

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ястребов С.С., Ефанов А.В.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие (лабораторный практикум)

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Профиль подготовки: «Электроснабжение»

Программа академического бакалавриата

Квалификация выпускника – бакалавр

Изучается в 7 семестре

Ставрополь
2017

Рецензенты: доцент кафедры электротехники, автоматике и метрологии Шарипов И.К.

Ястребов С.С., Ефанов А.В., Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: Учебное пособие (лабораторный практикум) – Ставрополь: СтГАУ, 2017. – 221 с.

В настоящем учебном пособии приведены методика и порядок выполнения лабораторных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем». Приведены рекомендации по выполнению лабораторных работ, порядок оформления отчетов по работам, вопросы для защиты лабораторных работ, предусмотренных рабочей программой дисциплины, и список рекомендуемой литературы. Учебно-методическое пособие составлено в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования и программой дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» и предназначено для студентов очной и заочной формы обучения направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Введение

Лабораторные занятия являются аудиторными видами занятий при их выполнении формируются необходимые умения и навыки.

Целями освоения дисциплины «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» является получение студентами необходимых знаний о назначении и принципе действия релейной защиты и автоматики в электроэнергетических системах, смехах основных типов защит в системах электроснабжения, методах испытания и проверки устройств релейной защиты и автоматики.

Для достижения этой цели в процессе изучения дисциплины решаются следующие задачи: ознакомление с основными понятиями и терминами изучаемой дисциплины, которыми будущий специалист будет оперировать в своей практической деятельности; освоение базовых принципов построения устройств релейной защиты и автоматики, освоение навыков составления схем устройств релейной защиты и автоматики, расчета уставок защит в системах электроснабжения, методов испытания и наладки оборудования релейной защиты и автоматики систем электроснабжения; приобретение навыков использования технической литературы и Интернет-ресурсами в процессе освоения дисциплины и выполнения дальнейшей практической деятельности.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3	68
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4	97
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5	121
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6	145
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7	174
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8	204
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	221

Лабораторная работа 1

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ 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, исследование схем соединения обмоток трансформаторов тока (ТА) и поведения схем (их чувствительности) при имитации различных видов коротких замыканий в системе электроснабжения.

1 Теоретическое обоснование

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 $I_{1ном}$: $1, \dots, 50, 75, \dots, 100, 150, 200, 250, 300, 400, \dots, 1000, 2000, \dots, 10000$ 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 рисунке 1.1 приведены некоторые из вариантов выполнения ТА. Например, трансформаторы типа ТПЛ-10 находят широкое применение в закрытых распределительных устройствах 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.

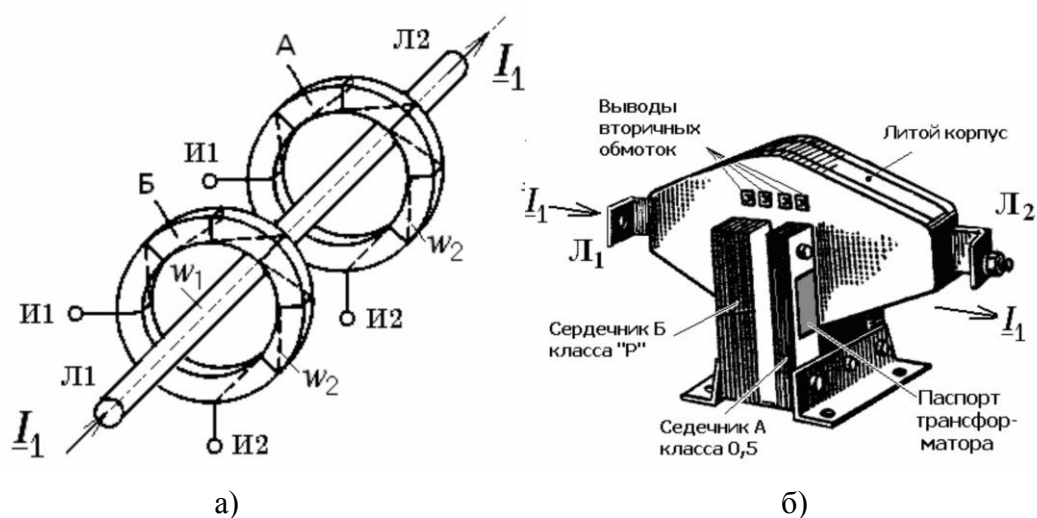


Рисунок 1.1 – Трансформатор тока: а) расположение обмоток трансформатора тока; б) внешний вид трансформатора тока ТПЛ-10 с двумя обмотками

Общие сведения о работе трансформаторов тока и схемах их соединений. Одно из принятых изображений ТА и схема замещения двухобмоточного трансформатора тока приведены на рисунке 1.2.

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.

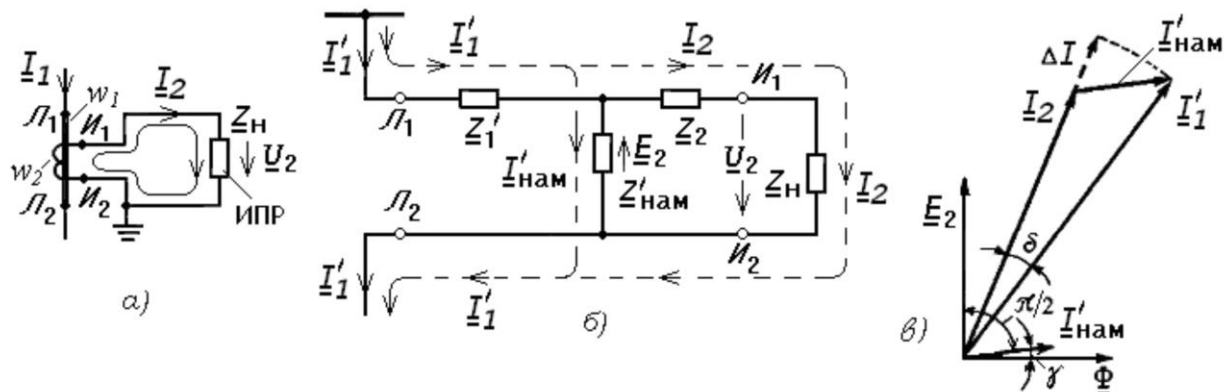


Рисунок 1.2 – Трансформатора тока: а) Схема включения, б) схема замещения, в) – векторная диаграмма трансформатора тока

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. рисунок 1.2б). 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. взаимоиндукцией 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 $I_{нам} \cdot w_1$ образующую основной магнитный поток Φ , т. е.

$$\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_{нам} w_2 \quad (1.1)$$

или

$$\underline{I}_2 = (\underline{I}_1 - \underline{I}_{нам}) \cdot \frac{w_1}{w_2} = \left(\frac{\underline{I}_1}{K_I} - \frac{\underline{I}_{нам}}{K_I} \right) = \underline{I}'_1 - \underline{I}'_{нам}, \quad (1.2)$$

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 (рисунок 1.2б).

Из (2) следует, что действительный вторичный ток \underline{I}_2 отличается от расчетного на величину $\underline{I}_{нам} / K_I$. Таким образом, вследствие наличия тока намагничивания $\underline{I}_{нам}$ 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 (рисунок 1.2в):

- 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:

$$\varepsilon_m = \left(\frac{K_{\text{Инно}} \cdot I_2}{I_1} - 1 \right) \cdot 100\% = \frac{I_{\text{нам}} / K_{\text{Инно}}}{I_1 / K_{\text{Инно}}} 100\%; \quad (1.3)$$

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

$$\varepsilon\% = \frac{100\%}{I_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2 \cdot K_{\text{Ином}} - i_1)^2 dt}. \quad (1.4)$$

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 (1.3).

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_H 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 $Z_{H,расч}$. Номинальная вторичная нагрузка представляет собой полное сопротивление внешней вторичной цепи трансформатора тока, при котором гарантируется класс точности или предельная кратность тока (предполагается, что $\cos\varphi_H = 0,8$). Значение $Z_{H,ном}$ 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%, $K_{10} = I_{1max} / I_{1ном}$

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

На рисунке 1.3 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 $I_{r.нам}$, создающей магнитный

поток Φ , который индуцирует во вторичной, обмотке э. д. с. E_2 , Ток $I_{р.нам}$ связан с потоком Φ соотношением $I_{р.нам} = \Phi \cdot R_M / w_1$

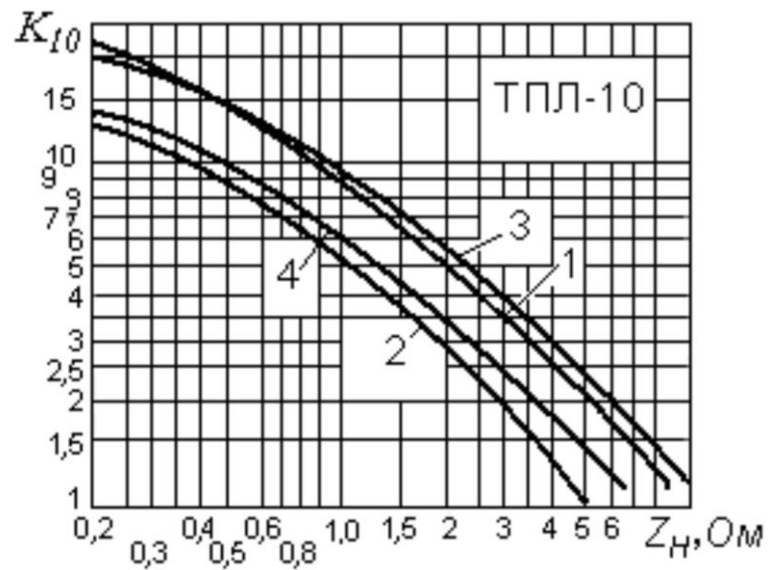


Рисунок 1.3 – Кривые предельных кратностей для трансформаторов тока: 1 – для $K_{Ином} = 5/5 - 300/5$ класса Р и 2 – для класса 0,5; 3 – для $K_{Ином} = 400/5$ класса Р и 4 для класса 0,5

Эта зависимость называется характеристикой намагничивания ТА (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Характеристика намагничивания трансформатора тока

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 $I_{р.нам}$ 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 $Л1$ и $Л2$ (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 Z_H (рисунок 1.2б), ток i_1' распределяется таким образом, что ток I_2 уменьшается, а ток $I_{i\dot{a}i}$

увеличивается, т. е. трансформатор тока начинает работать с большими погрешностями. В пределе, когда $Z_H = \infty$ (обмотка разомкнута), ток $I_2 = 0$, $I'_{нам} = I'_1$ 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 $F_{нам} = w_1 \cdot I_{нам}$, 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 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.

Если изображение не будет содержать необходимой информации, то мы не получим от него интересующие нас сведения.

При наладке и поверке 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. 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 (рисунок 1.5б), 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° (рисунок 1.5в).

В приборе ВАФ-85М В качестве измерителя *ИМ* использован магнитоэлектрический микроамперметр М-4204.36 (рисунок 1.5а,б); выпрямление осуществляется германиевым диодом *VD1*. При определении фазы тока или напряжения питание к измерительному прибору подается через фазозависимый полупроводниковый выпрямитель *A1*, который обеспечивает максимальный ток через измерительный прибор, если напряжения, подводимые к фазозависимому выпрямителю, совпадают по фазе. Фазозависимый выпрямитель *A1* 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 звездочкой $*$ (K_4) и 10 mA (K_5) или 50 mA (K_6), 250 mA (K_7). Переключатель $S1$ устанавливается в положение mA . 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:

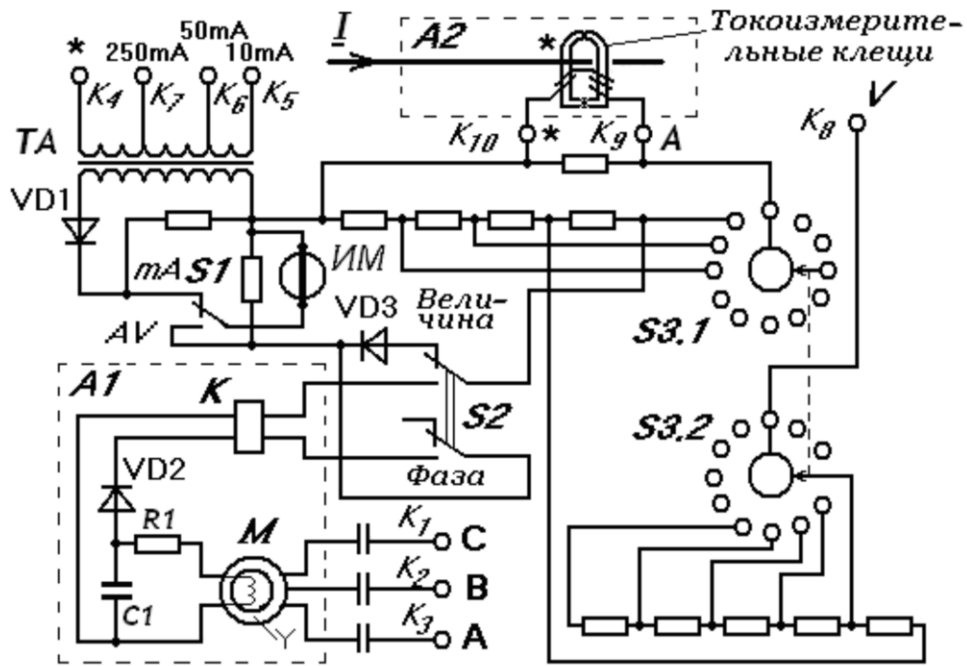
– измерения фазы тока *или* напряжения должно быть обращено внимание на правильность присоединения цепей, а именно, при определении фазы тока сторона магнитопровода электроизмерительных клещей, обозначенная $(*)$, должна быть обращена к питающему концу токопровода;

– измерения фазы напряжения, оно должно подводиться так, чтобы к зажиму ^(*) присоединялся провод, связанный с точкой (фазой), соответствующей принятому началу вектора напряжения.

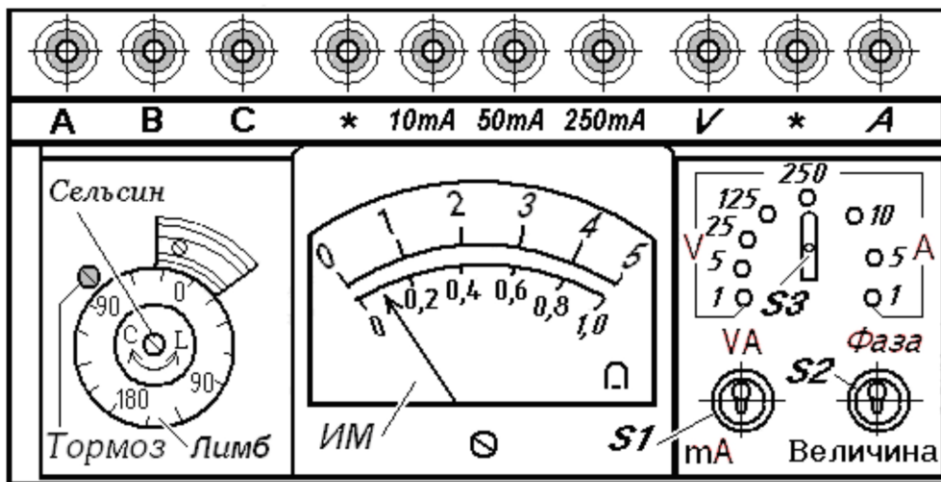
В рассматриваемом устройстве совпадение нулевого положения диска и нуля прибора соответствует подаче к зажимам $K_{10}^{(*)}$ и $K_8(V)$ - напряжения U_{AB} . Поэтому за исходный при измерении углов или снятии векторных диаграмм, как уже отмечалось, принимается вектор напряжения U_{AB} (базовое напряжение). 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 (рисунок 1.5б), при этом переключатель S_3 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.

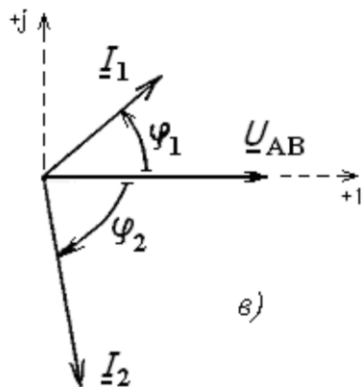
Угол будет определен правильно, если при незначительном повороте диска лимба стрелка прибора будет перемещаться в ту же сторону, что и лимб. Стрелки на диске, обозначенные буквами L , C , указывают в какую сторону относительно вектора напряжения U_{AB} будет **смещен** вектор измеряемого тока или напряжения: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



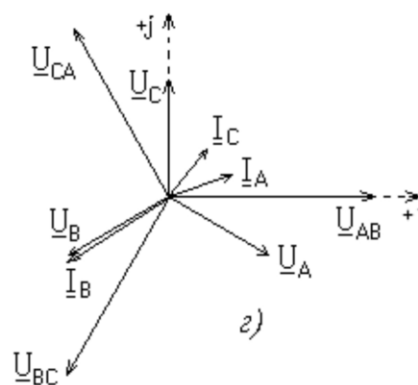
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.5 – Прибор ВАФ-85. а) – схема прибора, б) – лицевая панель прибора, в) – порядок измерения углов токов и напряжений; г) – пример построения векторной диаграммы

При измерении угла сдвига между векторами двух величин вначале определяются 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° (рисунок 1.5в).

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

На рисунке 1.5г 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. 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 сдвигах 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 суммой трех симметричных векторов, сводящих решение исходного несимметричного режима к рассмотрению трех задач, но уже для симметричных режимов.

$$\underline{A} = A \angle \varphi_A, \quad \underline{B} = B \angle \varphi_B \quad \text{и} \quad \underline{C} = C \angle \varphi_C \quad (1.5)$$

В выражении (1.5) 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:

$$\begin{aligned}
 \underline{A} &= \underline{A}_0 + \underline{A}_1 + \underline{A}_2; & a) \\
 \underline{B} &= \underline{B}_0 + \underline{B}_1 + \underline{B}_2 = \underline{A}_0 + a^2 \cdot \underline{A}_1 + a \cdot \underline{A}_2 = & б) \\
 &= A_0 \angle \varphi_0 + A_1 \angle (\varphi_1 + 240^\circ) + A_2 \angle (\varphi_2 + 120^\circ); & (1.6) \\
 \underline{C} &= \underline{C}_0 + \underline{C}_1 + \underline{C}_2 = \underline{A}_0 + a \cdot \underline{A}_1 + a^2 \cdot \underline{A}_2 = & в) \\
 &= A_0 \angle \varphi_0 + A_1 \angle (\varphi_1 + 120^\circ) + A_2 \angle (\varphi_2 + 240^\circ).
 \end{aligned}$$

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 (1.6):

$$\begin{aligned}
 \underline{A}_0 &= (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3 = (A \angle \varphi_A + B \angle \varphi_B + C \angle \varphi_C)/3; & a) \\
 \underline{A}_1 &= (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C})/3 = [A \angle \varphi_A + B \angle (\varphi_B + 120^\circ) + C \angle (\varphi_C + 240^\circ)]/3; & б) \\
 \underline{A}_2 &= (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C})/3 = [A \angle \varphi_A + B \angle (\varphi_B + 240^\circ) + C \angle (\varphi_C + 120^\circ)]/3 & в)
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

В (1.6) и (1.7) $a = 1 \cdot e^{j120^\circ} = 1 \angle +120^\circ = 1 \angle -240^\circ$ – 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 (1.7). В соответствии с этими выражениями симметричные составляющие \underline{A}_1 , \underline{A}_2 и \underline{A}_0 можно определить графическими построениями. 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. Располагая положением соответствующих векторов фазных напряжений и токов, можно определить направление полной мощности и его составляющих в каждой фазе (см. рис. 1.12).

2 Аппаратура 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)

3. Методика и порядок выполнения работы

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

$$k_{cx} = \frac{I_p^{(вид-режима)}}{I_2}, \quad (1.8)$$

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, $I_2 = I_1 / K_{Ином}$; I_1 - первичный ток; $K_{Ином}$ — номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

В таблице 2 приведены значения коэффициента относительной чувствительности $k_{\dot{I}}$ 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 $k_{\dot{I}}$ определяется схемой соединения ТА.

При n -м виде КЗ этот коэффициент равен

$$k_{ч.о} = \frac{k_q^{(n)}}{k_q^{(3)}} = \frac{I_p^{(n)}}{I_{с.р}^{(3)}} : \frac{I_p^{(3)}}{I_{с.р}^{(3)}} = \frac{I_p^{(n)}}{I_p^{(3)}}, \quad (1.9)$$

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

Таблица 1 – Коэффициенты схемы для различных схем включения трансформаторов тока

Наименование схемы	$K_{сх}^{(3)}$	$K_{ч.о}$ при КЗ в сети, где установлена защита							$K_{ч.о}$ при КЗ за трансформатором Y/Δ -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	1	1	1	1	2/√3	2/√3	2/√3	1/√3	1/√3	1/√3
Полный треугольник (трехлинейная)	√3	1	2/√3	2/√3	2/√3	1/√3	1/√3	1/√3	1	1	1	1	2/√3	2/√3	2/√3
Полный треугольник (двухрелевая)	√3	1	2/√3	1/√3	2/√3	1/√3	1/√3	1/√3	1	1	1	1	2/√3	2/√3	1/√3
Неполная звезда (двухрелевая)	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2/√3	1/√3	2/√3	1/√3	1/√3	1/√3
Неполная звезда (трехлинейная)	1	1		1		1	0	1	1	2/√3	2/√3	2/√3	1/√3	1/√3	1/√3
Неполный треугольник	√3	1	1/√3	1/√3	2/√3	1/√3	0	1/√3	1	1	0	1	2/√3	1/√3	1/√3

Относительный коэффициент чувствительности при n -м виде КЗ равен отношению тока $I_p^{(n)}$ в измерительном органе к току в нем при К(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 трех трансформаторов тока (рисунок 1.6 б), причем вторичные обмотки трансформаторов 1ТА, 2ТА и 3ТА соединяются в треугольник или в звезду соединяются в схему полной звезды (рисунок 1.6 а).

Схема подсоединяется к источнику тока, а различные виды КЗ имитируются замыканием или размыканием проводников в схеме.

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.

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.

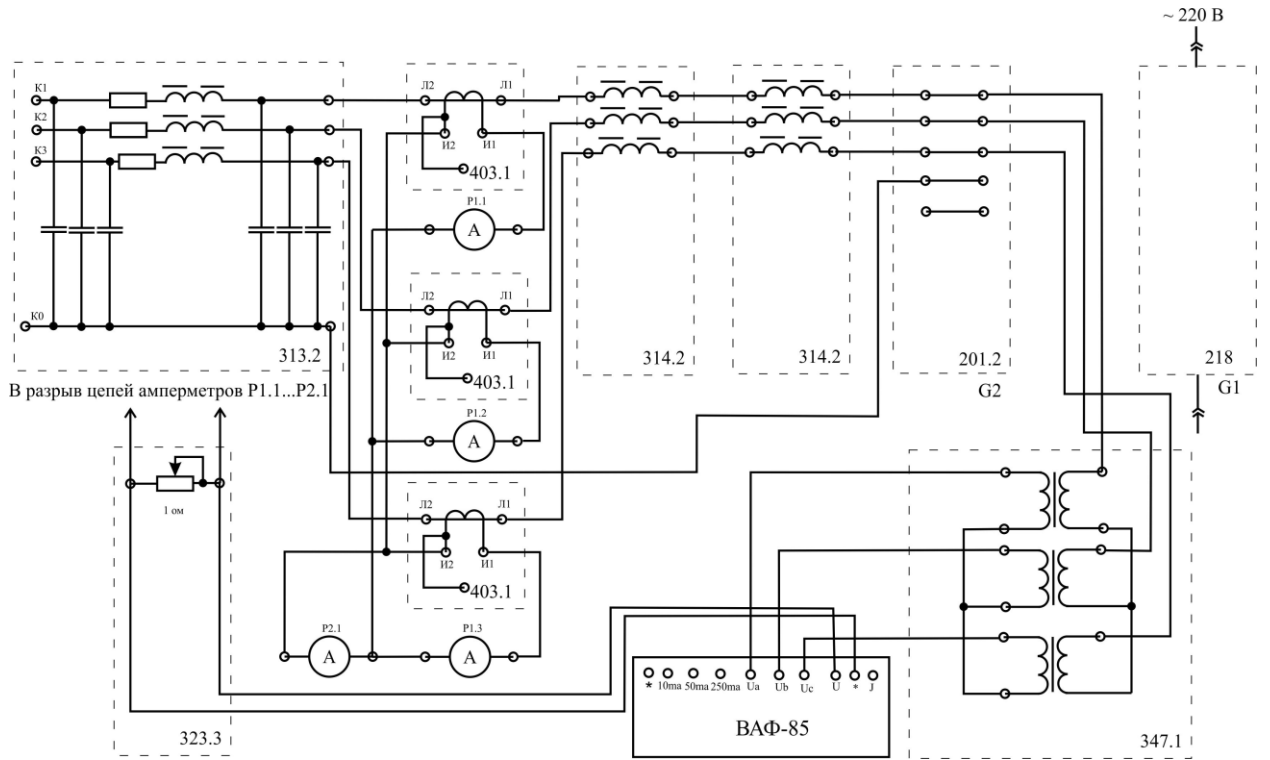
Для заданных преподавателем схем соединения ТА и вариантах КЗ выполнить измерения токов в первичной и во вторичной цепях ТА с одновременным измерением фаз токов.

Устанавливаемую величину тока в первичных обмотках ТА задает преподаватель.

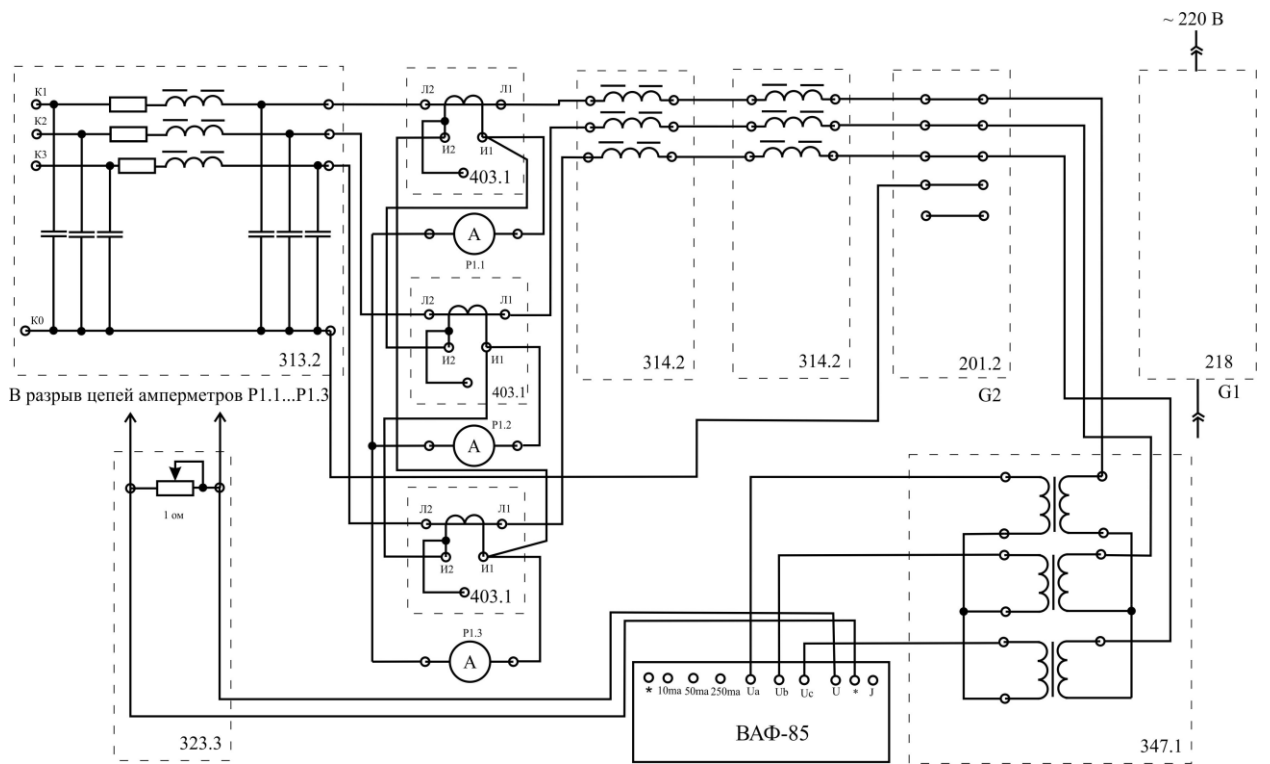
Примечание. Если ТА не используется в эксперименте, то его вторичная обмотка должна быть **закорочена!**

4.1 Выполнение работы

Собрать схему, указанную преподавателем, промоделировать различные виды КЗ, для различных схем соединения вторичных обмоток трансформаторов тока (см рисунок 1 а, б). Измерить величину и фазу токов в первичных и вторичных обмотках трансформаторов тока. Точки короткого замыкания К1, К2, К3 и К0. Результаты измерений занести в таблицу 2.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Схема для проведения опытов при соединении вторичных обмоток ТТ по схеме: а) – Y0, б) – Δ

Таблица 2 – Результаты проведения испытаний

Вид схемы и повреждения	IA1	IB1	IC1	IN	IA2ф	IB2ф	IC2ф	IA2л	IB2л	IC2л	I2N
$K^{(3)}$ Cx TT Y_0											
$K^{(2)}$ Cx TT Y_0											
$K^{(1,1)}$ Cx TT Y_0											
$K^{(1)}$ Cx TT Y_0											
$K^{(3)}$ Cx TT Y											
$K^{(2)}$ Cx TT Y											
$K^{(1,1)}$ Cx TT Y											
$K^{(1)}$ Cx TT Y											
$K^{(3)}$ Cx TT Δ											
$K^{(2)}$ Cx TT Δ											
$K^{(1,1)}$ Cx TT Δ											
$K^{(1)}$ Cx TT Δ											

4.2. Обработка экспериментальных данных

На основе экспериментальных данных п. 4.1 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 и его форма

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.

