{\text{ч}}$ устанавливается третья ступень защиты с отстройкой от второй ступени защиты смежного участка как по току, так и по времени.

III ступень. Отстраивается от защит смежных участков (II ступень защиты 2 и защита Т1) по следующим условиям:

$$1 \text{ условие: } I_{с.з1}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}} k_{\text{ток}} I_{с.з2}^{\text{II}}, \quad I_{с.з1}^{\text{III}} \geq 1,2 \cdot 0,84 \cdot 0,048 = 0,0483 \text{ кА};$$

$$2 \text{ условие: } I_{с.з1}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}} \varepsilon I_{\text{КЗ}}^{(3)}, \quad I_{с.з1}^{\text{III}} \geq 1,2 \cdot 0,05 \cdot 1,1 = 0,066 \text{ кА}.$$

Из полученных значений выбирается максимальное. Таким образом, уставка по току для третьей ступени защиты 1 равна $I_{с.з1}^{\text{III}} = 0,066 \text{ кА}$.

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{защ}}}{I_{с.з1}^{\text{III}}} = \frac{2,1}{0,066} = 31,81 - \text{коэффициент чувствительности достаточен.}$$

Выдержка времени третьей ступени – $t_{с.з1}^{\text{III}} = t_{с.з2}^{\text{II}} + \Delta t = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ с}$.

IV ступень (чувствительная). Отстраивается от небаланса при протекании через защиту максимального рабочего тока и обеспечения возврата реле тока после отключения внешних КЗ. Данная ступень защиты предназначена для обеспечения дальнего резервирования.

$$I_{с.з1}^{\text{IV}} \geq \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} \varepsilon k_3 I_{\text{раб. max}}, \quad I_{с.з1}^{\text{IV}} \geq \frac{1,2}{0,9} 0,05 \cdot 1,5 (60 + 40 + 30) = 26 \text{ А. Выдержка}$$

времени четвертой ступени $t_{с.з1}^{\text{IV}} = t_{с.з4}^{\text{III}} + \Delta t = 2,5 + 0,5 = 3 \text{ с}$. Коэффициент

$$\text{чувствительности в конце защищаемого участка } k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{защ}}}{I_{с.з1}^{\text{IV}}} = \frac{2,1}{0,026} = 80,76.$$

Коэффициент чувствительности в конце резервируемого участка

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{защ}}}{I_{с.з1}^{\text{IV}}} = \frac{1,5 k_{\text{ток}}}{0,026} = 48,46. \text{ Чувствительность четвертой ступени оценивается}$$

коэффициентом чувствительности при КЗ на землю в конце смежных элементов – $k_{\text{ч}} \geq 1,2$. Рассчитанные коэффициенты чувствительности показывают допустимость применения четвертой ступени защиты.

Практическое занятие №5

Расчет токовых направленных защит от многофазных КЗ в радиальной сети с двухсторонним питанием

6.1. Задание

Определить параметры срабатывания токовой направленной защиты от многофазных КЗ в радиальной сети напряжением 110 кВ, представленной на рис. 6.1. Оценить чувствительность защиты, построить график $t_{с.з} = f(\ell)$, разработать принципиальные схемы защиты.

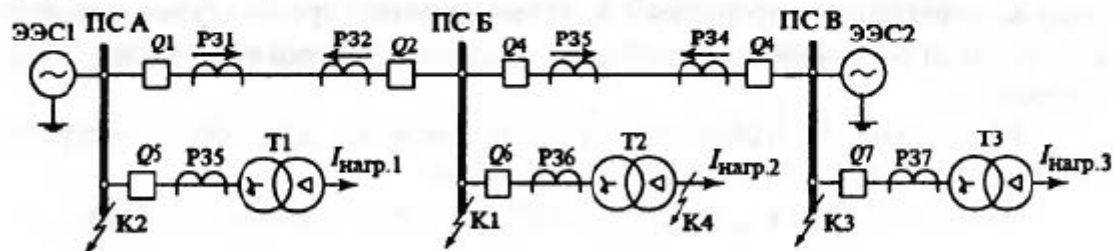


Рис. 6.1. Схема сети

Варианты исходных данных приведены в конце упражнения 6. При выборе параметров срабатывания принять во внимание следующее:

- 1) линии оборудованы устройствами АПВ;
- 2) основные режимы работы сети: нормальный, когда работают обе системы; отключена система С1; отключена система С2.
3. $U_{с.ном} = 115$ кВ; $k_{отс}^{III} = 1,2$; $k_{в} = 0,9$.

6.2. Методические указания

6.2.1. Общая характеристика защиты

Для селективного отключения поврежденного участка при многофазных КЗ в сети с двухсторонним питанием токовая ступенчатая защита выполняется направленной, включается на фазные токи и междуфазные напряжения и устанавливается на обоих концах защищаемой линии. В общем случае защита выполняется трехфазной, трехступенчатой, двух-, трехфазной. Направленность действия защиты обеспечивается установкой органов направления мощности, срабатывающих только при определенном направлении мощности — «от шин в линию».

На рис. 6.2 представлены принципиальные схемы трехступенчатой токовой защиты с направленной третьей ступенью [4]. Защита содержит установленные в двух фазах реле тока КА1–КА6 трех ступеней, реле направления мощности КВ1 и КВ2, реле времени КТ1 и КТ2, обеспечивающие выдержки времени II и III ступеней, указанные реле КН1–КН3 и выходное реле КЛ. В цепях оперативного постоянного тока

предусмотрена возможность вывода из работы рассматриваемой защиты при возникновении в сети КЗ на землю (контактом реле KV, включенного на напряжение нулевой последовательности).