5 Вопросы для защиты работы

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 двигателе 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. 5.4.4?
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?

Лабораторная работа 2

ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НА ПОСТОЯННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ

Цель работы – Изучить принципы построения схем токовых защит на постоянном оперативном токе, измерительные органы тока, промежуточные реле и реле времени. Освоить методику проверки и настройки уставок этих реле.

1 Теоретическое обоснование

1.1 Токовые защиты

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. 3.1*в, 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.

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 рисунке 2.1*а*, на которой: КА – вторичные токовые измерительные органы (ИОТ); 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.

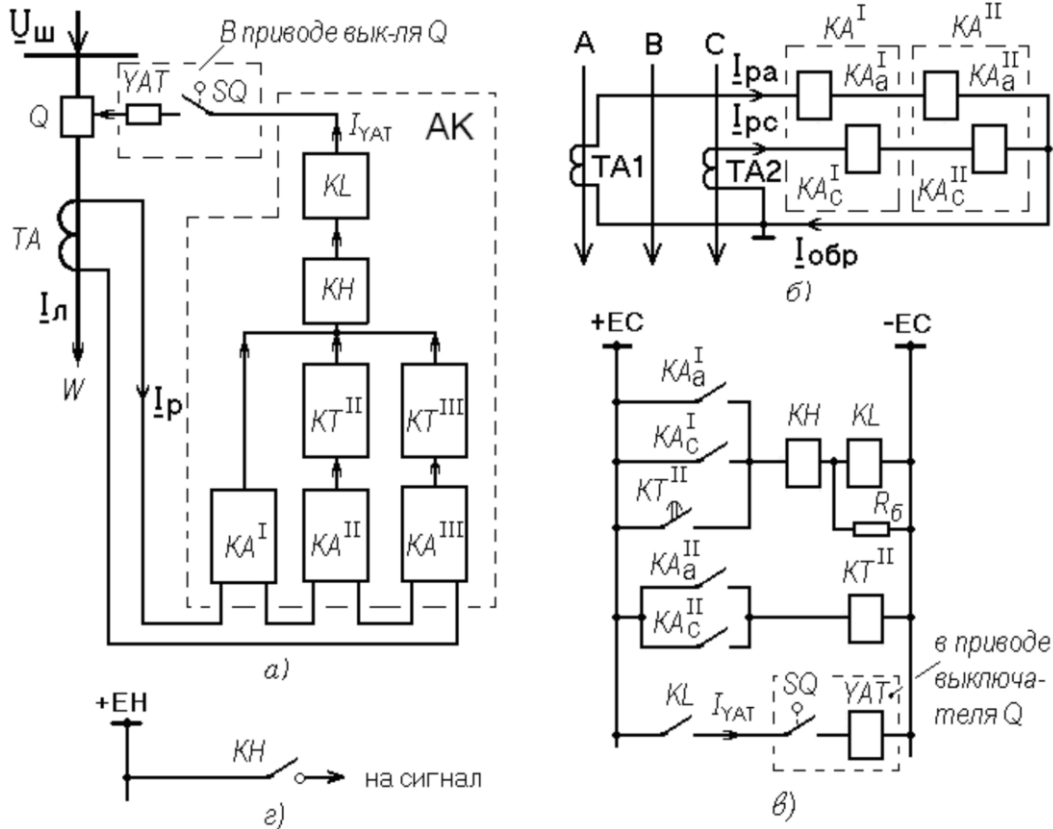


Рисунок 2.1 – Структурная схема токовых защит на постоянном оперативном токе: а) структурная схема защиты по одной фазе, б) схема токовых цепей двухступенчатой токовой защиты для сети с изолированной нейтралью, в) схема логической и исполнительной части защиты, г) схема цепей сигнализации.

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

Структура токовой защиты (количество и состав ступеней) определяется решаемой защитой задачей. На рисунке 2.1б в качестве примера приведены токовые цепи двухступенчатой токовой защиты, например, радиальной линии 6 – 35 кВ, состоящей из TO^I и $MTЗ^{III}$.

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 $I_{\dot{z}.max}$. 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 рисунке 2.1а, 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. $t_{c.p}^{IV} \gg t_{c.p}^{III}$.

Таким образом, у максимальной токовой защиты и токовой защиты от перегрузки один и тот же принцип действия, но назначение различное. На рисунке 2.1а 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).

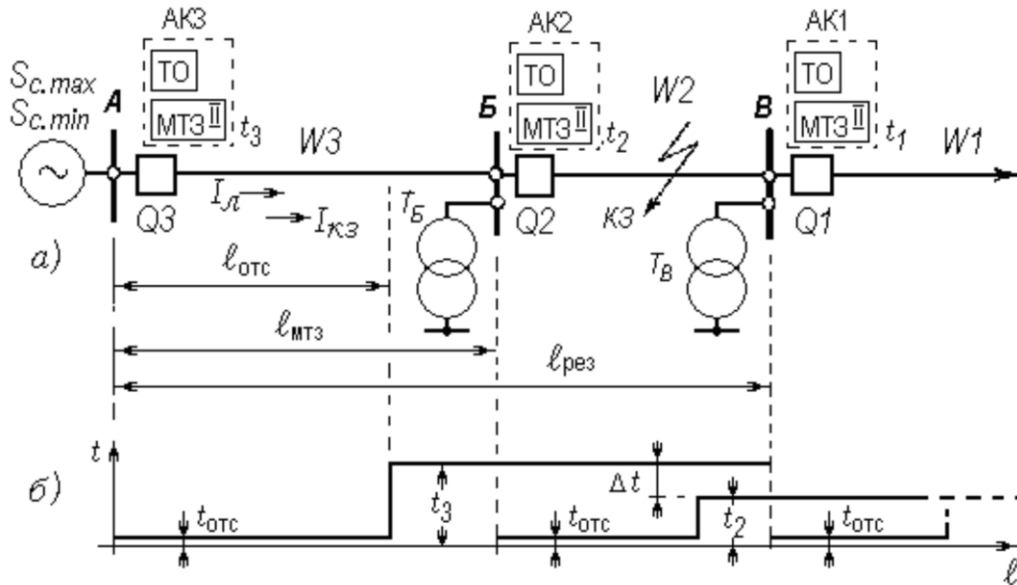


Рисунок 2.2 - Зоны действия максимальных токовых защит (МТЗ^{II}) и токовых отсечек (ТО) (а) и карта селективности срабатывания (б) $L_{ТО}$ и $L_{МТЗ}$ – зоны действия ТО и МТЗ линии W3; $L_{рез}$ - зона дальнего резервирования МТЗ линии W3; КЗ -точка короткого замыкания; t_1 - t_3 время срабатывания МТЗ линий W1 -W3 соответственно; Δt - ступень селективности; Q1 – Q3 выключатели на линиях

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, мгновенно, поскольку зона ее действия не выходит за пределы этого элемента, например, за пределы длины $l_{отс}$ на рисунок 2.2а. Максимальная токовая защита должна действовать на отключение с некоторой задержкой (выдержкой времени) для того, чтобы дать возможность работать раньше другим аналогичным защитам, расположенным ближе к месту повреждения. Например, при КЗ на линии

W2 запускаются как токовая защита дальнего резервирования комплекта АК3 линии W3, так и комплект защиты АК2 линии W2, но уставка по времени МТЗ^{III} комплекта АК3 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 АК3.

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 (рисунок 2.2а), где зона действия $l_{отс}$ токовой отсечки ТO^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 $l_{отс}$) 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. 3.2а), 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_{σ}^I токи срабатывания ТО^I радиальной линии определяются из выражений:

$$\begin{aligned} I_{с.р}^I &= k_{омс}^I \cdot k_{сх}^{(3)} \cdot I_{к.вн.маx}^{(3)} ; & a) \\ I_{\sigma}^I &= I_{с.р}^I / n_I , & б) \end{aligned} \quad (2.1)$$

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 рисунке 2.1б 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

$$I_{c.p}^{III} \geq k_{отс}^{III} \cdot k_{сзн} \cdot I_{л.раб.маx} / k_{в}, \quad (2.2)$$

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

$$I_y^{III} = I_{c.p}^{III} = \frac{k_{сх}^3 \cdot I_{c.p}^{III}}{n_I}, \quad (2.3)$$

где $I_{c.p}^{III}$ — первичный ток срабатывания МТЗ^{III}, А, определяемый по (3.1).

Способность защиты АКЗ реагировать на удаленные КЗ на *предыдущей* линии W2 называется *дальним резервированием*.

Соотношение времен срабатывания согласуемых между собой МТЗ, а именно $t_{3\text{посл}} > t_{2\text{пред}}$, является одним из важнейших для обеспечения селективной (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 (рисунок 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, $I_{л}$ 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 $k_{ч}$, который показывает, насколько ток в реле защиты при соответствующем виде КЗ превышает ток срабатывания $I_{с.р}$ (уставку):

$$k_{ч} = \frac{I_{р.мин}}{I_{с.р}}, \quad (2.4)$$

где $I_{р\ min}$ — 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 $k_{сх.мин}^{(видКЗ)}$, а так же реально возможные минимальные режимы работы питающей энергосистемы ($S_{с.мин}$), 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. $I_{мин}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{мин}^{(3)}$, коэффициент схемы для схемы на рис. 3.1б равен $k_{сх.мин}^{(2)} = 1$.

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, рисунок 2.2а).

Измерительные реле тока (ИОТ).

Эти измерительные органы относятся к реле с одной воздействующей величиной.

В качестве ИОТ (КА на рисунке 2.1) 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 (рисунок 2.3а) 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, рисунок 2.3в). К контактам 1, 3, 5 и 7 на цоколе присоединены неподвижные контактные пружины (рисунок 2.3 б). 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 (рисунок 2.3в). На рисунок 2.3б 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 (рисунок 2.3з), когда произойдет замыкания разомкнутых контактов 1 – 3 (рисунок 2.3в). Для реле подобного типа наиболее простым способом изменения тока срабатывания является изменение натяжения пружины 4. Если ослабить пружину, т. е. сдвинуть указатель б 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 (рисунок 2.3в); 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 рисунок 2.3в. 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

$$i_p = I_{p,\max} \cdot \sin \omega t, \quad (2.5)$$

якорь реле притягивается с усилием

$$F_{\text{э}} = k^2 \cdot I_{p,\max}^2 \cdot \sin^2 \omega t = k^2 \cdot I_p^2 - k^2 \cdot I_p^2 \cdot \cos 2\omega t = F_{\text{э}=\} - F_{\text{э}\approx}, \quad (2.6)$$

Поворот якоря на угол α происходит под действием постоянного усилия $F_{\text{э}=\}$, определяемом действующим значением протекающего по обмоткам реле тока I_p . Знакопеременное усилие $F_{\text{э}\approx}$ с частотой, удвоенной по сравнению с частотой сети ($2\omega = 2 \cdot 2\pi f$), вызывает вибрацию якоря и, следовательно, вибрацию связанной с ним магнитной системы.

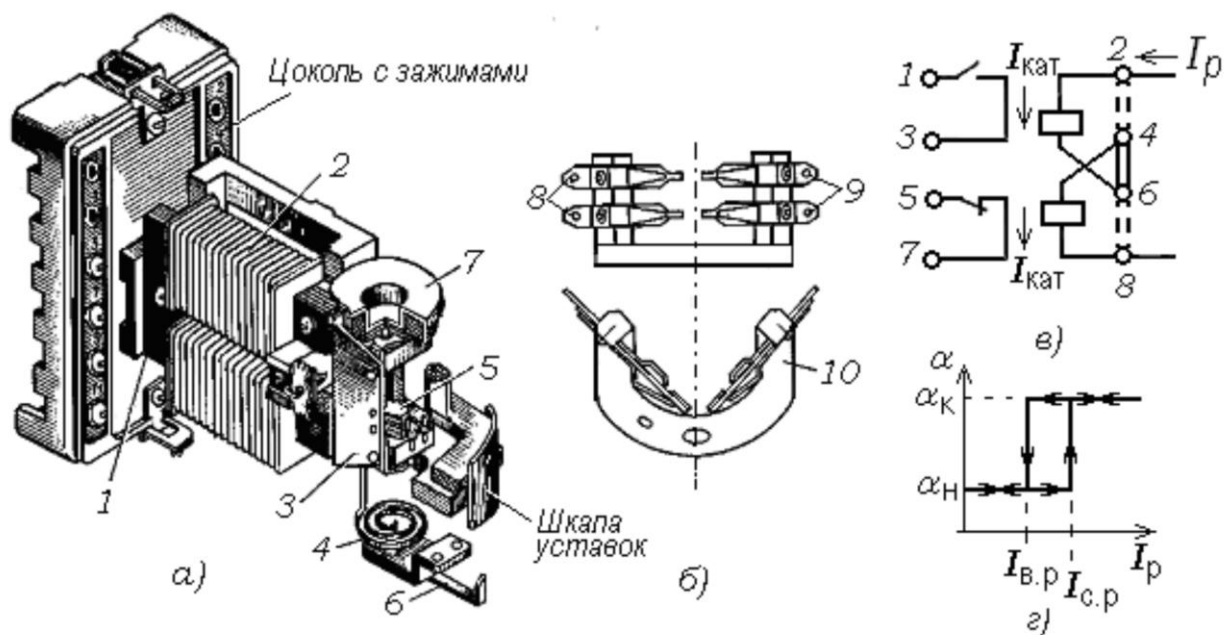


Рисунок 2.3 – Электромагнитное реле тока типа РТ-40: а) - конструкция реле; б) - крепление неподвижных контактов; в)- схема внутренних соединений, выводимых на цоколь реле; г) - к пояснению релейного эффекта.

Для уменьшения вибрации контактов в конструкции реле РТ-40 предусмотрен совместный ход подвижного и неподвижного контактов и специальное устройство — гаситель вибрации 7 (рисунок 2.3а), 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 рисунке 2.3г 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_B , который определяется выражением

$$k_B = \frac{I_{в.р}}{I_{с.р}}, \quad (2.7)$$

Измерительные органы тока в токовых защитах срабатывают при превышении протекающего через его токовую обмотку тока равного или превышающего ток срабатывания реле (уставку реле). Поэтому $k_B < 1$. Такие реле иногда называют реле максимального тока. Желательно иметь высокий $k_B \approx 0,8 - 0,85$, 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 рисунок 2.4а 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 напряжения $U_{ВЫХ1}$. Эта зависимость и используется в рассматриваемых реле.

Итак, на инвертирующий вход реле (рисунок 2.4а) подается входное выпрямленное напряжение $U_{A1ВХ1}$, форма которого соответствует напряжению $U_{ВХ1}$ на рисунок 2.4в. Это напряжение сравнивается с заданным напряжением $U_{A1ВХ2}$ на неинвертирующем входе.

В зависимости от соотношения между этими напряжениями на выходе усилителя $A1$ (рисунок 2.4а) появляются положительные или отрицательные импульсы напряжения $U_{A1\text{вых}}$ (рисунок 2.4г). 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 $U_{A2\text{вх}2}$ 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 $U_{A\text{вх}1}$ 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 4г). 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 $-U_{A2\text{вх}2}$. В самом деле, при возникновении повреждения амплитуда выпрямленного входного напряжения $U_{A1\text{вх}1}$ превысит заданное входное напряжение $U_{A1\text{вх}2}$ и на выходе усилителя $A1$ появится прямоугольный импульс максимального отрицательного напряжения (рисунок 2.4г). Конденсатор C начнет перезаряжаться. Когда напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на инвертирующем входе $U_{A2\text{вх}1}$ усилителя $A2$ достигнет значения отрицательного напряжения $U_{A2\text{вх}2}$, усилитель переключится и на его выходе появится максимальное положительное напряжение $U_{A2\text{вх}2}$. Вместе с ним изменяет знак и напряжение $U_{A2\text{вх}2}$. Последующие положительные и отрицательные импульсы напряжения $U_{A1\text{вых}}$ будут перезаряжать конденсатор, однако при этом напряжение $+U_{A2\text{вх}1}$ не достигнет значения $+U_{A2\text{вх}2}$ и усилитель $A2$ остается в состоянии после срабатывания. В таком состоянии он находится до тех пор, пока на усилителе $A1$ входное напряжение $U_{A1\text{вх}1}$ будет превышать заданное входное напряжение $U_{A1\text{вх}2}$.

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

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

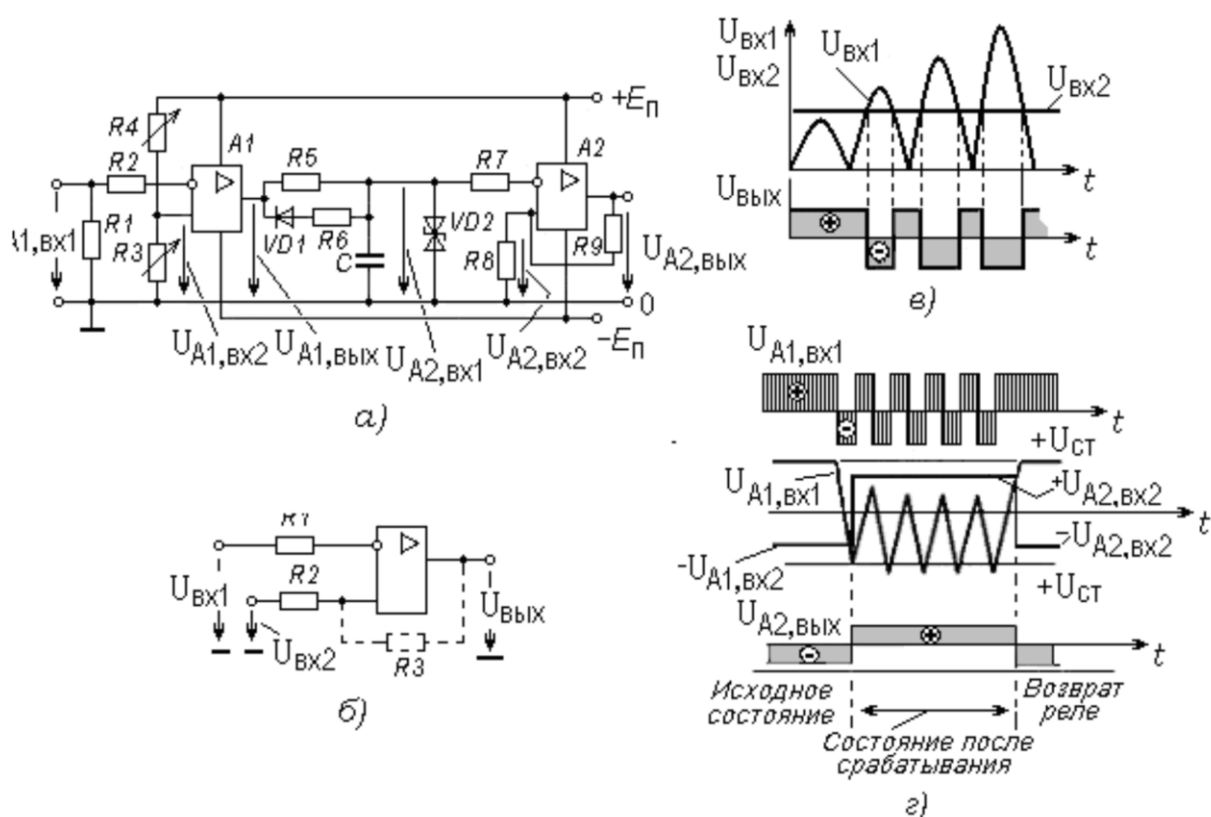



Рисунок 3.4 - Схема реле тока серии РСТ-14 (а) и поясняющая его работу схема компаратора (б); его работа (в); временные диаграммы работы реле (г).

В качестве реле времени 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 является электронным аналогом РВ-100.

Электромеханические 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 $\text{---} \text{---} \text{---}$, или помимо этого контакта еще имеется *проскальзывающий* контакт (временно

замыкающий), 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.

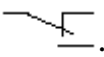
Пределы плавного регулирования времени срабатывания следующие:


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 замыкающий) 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 действия часового механизма реле серии РВ (рисунок 2.5а) приведено в учебной литературе.

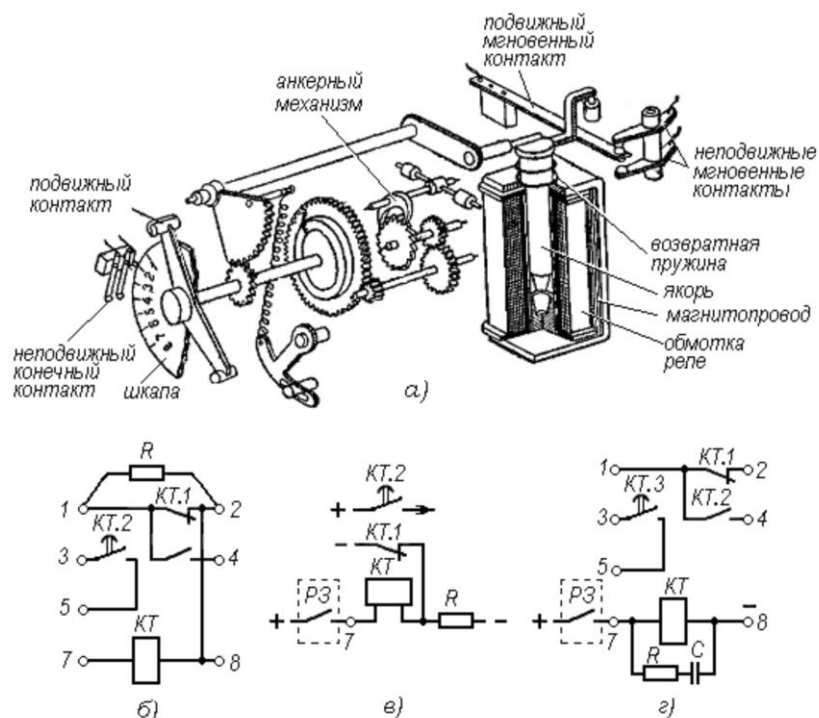


Рисунок 2.5 – Кинематическая схема реле РВ -100 (а).Схема внутренних соединений: б) - термически стойкое реле; в) - схема, поясняющая работу термически стойкого реле; г) - реле с искрогасительным контуром; РЗ-управляющей контакт релейной защиты

Электронное реле времени серии РВ-01

Электронными аналогами электромеханических реле времени являются статические реле типов РВ-01 (рисунок 2.6).

Управление работой реле РВ-01 осуществляется подачей напряжения оперативного тока контактами, например, измерительных органов максимальной токовой защиты ($КА^{II}$, $КА^{III}$ на рисунок 2.1). 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.

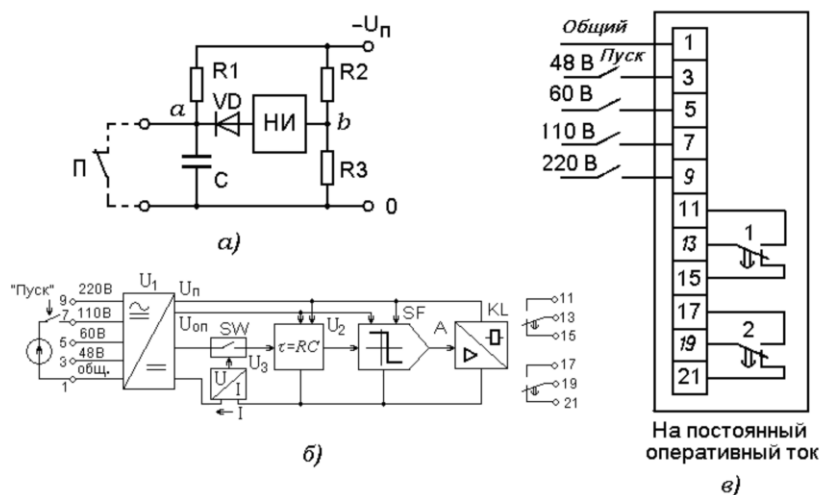


Рисунок 2.6 – Реле времени RB-01: а) – функциональная схема, б) – структурная схема, в) – схема подключения.

В большинстве случаев емкостное (конденсаторное) реле времени выполняется по мостовой схеме, принцип которого поясняется рисунком 2.6а.

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

Условием срабатывания нуль-индикатора $НИ$ является соотношение

$$U_C \geq U_{R3} = U_{\Pi} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (2.8)$$

где U_{Π} – напряжение питания реле.

Напряжение U_C по времени изменяется по экспоненциальному закону

$$U_C = U_{\Pi} \cdot (1 - e^{-t/R_1 C}). \quad (2.9)$$

Из приведенных выражений получаем время срабатывания реле

$$t_{c.p} = -R_1 \cdot C \cdot \ln \frac{R_2}{R_2 + R_3}, \quad (2.10)$$

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 степень 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.

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 КЛ.

Промежуточные реле в схемах максимальных токовых защит и токовых отсечек используются, главным образом, в качестве исполнительного органа (например, выходного реле KL на рисунок 2.1в). Своими достаточно мощными контактами они подают оперативное напряжение $\pm E_C$ на электромагниты отключения Y_{AT} коммутационных аппаратов (выключателя Q, рисунок 2.1а).

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 $I_{Y_{AT}}$ электромагнита Y_{AT} . 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 $k_B = 0,1 \dots 0,4$.

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

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 (рисунок 2.16) 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.

2 Аппаратура 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

3 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!

4 Методика и порядок выполнения работы

Испытание максимального реле тока.

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

4.1. Записать данные испытуемого реле.

4.2. Собрать схему испытания реле (рисунок 1). Схема соединения зависит от используемого реле. (В работе проверяется два реле, одно на с последовательным соединением обмоток, другое – с параллельным).

При плавном увеличении тока зафиксировать минимальное его значение, при котором контакты реле надежно замыкаются, т. е. определить

ток срабатывания реле $I_{с.р.}$ (по загоранию сигнальной лампы) 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 $\pm 5\%$.

Таблица 1 – Данные проверки токового реле

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

Рассчитать средние значения измеренных величин.

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

$$S = I_{уст\ min} \cdot U_p \quad (2.11)$$

4.4 Измерить время срабатывания реле тока при значениях $I_p = 1,2 \cdot I_{уст}$ и $I_p = 3 \cdot I_{уст}$ (но не более 5 А). Схема измерения времени срабатывания приведена на рисунке 2. В схеме используется измеритель параметров реле цифровой, однако в условиях эксплуатации должен использоваться специальный миллисекундомер, например типа ЭМС-54 или другой, позволяющий фиксировать малые интервалы времени. Порядок выполнения измерений следующий:

- Собрать схему согласно рисунка 2

- Включить прибор Ф291 и тумблер «Пуск» на нем и установить требуемый ток через реле (использовать значения, полученные в пункте 4.2, таблица 1).

- Выключить тумблер «Пуск»

- Нажать на кнопку «Сброс» на приборе Ф291

- Включить тумблер «Пуск»

- Зафиксировать показания прибора (повторить опыт не менее 3 раз), результаты записать в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты измерения времени срабатывания реле максимального тока

Ip, А	t _{ср} , мс	t _{ср} , среднее	Ip, А	t _{ср} , мс	t _{ср} , среднее

4.5 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 $\pm 0,03$.

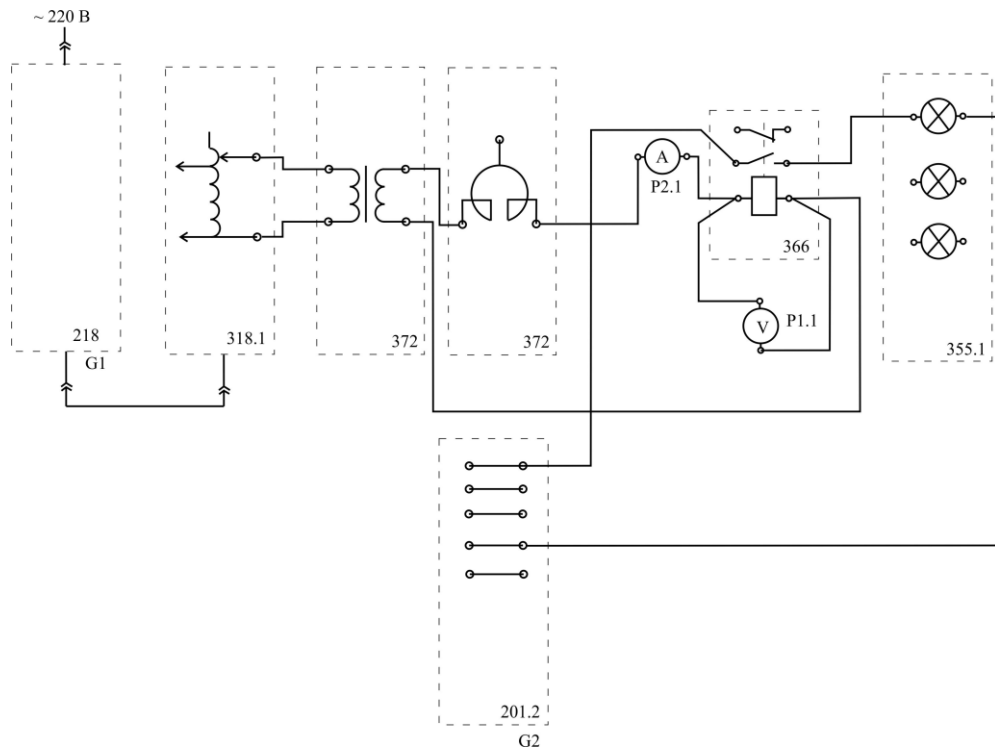


Рисунок 2.7 – Схема испытания тока срабатывания реле максимального тока

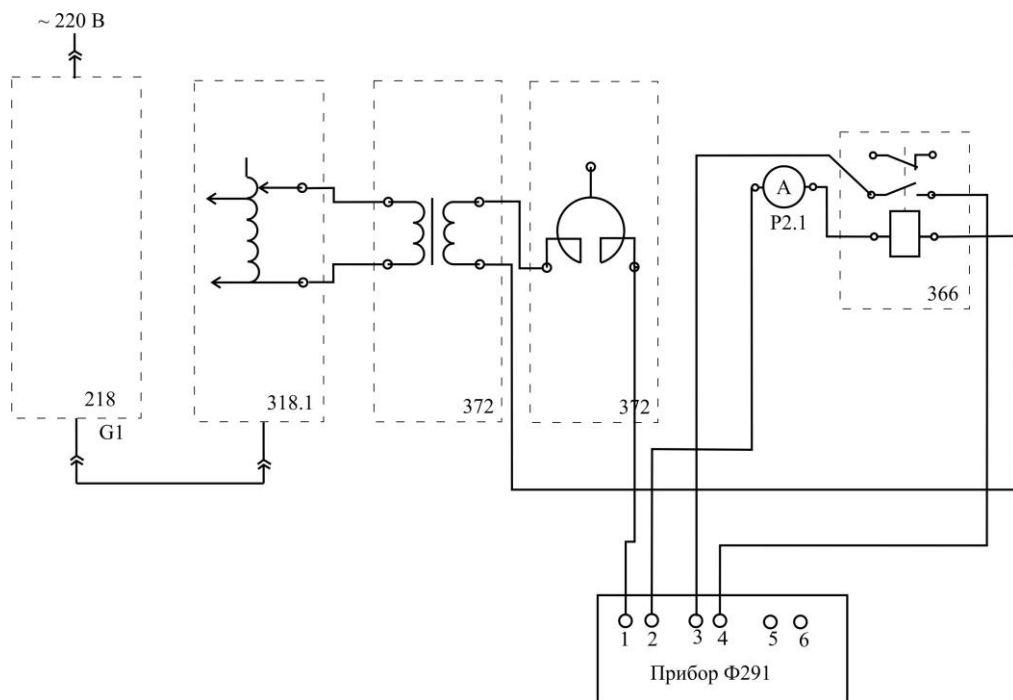


Рисунок 2.8 – Схема измерения времени срабатывания реле макмимального тока

Испытание реле времени

4.6. Ознакомьтесь с устройством испытуемого реле времени.

Записать паспортные данные.

Порядок проведения измерений прибором Ф291

- Собрать схему согласно рисунка 4
- Включить прибор Ф291 и тумблер «Пуск» на нем и установить требуемое напряжение на реле (порядка 200 В).
- Выключить тумблер «Пуск»
- Нажать на кнопку «Сброс» на приборе Ф291
- Включить тумблер «Пуск»
- Зафиксировать показания прибора (повторить опыт не менее 5 раз), результаты записать в таблицу 4.

Рассчитать среднее значение. Сделать выводы о пригодности реле в эксплуатации.

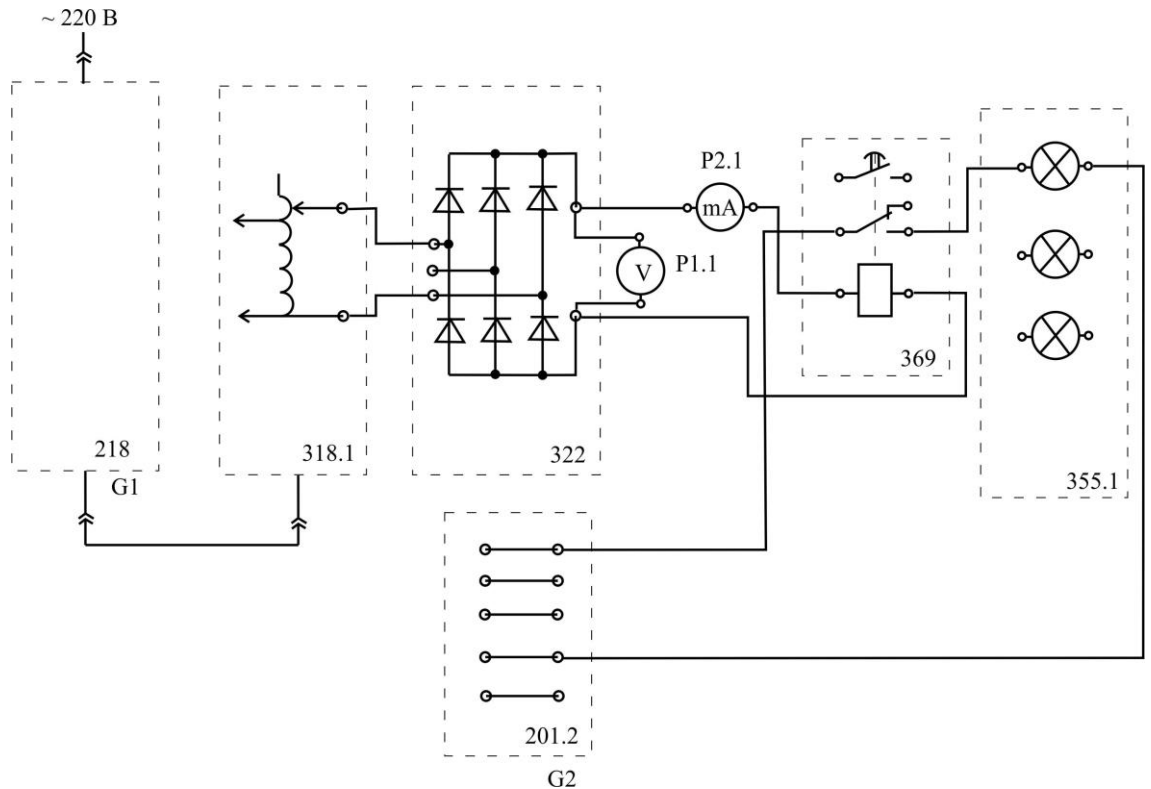


Рисунок 2.10 – Схема для определения напряжения срабатывания реле времени

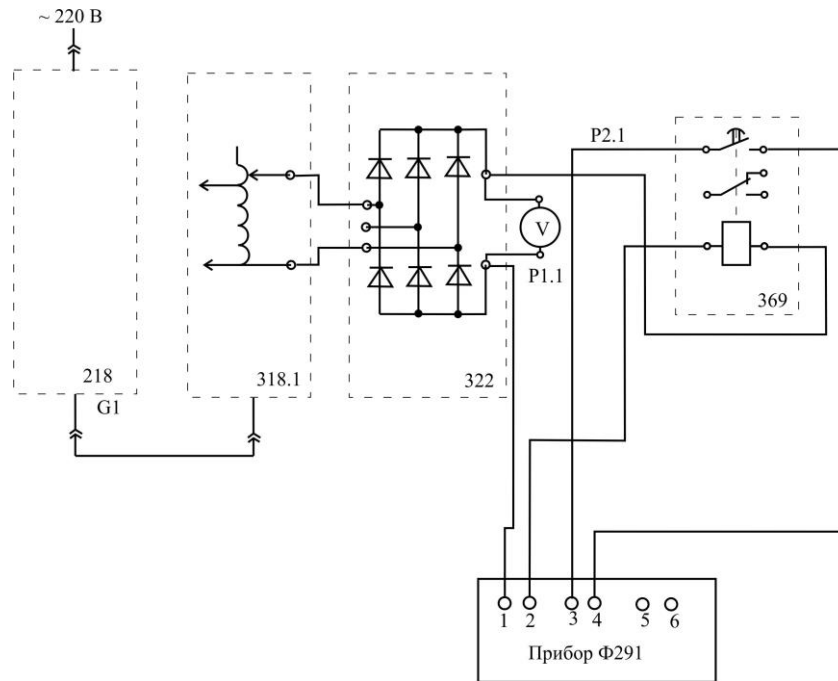


Рисунок 2.11 – Схема для исследования времени срабатывания

Испытание промежуточного реле

4.10 Ознакомиться с устройством испытуемого реле времени.

Записать паспортные данные.

4.11 Собрать схему для проверки электрических характеристик испытуемого промежуточного (рисунок 2.11).

4.12 Определить напряжение срабатывание реле, т. е. минимальное напряжение (для электромеханического реле), при котором оно срабатывает, плавно увеличивая напряжение на реле. Плавно уменьшая напряжение, определить значение напряжения возврата реле. Полученное значение напряжения срабатывания не должно превышать $0,7 \cdot U_{\text{ном}}$. Напряжение возврата должно быть не менее $0,05 \cdot U_{\text{ном}}$.

Таблица 5 – результаты испытания напряжения срабатывания реле времени

$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$U_{\text{с.р}}, \text{А}$	$U_{\text{в.р}}, \text{А}$	$k_{\text{в}}$

Рассчитать средние значения. Определить мощность, потребляемую реле по формуле $S = I_p \cdot U_p$

4.13 Проверить время срабатывания промежуточного реле на номинальном напряжении и $1,1 \cdot U_{ср}$ (значение взять из таблицы 2.5). На каждом напряжении следует производить не менее трех измерений. Полученные результаты измерений занести в таблицу 6.

Таблица 2.6 – Результаты проверки времени срабатывания промежуточного реле

U _p , В	t _{ср} , мс	t _{ср} , среднее

Порядок проведения измерений прибором Ф291

- Собрать схему согласно рисунка 6.
- Включить прибор Ф291 и тумблер «Пуск» на нем и установить требуемое напряжение на реле.
- Выключить тумблер «Пуск»
- Нажать на кнопку «Сброс» на приборе Ф291
- Включить тумблер «Пуск»
- Зафиксировать показания прибора (повторить опыт не менее 3 раз), результаты записать в таблицу 2.6.

Рассчитать среднее значение. Сделать выводы о пригодности реле в эксплуатации.

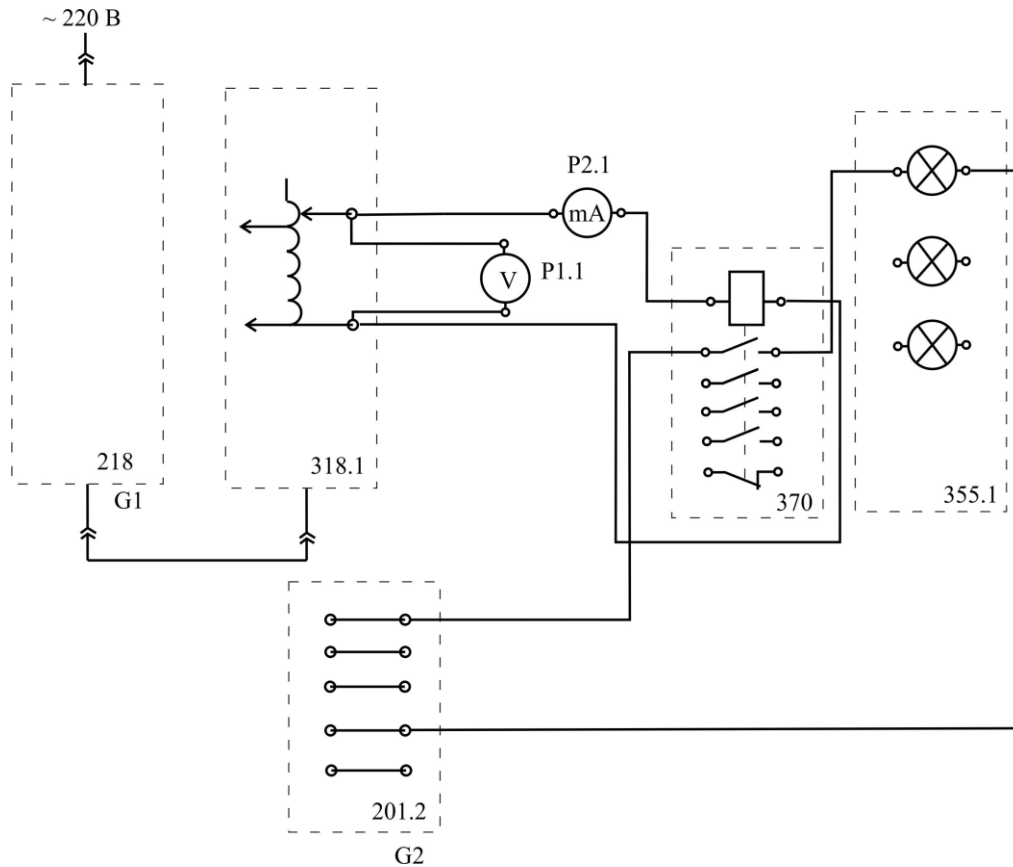


Рисунок 2.12 – Схема для исследования напряжения срабатывания промежуточного реле

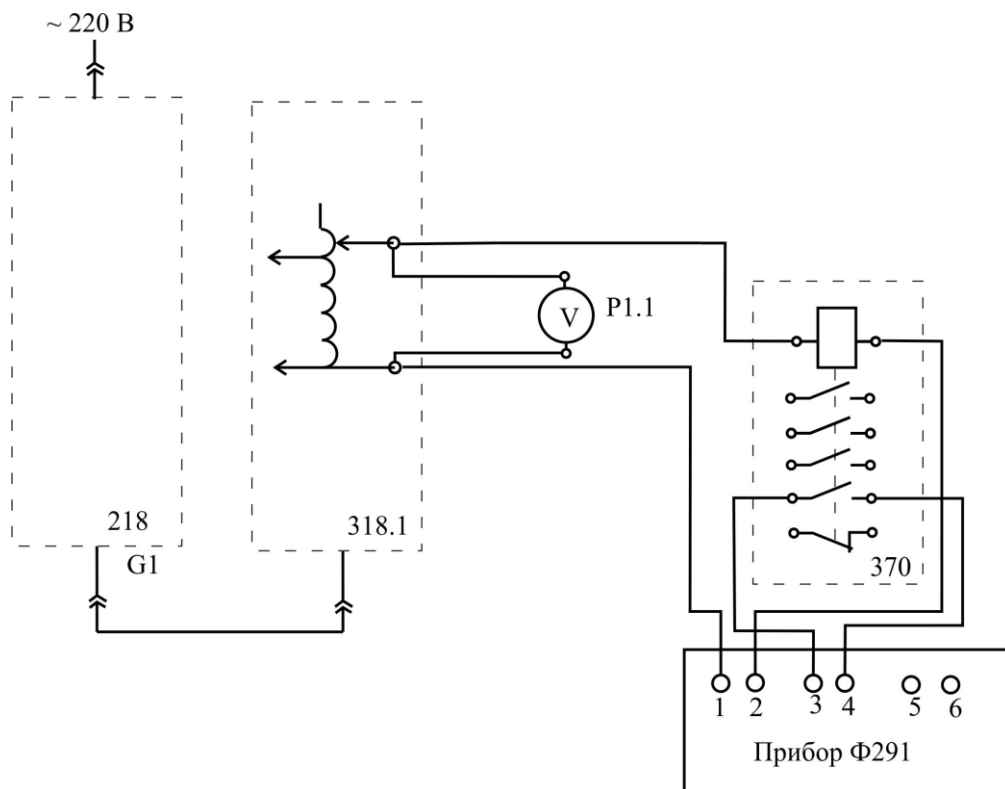


Рисунок 2.13 – Схема соединений для исследования времени срабатывания промежуточного реле

4.14 Изучение на макете схемы двухступенчатой токовой защиты и ее испытание.

Испытание схемы токовой защиты выполняется на модели токовой защиты на постоянном оперативном токе с имитационной моделью высоковольтного выключателя (рисунок 2.13).

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

Сигнализация положения выключателя регистрируется лампами НLG (отключено): НLR (включено).

В ходе испытаний создать короткие замыкания в заданных точках в схеме, зарегистрировать ток срабатывания ТО и МТЗ, с помощью прибора Ф291 измерить время срабатывания ТО и МТЗ.

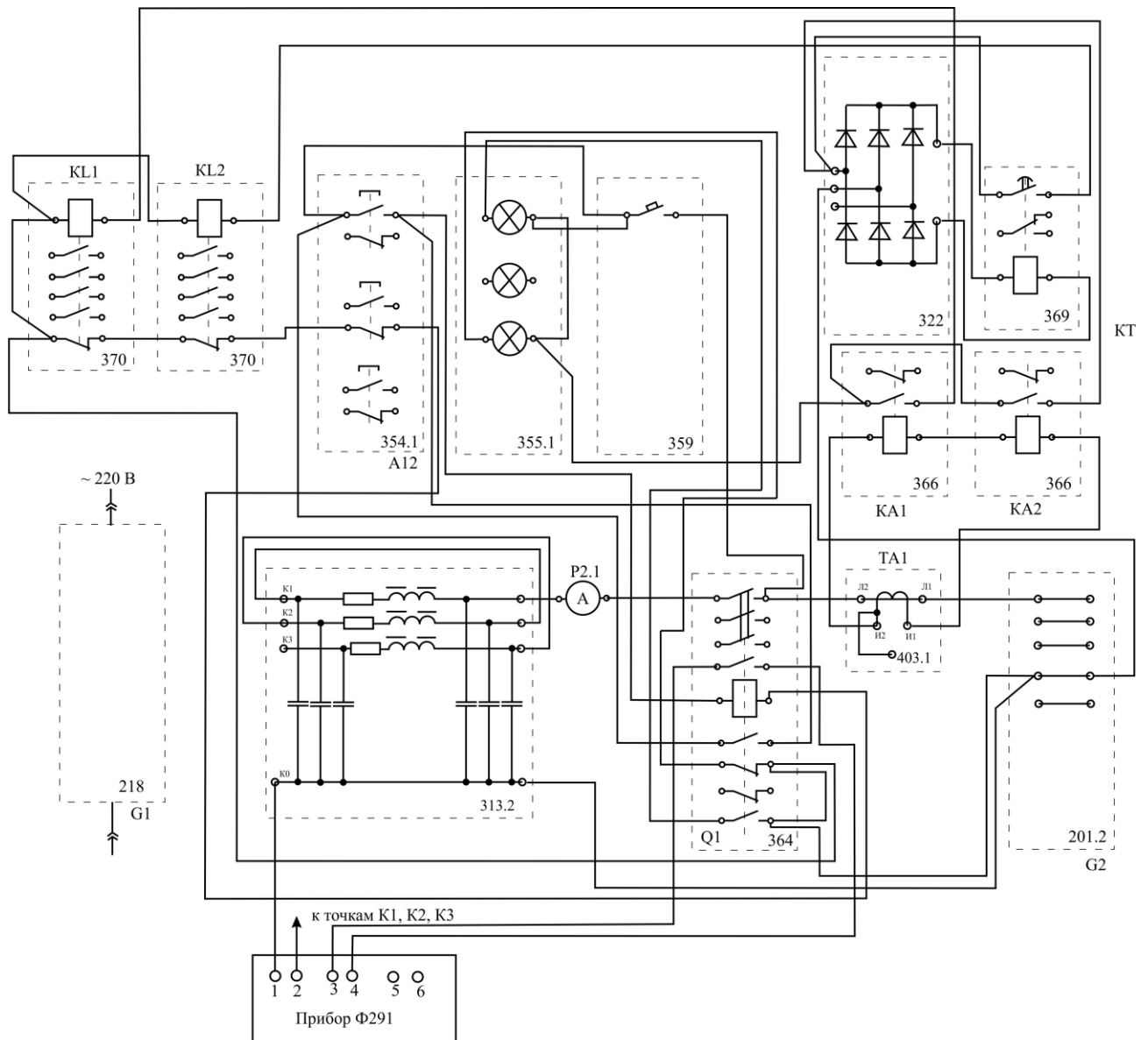


Рисунок 2.13 – Схема двухступенчатой токовой защиты

Порядок проведения испытаний:

- Включить прибор Ф291.
- Нажать на кнопку «Сброс» на приборе Ф291
- Включить тумблер «Пуск»
- Зафиксировать показания прибора в отчете.

Содержание отчета и его форма

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.

5 Вопросы для защиты работы

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 выборе 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?

Лабораторная работа 3

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.

1 Теоретическое обоснование

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 (рисунок 3.1):

– 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 (рисунок 3.1а) 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 Z_H . Поэтому в момент срабатывания защиты выдаваемая в нагрузку мощность трансформатора тока ($S_{ТА} = I_{2кз} \cdot U_2$) 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 T 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 T 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 (рисунок 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) (рисунок 3.1б).

Таким образом, в качестве источников переменного оперативного тока служат трансформаторы тока ТА, измерительные трансформаторы напряжения TV и трансформаторы собственных нужд Т (рисунок 3.1).

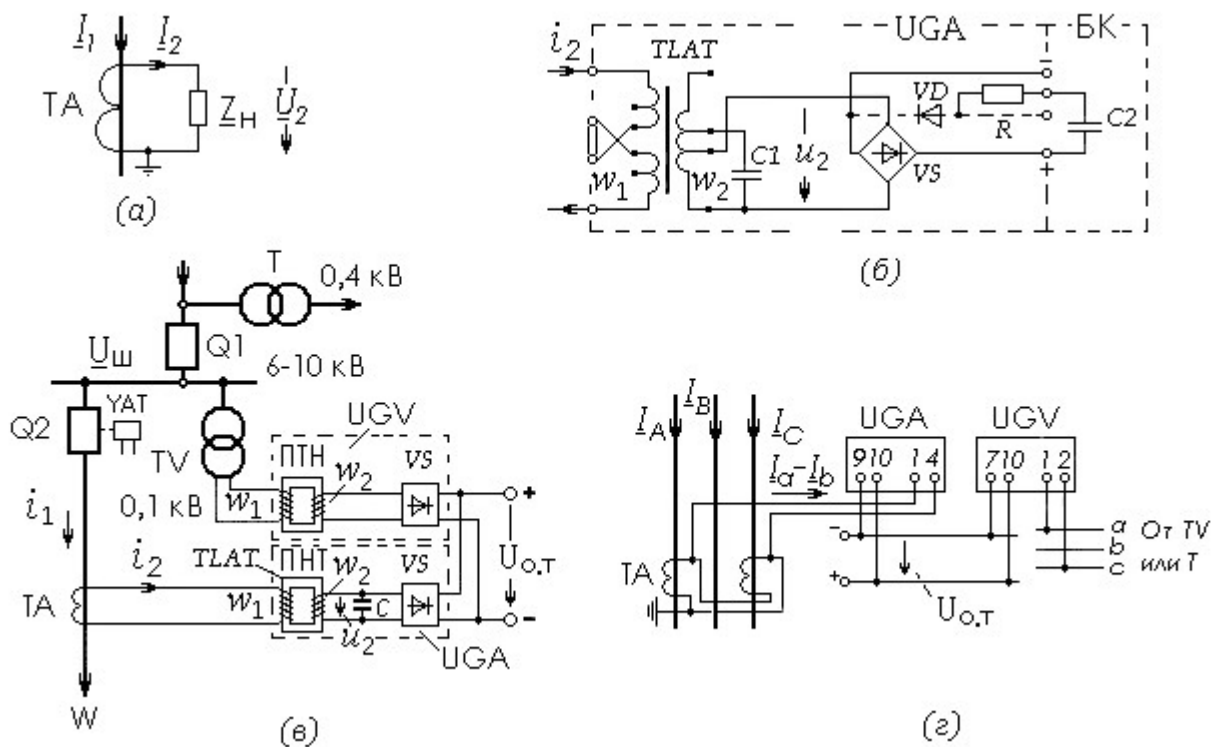


Рисунок 3.1 – Варианты получения переменного оперативного тока: а) использование трансформатора тока; б) блок питания типа БПЗ; в) и г) Блок питания типа UGV и UGA

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) (Рисунок 3.1 в, з) 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 рисунок 3.1 б), 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 \hat{I} 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 T 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 рисунок 3.1 *з* 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 $U_{0.T}$ 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 (рисунок 1 в), 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 рисунке 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 (рисунок 3.2 в).

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

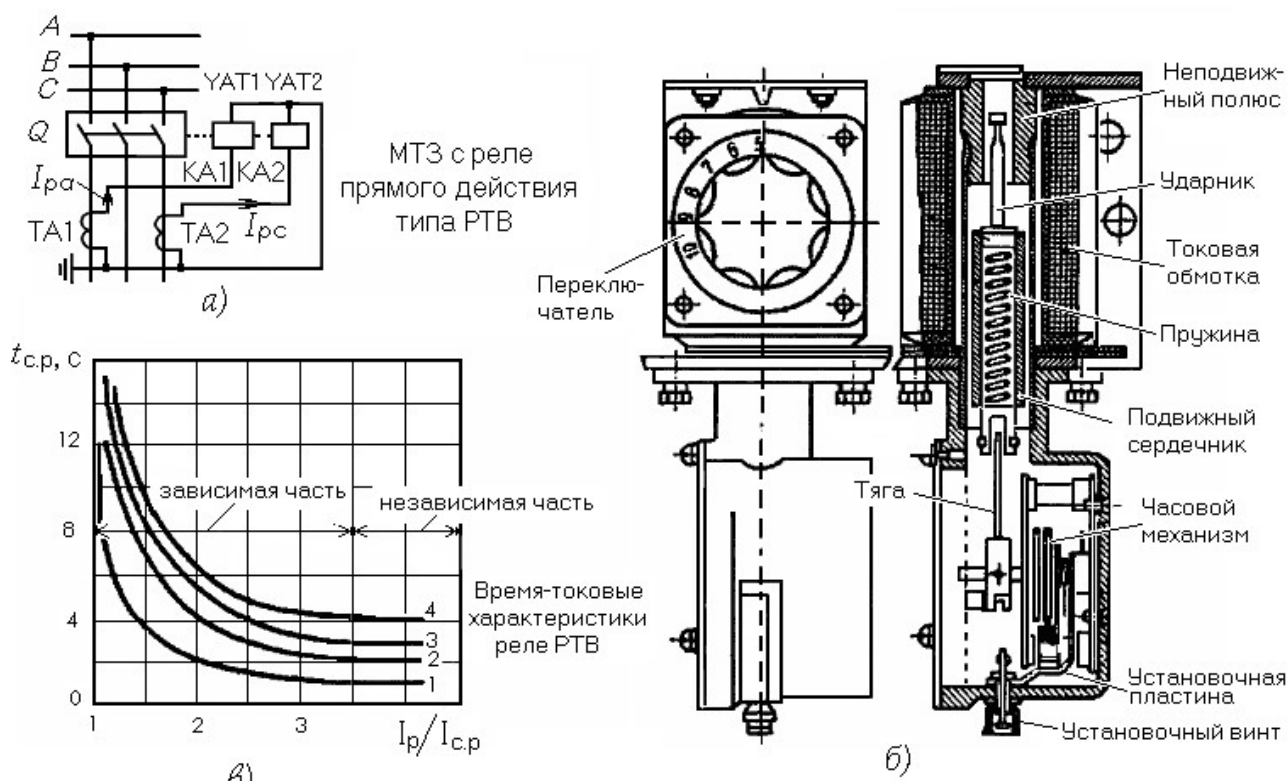


Рисунок 3.2 – Токовое реле прямого действия типа РТВ

Выпускает различные модификации вторичных реле тока КА (типов РТМ, РТВ) и реле напряжения КВ (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 (рисунок 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 рисунке 3.2б. 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 (рисунок 3.2в) 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 (рисунок 3.2б). 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 (рисунок 3.2в).