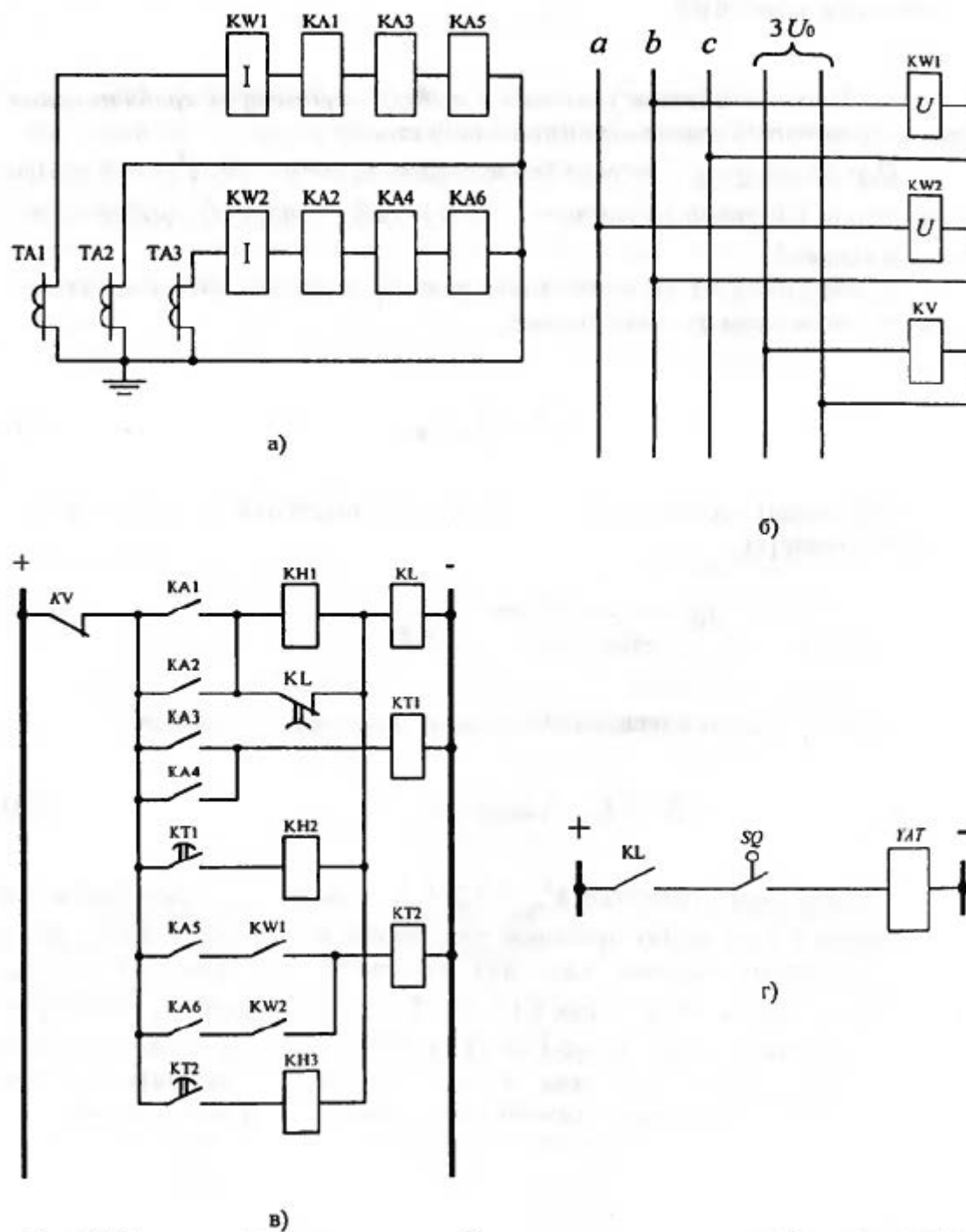


Рис. 6.2. Схема цепей переменного тока (а), переменного напряжения (б), оперативного постоянного тока (в) трехступенчатой токовой защиты и отключения выключателя (г)

Рекомендуется, по возможности, хотя бы одну из ступеней защиты выполнять ненаправленной для предотвращения отказа защиты при трехфазном КЗ в месте установки защиты вследствие недостаточной чувствительности ОНМ.

6.2.2. Методические указания к выбору параметров срабатывания трехступенчатой токовой направленной защиты

Первая ступень – отсечка без выдержки времени, т.е. $t_{с.з}^I \leq 0,1$ с. При выполнении I ступени ненаправленной ток срабатывания $I_{с.з}^I$ выбирается с учетом условий:

а) отстройки от уравнильного тока $I_{ур}$ в линии при качаниях или выходе генераторов из синхронизма;

$$I_{с.з}^I = k_{отс} I_{ур}, \quad (6.1)$$

где коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,3-1,5$, а уравнильный ток определяется соотношением [4]

$$I_{ур} = \frac{2U_{с.ном} / \sqrt{3}}{X_{C1} + X_{W1} + X_{W2} + X_{C2}}; \quad (6.2)$$

б) отстройки от максимального тока в защите при внешних КЗ:

$$I_{с.з}^I = k_{отс}^I I_{к.вн\ max}. \quad (6.3)$$

Коэффициент отстройки $k_{отс}^I = 1,2-1,3$, а ток $I_{к.вн\ max}$ определяется при трехфазном КЗ на шинах приемной подстанции и на шинах подстанции в месте установки защиты. Так, для защиты 1 (см. рис. 6.1) $I_{к.вн\ max}$ рассчитывается при КЗ в точках К1 и К2. Ток срабатывания $I_{с.з}^I$ выбирается большим из полученных по (6.1) и (6.3). Отсечка может быть выполнена направленной, если установка ОНМ позволяет уменьшить ее ток срабатывания. Защищаемая отсечкой зона определяется графически [4].

Вторая ступень – направленная отсечка с выдержкой времени $t_{с.з}^{\text{II}}$, выбираемой аналогично ненаправленной [см. упражнение 4]:

$$t_{с.з}^{\text{II}} = t_{с.з.см}^{\text{I}} + \Delta t = (0,5 - 0,6) \text{ с.} \quad (6.4)$$

При выполнении вторых ступеней направленными выбор токов срабатывания $I_{с.з}^{\text{II}}$ может производиться независимо для групп защит одного направления (1,3 и 4,2 для защит, указанных на рис. 6.1). При принятых выдержках времени по (6.4) ток срабатывания $I_{с.з}^{\text{II}}$ должен быть отстроен от тока I'_3 , проходящего в рассматриваемой защите при КЗ в конце зоны действия I ступени защиты предыдущей линии, и от тока I''_3 , проходящего в защите при КЗ за трансформатором, подключенным к шинам противоположной подстанции. Для защиты 1 можно записать:

$$\text{а) } I_{с.з1}^{\text{II}} = k_{отс}^{\text{I}} I'_3 = k_{отс}^{\text{II}} k_{т.л} I_{с.з3}^{\text{I}}; \quad (6.5)$$

$$\text{б) } I_{с.з1}^{\text{II}} = k_{отс}^{\text{II}} I''_3 = k_{отс}^{\text{II}} k_{т.т} I_{к.т}, \quad (6.6)$$

где коэффициент отстройки $k_{отс}^{\text{II}} = 1,1 - 1,15$; ток срабатывания $I_{с.з3}^{\text{I}}$ первой ступени защиты 3 смежной линии определяется соотношениями (6.1) – (6.3); ток $I_{к.т}$ определяется при КЗ за трансформатором Т2 в режиме, когда значение $I''_3 = k_{т.т} I_{к.т}$ будет максимальным. В рассматриваемой схеме сети это соответствует режиму, когда система С1 будет отключена, и

$$I''_{3\text{max}} = \frac{U_{с.ном} / \sqrt{3}}{X_{С1} + X_{\#1} + X_{т}}. \quad (6.7)$$

Коэффициенты токораспределения $k_{т.л}$ и $k_{т.т}$ учитывают возможное неравенство токов в согласуемых защитах 1 и 3, 1 и 6 (ток в защите 6 равен току $I_{к.т}$):

$$k_{т.л} = \frac{I_{31}}{I_{33}} \text{ и } k_{т.т} = \frac{I_{31}}{I_{36}}. \quad (6.8)$$

Из (6.5) и (6.6) выбирается большее значение.

Целесообразность применения II ступени с принятым значением $I_{с.з}^{\text{II}}$ оценивается, как и для ненаправленной защиты, коэффициентом чувствительности при КЗ в конце защищаемого участка (для защиты 1 на

шинах подстанции Б – в К1) при минимально возможном значении тока в защите:

$$k_{\text{ч}}^{\text{II}} = \frac{I_{\text{з min}}}{I_{\text{с.з}}} \geq 1,3 - 1,5.$$

Третья ступень – направленная максимальная токовая защита. Выдержки времени выбираются по встречно-ступенчатому принципу, т.е. для каждой из групп защит, действующих при одном направлении мощности (1,3 и 4,2 соответственно), выдержки времени выбираются, как для ненаправленной МТЗ, по ступенчатому принципу, начиная от наиболее удаленного от источника питания участка. Применительно к рассматриваемой схеме сети:

$$\begin{aligned} t_{\text{с.з.3}} &= t_{\text{с.з.7}} + \Delta t; & t_{\text{с.з.1}} &= \left. \begin{matrix} t_{\text{с.з.3}} \\ t_{\text{с.з.6}} \end{matrix} \right\}_{\text{max}} + \Delta t, \\ t_{\text{с.з.2}} &= t_{\text{с.з.5}} + \Delta t; & t_{\text{с.з.4}} &= \left. \begin{matrix} t_{\text{с.з.2}} \\ t_{\text{с.з.6}} \end{matrix} \right\}_{\text{max}} + \Delta t. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Анализ полученных выдержек времени позволяет определить защиты в сети, которые можно выполнить ненаправленными, не нарушая селективности их действия. Селективность не будет нарушена, если направленной будет выполнена третья ступень только с той стороны участка, где выдержка времени меньше. Если с обеих сторон выдержки времени одинаковые, то обе защиты выполняются ненаправленными. Например, при $t_{\text{с.з.1}} = t_{\text{с.з.2}}$ и $t_{\text{с.з.3}} > t_{\text{с.з.4}}$ направленной будет только защита 4.