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 времятоковой 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 ($I_{\text{р}}/I_{\text{с.р}} = 1$) достигает нескольких секунд (рисунок 3.2в). Большие временные погрешности реле ($\pm 0,3$ с) обуславливают необходимость ступень выдержки времени принимать равной $\Delta t = 0,8$ с.

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

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 $I_{\text{р}}/I_{\text{с.р}} = 2 \dots 3$ 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.

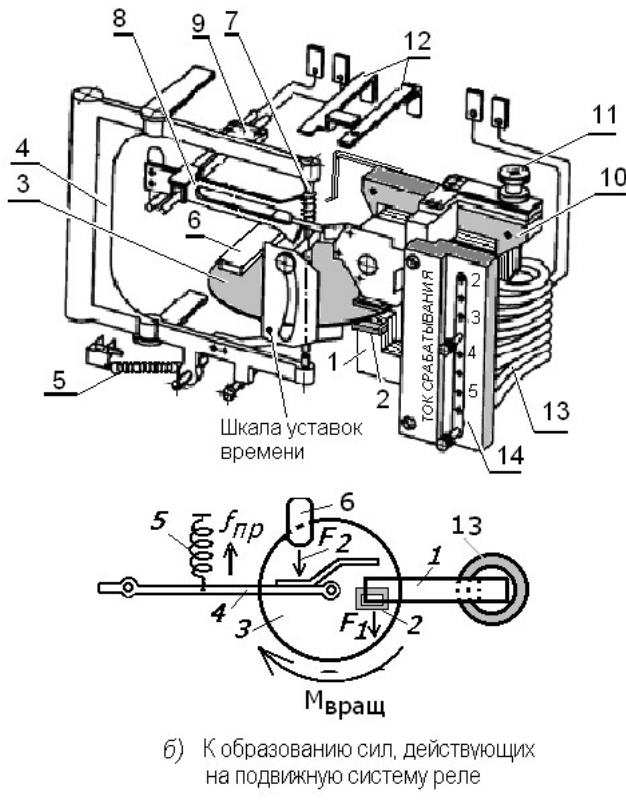
Минимальное реле напряжения с ограниченно зависимой выдержкой времени (РНВ), как и реле РТВ, имеет часовой механизм и имеет обмотку, включаемую на напряжения 110 или 220 В. В нормальном режиме, когда к обмотке реле подводится номинальное напряжение, реле находится в заведенном состоянии. Его сердечник притянут. При снижении напряжения до $U_p < 0,65 \cdot U_{\text{ном}}$ 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 $0 < t_{\text{ср}} < 4$ с. Она позволяет отстраивать защиту от кратковременных снижений напряжения. Однако реле имеет устойчивую выдержку времени лишь при напряжении $U_p < 0,35 \cdot U_{\text{ном}}$. Недостатками реле являются также отсутствие устройства установки напряжения срабатывания и сравнительно большая потребляемая мощность ($P_{\text{ср}} \approx 30$ ВА).

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 $U_{\text{с.р}} = (0,35 \dots 0,65) \cdot U_{\text{ном}}$ и $U_{\text{в.р}} = (0,65 \dots 0,85) \cdot U_{\text{ном}}$.

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

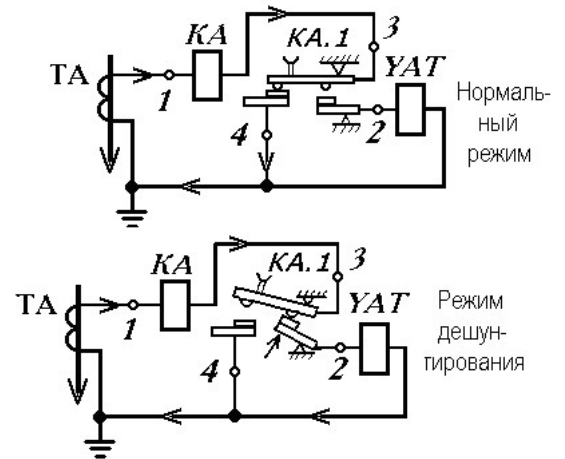
Устройство индукционного токового реле. Реле тока типа РТ-80 является комбинированным и состоит из двух элементов: индукционного с диском, создающего ограниченно зависимую характеристику выдержки времени, и электромагнитного мгновенного действия (отсечки). Схематический вид реле представлен на рисунке 3.3а.



а) Конструкция реле типа РТ-80 (РТ -90)

1 – магнитопровод; 2 – короткозамкнутый виток; 3 – алю. диск; 4 – подвижная рамка; 5 – пружина; 6 – постоянный магнит; 7 – червяк; 8 – зубчатый сегмент; 9 – коромысло; 10 – подвижный якорь; 11 – винт регулировки тока отсечки; 12 – контактная группа; 13 – токовая обмотка; 14 – штепсельный мостик

б) К работе переключающихся контактов:



г) Варианты схем индукционных реле с дешунтированием катушки отключения YAT

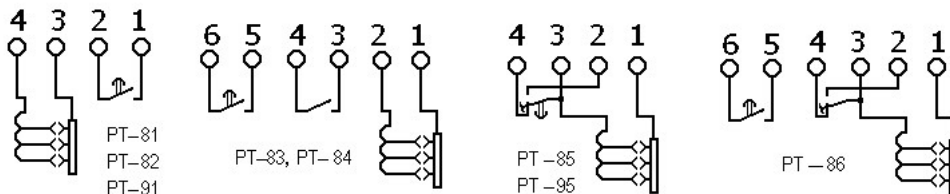


Рисунок 3.3 – Идукционное реле типа РТ-80: а) конструкция реле; б) – поясняющая схема; в) схема работы контактов; г) схемы идукционных токовых реле.

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 (рисунок 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 $I_{ср}$ 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 $k_B = I_B / I_{cp}$. 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 $I_p = 10 \cdot I_{cp}$, 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 рисунке 4.4 в (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.

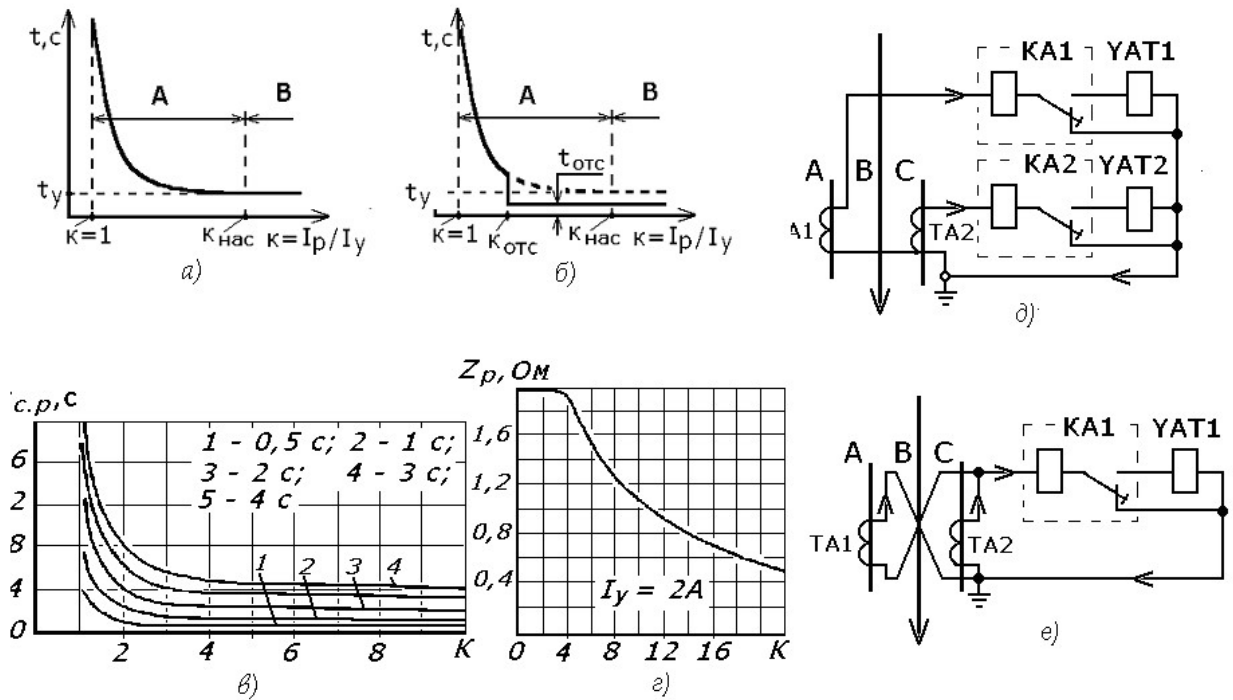


Рисунок 3.4 – Времятоковые характеристики реле типа РТ-80 а) – в), г) зависимость сопротивления реле от тока; д) и е) схемы его включения

Якорь 10 с электромагнитом 1 образует электромагнитный элемент реле — отсечку, который обеспечивает срабатывание реле практически без выдержки времени (рисунок 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 рисунок 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 рисунок 3г.

Реле типов РТ-81 - РТ-84 без переключающихся контактов (рис. 4.3г) 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 (рисунок 3.4, е).

Конструкция контактов усиленной мощности (главные контакты) и принцип их работы поясняются на рисунок 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 (рисунок 3.4з).

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 (рисунок 3.3з), 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 времятоковой 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 задача 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 рисунок 3.4в приведены времятоковые характеристики реле РТ-81, РТ-83 и РТ-85, а на рисунок 3.4б - 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 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 различного вида.

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 рисунок 3.4д приведен вариант принципиальной схемы двухфазной двухрелейной максимальной токовой защиты на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнитов отключения YAT1

и УАТ2 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 (рисунок 3.4e), 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 ВМП-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-1). 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 рисунок 4d, e основана на том, что при возникновении короткого замыкания на поврежденном объекте и после соответствующей отработки реле КА, его контакты дешунтируют катушку УАТ (рисунок 3.3в). Через нее проходит ток I_p , УАТ (РТМ) срабатывает и отключает выключатель.

$$I_{сз} = \frac{k_{отс} \cdot k_{зан} \cdot k_{сх}^{(3)}}{k_{\epsilon}} \cdot I_{раб. max} \quad (3.1)$$

Ток срабатывания МТЗ выбирается по выражению

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

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 достигать до 5.

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

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

$k_{сх}^{(3)}$ – 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 рисунке 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 $t_{с.з} = f(I_{\text{перв}})$, 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 времятоковыми характеристиками высоковольтных предохранителей (ПК на рисунке 5), которыми защищаются потребительские силовые трансформаторы Т напряжением 6–10/0,4 кВ.

2 Аппаратура 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, измеритель Ф291.

4 Методика и порядок выполнения работы

4.1 Определение токов срабатывания и возврата реле РТ-85

На шкале токов устанавливают минимальное значение тока уставки индукционного элемента, отсечку из действия выводят установкой винта 11 (рисунок 3.3а) в положение, создающее максимальный зазор. Значение уставки по шкале времени принимают максимальное.

Собрать схему для проведения экспериментов (рисунок 3.5).

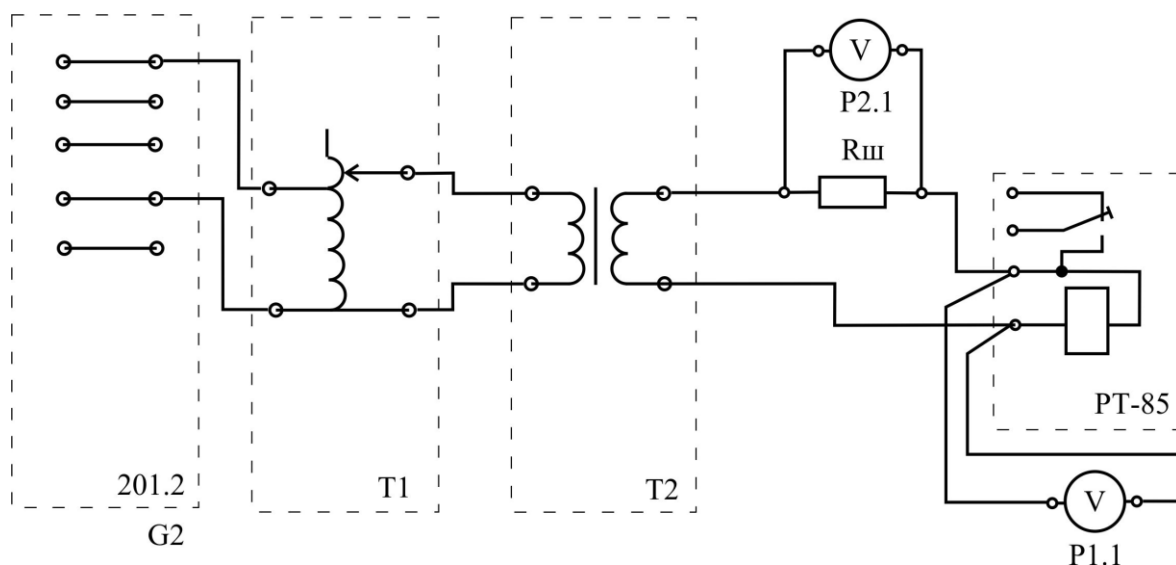


Рисунок 3.5 – Схема для измерения тока срабатывания и тока возврата.

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 таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Результаты испытаний тока срабатывания реле

I_y, A	$I_{ср}, A$				I_v, A				K_v	$\Delta I_{ср}, \%$
	1 изм	2 изм	3 изм	Ср. зн.	1 изм	2 изм	3 изм	Ср. зн.		

По результатам опыта вычисляют коэффициент возврата $k_v = I_v / I_{ср}$, токовую погрешность $\Delta I_{ср} = 100 \cdot (I_{ср} - I_y) / I_y$ (%) и строят графики $I_{ср} = f(I_y)$; $k_v = f(I_y)$; $\Delta I_{ср} = f(I_y)$. Определить сопротивление обмотки реле для минимальной и максимальной уставки по току.

4.2 Исследовать времятоковые характеристики реле. Для этого собрать схему на рисунке 7.

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.

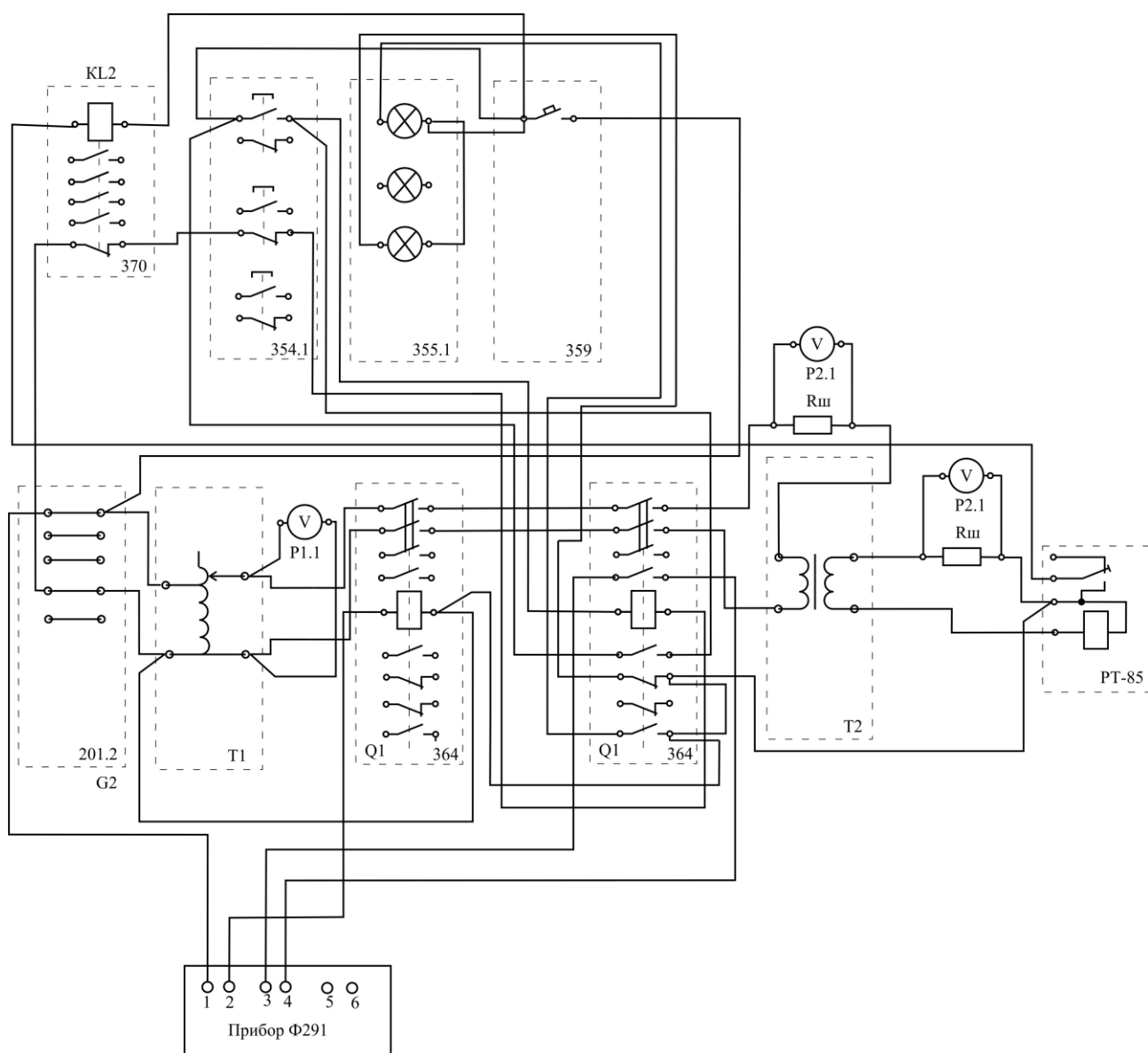


Рисунок 3.7 – Схема для измерения времятоковой характеристики

Содержание отчета и его форма

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.

5 Вопросы для защиты работы

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 ВБ? 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?

Лабораторная работа 4

ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И ЗАЗЕМЛЁННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Цель работы – изучение принципов функционирования защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью и защит от однофазного короткого замыкания на землю в сетях с заземленной нейтралью

1 Теоретическое обоснование

Выполнение токовой защиты нулевой последовательности сетей с глухозаземленной нейтралью. Защита обычно выполняется трехступенчатой. В случае недостаточной чувствительности она дополняется четвертой ступенью. Измерительными органами защиты являются реле тока, подключенные к фильтру тока нулевой последовательности. Использование тока нулевой последовательности в качестве воздействующей величины позволяет повысить чувствительность токовой защиты к коротким замыканиям на землю и уменьшить выдержку времени ее последней ступни. В радиальной сети с односторонним питанием (рисунок 4.1а) короткие замыкания на землю возникают на участках, ограниченных обмотками трансформаторов $T1—T3$, соединенных в звезду. При этом путь прохождения тока нулевой последовательности определяется заземленными нейтральями. В рассматриваемой схеме ток нулевой последовательности проходит по поврежденному участку через заземленную нейтраль трансформатора $T1$ и точку короткого замыкания. На линиях AB и BB и трансформаторах $T1 — T3$ установлены токовые защиты $A1—A5$ от междуфазных повреждений и токовые защиты нулевой последовательности $A_{01}—A_{05}$ от коротких замыканий на землю.

Рассмотрим токовую защиту нулевой последовательности A_02 линии AB . Расчет параметров ее первой и второй ступеней имеет много общего с расчетом первой и второй ступеней защиты от междуфазных КЗ $A2$.

Первая ступень защиты — токовая отсечка нулевой последовательности без выдержки времени. Ее ток срабатывания выбирается по условиям отстройки от максимального значения периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности $3 \cdot I_{0\text{вн max}}^{(m)}$, проходящего в месте установки защиты при коротких замыканиях на землю ($K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$) на шинах приемной подстанции B (точка $K_1^{(m)}$):

$$I_{сзA_02}^I = k_{отс}^I \cdot 3 \cdot I_{0\text{вн max}}^{(n)} \quad (4.1)$$

где $k_{отс}^I = 1,3$ при использовании реле РТ-40 для линий 110—220 кВ.

При этом токовая отсечка не должна срабатывать от токов нулевой последовательности, кратковременно появляющихся при одновременном включении фаз выключателя, например в цикле быстродействующего АПВ. Обычно в схеме защиты имеется выходное промежуточное реле, создающее замедление около трех-четырех периодов, поэтому отсечка оказывается отстроенной от этих токов по времени. Необходимо исключить также ложные срабатывания защиты в неполнофазном режиме, возникающем в цикле однофазного АПВ на защищаемой линии. Отстройка от уравнительного тока при качаниях не требуется, так как в нем нет составляющей тока нулевой последовательности. Преимущество токовой отсечки нулевой последовательности перед токовой отсечкой, включенной на полные токи фаз, — в ее большей защитоспособности. Она имеет большую защищаемую зону $\ell_{A_02}^I > \ell_{A_2}^I$ (рисунок 4.1б). Объясняется это тем, что ток нулевой последовательности $I_K^{(m)}$ (кривая 2) при перемещении точки КЗ вдоль линии AB

изменяется более резко, чем ток трехфазного короткого замыкания $I_K^{(3)}$ (кривая 1). Разный характер изменения токов является следствием неравенства сопротивления нулевой $Z_{0л}$ и сопротивления прямой последовательностей линии ($Z_{0л} > Z_{1л}$).

Вторая ступень защиты — токовая отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени. При выборе параметров защиты $I_{сзA_0,2}^{II}$ и $t_{сзA_0,2}^{II}$ необходимо осуществить отстройку от первой ступени A_{03} защиты нулевой последовательности линии $БВ$ и от защиты нулевой последовательности A_{04} трансформатора $T2$. Из сказанного следует, что для тока срабатывания должны выполняться условия

$$U_{oP} = I_o \cdot x_{o(H-P)} \quad (4.2)$$

где, $k_{отс}^{II} = 1,1$.

Из двух значений принимается большее. Выдержка времени, как и выдержка времени второй ступени токовой защиты, обычно не превышает 0,5 с.

Третья ступень защиты — максимальная токовая защита нулевой последовательности. Из рассмотрения схемы радиальной сети (рисунка 4.1а) следует, что при повреждениях на землю в точках K_2 и K_3 ток нулевой последовательности с высшей стороны трансформаторов $T2$ и $T3$ отсутствует, поэтому защиту A_{04} и A_{05} можно выполнить без выдержки времени ($t_{A_0,4}^{III} \approx 0$ и $t_{A_0,5}^{III} \approx 0$), а выдержки времени $t_{A_0,1}^{III}$; $t_{A_0,2}^{III}$ и $t_{A_0,3}^{III}$ защит A_{01} — A_{03} выбрать по ступенчатому принципу. На рис. 5.3в изображены также характеристики выдержек времени $t_{A1}^{III} - t_{A6}^{III}$ токовых защит $A1$ — $A6$. Из сопоставления характеристик следует, что токовую защиту нулевой последовательности можно выполнить более быстродействующей, чем токовую защиту с включением реле на полные токи фаз.

В нормальном режиме и при многофазных повреждениях в реле проходит только ток небаланса $I_{нб}$, поэтому ток срабатывания реле можно выбирать без учета рабочих токов по условию

$$I_{ср}^{III} > I_{нб.рсч} \quad (4.3)$$

При определении расчетного тока небаланса $I_{нб.рсч}$ следует иметь в виду, что он возрастает с увеличением первичного тока, достигая максимального значения при трехфазных коротких замыканиях. Поэтому в случае, когда $t_{A_02}^{III} \geq t_{A3}^{III}$ ток срабатывания реле защиты нулевой последовательности должен быть больше максимального тока небаланса при внешних трехфазных коротких замыканиях, для того чтобы исключить неселективное действие защиты. Расчет тока небаланса довольно сложен. С некоторыми допущениями он определяется, исходя из максимальной погрешности трансформаторов тока $\varepsilon = 10\%$ и с учетом коэффициента их однотипности $k_{одн} = 0,5 \dots 1,0$ по выражению

$$I_{нб.рсч} > I_{нб.рсч.мах} = k_{одн} (\varepsilon / 100) I_{к.вн.мах}^{(3)} / K_I \quad (4.4)$$

где $I_{к.вн.мах}^{(3)}$ — действующее значение установившегося тока внешнего трехфазного короткого замыкания при повреждении в начале следующего участка (для защиты A_{02} в точке $K_1^{(m)}$).

Ток установившегося режима короткого замыкания принимается потому, что защита действует с выдержкой времени, достаточной для затухания апериодической составляющей.

В тех случаях, когда выдержка времени защиты не превышает $t_{сз} = 0,3$ с, при определении тока небаланса $I_{нб.рсч}$ следует учитывать и апериодическую составляющую тока короткого замыкания коэффициентом $k_{ап}$:

$$I_{нб.рсч.мах} = k_{одн} k_{ап} (\varepsilon / 100) I_{к.вн.мах}^{(3)} / K_I \quad (4.5)$$

где $k_{ап} = 2$ при времени действия защиты до $I_{сз} = 0,1$ с и $k_{ап} = 1,5$ при $0,1 < t_{сз} < 0,3$ с.

В рассматриваемом случае при определении тока срабатывания реле коэффициент возврата $k_{в}$ не учитывается, так как при внешних многофазных коротких замыканиях измерительный орган защиты не срабатывает, а при отключении внешних коротких замыканий на землю, при возникновении которых реле может сработать, ток нулевой последовательности исчезает. Таким образом,

$$I_{с.р}^{III} = k_{отс}^{III} I_{нб.рсч\max}, \quad (4.6)$$

где $k_{отс}^{III}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность и необходимый запас.

Чувствительность защиты можно повысить, если принять $t_{A02}^{III} \gg t_{A3}^{III}$.

При этом внешние многофазные короткие замыкания отключаются со временем, меньшим времени действия токовой защиты нулевой последовательности. Поэтому достаточно ее ток срабатывания выбирать по расчетному току небаланса в нормальном режиме $I_{нб.рсч} = I_{нб.нрм}$. Ток $I_{нб.нрм}$ значительно меньше тока $I_{нб.рсч}$, поэтому при внешних многофазных коротких замыканиях измерительный орган защиты срабатывает. Для обеспечения возврата реле после отключения внешних коротких замыканий при выборе тока срабатывания учитывается коэффициент возврата $k_{в}$:

$$I_{с.р}^{III} = k_{отс}^{III} I_{нб.нрм} / k_{в} \quad (4.7)$$

В выражении (4.7) коэффициенты $k_{отс}^{III}$ и $k_{в}$ принимаются равными соответствующим коэффициентам максимальной токовой защиты с включением реле на полные токи фаз. Ток находят путем измерения; в зависимости от класса трансформаторов тока, однотипности их характеристик и нагрузки он находится в пределах $0,01 < I < 0,1$ А, т. е. ток

срабатывания защиты значительно меньше рабочих токов защищаемой линии. Таким образом, по сравнению с защитами, включенными на полные фазные токи, защита нулевой последовательности может иметь меньшие выдержки времени и повышенную чувствительность. В связи с этим она находит широкое применение в сетях с глухозаземленными нейтралями в качестве защиты от коротких замыканий на землю.

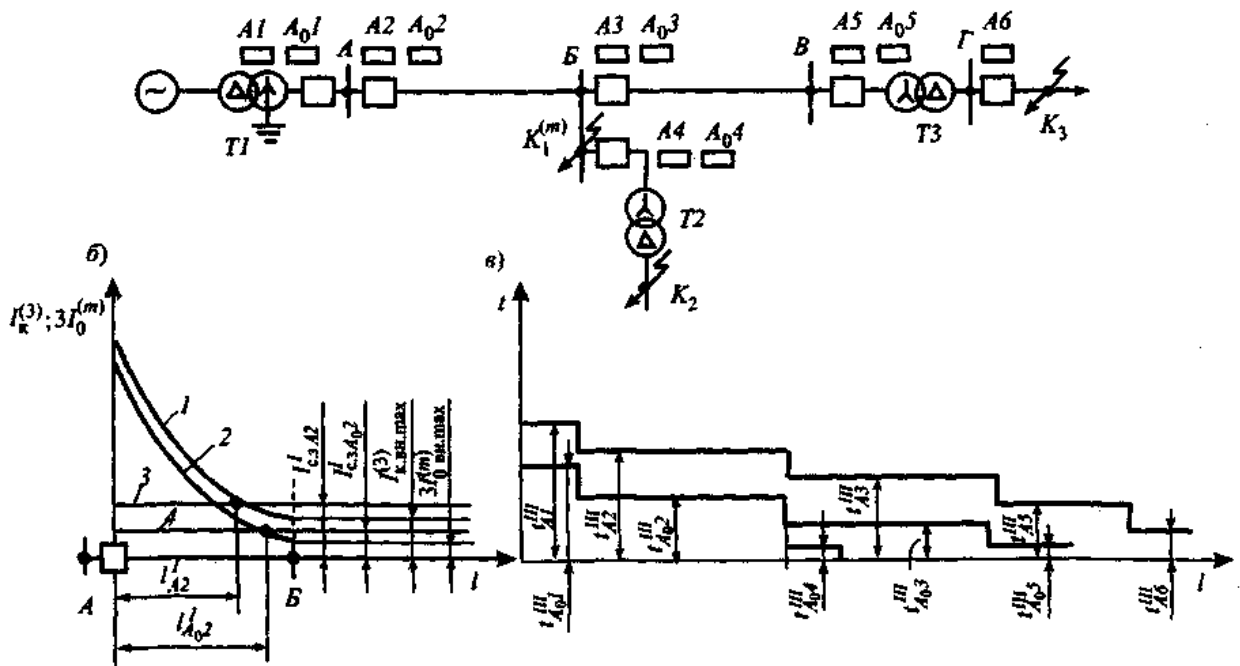


Рисунок 4.1 – Пояснение принципа работы защиты от однофазных коротких замыканий на землю: а) схема сети; б) зоны действия; в) карата селективности защит

Отметим, что для направленной защиты от однофазных КЗ в сетях с большими токами замыкания на землю, ИОНТ должен определять направление мощности нулевой последовательности. Для этого к соответствующему реле КВ должны быть подведены напряжение нулевой последовательности \underline{U}_0 и ток \underline{I}_0 нулевой последовательности. Угол максимальной чувствительности у реле направления мощности нулевой последовательности принимается равным $\varphi_{м.ч} = 2\pi / 3$.

ТНЗ нулевой последовательности не имеет мертвой зоны.

Пример схемы направленной токовой защиты на постоянном оперативном токе для линии 110 кВ и выше. На рисунке 4.2 приведена функциональная схема (а) трехступенчатой направленной токовой защиты для линии электропередачи системы с большими токами замыкания на землю (*система с глухозаземленной нейтралью*), схема цепей тока (б) и соединений обмоток измерительного трансформатора напряжения TV (в), схема цепей напряжения защиты (г), а также цепей оперативного тока защиты (д). На рисунке под измерительными органами тока ИОТ ступеней защиты в общем случае следует понимать соответствующие реле тока КА, а под измерительным органом направления тока ИОНТ – соответствующие реле направления мощности КW. Схема включает три ступени токовой направленной защиты от междуфазных КЗ (реле тока КА1-КА6, реле направления мощности КW1, КW2, при этом соответствующие их обмотки тока и напряжения включены по так называемой 90-градусной схеме) и две ступени направленной токовой защиты от замыканий на землю (реле тока КА7, КА8 и реле направления мощности нулевой последовательности КW3).

При этом реле КА7 является пусковым органом комплекта первой ступени токовой защиты нулевой последовательности, а реле КА8 – пусковым органом третьей ступени. Группа из трех трансформаторов тока ТА для токовых реле КА7 и КА8 и токовой обмотки реле КW3 образует схему соединения, обеспечивающую при однофазном КЗ $K^{(1)}$ протекание через эти обмотки утроенного тока нулевой последовательности $3 \cdot \underline{I}_0$, т. е. схему фильтра тока нулевой последовательности.

Утроенное напряжение нулевой последовательности $3 \cdot \underline{U}_0$ получают от группы вторичных обмоток трансформатора напряжения TV (рисунок 4.2в), соединенных в открытый треугольник (*фильтр напряжения нулевой последовательности*

В схеме предусмотрена блокировка действия защиты от междуфазных КЗ при возникновении в системе однофазного КЗ $K^{(1)}$ (см. на рисунок 4.2д назначение реле КА8 и KV и их размыкающихся контактов).

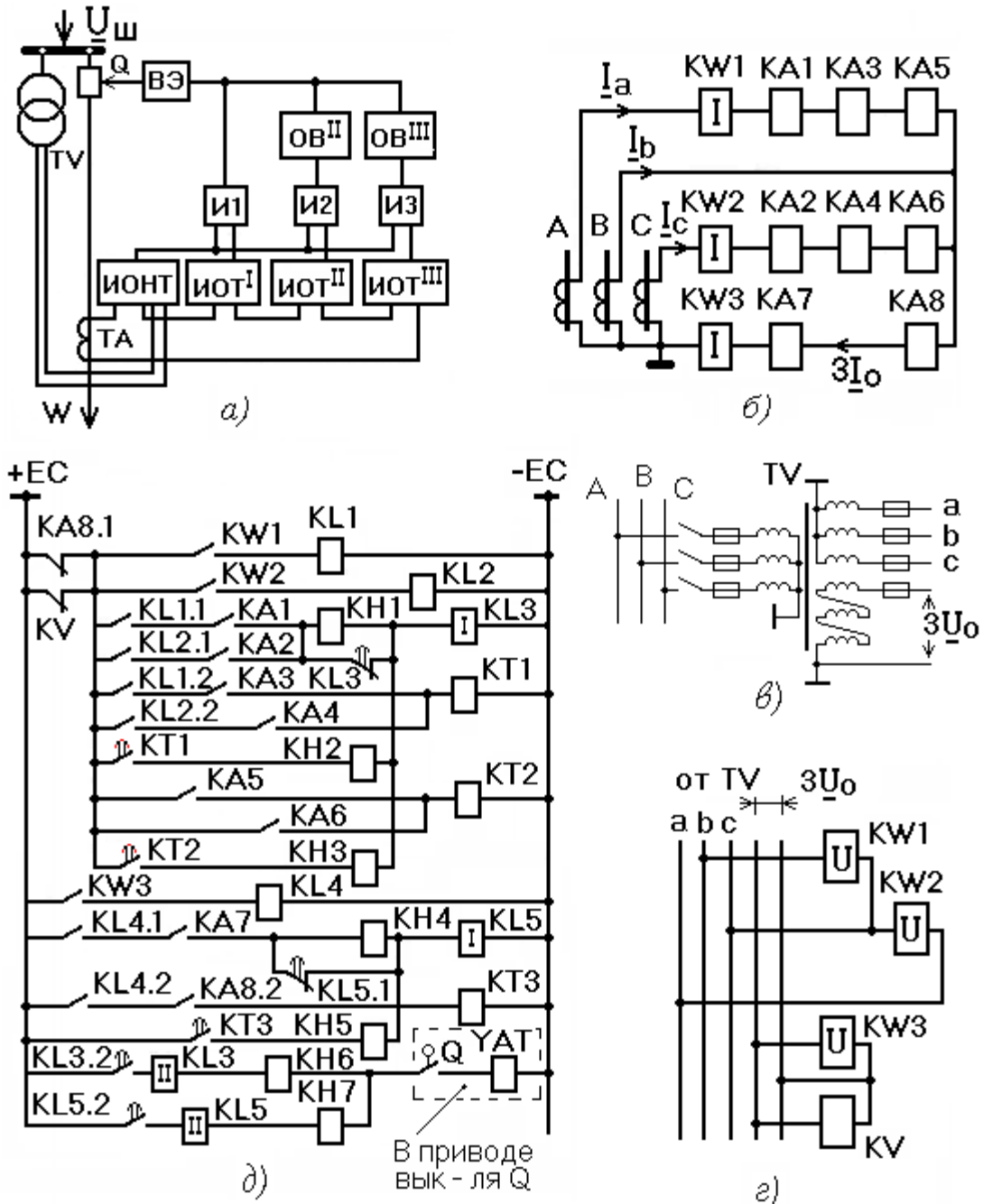


Рисунок 4.2 – Токвая направленная защита нулевой последовательности: а) структурная схема; б) схема токовых цепей; в) схема цепей напряжения; г) схема подключения цепей напряжения реле направления мощности; д) логическая и исполнительная часть

Линейные напряжения \underline{U}_{bc} и \underline{U}_{ca} получают от вторичных обмоток измерительного трансформатора TV, соединенных в звезду (рисунок 4.2в).

Подробное описание схемы трехступенчатой токовой защиты (рисунок 4.2) приведено в учебной литературе и рекомендуется ее работу изучить самостоятельно. Обращаем внимание на следующее. НТЗ благодаря органу направления мощности действует только тогда, когда защита «видит» точку КЗ, что равносильно тому, что действие контактов реле KW и реле КА определяется логической схемой И (рисунок 4.2а), т. е. в упрощенном варианте можно считать, что контакты этих реле соединены по схеме $+ \begin{array}{c} \text{KW} \quad \text{KA} \\ \text{---} \quad \text{---} \\ \text{---} \end{array} \rightarrow$. Постарайтесь разобраться, как это реализовано в схеме защиты (рисунок 4.2д).

Направленные токовые защиты согласуются между собой по времени срабатывания по встречно ступенчатому принципу. С этим вопросом можно познакомиться по литературе.

Так как правильное функционирование направленной защиты зависит от наличия подводимого к ней напряжения от измерительного трансформатора TV, то в схемах защиты уделяется особое внимание контролю наличия этого напряжения.

Поэтому в полной схеме защит предусматривается схема контроля целостности цепей напряжения, выдаваемых трансформатором напряжения TV. С вариантами контроля цепей напряжения можно познакомиться по литературе.

В заключение отметим, что в настоящее время в энергосистемах начинают использоваться токовые защиты и направленные токовые защиты, реализованные на микропроцессорной технике.

Защита линий от замыканий на землю в сети с изолированной и компенсированной нейтралью.

Однофазные замыкания на землю являются наиболее частым видом замыканий в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью (обычно сети с напряжением до 35 кВ).

Ввиду сохранения при замыкания на землю всех линейных напряжений, функционирование элементов сети в этом режиме почти всегда определенное время допускается. Однако необходимо выявление и отключение данного повреждения, прежде всего потому, что потенциал неповрежденных фаз относительно земли возрастает до линейного напряжения (рисунок 4.3б) и увеличивается вероятность пробоя изоляции этих фаз.

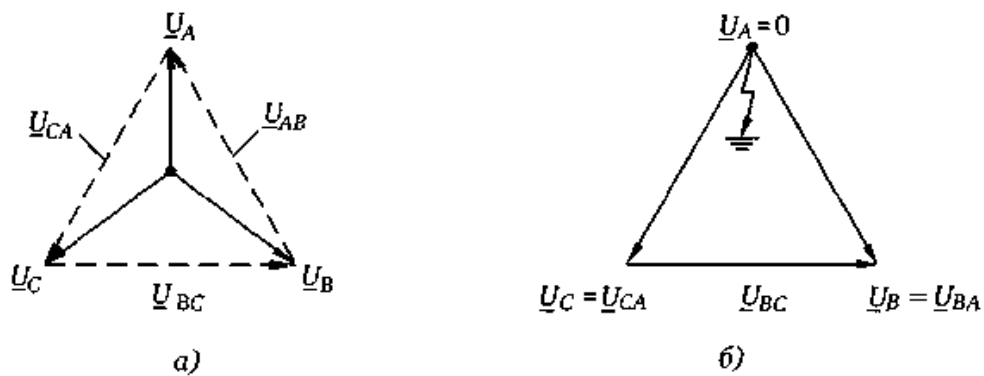


Рисунок 4.3 – Напряжения в сети с изолированной нейтралью: а) – нормальный режим; б) – однофазное замыкание на землю

Сеть с изолированной нейтралью.

Протекание токов при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью (заземляющий элемент Z_g не подсоединен) иллюстрирует рис. 5.6.

На рисунке 4.4 показана защищаемая линия с суммирующим трансформатором TA и защитой S в начале линии. Все остальные элементы сети, подключенные к шинам, замещаются другой линией.

При замыкании на землю K_1 фазы A на защищаемой линии (рисунок 4.4а), потенциал фазы A как защищаемой линии, так и всех электрически связанных с ней элементов становится нулю, а потенциалы «здоровых» фаз B и C увеличиваются до линейного напряжения (рисунок 4.4б). Каждая из фаз ЭС обладает определенной емкостью относительно земли ($C_{л}$ — емкость защищаемой линии, C_{Σ} эквивалентная емкость остальных элементов).

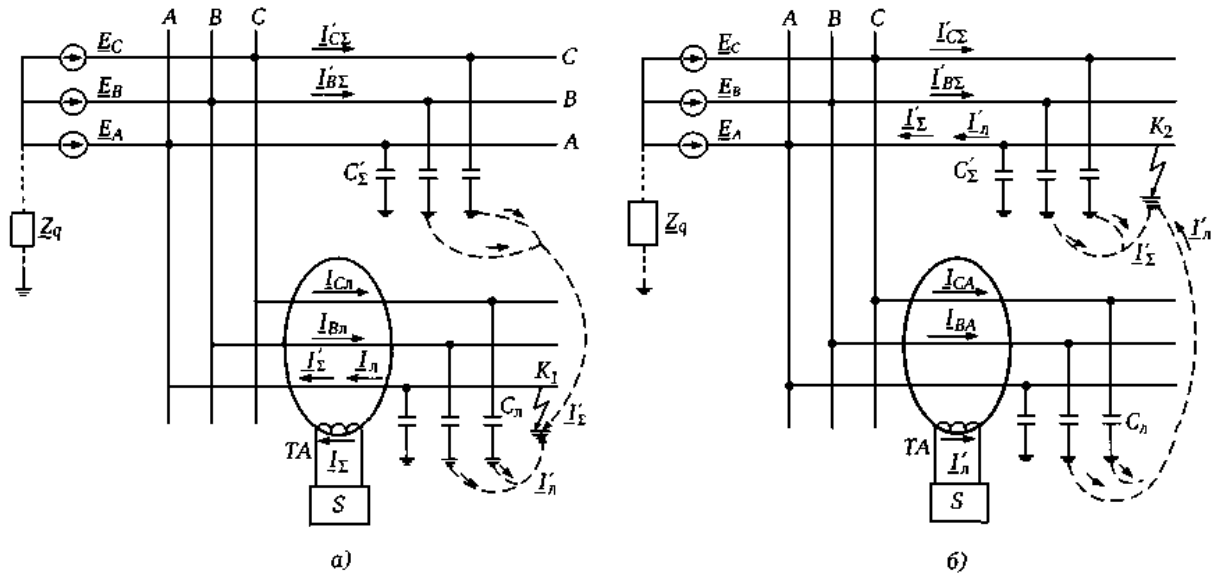


Рисунок 4.4 – Схема сети с изолированной нейтралью: а) замыкание на линии; б) внешнее замыкание

С учетом этого, потенциал фаз шин B и C относительно земли соответственно равен: $\underline{U}_B = \underline{E}_B - \underline{E}_A = a^2 \underline{E}_A - \underline{E}_A$; $\underline{U}_C = \underline{E}_C - \underline{E}_A = a \underline{E}_A - \underline{E}_A$

Емкостные токи $\underline{I}'_{B\Sigma}$ и $\underline{I}'_{C\Sigma}$ от эквивалентных внешних элементов равны:

$$\underline{I}'_{B\Sigma} = j\omega_0 C'_\Sigma (a^2 - 1) \underline{E}_A, \quad \underline{I}'_{C\Sigma} = j\omega_0 C'_\Sigma (a - 1) \underline{E}_A, \quad (4.8)$$

Результирующий емкостной ток $\underline{I}_{B\lambda}$ подтекает к точке замыкания K_1 на защищаемой линии.

Ток, вытекающий из точки K_2 и протекающий через защищаемую линию, имеет противоположную току \underline{I}'_Σ полярность (направление от линии к шинам на рисунок 4.4a). С учетом выражения (4.8) имеем

$$3\underline{I}'_0 = -\underline{I}'_\Sigma = (\underline{I}'_{C\Sigma} + \underline{I}'_{B\Sigma}) = 3j\omega_0 C'_\Sigma \underline{E}_A, \quad (4.9)$$

Емкостные токи $\underline{I}_{B\lambda}$ и $\underline{I}_{C\lambda}$, подтекающие от фаз поврежденной линии к месту замыкания K_1 соответственно равны

$$\underline{I}'_{B\Sigma} = j\omega_0 C_\Sigma (a^2 - 1) \underline{E}_A, \quad \underline{I}'_{C\Sigma} = j\omega_0 C_\Sigma (a - 1) \underline{E}_A, \quad (4.10)$$

а суммарный емкостной ток линии $\underline{I}'_{\Sigma} = \underline{I}'_{Bл} + \underline{I}'_{Cл}$ по знаку противоположен току $I_{л}$, протекающему к шинам по поврежденной фазе A . С учетом этого, в суммирующем трансформаторе TA емкостные токи поврежденной линии взаимно компенсируются (рисунок 4.4), так как $\underline{I}_{Bл} + \underline{I}_{Cл} + \underline{I}_{л} = 0$. Таким образом, при повреждении на защищаемой линии токовая защита нулевой последовательности, реагирующая на сумму токов отдельных фаз, измеряет сумму емкостных токов \underline{I}'_{Σ} по выражению (4.8), создаваемых всеми внешними по отношению к защищаемой линии элементами ЭС. При замыкании на землю K_2 на любом элементе ЭС вне рассматриваемой линии (рис. 5.6б) через трансформатор TA протекают только емкостные токи неповрежденных фаз линии. Утроенный ток нулевой последовательности, измеряемый защитой с учетом выражения (4.9) равен

$$3I_0 = (\underline{I}_{Cл} + \underline{I}_{Bл}) = 3j\omega_0 C_{л} \underline{E}_A, \quad (4.11)$$

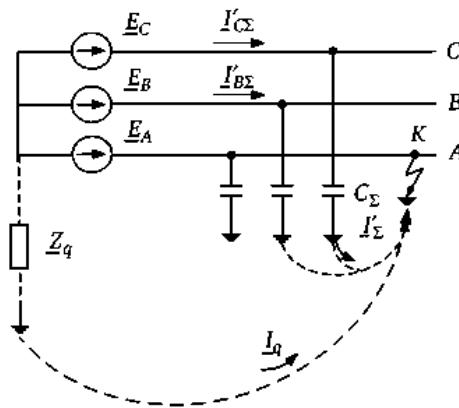


Рисунок 4.5 – К расчету токов однофазного замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью

С учетом изложенного, селективную защиту от замыканий на землю можно выполнить, обеспечив отстройку при внешних замыканиях от собственных емкостных токов линии по выражению (4.11). Однако необходимо вводить определенные коэффициенты запаса, учитывающие возможные броски емкостного тока при перемежающемся дуговым

замыкании. Также необходима отстройка от небаланса по току $3I_0$, обусловленного неидеальностью суммирующего трансформатора, например несимметричности геометрического расположения отдельных жил кабеля. С другой стороны, результирующий емкостной ток от внешних элементов по выражению (4.8), измеряемый защитой при замыкании на защищаемой линии, должен быть с запасом достаточен для срабатывания защиты. Таким образом, селективность защиты, определяемая различием емкостных токов при внешних и внутренних замыканиях на землю, обеспечится лишь при условии, что эквивалентная суммарная емкость внешних элементов существенно больше емкости защищаемой линии. Техническая реализация защиты в этом случае не имеет принципиальных отличий от реализации ступени максимальной токовой защиты с той разницей, что измеряется непосредственно ток $3I_0$.

Сеть с компенсацией емкостного тока. В общем случае для уменьшения емкостных токов замыкания на землю нейтраль системы подсоединяется к земле через индуктивное сопротивление \underline{Z}_q компенсирующее емкостное сопротивление сети при КЗ на землю. Данная сеть называется *компенсированной*. Возможно замыкание нейтрали на землю через активное сопротивление с целью распознавания и быстрого отключения замыканий на землю.

Протекающие в этом случае токи показаны на рисунке 4.5.

Так как потенциал нейтрали равен $-E_A$, ток, протекающий через сопротивление \underline{Z}_q при замыкании фазы A на землю, равен $I_q = -\underline{E}_q / \underline{Z}_q$. С учетом выражения (4.8) для емкостного тока, получим суммарный ток замыкания на землю, протекающий к точке K :

$$\underline{I}_{\Sigma q} = I_q + I_{\Sigma} = -\frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_q} - 3j\omega_0 C_{\Sigma} \underline{E}_A \quad (4.12)$$

В данном случае C_{Σ} — эквивалентная емкость всех элементов сети, включая и поврежденную линию. Если $Z_q = j\omega_0 L_q$ — индуктивное сопротивление заземляющей катушки, то выражение (4.12) примет вид:

$$\underline{I}_{\Sigma q} = j\underline{E}_A \frac{1}{\omega_0 L_q} - 3\omega_0 C_{\Sigma} \quad (4.12)$$

Указанное означает, что при условии полной компенсации

$$\frac{1}{\omega_0 L_q} = 3\omega_0 C_{\Sigma} \quad (4.13)$$

ток в месте замыкания на землю равен нулю. Практически же, учитывая составляющие токов, обусловленные активными составляющими сопротивлений линий (кабелей) и заземляющей катушки, незначительный ток в месте замыкания на землю протекает.

При полной компенсации сети с учетом (4.13) справедливо соотношение

$$\frac{j\underline{E}_A}{\omega_0 L_q} + 3j\omega_0 (C'_{\Sigma} + C_L) \underline{E}_A = 0 \quad (4.14)$$

где C'_{Σ} — эквивалентная емкость внешней сети; C_L — емкость защищаемой линии.

Измеряемый защитой ток при КЗ на защищаемой линии при наличии компенсации в этом случае с учетом выражения (5.11) равен

$$3I_0 = \frac{\underline{E}_A}{j\omega_0 L_q} + 3j\omega_0 C' \underline{E}_A \quad (4.15)$$

Преобразовав выражение (4.15), с учетом (4.14) получим, что измеряемый защитой ток при замыкании на землю в полностью компенсированной сети численно равен емкостному току защищаемой линии:

$$3\underline{I}_0 = -3j\omega_0 C_L \underline{E}_A = \underline{I}_L \quad (4.16)$$

В данном случае емкость внешней цепи уже не определяет, в отличие от выражения (4.8), измеряемый ток нулевой последовательности, который в этих условиях зависит только от емкости поврежденной линии. Таким образом, в компенсированной сети токовая защита, реагирующая только на ток нулевой последовательности, не может быть выполнена, так как при внешнем КЗ и КЗ на защищаемой линии значение тока одно и то же и равно емкостному току защищаемой линии.

Возможно, прежде всего для целей сигнализации, использовать при выявлении замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных сетях тот факт, что при КЗ на защищаемой линии защита измеряет суммарный ток всех оставшихся присоединений, в том числе и высшие гармонические составляющие в токе. Эти составляющие не компенсируются включением индуктивности в нейтраль трансформатора, вследствие чего их относительный уровень достаточно велик при замыканиях на землю на защищаемой линии.

2 Аппаратура и материалы

Исследование принципа функционирования дистанционной защиты линии электропередачи выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием нижеследующей аппаратуры:

Таблица 4.1 - Перечень аппаратуры, применяемой в экспериментах

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1, A6	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A2	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
A3	Линейный реактор	314.2	220/380 В; 50 Гц; 0,3 А; 0,3 Гн/10 Ом

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A4	Блок однофазных трансформаторов	347.1	3 х 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A5	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3×0...50 Вт;
A7	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A8	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
A9	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A10	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A11	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

3 Описание модели для проведения экспериментов.

Для защиты линий от коротких замыканий (КЗ) на землю (однофазных и двухфазных), применяется защита, реагирующая на ток и мощность нулевой последовательности. Необходимость специальной защиты от КЗ на землю вызывается тем, что этот вид повреждений является преобладающим, а защита, включаемая на ток и напряжение нулевой последовательности, осуществляется более просто и имеет ряд преимуществ по сравнению с токовой защитой, реагирующей на полные токи фаз. Защиты нулевой последовательности выполняются в виде токовых максимальных защит и отсеков как простых, так и направленных.

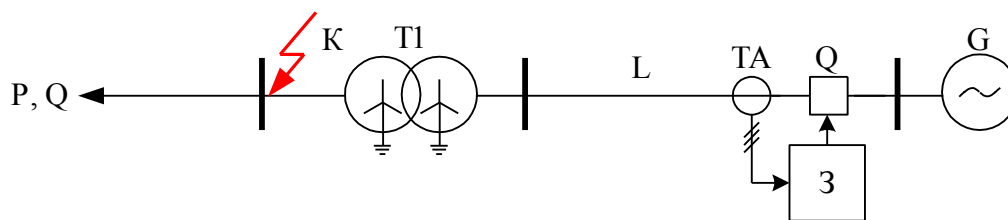


Рисунок 4.6 – Схема сети для проведения экспериментов

В данном эксперименте моделируется сеть с односторонним питанием, к которой через трансформатор подключены активная и индуктивная нагрузки P и Q (см. рисунок 4.6). Короткие замыкания различных видов устраиваются в точке K на шинах этих нагрузок. Около шин источника питания G в каждую фазу сети включен трансформатор тока ТА.

С помощью специальной программы на компьютере моделируется защита от замыканий на землю. Критерием ее запуска служит превышение суммой фиксируемых токов значения заданной уставки.

Правильно работающая защита должна срабатывать (вырабатывать сигнал на отключение выключателя Q) при однофазных и двухфазных замыканиях на землю и не должна срабатывать при трехфазных и двухфазных замыканиях.

4 Порядок выполнения работы

4.1 Описание электрической схемы соединений экспериментального стенда

Активная нагрузка, смоделированная блоком А5, подключена к трехфазному источнику питания G1 через последовательно соединенные трехфазную трансформаторную группу А4, линейный реактор А3, модель линии электропередачи А2 и трехполюсный выключатель А1.

Выключатель А6 включен параллельно активно-индуктивной нагрузке как короткозамыкатель.

В разрыв цепей фаз источника питания G1 включены трансформаторы тока блока А7 измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Вторичные обмотки трансформаторов тока блока А7 подключены к аналоговым входам коннектора А10, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода РСІ6024Е персонального компьютера А11.