Перед выбором токов срабатывания $I_{\text{с.з}}^{\text{III}}$ следует рассматривать возможные режимы работы сети (указаны в задании) для определения значения и направления токов в защитах.

Ток срабатывания направленной МТЗ выбирается с учетом рассмотренных выше для ненаправленной защиты условий (см. упражнения 3, 4):

а) отстройка от переходных токов после отключения внешних КЗ:

$$I_{\text{с.з}}^{\text{III}} = \frac{k_{\text{отс}}^{\text{III}}}{k_{\text{в}}} k_3 I_{\text{раб max}}; \quad (6.10)$$

б) отстройка от переходных токов после успешного АПВ на защищаемой линии:

$$I_{\text{с.з}}^{\text{III}} = k_{\text{отс}}^{\text{III}} k_3' I_{\text{раб max}}. \quad (6.11)$$

При расчете по (6.10), (6.11) коэффициент отстройки $k_{отс}^{III} = 1,1 - 1,2$; коэффициенты запуска k_3 и k_3' имеют разные значения и могут колебаться в достаточно широких пределах $1,2 - 4,0$ [4]; коэффициент возврата реле тока $k_B = 0,8 - 0,9$; $I_{раб. max}$ – максимальный рабочий ток, направленный от шин в линию.

Для направленной ступени при расчете по (6.10), (6.11) учитывается максимальное значение рабочего тока вне зависимости от его направления.

В сети с двусторонним питанием помимо рассмотренных условий (6.10) и (6.11) необходимо учитывать следующие:

в) отстройка от токов нагрузки $I_{раб. норм}$, направленных к шинам для предотвращения ложного срабатывания направленной защиты вследствие возможного неправильного срабатывания ОНМ при нарушениях цепей напряжения в длительном рабочем режиме,

$$I_{с.з}^{III} = \frac{k_{отс}^{III}}{k_B} I_{раб. норм}; \quad (6.12)$$

г) согласование токов срабатывания защит смежных участков, действующих при одинаковом направлении мощности, например

$$I_{с.з.1}^{III} = k_{отс} I_{с.з.3}^{III} \text{ и } I_{с.з.4}^{III} = k_{отс} I_{с.з.2}^{III}, \quad (6.13)$$

где коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,1$;

д) отстройка от токов неповрежденных фаз при КЗ на землю в сети с $U \geq 110$ кВ может не производиться, если предусматривается вывод защиты из работы в рассматриваемом режиме (см. рис. 6.2).

Из (6.10) – (6.13) выбирается максимальное значение.

Чувствительность III ступени направленной защиты проверяется, как и ненаправленной, при КЗ в конце своего участка и в конце смежных участков (см. упражнение 3).

6.2.3. Пример расчета максимальной токовой направленной защиты (III ступени).

Исходные данные соответствуют варианту № 30 из табл. вариантов заданий: расчет выполняется для защит 2 и 4.

1. Расчет выдержек времени по встречно-ступенчатому принципу:

$$t_{с.з.2} = t_{с.з.5} + \Delta t = 0,9 + 0,5 = 1,4 \text{ с};$$

$$t_{с.з.4} = \left. \begin{matrix} t_{с.з.2} \\ t_{с.з.6} \end{matrix} \right\}_{\max} + \Delta t = \left. \begin{matrix} 1,4 \\ 1,5 \end{matrix} \right\}_{\max} + 0,5 = 2,0 \text{ с};$$

$$t_{с.з3} = t_{с.з7} + \Delta t = 1,9 + 0,5 = 2,4 \text{ с};$$

$$t_{с.з1} = \left. \begin{matrix} t_{с.з3} \\ t_{с.з6} \end{matrix} \right\}_{\max} + \Delta t = \left. \begin{matrix} 2,4 \\ 1,5 \end{matrix} \right\}_{\max} + 0,5 = 2,9 \text{ с.}$$

Зависимость $t_{сз} = f(\ell)$ представлена на рис. 6.3.

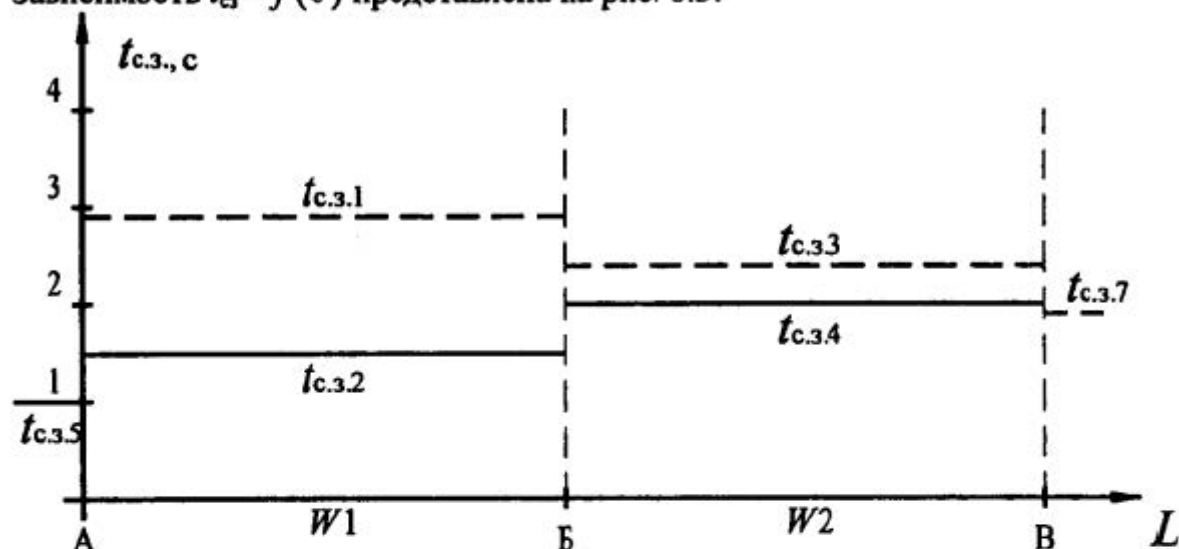


Рис. 6.3. Диаграмма выдержек времени третьих ступеней защит сети

2. Уточнение места установки ОНМ.

На линии $W1$ направленной выполняется защита 2, т.к. $t_{с.з2} < t_{с.з1}$; на линии $W2$ – защита 4, т.к. $t_{с.з4} < t_{с.з3}$.

3. Выбор токов срабатывания защит 2 и 4 производится с учетом (6.10) – (6.13). Предварительно составляется таблица значений токов (табл. 6.1) в цепях защит для возможных рабочих режимов. Знак «минус» означает, что ток направлен к шинам.

Таблица 6.1

Значение токов, А

№ защиты \ Режим	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Обе системы работают	230	-230	150	-150
Отключена система С1	-70	70	-150	150
Отключена система С2	170	-170	90	-90

Ток срабатывания защиты 2:

$$а) I_{с.з.2}^{III} = \frac{k_{отс}^{III}}{k_B} k_3 I_{раб. max} = \frac{1,2}{0,9} 1,2 \cdot 70 = 112 \text{ A};$$

$$б) I_{с.з.2}^{III} = k_{отс}^{III} k_3' I_{раб. max} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 70 = 126 \text{ A};$$

$$в) I_{с.з.2}^{III} = \frac{k_{отс}^{III}}{k_B} I_{раб. норм} = \frac{1,2}{0,9} 230 = 306,7 \text{ A}.$$

Выбирается $I_{с.з.2}^{III} = 306,7 \text{ A}$.