Розетка «УПР.» трехполюсного выключателя А1 гибким кабелем подключена к розетке терминала А8, гнезда которого соединены с гнездами блока А9 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

Электрическая схема соединений

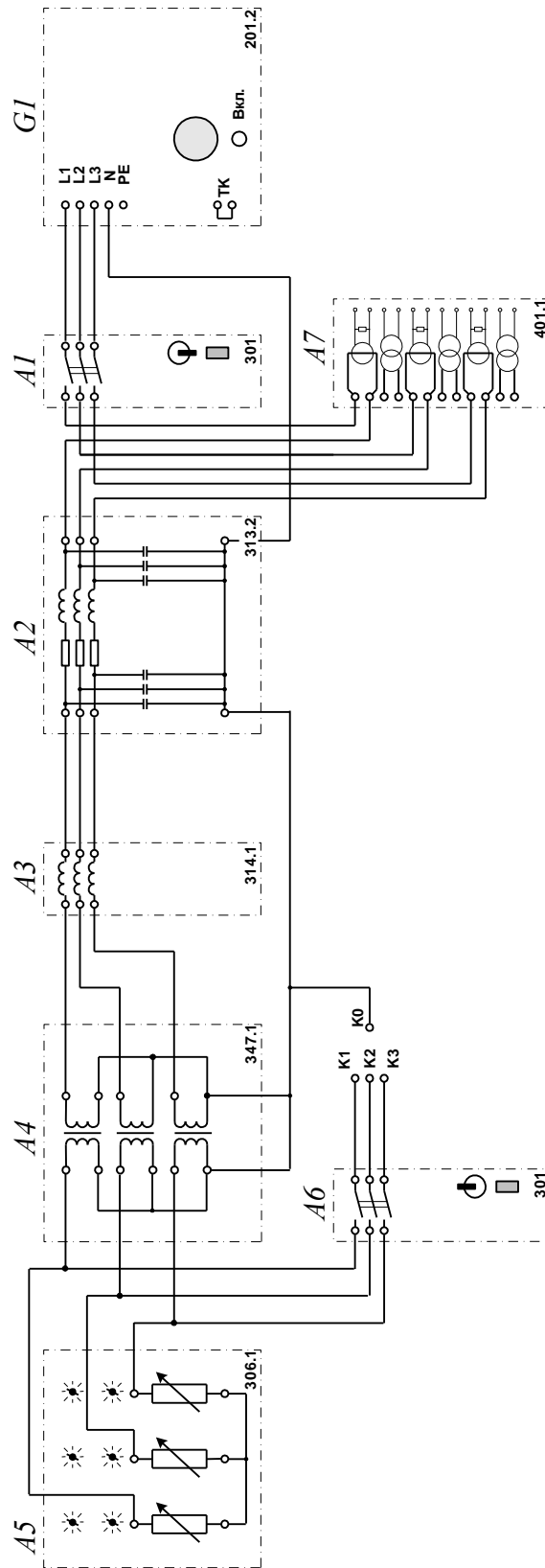


Рисунок 4.7 – Схема соединения блоков для проведения экспериментов

Продолжение электрической схемы соединений

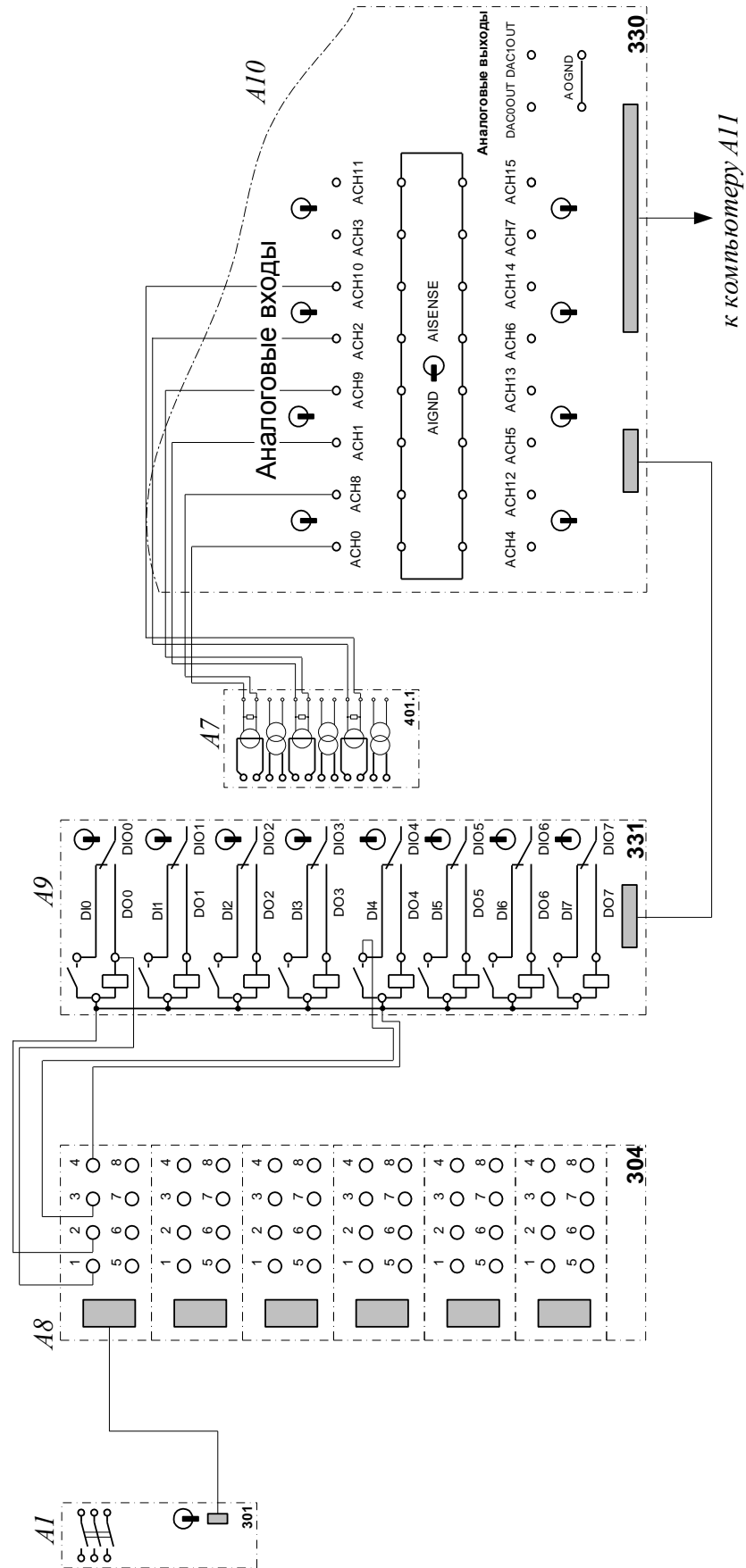


Рисунок 4.8 – Схема соединения измерительных и управляющих цепей для проведения экспериментов.

4.2 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 режимов работы трехполюсного выключателя A1 установите в положение «АВТ.», выключателя A6 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трехфазной трансформаторной группы A4 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линии электропередачи A2 переключателями установите, например, следующими: $R = 200 \text{ Ом}$, $L/R_L = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C1=C2=0 \text{ мкФ}$. Выберите мощность активной нагрузки A5, например 100% от 50 Вт в используемых фазах.
- Смоделируйте интересующий вид короткого замыкания. Например, для короткого замыкания фаз А и В на землю соедините клеммы K1, K2 и K0 между собой.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A1 и A6, а также блока A9 ввода-вывода цифровых сигналов.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A11, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Защита от замыканий на землю.exe».
- Задайте уставки защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.

- Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись»; введите защиту нажатием на соответствующую кнопку и непосредственно после этого смоделируйте короткое замыкание, включив выключатель А6. После отключения защитой «поврежденной» линии, либо в случае длительного (дольше, чем задано уставкой времени) не срабатывания защиты выведите ее из работы и остановите запись. Проанализируйте отображенные осциллограммы токов фаз и суммы токов фаз линии, состояние выключателя, а также информацию о последовательности произошедших событий в журнале работы защит, вызывать который можно нажатием на соответствующую кнопку.
- При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:
 - Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
 - Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
 - Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
 - На экране также отображается состояние выключателя А1.
 - Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.
 - Уставки токов и напряжений следует задавать амплитудными значениями.
 - При возникновении неправдоподобных результатов эксперимент следует повторить.
 - Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. 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 две 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 пяти 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 А1, А6, А9.

Содержание отчета и его форма

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. Необходимые рисунки.
3. Результаты проведения экспериментов в виде таблиц и графиков и расчетных данных.
4. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

5 Вопросы для защиты работы

1. Виды однофазных замыканий на землю в энергосистемах.
2. Работа сети с заземленной нейтралью
3. Работа сети с изолированной и компенсированной нейтралью.
4. Какими мероприятиями обеспечивается направленность токовой защиты нулевой последовательности
5. Как выбираются уставки защиты от однофазных коротких замыканий.

6. Понятие переходного сопротивления при коротких замыканиях и его влияние на работу токовой защиты нулевой последовательности.

7. Понятие угол максимальной чувствительности для реле направления мощности.

8. Процессы в электроэнергетических сетях, осложняющие работу токовых защит от однофазных коротких замыканий на землю.

9. Защиты в сетях с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю.

10. Защит от однофазных замыканий на землю по току нулевой последовательности.

11. Защит от однофазных замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности.

12. Защит от однофазных замыканий на землю по высшим гармоникам напряжения нулевой последовательности.

13. Резистивное заземление нейтрали.

14. Способы поиска однофазных замыканий на землю на воздушных линиях 6-20 кВ.

Лабораторная работа 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Цель работы – Ознакомление с принципом действия дистанционной защиты высоковольтной линии электропередачи

1 Теоретическое обоснование

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

$$Z_p = Z_{уд} \ell_k, \quad (5.1)$$

где $Z_{уд}$ — удельное сопротивление линии; l_k — расстояние до места короткого замыкания.

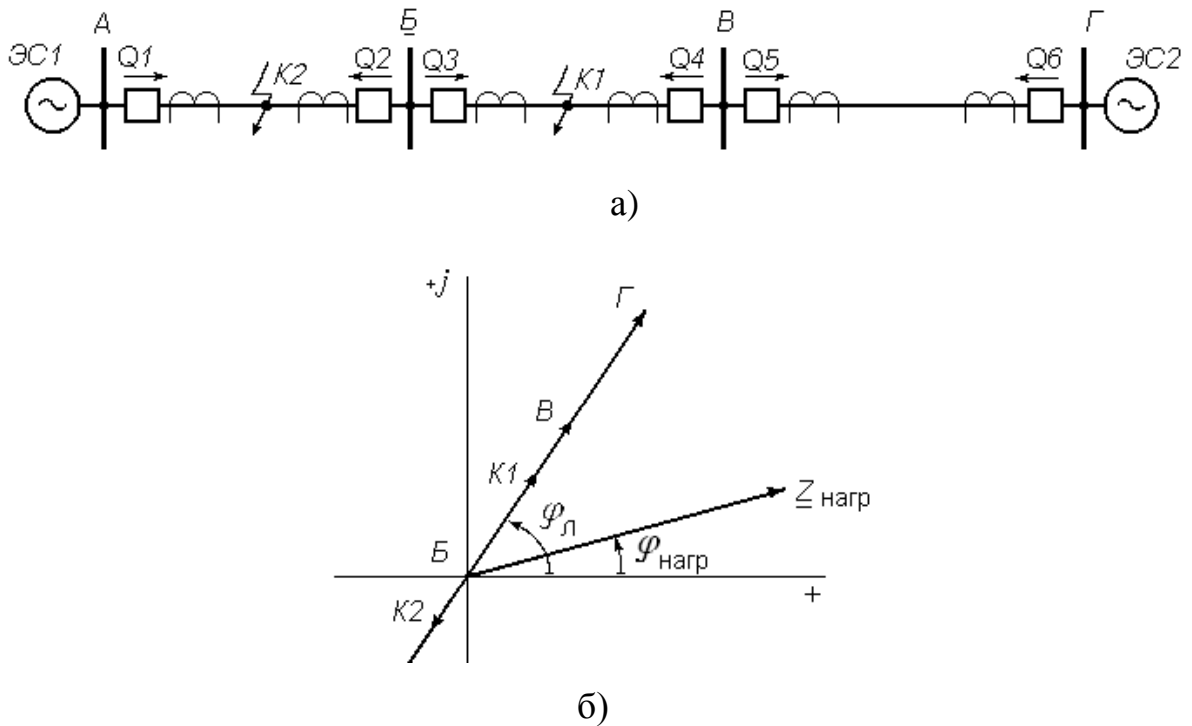


Рисунок 5.1 – Принцип действия дистанционной защиты: а) – схема сети; б) – векторная диаграмма

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 рисунок 5.1а) в комплексной плоскости при коротком замыкании в точке $K1$ есть вектор $BK1$ (рисунок 5.1б), сопротивление линии $BВ$ и суммарное сопротивление линий $BВ$ и $BГ$ — векторы $BВ$ и $BГ$, а сопротивление до точки $K2$ и линии $АБ$ — 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 рисунок 5.1б). Этот

вектор отличается от вектора сопротивления короткого замыкания не только по величине, но и по фазе, так как коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_{\text{нагр}} \approx 0,8—0,95$.

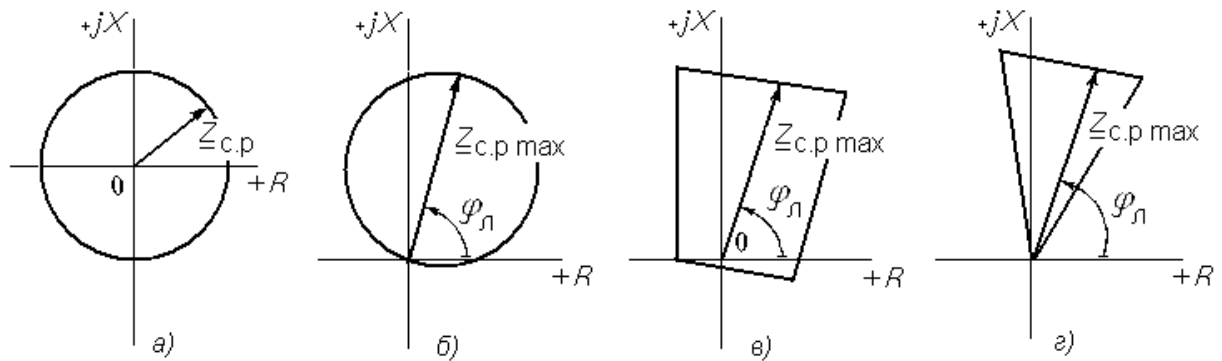


Рисунок 5.2 – Примеры характеристик реле сопротивления

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 (рисунок 5.2).

Характеристики на рисунок 5.2а 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 рисунок 5.2 в позволяет обеспечить чувствительность защиты при коротком замыкании через переходное сопротивление, а характеристика на рисунок 5.2г – оптимальным образом отстроить защиту от сопротивления нагрузки.

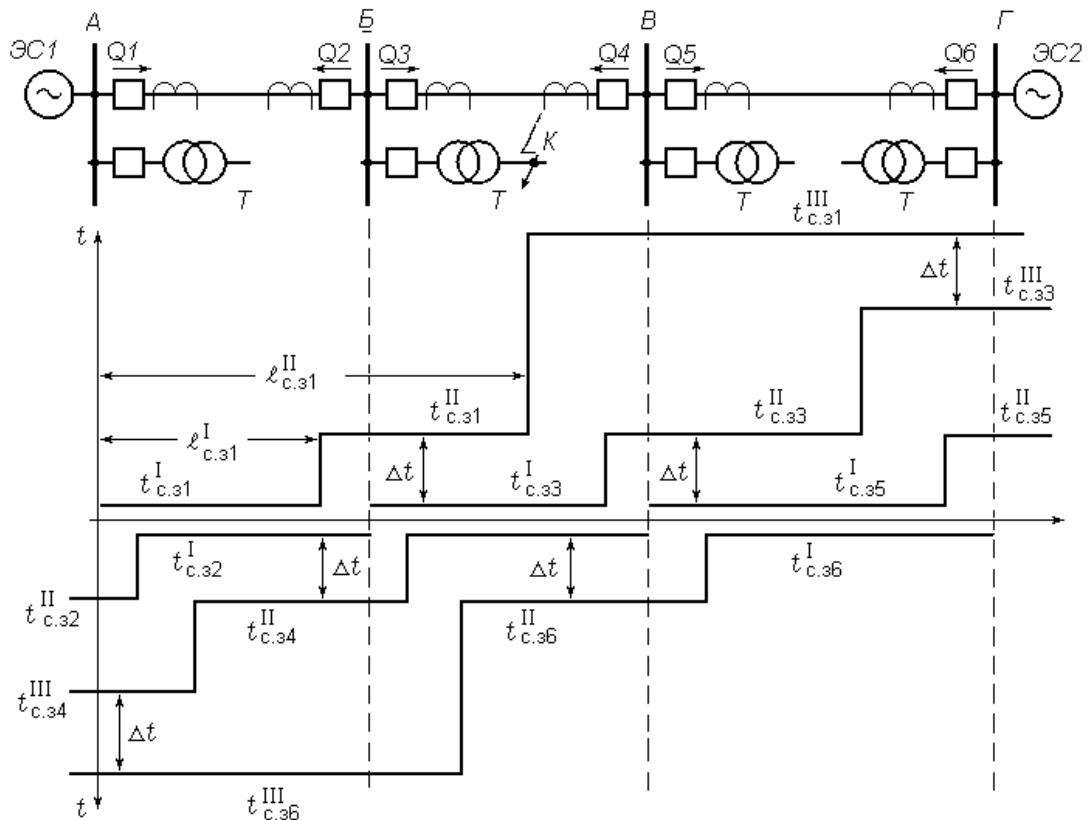


Рисунок 5.3 – Время срабатывания трехступенчатой направленной дистанционной защиты в электрической сети с двухсторонним питанием

Структура дистанционной защиты и принципы выбора уставок дистанционных защит. Дистанционная защита выполняется, как правило, трехступенчатой. Первая ступень не имеет выдержки времени (рисунок 5.3), а сопротивление срабатывания принимается несколько меньшим сопротивления защищаемой линии. Например, для защиты I линии AB $Z_{с.31}^I = k_{отс} Z_{AB}$

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 срабатывания первой ступени защиты смежной линии, а также от короткого замыкания за трансформатором приемной подстанции, например:

$$\begin{aligned} Z_{с.31}^{II} &= k_{отс} (Z_{AB} + k'_{отс} Z_{с.33}^I); \\ Z_{с.31}^{II} &= k_{отс} (Z_{AB} + k_T Z_T), \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $k_T = I_K / I_{K1}$ — 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. $t_{с.31}^{II} = t_{с.33}^I + \Delta t$ (рисунок 5.3).

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:

$$\begin{aligned} Z_{с.31}^{\text{III}} &\geq (Z_{AB} + Z_{BB})k_{\text{ч}}; \\ Z_{с.31}^{\text{III}} &\geq (Z_{AB} + k_{\text{T}}Z_{\text{T}})k_{\text{ч}}; \\ Z_{с.31}^{\text{III}} &\leq \frac{Z_{\text{раб. min}}}{k_{\text{отс}}k_{\text{в}}} \end{aligned} \quad (5.3)$$

где $k_{\text{ч}} > 1,2$ — коэффициент чувствительности; $k_{\text{в}} = Z_{\text{вр}}/Z_{\text{с.р}} = 1,1-1,15$ — 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 $\varphi_{\text{нагр}}$ (рисунок 5.1б).

Время срабатывания третьей степени защиты отстраивается от времени срабатывания третьей степени защиты смежной линии (рисунок 5.3).

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 быстроедействие 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 быстроедействием для обеспечения вывода защиты. В общем случае схемы строятся таким образом, что для действия защиты на отключение необходима информация БК и БН (рисунок 5.4).

Для защиты от междуфазных 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): $I_p = I_{2A} - I_{2B}$, $U_p = U_{2AB}$; напряжение подпитки от третьей фазы $U_{под} = U_{2C}$ 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): $\underline{I}_p = \underline{I}_{2C} - \underline{I}_{2A}$, $\underline{U}_p = \underline{U}_{2CA}$, $\underline{U}_{под} = \underline{U}_{2B}$.

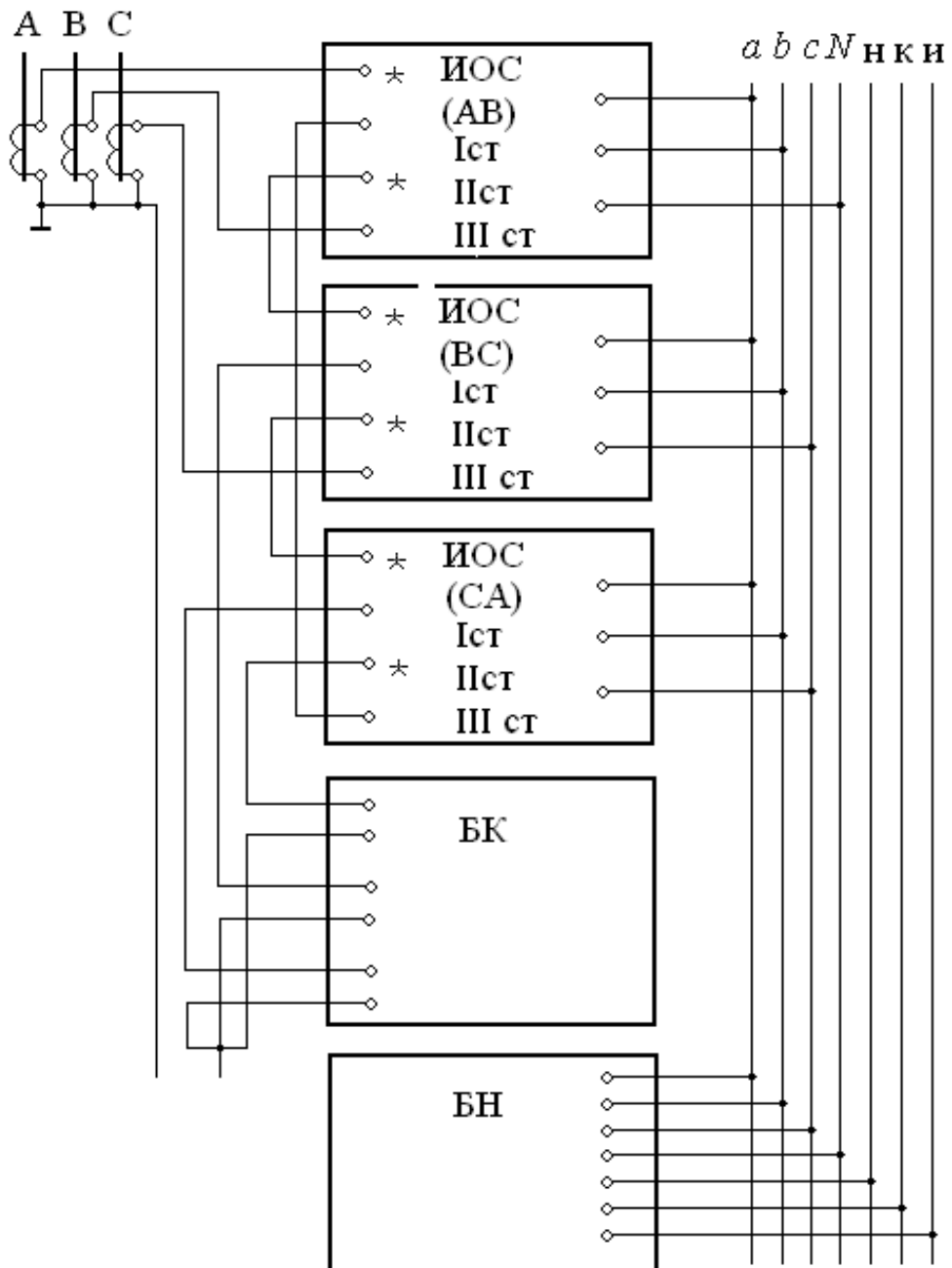


Рисунок 5.4 – Цепи тока и напряжения дистанционной защиты

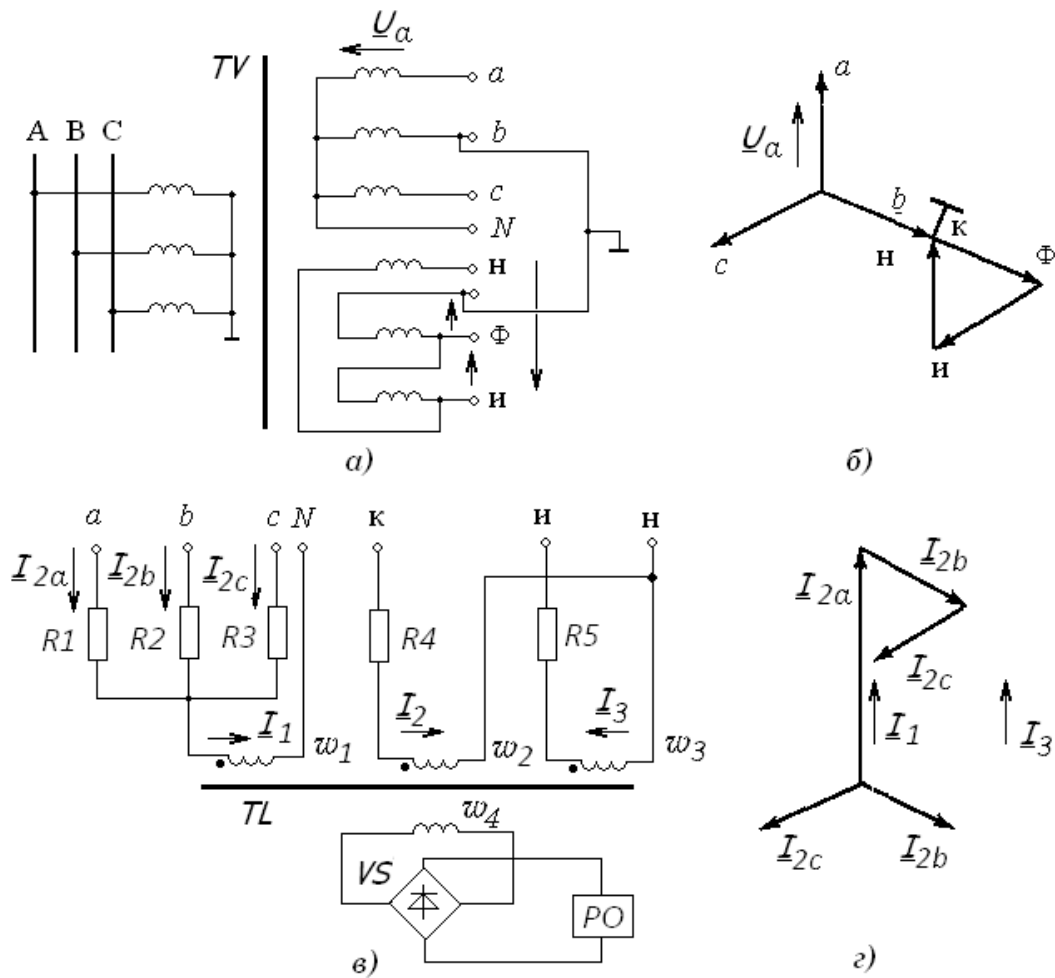


Рисунок 5.5 – Схема блокировки защит при неисправностях цепей напряжения: а) схема трансформатора напряжения, б) векторная диаграмма напряжений в нормальном режиме, в) реализация блокировки при неисправности цепей напряжения г) векторная диаграмма напряжений при повреждении

Блокировка при качаниях БК реагирует на приращение вектора тока (или напряжения) обратной последовательности.

Блокировка при неисправностях цепей напряжения БН выполнена в соответствии с рисунком 5.5. 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 защитам большую гибкость и универсальность. Это определяет их преимущественное применение как при выполнении защитных 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.

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 технике.

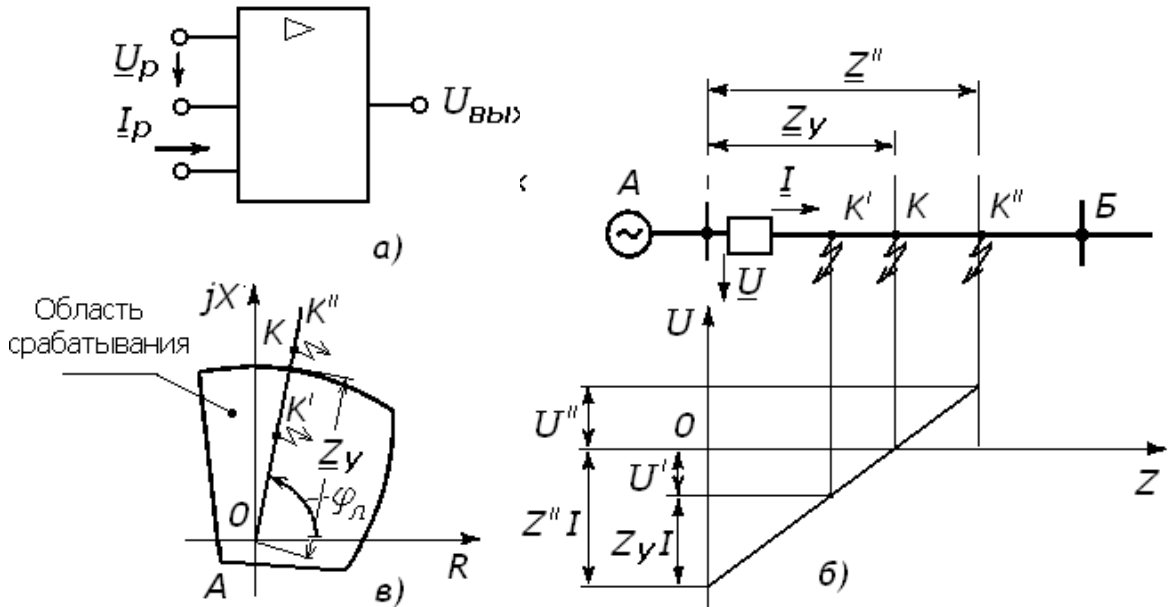


Рисунок 5.6 - Условное обозначение измерительного органа минимального сопротивления прямого действия (а); схема линии электропередачи и зависимость компенсированного напряжения от места КЗ (б), область характеристики срабатывания измерительного го органа (в)

На рисунок 5.6 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:

$$\underline{U}' = \underline{U}_p - \underline{Z}_y \underline{I}_p = \underline{I}_p (\underline{Z}_p - \underline{Z}_y), \quad 5.4$$

где $\underline{U}_p = \underline{I}_p \cdot \underline{Z}_p$ — остаточное напряжение в месте включения измерительного органа на шинах А (рисунок 5.6б) при коротком замыкании за сопротивлением \underline{U}_p , \underline{I}_p — ток в линии, подведенный от вторичных зажимов измерительных трансформаторов напряжения и тока; $\underline{Z}_y = \underline{Z}_{с.р}$ — сопротивление срабатывания, установленное в измерительном органе.

При перемещении точки КЗ через границу зоны (K' — в зоне срабатывания, K'' — вне зоны срабатывания), определяемой сопротивлением \underline{Z}_y (точка K), компенсированное напряжение \underline{U}' меняет фазу на угол π , а при $\underline{Z}_p = \underline{Z}_y$ 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}' , когда для срабатывания минимального ИО сопротивления достаточно выполнения условия (рис. 8.7а)

$$|\underline{U}_p| < |\underline{I}_p \underline{Z}_p| \quad (8.4)$$

При этом получается минимальный ИОПС с граничной характеристикой (характеристикой срабатывания идеального реле) $\underline{Z}_{гр} = \underline{Z}_{с.р}(\varphi_p)$, определяемой уравнением

$$\underline{Z}_{с.р} = (|\underline{U}_p| / |\underline{I}_p|)_{с.р} = \underline{Z}_y \cdot \quad (8.5)$$

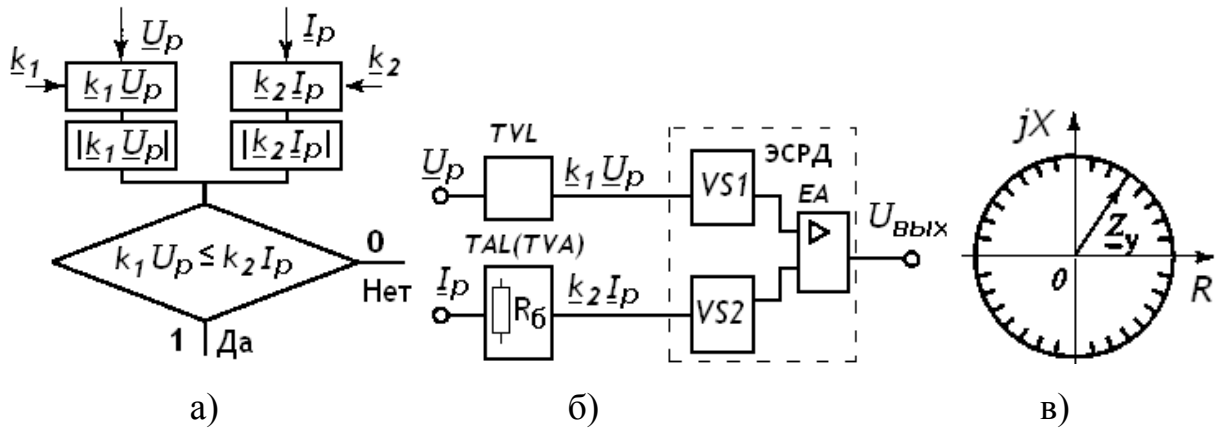


Рисунок 5.7 – Алгоритм (а), функциональная схема (б) и характеристика срабатывания (в) минимального измерительного органа полного сопротивления

Характеристика $Z_{c.p}(\varphi_p)$ в плоскости \underline{Z} — окружность с центром в начале координат (рисунок 5.7в).

При реализации алгоритма к элементу сравнения релейного действия ЭСРД, в частности состоящему из выпрямителей $VS1$, $VS2$ и релейного компаратора EA (рисунок 5.7б), 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 k_1 и k_2 – коэффициенты преобразования вторичных измерительных преобразователей.

Если k_1 обычно не имеет размерности (коэффициент трансформации K_U трансформатора или автотрансформатора напряжения TVL), то k_2 должен иметь размерность сопротивления. В качестве преобразователя применяются вторичные измерительные трансформаторы тока TAL , нагруженные балластным резистором R_6 , или трансреакторы TAV .

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 :

$$Z_p = Z_{c.p} = \left| \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} \right| = \frac{k_2}{k_1} = Z_y. \quad (5.7)$$

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 рисунку 5.2б можно познакомиться по учебной литературе.

2 Аппаратура и материалы

Исследование принципа функционирования дистанционной защиты линии электропередачи выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием нижеследующей аппаратуры:

Таблица 5.1 - Перечень аппаратуры, применяемой в экспериментах

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 x 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; 3x0...40 Вар;
A7	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3x0...50 Вт;
A8	Емкостная нагрузка	317.2	220/380 В; 50Гц; 3x0...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

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
			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

4.2 Описание модели для проведения экспериментов.

На основе компонентов, входящих в комплект универсального стенда создается экспериментальная модель из восьми последовательно соединенных линий электропередачи ($L1-L4, L1^{\setminus}-L4^{\setminus}$), питающихся с двух сторон от двух источников $G1, G2$ (см. рис.). К шинам этих линий подсоединены различные электрические нагрузки ($P, Q_L, Q_C, P^{\setminus}, Q_L^{\setminus}, Q_C^{\setminus}$). Выключатель Q включен между линиями $L4$ и $L4^{\setminus}$.

Существует возможность устраивать короткие замыкания в шести точках схемы ($K1, K2, K3, K1^{\setminus}, K2^{\setminus}, K3^{\setminus}$) на разных расстояниях и с разных сторон от выключателя Q (рисунок 5.8).

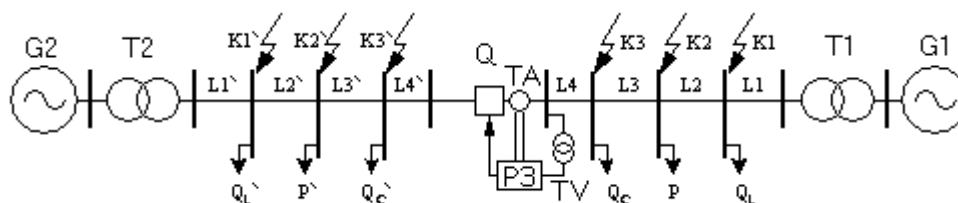


Рисунок 5.8 – Схема модели линии для исследования дистанционной защиты

Существует возможность устраивать короткие замыкания в шести точках схемы (K_1 , K_2 , K_3 , K_1' , K_2' , K_3') 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 РЗ, 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.

4 Порядок выполнения работы

4.1 Описание электрической схемы соединений экспериментального стенда

Электрическая схема соединений представляет собой замкнутую кольцевую сеть (рисунке 4.9), собранную в однофазном исполнении и образованную двумя последовательно соединенными моделями линий электропередачи A_2 и A_4 , фазы каждой из которых в свою очередь также соединены последовательно. Кроме того, в кольцевую сеть включены две фазы линейного реактора A_5 и выключатель A_3 , являющийся исполнительным органом моделируемой дистанционной защиты. Сеть получает питание от трехфазного источника G_1 через два однофазных трансформатора блока A_1 .

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.

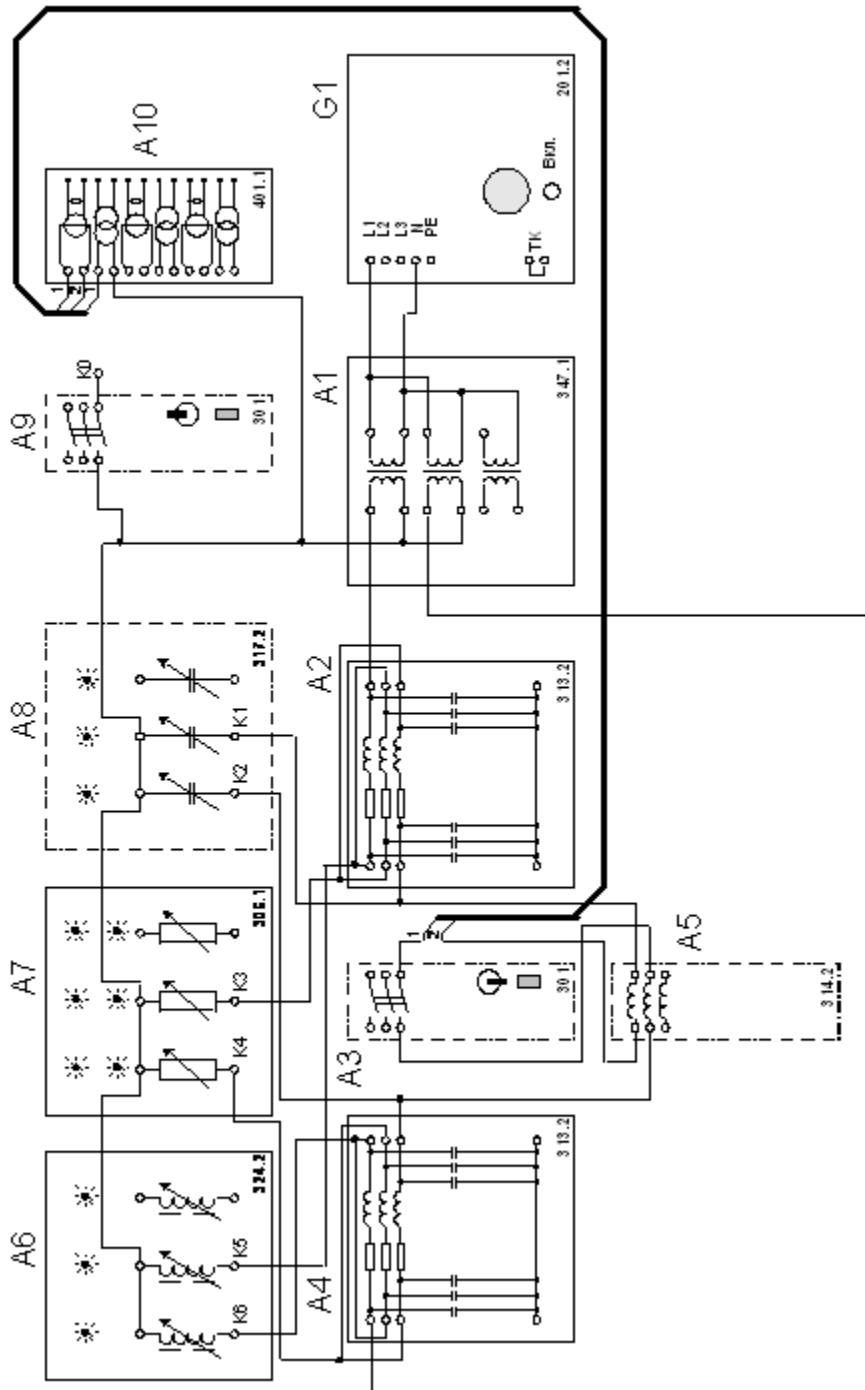


Рисунок 5.9 – Схема соединения блоков для проведения экспериментов

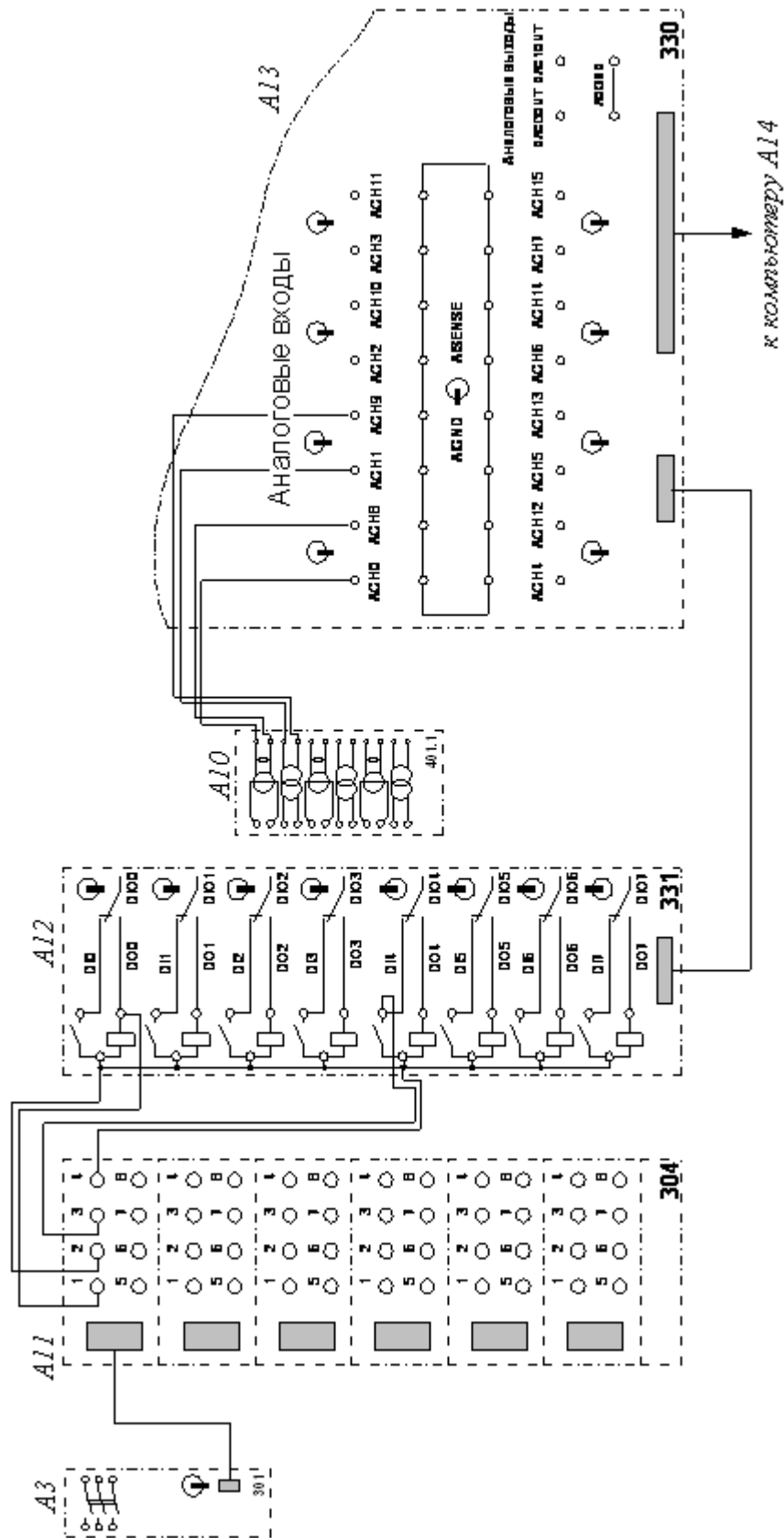


Рисунок 5.10 – Схема соединения измерительных и управляющих цепей для проведения экспериментов.

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 А3 фиксируются с помощью включенных в схему измерительных трансформаторов тока и напряжения блока А10.

Вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения блока А10 подключены к аналоговым входам коннектора А13, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода РСІ6024Е персонального компьютера А14.

Розетка «УПР.» трехполюсного выключателя А3 гибким кабелем подключена к розетке терминала А11, гнезда которого соединены с гнездами блока А12 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

4.2 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 А3 установите в положение «АВТ.», выключателя А9 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блока А1

выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линий электропередач А2 и А4 переключателями установите, например, следующими: $R = 100 \text{ Ом}$, $L/R_L = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C1=C2=0 \text{ мкФ}$.

- Выберите мощность активной нагрузки А7, например 10% от 50 Вт в первой фазе, 100% - во второй.
- Выберите мощность индуктивной нагрузки А6, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 80% - во второй.
- Выберите мощность емкостной нагрузки А8, например 20% от 40 Вар в первой фазе, 20% - во второй.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатели «**СЕТЬ**» выключателей А3, А9 а также блока А12 ввода-вывода цифровых сигналов.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер А14, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «*Дистанционная защита.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 АЗ, А9, А12.

Содержание отчета и его форма

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

Отчет должен содержать:

5. Название и цель работы.
6. Необходимые рисунки.

7. Кратко изложите назначение дистанционной защиты. Изложите назначение ее основных компонентов.

8. Приведите изменение положения вектора входного сопротивления линии при перемещении точки короткого замыкания вдоль линии и дайте пояснения.

9. Приведите краткие выводы и ответы по содержанию лабораторной работы.

10. Письменные ответы на выданные студенту индивидуальные вопросы из перечня вопросов для защиты лабораторной работы.

11. Самостоятельно, по учебной литературе изучить принципы построения схем и выбор уставок дистанционной защиты.

5 Вопросы для защиты работы

1. Принцип действия и назначение дистанционной защиты.

2. Измерительные органы дистанционной защиты

3. Реле сопротивления и их характеристики.

4. Какими мероприятиями обеспечивается направленность дистанционной защиты

5. Как выбираются уставки дистанционной защиты.

6. Понятие переходного сопротивления при коротких замыканиях и его влияние на работу дистанционной защиты.

7. Понятие угол максимальной чувствительности для дистанционной защиты.

8. Процессы в электроэнергетических сетях, осложняющие работу дистанционной защиты.

9. Устройство блокировки от качаний.

10. Признаки возникновения коротких замыканий на линии электропередач.

11. Принципы определения расстояния до места повреждений на линиях электропередач.
12. Понятие угол линии и его применение в дистанционной защите.
13. Обеспечение селективности ступеней дистанционных защит.
14. Понятие первичного и вторичного сопротивлений измерительных органов дистанционных защит.

Лабораторная работа 6

НАПРАВЛЕННАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Цель работы – Изучение некоторых принципов выполнения направленной токовой защиты. Изучение с конструкцией и методами проверок основных электрических характеристик реле направления мощности.

1 Теоретическое обоснование

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 (рисунок 6.1а). 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 (рисунок 6.1а) направление тока и мощности КЗ зависит от места возникновения повреждения и может иметь два противоположных значения. Как следует из рисунка 6.1а, 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.

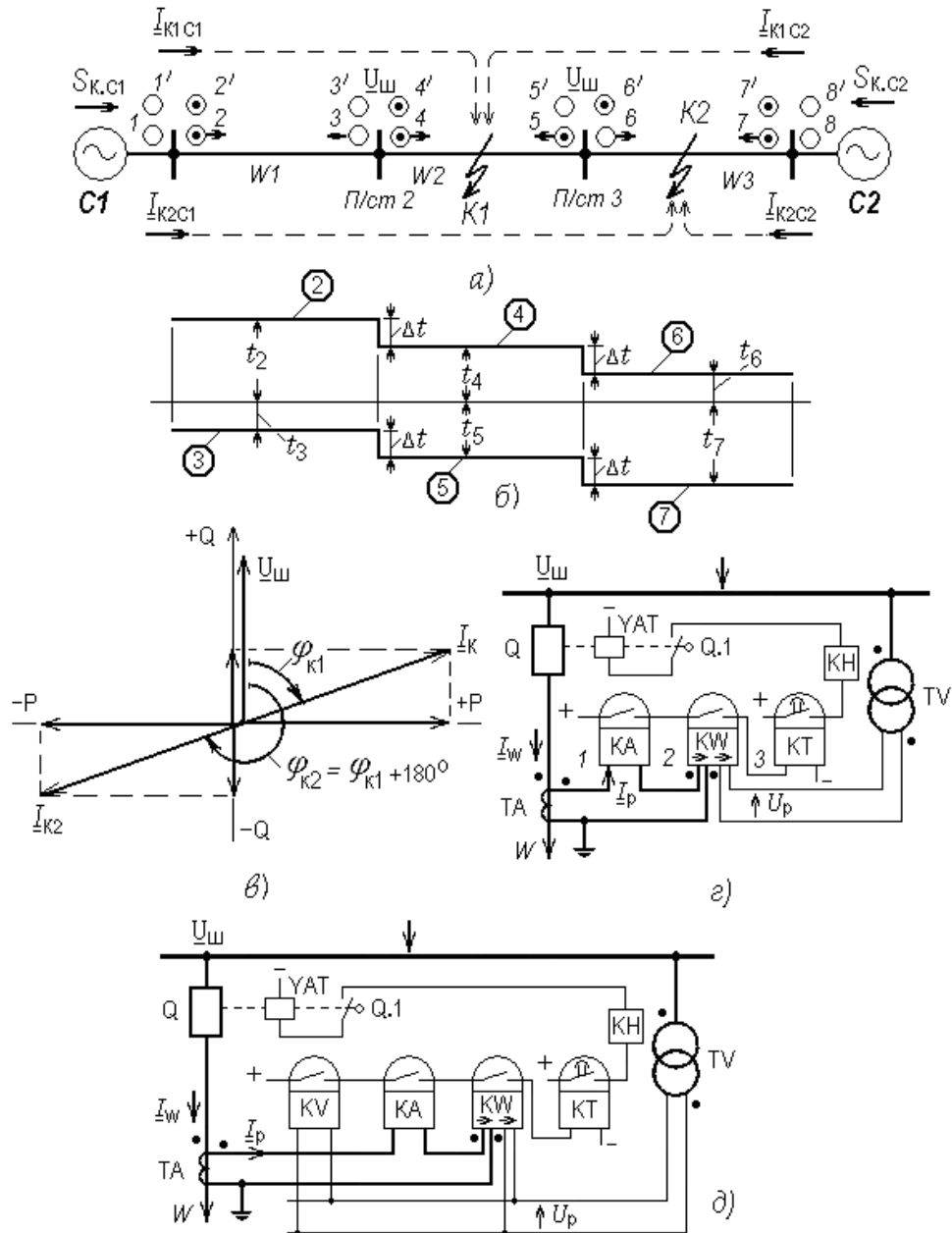


Рисунок 6.1 – Принцип работы токовой направленной защиты: а) схема сети, б) – карта селективности, в) векторная диаграмма, г) – структурная схема направленной токовой защиты, д) структурная схема направленной токовой защиты с пусковым органом по напряжению

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} (рисунок 6.1*в*) 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 рисунок 6.1*в*) 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 рисунке 6.1*б* показаны соотношения выдержек времени срабатывания защит $t_{с.з.}$, работающих при одном направлении мощности КЗ защит (от источника С1 или от источника С2). 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 рисунке 6.1*г* 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 $\underline{U}_{\text{ш}}$. ИОНТ еще называют реле направления мощности KW;

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

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:

$$S_p = U_p \cdot I_p \cdot \sin(\alpha + \varphi_p), \quad (6.1)$$

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 (рисунок 6.1з, д).

Сочетание углов α и φ_p , при котором выражение (6.1) имеет максимальное значение, т. е. $S_p = S_{p,\text{max}}$ соответствует условию максимальной чувствительности реле направления мощности.

Это имеет место при

$$\alpha + \varphi_p = 90^\circ, \text{ или } \alpha = 90^\circ - \varphi_p \quad (6.2)$$

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 (рисунок 6.1з). Через установленную выдержку времени $t_{\text{с.з}}$ его контакты замыкаются, подавая напряжение на катушку отключения YAT, которая и вызывает отключение выключателя Q.

При КЗ на других присоединениях, отходящих от данной подстанции, мощность КЗ направлена к шинам, поэтому контакты реле мощности КВ 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 КВ 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 $I_{H.max}$ максимальной нагрузки линии. В тех случаях, когда по условию чувствительности при КЗ токовые реле КА не удается отстроить от максимальной нагрузки $I_{H.max}$, применяется блокировка действия НМЗ от реле минимального напряжения КВ. Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения, приведенная на рисунок 6.10.

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 КВ, при КЗ защита может подействовать неправильно. Поэтому для своевременного выявления повреждения цепей напряжения, идущих от трансформатора

напряжения TU , в защите предусматривается специальная схема, контролирующая их исправность.

Обращаем внимание на особенности использования МНЗ 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 междуфазных замыканий. При $K^{(1)}$ МНЗ от междуфазных 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 (рисунок 6.12). При замыканиях на землю срабатывает это токовое реле срабатывает и свои размыкающимся контактом разрывает цепь запуска реле времени KT , лишая МНЗ от междуфазных 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 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 (рисунок 6.2 а).

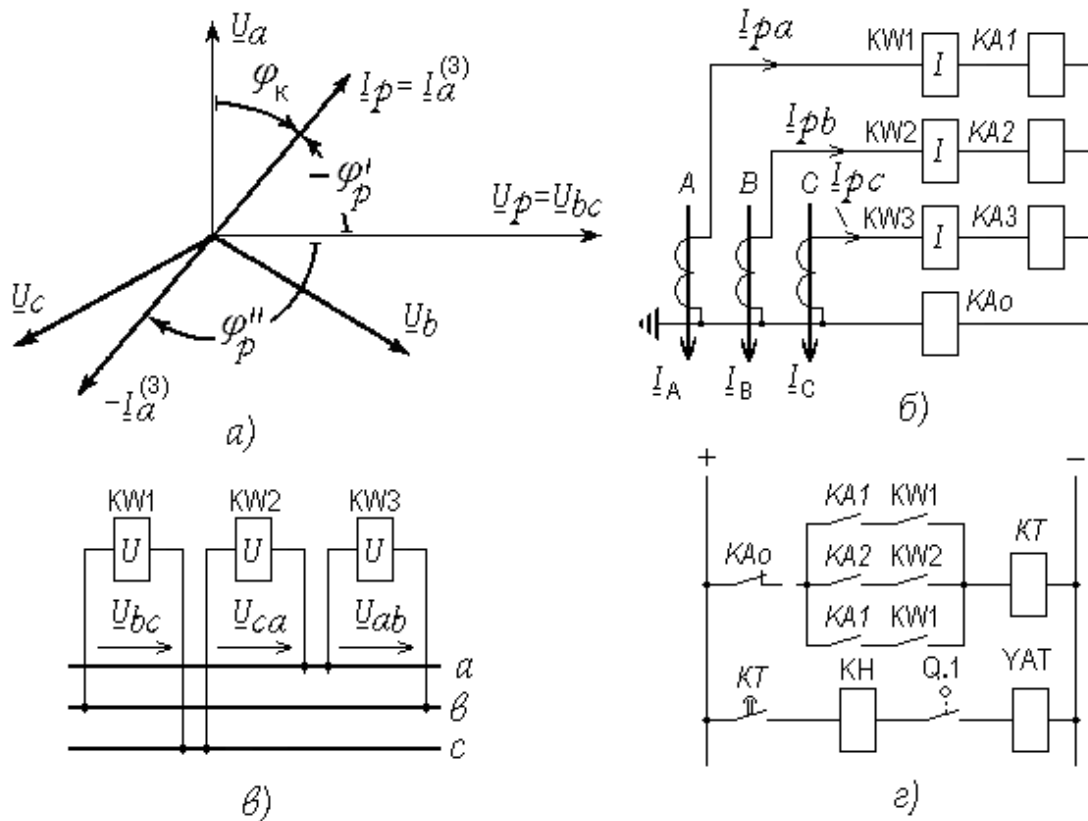


Рисунок 6.2 - 90-градусная схема включения реле направления мощности KW и развернутая схема МНЗ с ненаправленной блокировкой при замыкании на землю: а) векторная диаграмма, б) схема токовых цепей, в) схема цепей напряжения, г) схема логической и исполнительной части

Отметим, что схемы именуется 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 (рисунок 6.2а) за пределами «мертвой» зоны угол $\varphi_k^{(3)}$ изменяется от $\varphi_k^{(3)} = \pi/2$ при отсутствии переходного сопротивления до $\varphi_k^{(3)} = 0$, когда в месте повреждения имеется значительное активное переходное сопротивление $R_{\text{п}}$. 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 КВ 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 $R_{\text{п}}$, 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 (рисунок 6.2б, в):

– реле КВ1 – на сочетания $\underline{I}_p = \underline{I}_a, \underline{U}_p = \underline{U}_{bc}$;

– реле KW2 – на сочетание $\underline{I}_p = \underline{I}_b, \underline{U}_p = \underline{U}_{ca}$;

– реле KW3– на сочетание $\underline{I}_p = \underline{I}_c, \underline{U}_p = \underline{U}_{ab}$.

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

90–градусная схема включения реле KW 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;
– 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.

Индукционное реле направления мощности. Конструкция индукционного реле направления мощности серии РБМ-170 (РБМ-270) показана на рисунке 6.3а. 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 (рисунок 6.1з), 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

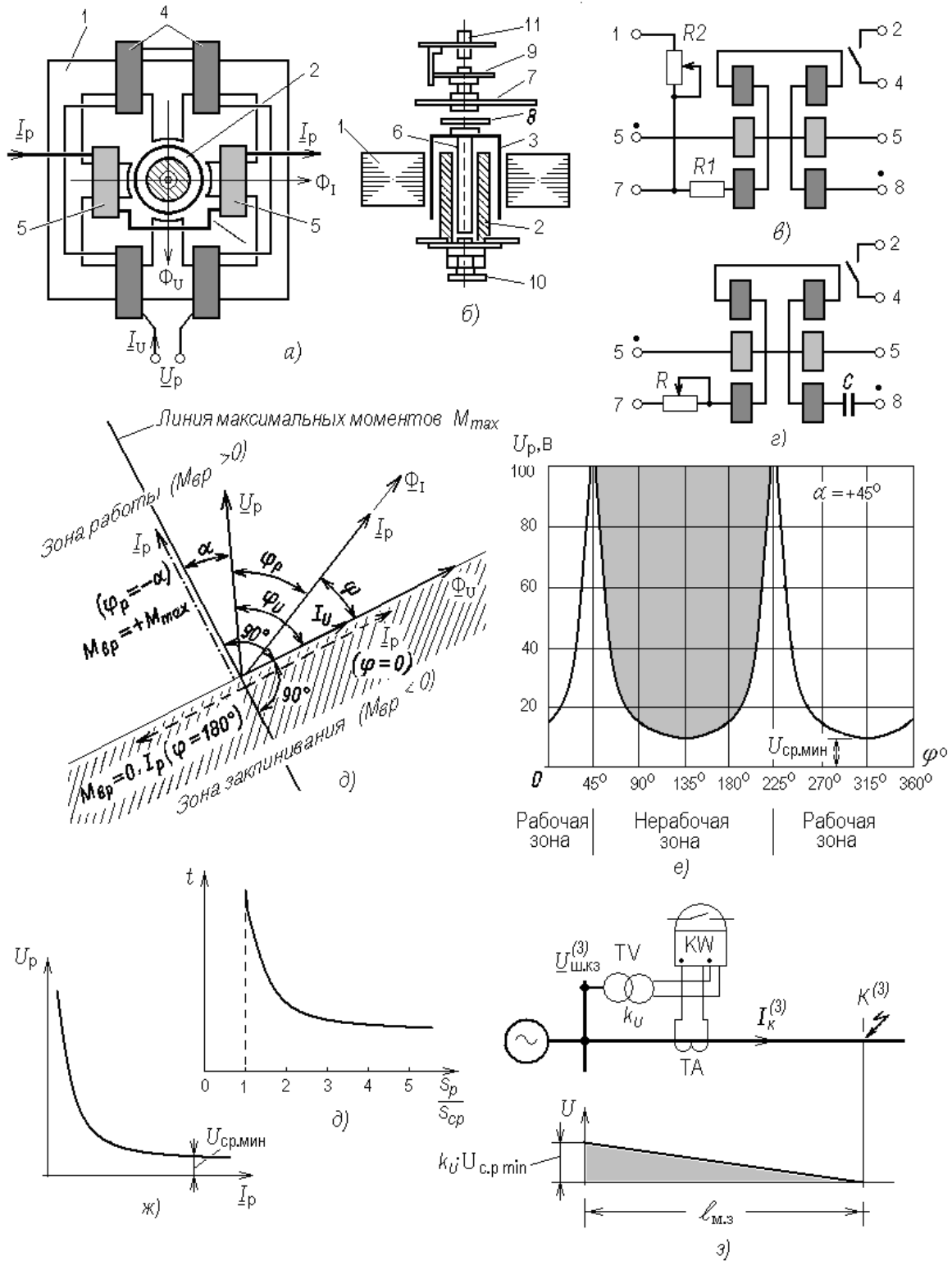


Рисунок 6.3 – Реле направления мощности типа РБМ -170: а) схема расположения обмоток, б) поперечный разрез якоря, в,г) схемы включения обмоток, д) зона работы реле мощности, е) зависимость мощности срабатывания реле от угла, ж-з) характеристики реле

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 (рисунок 6.3д). Схемы внутренних соединений реле одностороннего действия показаны на рисунок 6.3а, б.