Ток срабатывания защиты 4:

$$а) I_{с.з.4}^{III} = \frac{1,2}{0,9} 1,2 \cdot 150 = 240 \text{ A};$$

$$б) I_{с.з.4}^{III} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 150 = 270 \text{ A};$$

$$в) I_{с.з.4}^{III} = \frac{1,2}{0,9} 150 = 200 \text{ A};$$

$$г) I_{с.з.4}^{III} = k_{отс} I_{с.з.2}^{III} = 1,1 \cdot 306,7 = 337,3 \text{ A}.$$

Выбирается $I_{с.з.4}^{III} = 337,3 \text{ A}$.

4. Проверка чувствительности защиты 4. Чувствительность защиты 4 проверяется при двухфазных КЗ в точках К1, К2 и К4. Для этого необходимо рассчитать токи в защите:

а) при КЗ в точке К1:

$$I_{з1(К1)} = I_{к(К1)}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_{с.ном} / \sqrt{3}}{(X_{C2} + X_{W2})} = \frac{115 \cdot 10^3}{2(8+15)} = 2500 \text{ A};$$

$$k_{ч(К1)} = \frac{2500}{337,3} = 7,4 > (1,5 - 2,0);$$

б) при КЗ в точке К2:

$$I_{з1(К2)} = I_{к(К2)}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_{с.ном} / \sqrt{3}}{(X_{C2} + X_{W2} + X_{W1})} = \frac{115 \cdot 10^3}{2(8+15+20)} = 1337 \text{ A};$$

$$k_{ч(К2)} = \frac{1337}{337,3} = 4 > (1,5 - 2,0);$$

в) при КЗ за трансформатором Т2 (точка К3) рассматривается режим, когда работают обе системы, т.к. в этом случае ток $I_{з1(К3)}$ будет иметь минимальное значение:

$$I_{з4(К3)}^{(3)} = \frac{U_{с.ном} / \sqrt{3}}{(X_{экв} + X_T)} \cdot \frac{(X_{C1} + X_{W1})}{(X_{C2} + X_{W1} + X_{W2} + X_{C2})},$$

$$\text{где } X_{\text{экв}} = \frac{(X_{C1} + X_{W1})(X_{C2} + X_{W2})}{X_{C1} + X_{W1} + X_{W2} + X_{C2}} = \frac{(15 + 20)(8 + 15)}{58} = 13,9 \text{ Ом};$$

$$I_{34(K3)}^{(3)} = \frac{U_{\text{с.ном}} / \sqrt{3} (15 + 20)}{(13,9 + 72) 58} = 467 \text{ А.}$$

При двухфазном КЗ за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ-11 минимальное значение тока

$$I_{34 \text{ min}}^{(2)} = 0,5 \quad I_3^{(3)} = 0,233 \text{ А} < I_{\text{с.з}}^{\text{III}} = 337,3 \text{ А.}$$

При выполнении схемы трехрелейной

$$k_{\text{ч}(K3)} = \frac{467}{337,3} = 1,38 > 1,2.$$

Чувствительность защиты 2 может быть проверена аналогично.

Схемы цепей направленной максимальной токовой защиты (III ступени) 4 составляются на основе приведенных схем (см. рис. 6.2).

Таблица вариантов исходных данных схем

№ вариантов	$I_{\text{нагр1}}, \text{ А}$	$I_{\text{нагр2}}, \text{ А}$	$I_{\text{нагр3}}, \text{ А}$	$I_{C2}, \text{ А}$	$X_{C1}, \text{ Ом}$	$X_{C2}, \text{ Ом}$	$X_{W1}, \text{ Ом}$
1,2	60	30	30	60	5	8	28
3,4	100	70	60	80	5	8	28
5,6	80	60	70	100	5	6	24
7,8	70	80	100	60	2	8	16
9,10	60	80	30	50	8	2	20
11,12	45	65	40	80	5	8	18
13,14	60	80	100	70	4	6	20
15,16	40	40	60	50	10	8	16
17,18	50	70	100	40	10	8	20
19,20	80	60	70	50	5	10	25
21,22	40	80	50	60	5	8	25
23,24	60	100	40	50	10	6	14
25,26	70	40	80	60	5	8	15
27,28	60	50	80	30	15	10	16
29,30	70	80	90	60	15	8	20

Продолжение таблицы

№ вариантов	X_{H2} , Ом	X_T , Ом	k_3	K_3'	$t_{с.з.5}$, с	$t_{с.з.6}$, с	$t_{с.з.7}$, с
1,2	20	80	1,2	1,5	0,5	1,0	1,5
3,4	20	37,5	1,5	1,9	1,2	1,7	1,5
5,6	18	42	1,3	1,8	1,3	1,5	0,9
7,8	20	70	1,4	2,0	1,1	1,3	0,9
9,10	24	72	1,5	1,8	1,2	1,5	1,6
11,12	28	65	1,2	1,5	1,0	2,0	1,5
13,14	28	38,5	1,5	2,0	1,1	1,2	1,5
15,16	24	52,2	1,4	1,7	2,0	0,5	1,0
17,18	20	48,5	1,3	1,5	1,5	1,7	1,9
19,20	20	60,5	1,4	1,5	0,7	1,4	1,7
21,22	20	51,5	1,5	1,8	1,0	2,0	1,5
23,24	20	48,5	1,4	1,8	0,6	1,2	1,9
25,26	20	72,3	1,3	1,6	1,5	2,0	0,9
27,28	20	75	1,3	1,6	1,0	1,3	1,5
29,30	15	72	1,2	1,5	0,9	1,5	1,9

Примечание. Варианты с нечетными номерами: расчет защит 1,3;
 варианты с четными номерами: расчет защит 2,4.

Практическое занятие №6

Расчет защит трансформатора (основная защита – дифференциальная токовая отсечка; резервная защита – МТЗ; защита от перегрузки)

Задание

1. Определить параметры срабатывания и оценить чувствительность основной защиты трансформатора – дифференциальной токовой отсечки. Составить принципиальную схему защиты.

2. Определить ток и время срабатывания и оценить чувствительность резервной защиты трансформатора – МТЗ. Составить принципиальную схему защиты.

3. Определить ток и время срабатывания защиты от перегрузки.

На рис. 7.1 представлена подстанция 110/10 кВ с двумя трансформаторами ТММ 2500/110 с коэффициентом трансформации $n_T = 110 \text{ кВ} / 10,5 \text{ кВ}$, $u_k = 10,5\%$.

Мощность КЗ на шинах ВН подстанции $S_{\text{КЗ ВН}} = 1400 \text{ МВА}$, ток нагрузки $I_n = 80 \text{ А}$, время срабатывания защит отходящих линий $t_{\text{с.з.н}} = 1,0 \text{ с}$.

На трансформаторах установлены трансформаторы тока со следующими коэффициентами трансформации $K_{I110} = 25/5$; $K_{I10,5} = 150/5$.

В расчетах принять: коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,2$, коэффициент запуска $k_z = 1,5$, коэффициент возврата $k_v = 0,9$; ступень селективности времени $\Delta t = 0,5$ с.

На секционном выключателе НН подстанции предусмотрено устройство АВР.

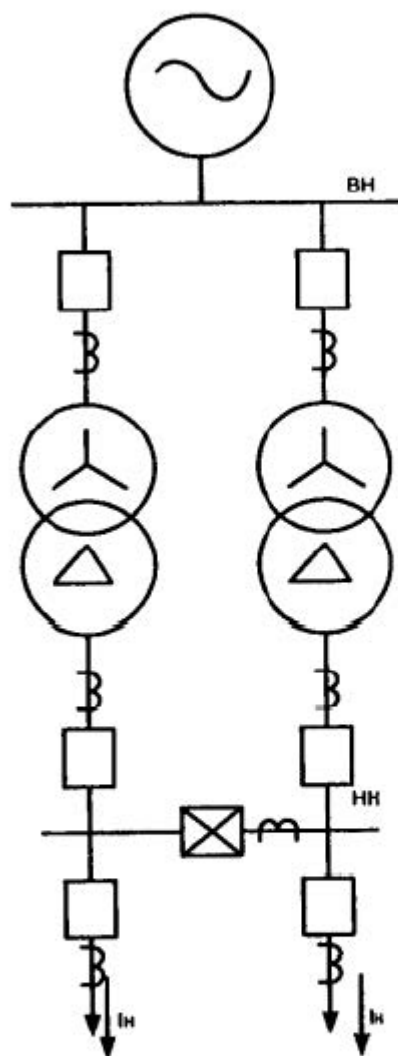


Рис. 7.1. Схема подстанции

Методические указания

К п.1. Ток срабатывания защиты $I_{с.з}$ целесообразно определить приведенным к стороне ВН, поскольку источник питания подключен со стороны ВН.

Для определения максимального внешнего тока КЗ (точка К2) необходимо рассчитать сопротивление трансформатора X_T и энергосистемы X_c :

$$X_T = \frac{U_{ВН}^2 u_{к\%}}{S_{Т,н} 100}; \quad (7.1)$$

$$X_c = \frac{U_{ВН}^2}{S_{КЗВН}}, \quad (7.2)$$

где $U_{ВН}$ — номинальное напряжение стороны ВН трансформатора;

$S_{Т,н}$ — номинальная мощность трансформатора;

$S_{КЗВН}$ — мощность КЗ на шинах ВН (точка К1).

Максимальный ток внешнего КЗ определяется следующим образом:

$$I_{К2}^{(3)} = \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3}(X_T + X_c)}. \quad (7.3)$$

Ток срабатывания дифференциальной токовой защиты трансформатора выбирается по двум условиям:

1) отстройка от расчетного максимального первичного тока небаланса $I_{нб,расч}$ при внешних КЗ;

2) от бросков тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора или отключения внешнего КЗ.

По первому условию

$$I_{сз} \geq k_{отс} (K_a k_{одн} \varepsilon + \Delta U_{рег} / 100 + \Delta f_{выр}) I_{К2}^{(3)}, \quad (7.4)$$

где ε – полная допустимая относительная погрешность трансформаторов тока в установившемся режиме, $\varepsilon = 0,1$; K_a – коэффициент, учитывающий увеличение погрешностей трансформаторов тока в переходном режиме внешнего КЗ, причем для защит с реле типа РТ-40 (дифференциальной отсечки) следует принять $K_a = 2$; $k_{одн}$ – коэффициент, учитывающий неоднотипность трансформаторов тока, установленных с двух сторон защищаемого трансформатора, в рассматриваемом случае $k_{одн} = 1$; $\Delta U_{рег}$ – вторая составляющая тока небаланса, обусловленная регулированием.

Напряжение трансформатора в рассматриваемом случае не предусмотрено и поэтому не учитывается;

$$\Delta f_{выр} = \frac{|I_{ц,ном,Y} - I_{ц,ном,\Delta}|}{I_{ц\Delta}} - \text{относительное значение составляющей}$$

тока небаланса, обусловленной неравенством токов в цепях циркуляции со стороны обмоток силового трансформатора, соединенных в звезду и треугольник, при внешнем КЗ в защите с реле типа РТ-40 (дифференциальной токовой отсечке);

$I_{ц,ном,Y}$ – вторичный ток в цепи циркуляции в номинальном режиме для стороны трансформатора;

$I_{ц,ном,\Delta}$ – вторичный ток в цепи циркуляции в номинальном режиме для стороны Δ трансформатора.

По второму условию

$$I_{сз} \geq k_{отс} I_{т,н}, \quad (7.5)$$

где $k_{отс} = 4 - 4,5$ для реле типа РТ-40; $I_{т,н}$ – номинальный ток трансформатора, равный $I_{т,н} = \frac{S_{т,н}}{\sqrt{3}U_{ВН}}$.

Из двух условий (7.4) и (7.5) необходимо выбрать наибольший ток срабатывания. Время срабатывания дифференциальной защиты равно 0.

Далее определяется ток срабатывания реле:

$$I_{с.р} = I_{сз} k_{сх}^{(3)} / K_{I,110},$$

где $k_{сх}^{(3)}$ – коэффициент схемы той стороны, относительно которой определялся ток срабатывания защиты (в данном случае $k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$, так как трансформаторы тока со стороны ВН соединены в треугольник);

$K_{I,110}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока той стороны, относительно которой определялся ток срабатывания защиты.

Для оценки чувствительности защиты необходимо определить коэффициент чувствительности, который должен быть не менее 2.

$$k_{\text{ч}} = I_{\text{р min}} / I_{\text{с.р}} ,$$

где $I_{\text{р min}}$ – минимальное из трех значений тока в реле при трех-, двухфазном КЗ за трансформатором (точка К2) и однофазном КЗ на стороне 110 кВ в зоне действия защиты.

Следует отметить, что при двухфазном КЗ за трансформатором ток в реле тока защиты обусловлен токораспределением (см. упражнение 1) и равен

$$I_{\text{р min}} = \frac{I_{\text{К2}}^{(3)} 1,5}{K_{I,110}} . \quad (7.6)$$

Пример принципиальной схемы дифференциальной токовой отсечки см. рис. 9 – 22 в [1].

К п. 2. Ток срабатывания МТЗ определяется по нескольким условиям.

1. По условию отстройки от тока, протекающего через трансформатор после АВР на стороне НН:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{отс}}}{k_{\text{в}}} (I_{\text{н}} + I_{\text{н}} k_{\text{з}}) , \quad (7.7)$$

где $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки.

2. По условию отстройки от тока самозапуска нагрузки после успешного АПВ питающей линии на стороне 110 кВ (в случае питания всей нагрузки от одного трансформатора):

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} k_{\text{з}} (I_{\text{н}} + I_{\text{н}}) . \quad (7.8)$$

Расчет времени срабатывания МТЗ:

$t_{\text{с.з.св}} = t_{\text{с.з.н}} + \Delta t$, выдержка времени МТЗ секционного выключателя Q5;

$t_{\text{с.з.вв}} = t_{\text{с.з.св}} + \Delta t$, выдержка времени МТЗ вводного выключателя Q3 (Q4);

$t_{\text{с.з}} = t_{\text{с.з.вв}} + \Delta t$ выдержка времени резервной МТЗ трансформатора (Q1, Q2).

К п. 3. Ток срабатывания защиты от перегрузки трансформатора выбирается по следующему условию:

$$I_{\text{с.з.пер}} = 1,1 (I_{\text{н}} + I_{\text{н}}) .$$

Время срабатывания защиты от перегрузки берется равным 9 с.

Принципиальную схему защиты от перегрузки см. рис. 9 – 41 [1].

Практическое занятие №7

Расчет защиты параллельных линий напряжением 35 кВ

8.1. Задание

Определить параметры срабатывания поперечной дифференциальной токовой направленной защиты, токовой отсечки и максимальной токовой защиты параллельных линий.

Схема сети представлена на рис. 8.1.

Исходные данные для расчета в конце упражнения 8.

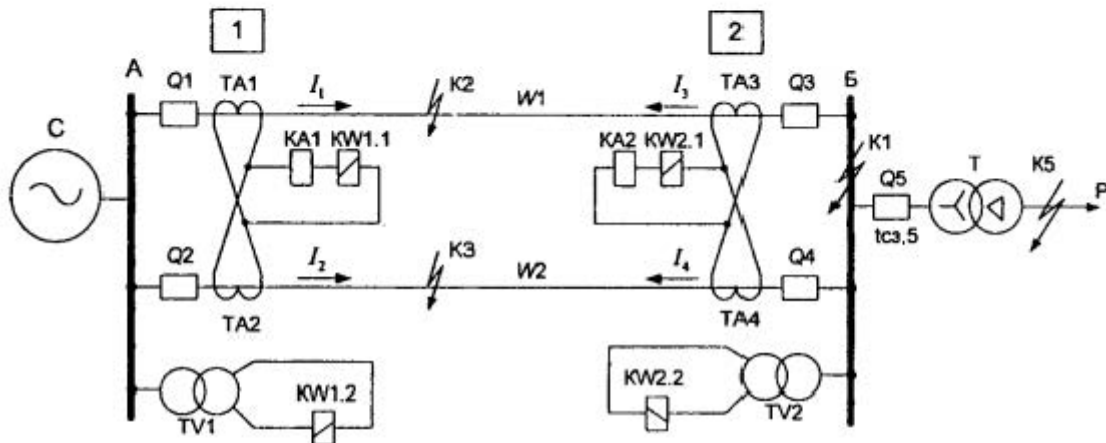


Рис. 8.1. Исходная сеть и схема подключения поперечной дифференциальной токовой защиты

8.2. Методические указания

8.2.1. Краткая характеристика защиты

На линиях напряжением 35 кВ должна быть предусмотрена защита от многофазных КЗ, обеспечивающая в соответствии с ПУЭ отключение одного места повреждения в большинстве случаев двойных замыканий на землю.

На параллельных линиях с односторонним питанием рекомендуется установка токовой ступенчатой и поперечной дифференциальной токовой направленной защит.

Токовая ступенчатая защита устанавливается на каждой линии со стороны питания, выполняется двух-, трехступенчатой, имеет двухфазное исполнение. В целях повышения чувствительности к повреждениям при КЗ за трансформаторами с соединением обмоток Δ/Y и Y/Δ допускается выполнение трехрелейных схем защиты.

Поперечная дифференциальная токовая направленная защита предназначена для ускорения отключения повреждений в режиме, когда в работе находятся обе линии. Защита выполняется двумя комплектами, устанавливаемыми по концам защищаемых линий, как показано на рис. 8.1, и обеспечивает отключение при КЗ только поврежденной цепи с обоих концов без выдержки времени. Как и токовая, ступенчатая поперечная дифференциальная защита имеет двухфазное исполнение.

8.2.2. Принцип действия поперечной дифференциальной токовой направленной защиты

Принцип действия защиты основан на сравнении комплексов вторичных токов одноименных фаз параллельных линий. В нормальном режиме и при внешних КЗ (К1) токи $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ ($\underline{I}_3$ и $\underline{I}_4$), проходящие по линиям, совпадают по фазе и имеют равные значения. Поэтому токи в реле КА1 и КА2, определяемые разностью соответствующих вторичных токов, можно считать равными нулю:

$$\underline{I}_{КА1} = \underline{I}_{1в} - \underline{I}_{2в} = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_2}{K_I} \approx 0,$$

$$\underline{I}_{КА2} = \underline{I}_{3в} - \underline{I}_{4в} \approx 0,$$

где K_I – коэффициенты трансформации трансформаторов тока ТА1–ТА4; $\underline{I}_{1в}$ – $\underline{I}_{4в}$ – вторичные токи.

При КЗ на одной из линий (К2 или К3) равенство первичных токов нарушается, что приводит к появлению токов в обмотках реле КА1 и КА2 и их срабатыванию. При этом ток в реле КА1 определяется разностью вторичных токов поврежденной и неповрежденной цепей, а ток в реле КА2 равен удвоенному значению вторичного тока неповрежденной линии. Таким образом, реле тока являются пусковыми органами защиты, срабатывающими только при внутренних КЗ на любой из параллельных цепей, т.е. защита селективна по принципу действия (обладает абсолютной селективностью) и не нуждается в выдержке времени.

Выбор поврежденной цепи осуществляется с помощью органов направления мощности (ОНМ) двустороннего действия КВ1 и КВ2, включаемых по 90°-ой схеме [4]. Токовые обмотки реле КВ1 (КВ2) включаются последовательно с обмотками реле КА1 (КА2), а обмотки напряжения подключаются к установленным на шинах подстанций трансформаторам напряжения TV1 (TV2). ОНМ имеет два выхода. Из приведенных на рис. 8.2 диаграмм вторичных токов $\underline{I}_{1в}$, $\underline{I}_{2в}$ и напряжений $\underline{U}_p$,

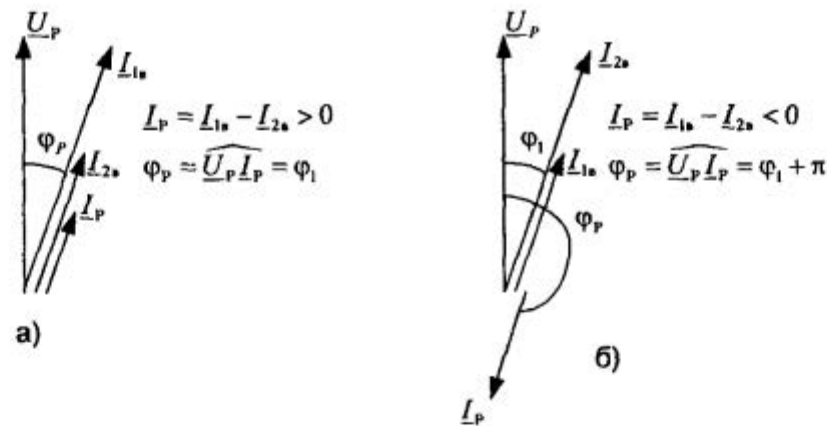


Рис. 8.2. Векторные диаграммы токов и напряжений, подводимых к реле KW1 при КЗ в точке К2 на линии W1 (а) и в точке КЗ на линии W2 (б)

иллюстрирующих работу ОНМ, видно, что при КЗ на линии W1 (точка К2) угол между подводимыми к реле KW1 током I_p и напряжением $\underline{U}_p$ равен $\varphi_p = \varphi_1$, а при КЗ на линии W2 (точка К3) изменяется до значения $\varphi'_p = \varphi_1 + \pi$ вследствие изменения направления тока I_p . В первом случае сигнал появляется на выходе ОНМ, разрешающем отключение выключателя Q1 поврежденной цепи W1, во втором – на выходе, разрешающем отключение выключателя Q2 поврежденной цепи W2. Отключение соответствующего выключателя происходит, если одновременно с ОНМ срабатывает и реле тока.

При отключении одной из линий поперечная дифференциальная защита превращается в неселективную токовую защиту (ток проходит только в одной цепи), действующую без выдержки времени. Поэтому предусматривается вывод защиты из работы: автоматический – при отключении одного из выключателей в месте установки защиты и оперативный (вручную) – при отключении выключателя с противоположной стороны линии.

8.2.3. Методические указания к расчету поперечной дифференциальной токовой направленной защиты

8.2.3.1. Расчет тока срабатывания

Ток срабатывания защиты в сети с напряжением ≤ 35 кВ выбирается с учетом выполнения двух условий.

1. Ток срабатывания защиты должен быть отстроен от максимального расчетного тока небаланса $I_{нб \max}$ при внешнем КЗ на шинах противоположной подстанции (точка К1):

$$I_{сз} = k'_{отс} I_{нб \max}.$$

Ток небаланса определяется разницей полных погрешностей ϵ измерительных трансформаторов тока, а также возможным неравенством сопротивлений параллельных линий. При одинаковых параметрах линий учитывается лишь первая составляющая. В этом случае

$$I_{сз} = k'_{отс} k_{одн} k_{ап} \epsilon 0,5 I_{к.вн. \max}, \quad (8.1)$$

где коэффициент отстройки $k'_{отс} = 1,2$; коэффициент однотипности трансформаторов тока $k_{одн} = 0,5$; коэффициент апериодичности $k_{ап} = 2 - 3$ (защита без выдержки времени); полная относительная погрешность $\epsilon = 0,1$; максимальный ток внешнего КЗ $I_{к.вн. \max}$ (по каждой цепи проходит половина этого тока) определяется соотношением

$$I_{к.вн. \max} = I_{к(К1)}^{(3)} = \frac{U_{с.ном}}{\sqrt{3} (X_c + 0,5 X_l)}, \quad (8.2)$$

где $U_{с.ном} = 35$ кВ – среднее номинальное напряжение сети; X_c и X_l – индуктивные сопротивления прямой последовательности системы и линии, равные

$$X_c = \frac{U_{с.ном}^2}{S_{КЗ}^{(3)}}, \quad X_l = X_{л.уд} \ell. \quad (8.3)$$

2. Ток срабатывания реле тока защиты должен быть определен с учетом необходимости его возврата после отключения внешнего КЗ в режиме работы линии с односторонним отключением одной из цепей (например, при отключенном Q4 на линии W2 – см. рис. 8.1):

$$I_{с.з} = \frac{k''_{отс}}{k_v} I_{раб \max}, \quad (8.4)$$

где коэффициент отстройки $k''_{отс} = k'_{отс}$; коэффициент возврата реле тока $k_v = 0,9$; максимальный рабочий ток $I_{раб, \max}$ определяется по заданной мощности нагрузки $P_{нагр} = P$ соотношением

$$I_{раб \max} = \frac{P_{нагр}}{\cos \varphi \sqrt{3} U_{с.ном}}. \quad (8.5)$$

Ток срабатывания защиты выбирается по условию, дающему большее значение. Оба комплекта защиты могут быть выполнены с одинаковыми параметрами срабатывания.

8.2.3.2. Оценка чувствительности защиты

Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности пускового органа и зоной каскадного действия. Каскадной называется такая работа защиты, когда комплект защиты с одной стороны линии может и начинает работать только после отключения выключателя противоположной стороны. Каскадное действие защиты обусловлено конечной чувствительностью пускового органа, не срабатывающего при КЗ вблизи шин противоположной подстанции.

Зоны каскадного действия определяются соотношениями

$$\ell_{K1} = \frac{I_{с.з1}}{I'_K} \ell \quad \text{и} \quad \ell_{K2} = \frac{I_{с.з2}}{I''_K} \ell \quad (8.6)$$

для первого и второго комплектов защиты, соответственно, причем $I_{с.з1} = I_{с.з2}$, а токи I'_K и I''_K принимаются, приближенно, равными токам трехфазных КЗ на шинах противоположных подстанций в режиме, когда работают обе цепи.

Ток I'_K определяется соотношением (8.2), а

$$I''_K = \frac{U_{с.ном}}{\sqrt{3} X_c} \quad (8.7)$$

Суммарная зона каскадного действия $\ell_K = \ell_{K1} + \ell_{K2}$ должна быть меньше длины линии.

Коэффициент чувствительности защиты определяется соотношением $k_{\text{ч}} = I_{\text{з min}} / I_{с.з}$ и проверяется при КЗ в точке равной чувствительности обоих комплектов ($k_{\text{ч min p.ч}} \geq 2$) и при КЗ в зоне каскадного действия защиты ($k_{\text{ч min K}} \geq 1,5$). В первом случае (при одинаковых значениях токов срабатывания) рассматривается КЗ на середине линии и $I_{\text{з min}} = 0,5 I_K^{(2)}$, где $I_K^{(2)}$ – ток двухфазного КЗ в расчетной точке. Во втором случае достаточно оценить чувствительность первого комплекта защиты при двухфазном КЗ у шин подстанции Б (точка К4) при отключенном выключателе Q4.

8.2.4. Токовая ступенчатая защита параллельных линий

В общем случае на каждой линии устанавливается трехступенчатая защита. Первая ступень представляет собой селективную токовую отсечку без выдержки времени, защищающую часть линии. При необходимости отсечка может быть выполнена неселективной. В этом случае требуется оценка возможности оставления ее в работе при параллельной работе линий. Вторая ступень представляет собой отсечку с выдержкой времени, обеспечивающую отключение КЗ в конце линии (в режиме, когда вторая цепь отключена) и на шинах приемной подстанции.

Максимальная токовая защита – третья ступень – выполняется с выдержкой времени и осуществляет резервирование отказа быстродействующих ступеней и поперечной защиты при КЗ на защищаемой линии и отказа защиты или выключателя поврежденных смежных участков.

В рассматриваемом случае рекомендуется установка двухступенчатой защиты.

Первая ступень защиты выполняется в виде селективной токовой отсечки без выдержки времени; вторая ступень – в виде максимальной токовой защиты.

Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального значения тока $I_{к.вн. max}$ внешнего КЗ

$$I_{с.з}^I = k_{отс} I_{к.вн. max}, \quad (8.8)$$

где коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,3$, а ток $I_{к.вн. max}$ определяется при трехфазном КЗ на шинах приемной подстанции (точка К1) в режиме, когда одна из линий отключена

$$I_{к.вн. max}^{(3)} = \frac{U_{с.ном}}{\sqrt{3} (X_c + X_d)}. \quad (8.9)$$

Оценкой отсечки служит длина защищаемой зоны, определяемая, главным образом, в режиме, когда одна из линий отключена.

Параметры срабатывания максимальной токовой защиты МТЗ выбираются в соответствии с рекомендациями, рассмотренными в упражнениях (2 – 4).

Выдержка времени $t_{с.з.МТЗ}$ выбирается по ступенчатому принципу и в рассматриваемом случае равна

$$t_{с.з.МТЗ} = t_{с.з.5} + \Delta t. \quad (8.10)$$

Ток срабатывания определяется соотношением

$$I_{с.з}^{III} = \frac{k_{отс}^{III} k_3}{k_b} I_{раб max}, \quad (8.11)$$

где коэффициент отстройки $k_{отс}^{III} = 1,1 - 1,2$; коэффициент, учитывающий самозапуск двигателей потребителей; $k_3 = 1,2 - 2,0$; коэффициент возврата реле тока $k_b = 0,9$; максимальный рабочий ток $I_{раб max}$ определяет соотношением (8.5).

Коэффициент чувствительности МТЗ проверяется при КЗ за трансформатором (К5) и при КЗ на шинах приемной подстанции (К1) в режиме, когда в работе находятся обе линии.

8.2.5. Пример расчета поперечной дифференциальной токовой направленной защиты

Исходные данные для расчета соответствуют варианту № 30 из таблицы вариантов заданий в конце упражнения 8.

Для выбора тока срабатывания по условию (8.1) предварительно рассчитываются сопротивления X_c и X_ℓ по (8.3) и ток $I_{к.вн\max}$ по (8.2):

$$X_c = \frac{U_{с.ном}^2}{S_{КЗ}^{(3)}} = \frac{(35 \cdot 10^3)^2}{460 \cdot 10^6} = 2,66 \text{ Ом};$$

$$X_\ell = X_{\ell,уд} \ell = 0,4 \cdot 19 = 7,6 \text{ Ом};$$

$$I_{к.вн\max}^{(3)} = \frac{U_{с.ном}}{\sqrt{3}(X_c + 0,5 X_\ell)} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3}(2,66 + 3,8)} = 3132 \text{ А};$$

$$I_{с.з} = k'_{отс} k_{одн} k_{ап} \in 0,5 I_{к.вн\max} = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 2,0 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 3132 = 187,9 \text{ А}.$$

Для выбора тока срабатывания по (8.4) определяется значение $I_{раб\max}$ по (8.5):

$$I_{раб\max} = \frac{P_{нагр}}{\cos\varphi \sqrt{3} U_{с.ном}} = \frac{6,75 \cdot 10^6}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 131,1 \text{ А};$$

$$I_{с.з} = \frac{k''_{отс}}{k_\beta} I_{раб\max} = \frac{1,2}{0,9} \cdot 131,1 = 175 \text{ А}.$$

Выбирается $I_{с.з} = 187,9 \text{ А}$.

Зоны каскадного действия защиты при трехфазных КЗ определяются соотношениями (8.6), (8.2) и (8.7):

$$\ell_{к1} = \frac{I_{с.з1}}{I'_к} \ell = \frac{187,9}{3132} \ell = 0,06 \ell;$$

$$\ell_{к2} = \frac{I_{с.з2}}{I''_к} \ell = \frac{187,9}{7606} \ell = 0,025 \ell;$$

$$I''_к = \frac{U_{с.ном}}{\sqrt{3} X_c} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,66} = 7606 \text{ А}.$$

Таким образом, суммарная зона каскадного действия

$$\ell_k = \ell_{к1} + \ell_{к2} = 0,085 \ell \ll \ell.$$

Для проверки коэффициента чувствительности защиты при КЗ в точке равной чувствительности рассматривается схема замещения сети, представленная на рис. 8.3:

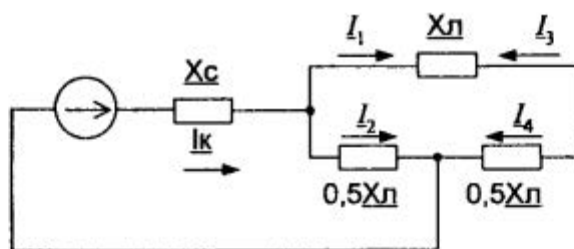


Рис. 8.3. Эквивалентная схема замещения для расчета $I_K^{(3)}$ при КЗ на середине линии W2

$$I_K^{(3)} = \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} (X_c + 0,5 X_{\text{л, экв}})} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} (2,66 + 2,85)} = 3671 \text{ A};$$

$$X_{\text{л, экв}} = \frac{1,5 X_{\text{л}} 0,5 X_{\text{л}}}{2 X_{\text{л}}} = 0,375 X_{\text{л}} = 2,85 \text{ Ом};$$

$$I_{3 \min} = 0,5 I_K^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} 3671 = 1588 \text{ A};$$

$$k_{\text{ч min p.ч}} = \frac{I_{3 \min}}{I_{\text{с.з}}} = \frac{1588}{187,9} = 8,45 > 2.$$

Для проверки коэффициента чувствительности первого комплекта защиты определяется ток $I_{3 \min}$ при двухфазном КЗ в точке К4 при отключенном выключателе Q4:

$$I_{3 \min} = I_{K4}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_{\text{с.ном}}}{\sqrt{3} (X_c + X_{\text{л}})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{35 \cdot 10^3}{(2,66 + 7,6)} = 1705 \text{ A}$$

$$\text{и } k_{\text{ч min к}} = \frac{I_{3 \min}}{I_{\text{с.з}}} = \frac{1705}{187,9} = 9,1 > 1,5.$$

Таблица вариантов заданий

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметр										
$S_{\text{КЗ}}^{(3)}$, МВА	430	510	520	670	550	490	610	500	470	570
P, МВт	6,3	6,3	6,0	7,2	7,1	6,1	7,1	6,4	7,0	7,9
ℓ , км	13	17	20	14	12	16	25	11	10	20
$t_{\text{с.з}}$, с	2,0	2,3	1,7	1,8	1,5	1,9	2,1	0,7	0,8	2,0

Продолжение таблицы

№ варианта Параметр	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$S_{K3}^{(3)}$, МВА	520	510	480	450	460	560	530	440	415	430
P , МВт	6,7	7,2	8,5	6,0	6,9	5,9	6,7	6,8	7,5	7,8
ℓ , км	14	13	15	30	24	19	25	15	15	18
$t_{c.з.5}$, с	2,4	2,4	2,5	1,4	1,7	1,5	1,1	0,9	0,9	1,3

Продолжение таблицы

№ варианта Параметр	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$S_{K3}^{(3)}$, МВА	470	460	520	470	425	420	400	410	580	460
P , МВт	7,8	7,0	7,4	7,9	7,2	6,4	7,7	8,1	7,6	6,75
ℓ , км	15	27	18	20	21	14	19	20	28	19
$t_{c.з.5}$, с	1,3	1,6	1,6	1,9	2,1	1,9	1,8	1,7	1,0	1,3

Примечание. $S_{K3}^{(3)}$ – мощность системы при $K^{(3)}$ на шинах; P – мощность нагрузки;
 $t_{c.з.5}$ – выдержка времени резервной защиты трансформатора Т

Дополнительные данные к расчету: $X_{л.ул} = 0,4$ Ом/км; $S_{т.ном} = 10$ МВА – номинальная мощность трансформатора Т; $U_k = 10,5\%$; $\cos\varphi = 0,85$; $\Delta t = 0,5$ с; $k_a = 0,9$; $k_3 = 1,5$.

Задание на самостоятельную работу.

Определить параметры срабатывания поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий в соответствии с заданным вариантом исходных данных.

Основная литература

1. Андреев, В. А. Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах : учеб.пособие / В. А. Андреев. - М.:Высш. школа, 2008. - 251 с.
2. Басс, Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. пособие / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев ; под ред. А. Ф. Дьякова. - 2-е изд., стер. - Москва :Издат. дом МЭИ, 2010. - 295 с.

Дополнительная литература

1. Андреев, В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения : учебник для вузов / В. А. Андреев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. :Высш. шк., 1985. - 391 с.
- 2.•Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем : Релейная защита сетей : учеб.пособие для вузов / А. М. Федосеев. - М.. :Энергоатомиздат, 1984. - 520 с.
- 3.•Электротехнический справочник : справочник : в 3 т. / под ред. И. Н. Орлова и др., Т.3, кн. 1, Производство и распределение электрической энергии. - 7-е изд., испр. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 880 с. : ил. - ISBN 5-283-00569-0(Т. 3, Кн.1). - I
4. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. :Энергоатомиздат, 1985. - 296 с. :
5. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник / В. А. Андреев. - Изд. 5-е, перераб. стер. - М. : Высшая школа, 2007. - 639 с. : ил. - Предм. указ.: с. 621-624. - Библиогр.: с. 625-634.
6. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник / В. А. Андреев. - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2006. - 639 с. : ил. - Предм. указ.: с. 621-624. - Библиогр.: с. 625-634. - ISBN 5-06-004826-8
- 7.Основы современной энергетики : учебник : в 2 т. / под ред. Е. В. Аметистова, Т. 2, Современная электроэнергетика / под ред. А. П. Бурмана, В. А. Строева. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : МЭИ, 2008. - 632 с. :