При включении реле токи I_p и 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 (рисунок 6.3а) и по фазе на некоторый угол ψ (рисунок 6.3д). Каждый из потоков дважды, пронизывает алюминиевый цилиндр и индуцирует в нем вихревые токи. Вращающий момент, действующий на подвижную систему, определяется выражением

$$M_{\text{вп}} = k' \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot \sin \psi, \quad (6.3)$$

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

$$M_{\text{вд}} = k \cdot I_p \cdot U_p \cdot \sin \psi, \quad (6.4)$$

Векторная диаграмма реле направления мощности представлена на рисунке 6.3д. Пренебрегая потерями в стали, векторы потоков $\underline{\Phi}_I$ и $\underline{\Phi}_U$ можно представить совпадающими по фазе с векторами соответствующих токов \underline{I}_p и \underline{I}_U . Значение угла φ_U (угла между векторами тока в обмотке напряжения \underline{I}_U и подводимого к ней напряжения \underline{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 U_p (на рисунок 6.3д вектор I_p для рассматриваемого случая показан пунктиром). При этих углах, как следует из выражения (5.3), значение вращающего момента оказывается равным нулю:

$$M_{\text{вр}} = 0, \quad (6.5)$$

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

$$M_{\text{вр}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos(\varphi_p + \alpha), \quad (6.6)$$

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

$$M_{\text{вр}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos\varphi_p, \quad (6.7)$$

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

$$M_{\text{вр}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin\varphi_p, \quad (6.8)$$

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

$$M_{\text{вр}} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin(\varphi_p + \alpha), \quad (6.9)$$

направлен в сторону замыкания контактов — реле работает и замыкает свои контакты ($M_{\text{вр}} > 0$ — зона действия). Если поток Φ_I отстает по фазе от потока

$\underline{\Phi}_U$, момент направлен в сторону размыкания контактов — реле не действует ($M_{вр} < 0$ — зона недействия, зона «заклинивания»)

На рисунке 6.3д приведена векторная диаграмма для реле смешанного типа. Контактная система реле выполняется так, что в случае, когда поток $\underline{\Phi}_I$ опережает по фазе поток $\underline{\Phi}_U$, вращающий момент

Как следует из выражения (6.6), если $\varphi_p = -\alpha$, т. е. когда вектор тока \underline{I}_p опережает вектор напряжения \underline{U}_p на угол α , при одних и тех же значениях тока и напряжения вращающий момент реле наибольший (вектор тока \underline{I}_p для данного случая показан штрихпунктирной линией и совпадает с направлением линии максимальных моментов):

$$M_{вр} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos 0 = k \cdot U_p \cdot I_p = M_{вр. \max}, \quad (6.10)$$

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 (рисунок 6.3в) 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 (рисунок 6.2г) имеет вид:

$$M_{ep} = k \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin(\varphi_p + 20^\circ), \quad (6.11)$$

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 загробления 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.

Основные характеристики реле направления мощности

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

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

У индукционных реле направления мощности мощность срабатывания при угле максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ 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_p и угла φ_p принято оценивать характеристикой чувствительности, т. е. зависимостью $U_{с.р}(I_p)$, и угловой характеристикой, представляющей зависимость $U_{с.р}(\varphi_p)$,

Характеристика чувствительности представляет собой зависимость $U_{с.р}(I_p)$ при неизменном φ_p (рисунке 6.3ж), где $U_{с.р}$ – наименьшее напряжение, необходимое для действия реле (при данных значениях I_p и φ_p).

Обычно характеристика снимается при φ_p , равном углу максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$, т. е. для случая когда $\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$. Теоретическая характеристика чувствительности представляет гиперболу, но в действительности за счет насыщения стали магнитопровода при больших токах I_p напряжение $U_{с.р}$ остается неизменным и кривая чувствительности $U_{с.р}(I_p)$ идет параллельно оси токов.

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

- изменение чувствительности реле (характеризуемое величиной $U_{ср}$) при разных значениях угла φ_p ;
- минимальную величину $U_{ср.мин}$ и наиболее выгодную зону углов φ_p , в пределах которой $U_{ср}$ близко к $U_{ср.мин}$;
- 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 $S_p/S_{с.р}$. Характер этой зависимости для индукционного реле приведен на рис. 5.2d. При мощностях S_p , близких к $S_{с.р}$, выдержки времени достаточно велики, и только при $S_p/S_{с.р} \geq 3 \dots 4$ 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 $U_{ср. min}$ (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 $l_{м.з.}$, расположенном у места включения реле.

Оценить длину мертвой зоны можно по формуле

$$l_{м.з.} \approx \frac{k_U \cdot U_{с.р. min}}{\sqrt{3} \cdot I_K^{(3)} \cdot z_{1уд} \cdot \cos(\varphi_p - \varphi_{м.ч})}, \quad (6.12)$$

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

Современные (статические) КВ имеют относительно небольшие $U_{с.р. min}$ (доли вольт) и незначительные $l_{м.з.}$

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

2. Аппаратура и материалы

Исследование принципа функционирования токвой направленной защиты линии электропередачи выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием нижеследующей аппаратуры.

Таблица 6.1 – Перечень аппаратуры, необходимый для выполнения работы

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A4, A6, A8, A10, A13	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A3, A7	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
A5	Линейный реактор	314.2	220/380 В; 50 Гц; 0,5 А; 0,3 Гн/10 Ом
A9	Трехфазная трансформаторная группа	347.2	3 × 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В / 230 В (треугольник)
A11	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50 Гц; 3×0...50 Вт;
A12	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц; 3×0...40 Вар;
A14, A15	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A16	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
A17	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A18	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A19	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

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

направление мощности КЗ в защищаемой линии (иначе говоря, фазу тока в линии относительно напряжения на шинах).

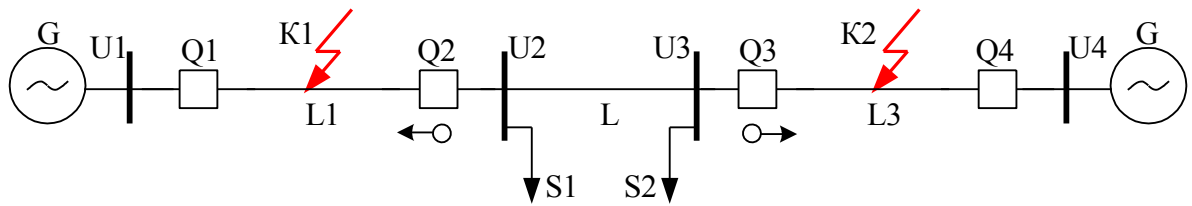


Рисунок 6.4 – Схема модели кольцевой сети

В сетях с двусторонним питанием (рисунок 6.4) и в кольцевых сетях направление тока и мощности КЗ зависит от места возникновения повреждения. Например, при коротком замыкании в точке К2 через защиту на выключателе Q3 проходит ток в направлении от шин подстанции 3 к месту повреждения. При коротком замыкании в точке К1 через эту же защиту проходит ток в противоположном направлении.

Если принять, что в первом случае ток короткого замыкания отстает от напряжения U_3 на шинах подстанции 3, а мощность КЗ положительна и направлена от шин в линию, то во втором случае ток КЗ сдвинут на 180° относительно тока КЗ в первом случае, а соответствующая этому мощность КЗ отрицательна и направлена из линии к шинам. Таким образом, направление мощности КЗ, проходящей по линии, характеризует, где возникло повреждение: на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.

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

Простая токовая защита, не реагирующая на знак мощности, действует как при КЗ на защищаемой линии, так и при повреждениях на других присоединениях, отходящих от шин подстанции, питающей защищаемую линию. Поэтому получить селективное отключение КЗ в сетях с

двусторонним питанием с помощью простой токовой защиты, как правило, невозможно.

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

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

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

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

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

Если уставки защит выбраны правильно, то при коротком замыкании отключается только та линия, на которой оно возникло (при К3 в точке K1 отключаются выключатели Q1 и Q2, при К3 в точке K2 – Q3 и Q4).

Электрическая схема соединений

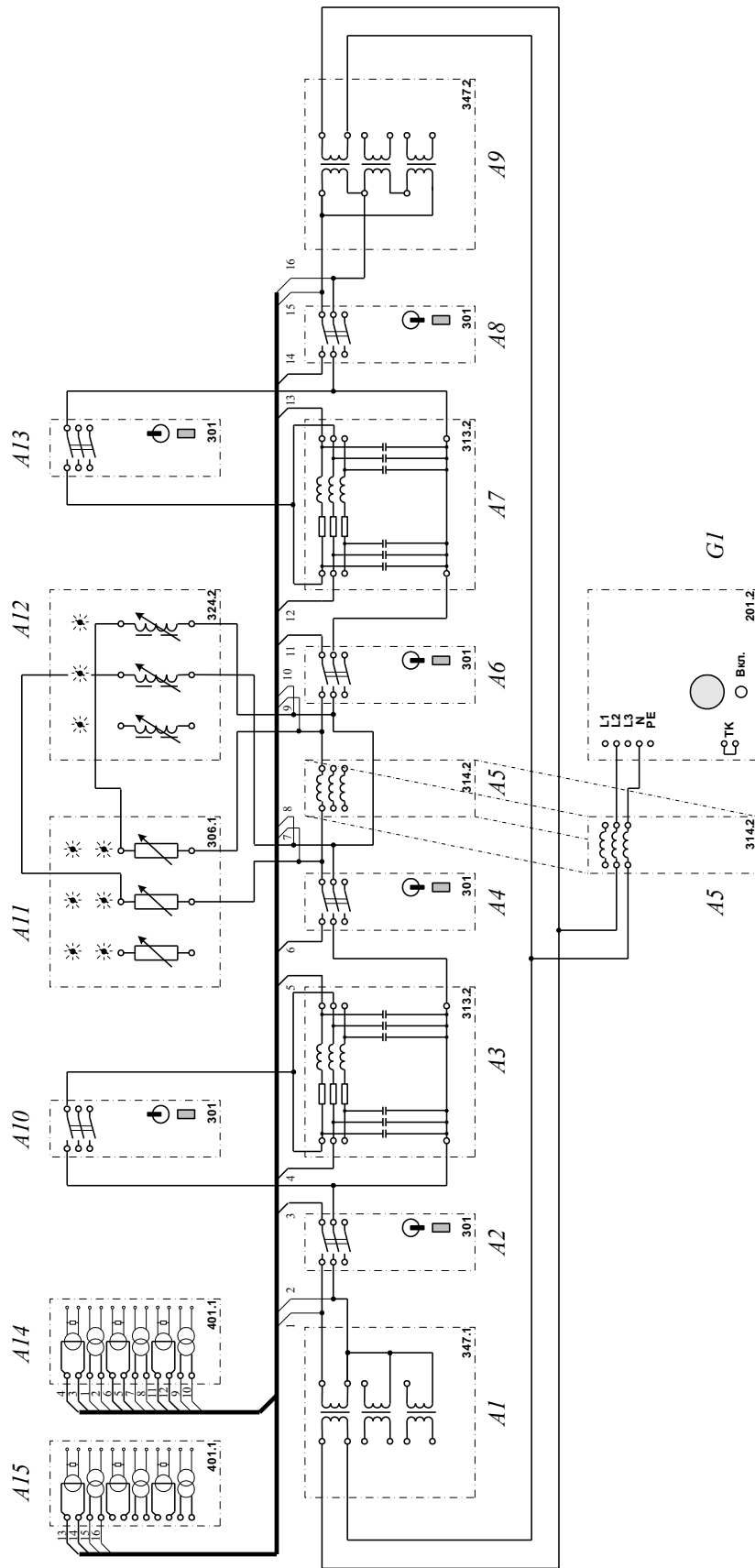


Рисунок 6.5 – Схема соединений блоков стенда для проведения экспериментов

Продолжение электрической схемы соединений

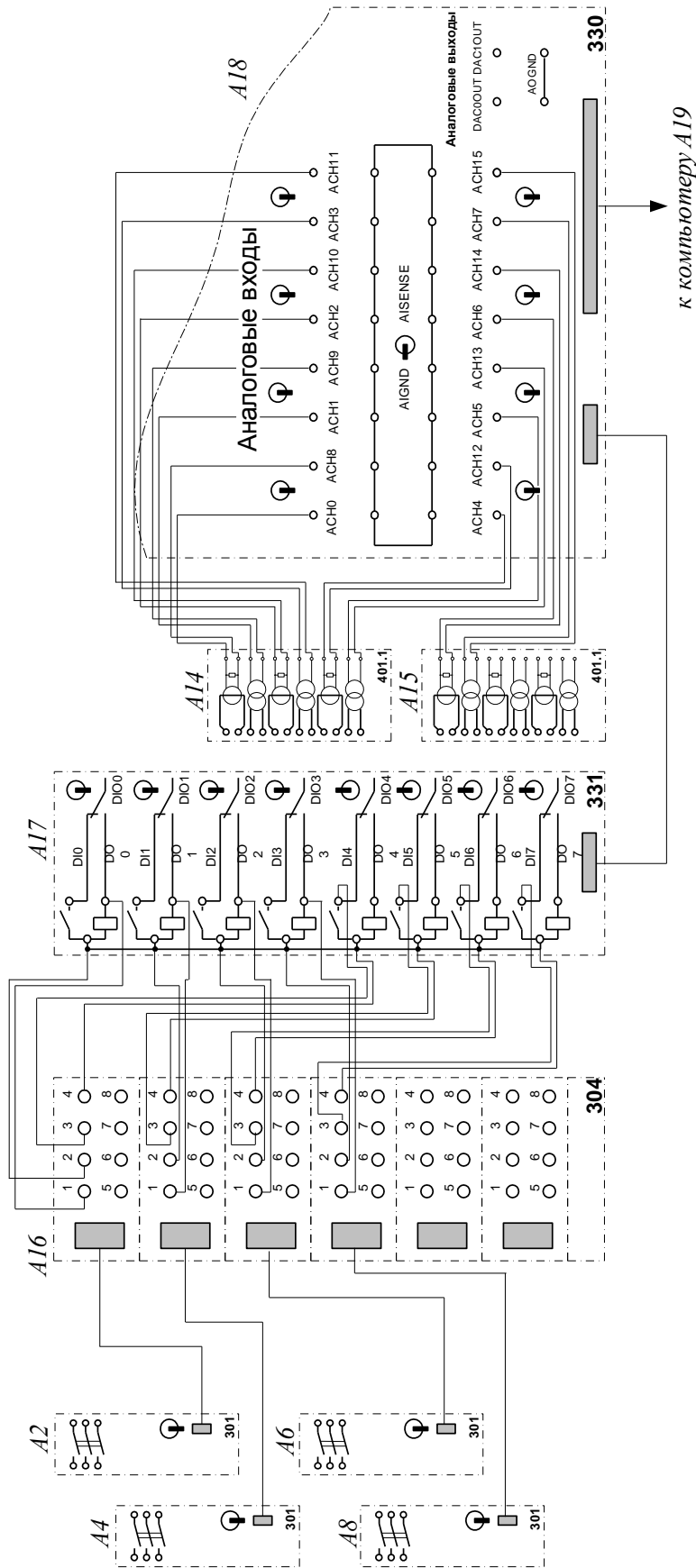


Рисунок 6.6 – Схема соединения цепей управления и измерения модели кольцевой сети

3.2 Описание электрической схемы соединений

Трехфазная трансформаторная группа А1, выключатель А2, модель линии элек-тропередачи А3, выключатель А4, линейный реактор А5, выключатель А6, модель линии электропередачи А7, выключатель А8 и трехфазная трансформаторная группа А9 образуют кольцевую замкнутую электрическую сеть, собранную в однофазном исполнении. В каж-дой из моделей линии электропередачи А3 и А7 две фазы соединены последовательно для получения возможности моделирования короткого замыкания в середине каждой из таким образом полученных линий. Сеть питается от источника G1, подключенного через две ка-тушки токоограничивающего линейного реактора А5. К третьей катушке реактора А5, имитирующей еще одну линию электропередач, с обеих сторон подключены активно-индуктивные нагрузки А11, А12.

Выключатели А10 и А13 включены как короткозамыкатели, в середине линий А3 и А7 соответственно.

К каждому из выключателей А2, А4, А6, А8 с противоположной от соответству-ющих линий стороны подключены трансформаторы напряжения блоков А14, А15 измери-тельных трансформаторов тока и напряжения. В разрывы между вышеупомянутыми вы-ключателями и соответствующими линиями электропередачи включены трансформаторы напряжения блоков измерительных трансформаторов тока и напряжения А15, А16.

Вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения блоков А14, А15 под-ключены к аналоговым входам коннектора А18, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода РСІ6024Е персонального компьютера А19.

Розетки «УПР.» трехполюсных выключателей А2, А4, А6, А8 гибкими кабелями подключены к розеткам терминала А18, гнезда которого соединены с гнездами блока А17 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

4 Выполнение работы

4.1 Методика и порядок выполнения работы

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда «ТК» источника G1.
- Соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений, обращая особое внимание на полярность включения в схему измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также полярность вторичных сигналов с них.
- Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей A2, A4, A6, A8 установите в положение «АВТ.», выключателей A10 и A13 – в положение «РУЧН.». Номинальные напряжения обмоток трансформаторов блоков A1 и A9 выставьте равными, например, 230/230 В. Параметры линий электропередачи A3 и A7 переключателями установите, например, следующими: $R = 200 \text{ Ом}$, $L/RL=1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C1=C2=0 \text{ мкФ}$. Выберите мощность активной нагрузки A11, например 20% от 50 Вт в используемых фазах. Выберите мощность индуктивной нагрузки A9, например 40% от 40 Вар в используемых фазах.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A2, A4, A6, A8, A10, A13 блока A17 ввода-вывода цифровых сигналов.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A12, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Направленная защита.exe».

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

- Нажмите на виртуальную кнопку «Начать запись»; введите защиты нажатием на соответствующую кнопку и непосредственно после этого смоделируйте короткое замыкание на одной из линий, включив выключатель А10 или А13. После отключения защитой «поврежденной» линии выведите защиты и остановите запись. Проанализируйте отображенные осциллограммы токов и напряжений линий, состояние выключателей, а также информацию о последовательности произошедших событий в журнале работы защит, вызывать который можно нажатием на соответствующую кнопку.

- При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:

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

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

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

- На экране также отображается состояние выключателей А2, А4, А6, А8.

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

- Точные значения любых времен следует определять по осциллограмме, а не по журналу работы защит.
- Уставки токов и напряжений следует задавать амплитудными значениями.
- При возникновении неправдоподобных результатов эксперимент следует повторить.
- Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Его длину можно изменять в пункте меню «Настройки».
- По завершении экспериментов отключите источник G1 и выключатели «СЕТЬ» блоков А2, А4, А6, А8, А10, А13, А17.

Содержание отчета и его форма

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.

5 Вопросы для защиты работы

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.

Лабораторная работа 7

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы – Ознакомление с принципами построения защит силового трансформатора. Исследование работы дифференциальной защите трехфазного силового трансформатора.

1 Теоретическое обоснование

Виды повреждений и ненормальных режимов работы 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 междуфазные 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 электроснабжения 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 нейтральями (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 7.1 – 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

$$t_{\text{доп}} \leq 1500 / k_{\text{расч}}^2, \quad (7.1)$$

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

$$k_{\text{расч}} = I_{\text{к.вн.мах}}^{(3)} / I_{\text{т.ном}}, \quad \text{где} \quad I_{\text{к.вн.мах}}^{(3)} = \frac{100}{u_{\text{к}}\%} \cdot I_{\text{т.ном}}. \quad (7.2)$$

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

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

Уставки по времени МТЗ трансформаторов ($t_{\text{МТЗ}}$) и время срабатывания плавких предохранителей, защищающих трансформатор, не должны превышать приведенных выше значений $t_{\text{доп}}$. Как правило, значение $t_{\text{с.з}} = 4$ 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 рисунке 7.1а, 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

$$I_p = I_{2-1} - I_{2-2}. \quad (7.2)$$

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:

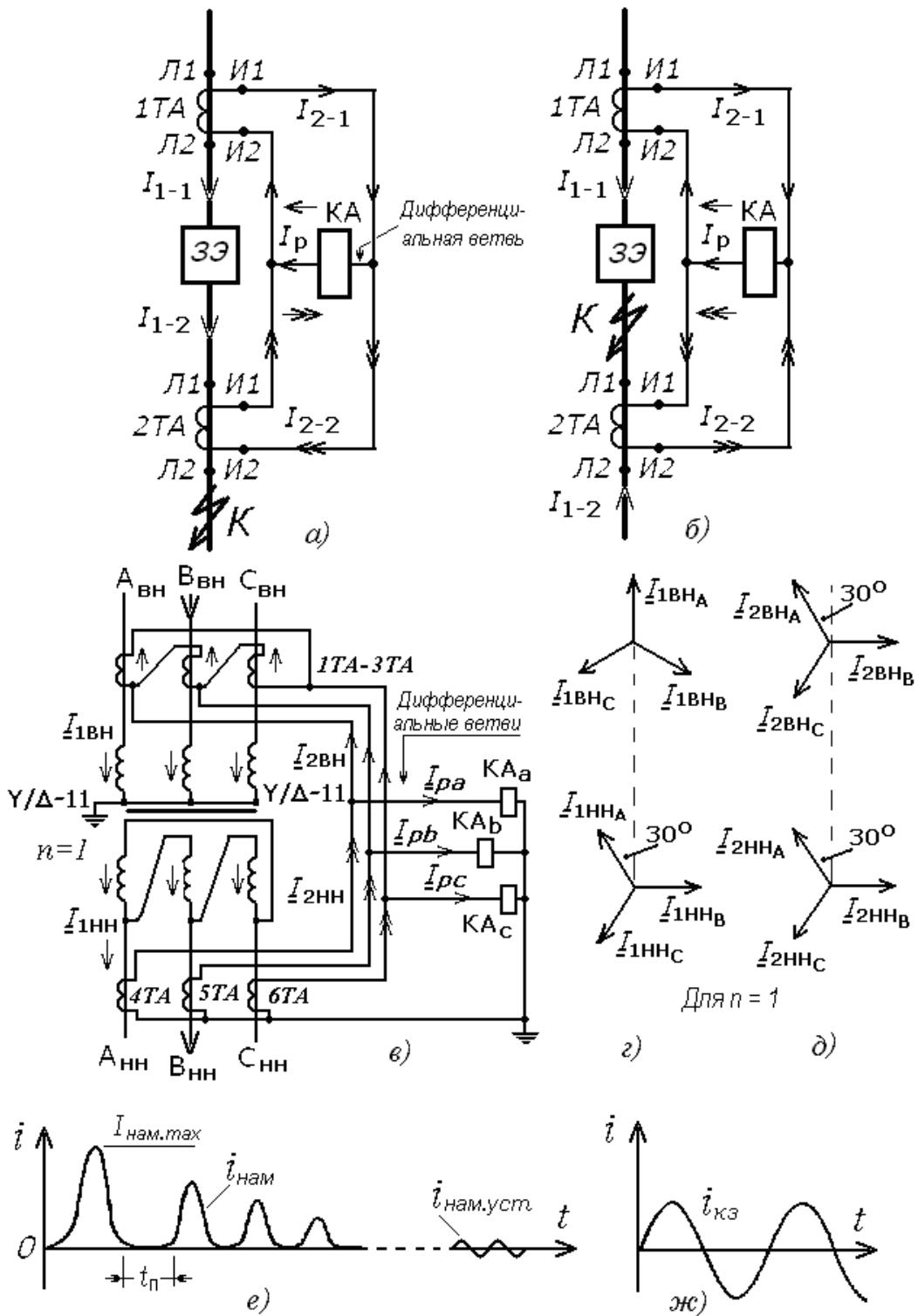


Рисунок 7.1 – Дифференциальная защита трансформатора: а) схема протекания токов при внешнем КЗ, б) схема протекания токов при внутреннем КЗ, в) схема токовых цепей дифференциальной защиты понижающего трансформатора, г, д) векторные диаграммы токов, е) осциллограмма броска тока намагничивания, ж) осциллограмма тока при КЗ

$$I_p = I_{2-1} - I_{2-2} = I_{нб}. \quad (7.3)$$

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

$$I_{с.р} \geq k_n \cdot I_{нб}. \quad (7.4)$$

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

При КЗ в зоне действия дифференциальной защиты (рисунок 7.1б) 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 (7.5) и он должен быть не менее двух, т. е.:

$$k_{ч} = I_{р.мин} / I_{с.р} \geq 2, \quad (7.5)$$

где $I_{р.мин} = I_{2-1}$ или I_{2-2} (рисунок 7.1б).

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 $I_{нам}$, 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_N трансформатора (рисунок 7.1z). 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 рисунок 7.1e). Неравенство значений вторичных токов вызывает ток небаланса, как это видно из выражения (7.3).

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

- различных погрешностей, с которыми работают разнотипные трансформаторы тока (1ТА и 2ТА на рисунок 7.1a);
- 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 $Y/\Delta-11$; 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 отсеков. 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 отсечку 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 (рисунок 7.1*з*) при включении силового трансформатора под напряжение, а именно:

- смещение кривой броска тока намагничивания в одну сторону от нулевой линии и отсутствие обратных полуволн (рисунок 7.1*е*);

– наличие в броске тока намагничивания бестоковых пауз t_{Π} 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 $КА$) включен в дифференциальную цель защиты через промежуточный трансформатор, работающий с повышенной индукцией в магнитопроводе. Когда в первичную обмотку такого трансформатора тока подается однополярный ток (рисунок 7.1а, 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 (рисунок 7.1ж), 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 апериодическую составляющую, которая насыщает НТТ и препятствует трансформации периодической составляющей. Но апериодическая составляющая тока КЗ быстро затухает, после чего реле срабатывает за счет периодической состав-

ляющей. 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 апериодическая 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 (рисунок 7.1в, з), для упрощения анализа коэффициент трансформации силового трансформатора принят условно равным единице ($n = 1$). Поэтому коэффициенты трансформации трансформаторов ток 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 (рисунок 7.1в), 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 (рисунок 6.1е). 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 (рисунок 7.1а, $I_{2-1} \approx I_{2-2}$) или совпадали. При соединении обмоток силового трансформатора в Y/Y желательно, чтобы соотношение между коэффициентами трансформации трансформаторов тока определялись из выражения

$$k_{iII} / k_{iI} = n, \quad (7.6)$$

где n – коэффициент трансформации силового трансформатора.

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

$$k_{iIII} / k_{iII} = n / \sqrt{3} \quad (7.7)$$

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 *РНТ-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 уравнивательной 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:

$$w_{yp1} \cdot I_{2-1} = 10 \cdot 3 = w_{yp2} \cdot I_{2-2} = 6 \cdot 5$$

Поскольку магнитодвижущие силы имеют такие же условные направления, что и создающие их токи, разность этих сил в обеих уравнивательных (первичных) обмотках НТТ равна нулю (рисунок 7.2а), 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 уравнивательных 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 $I_{\text{нб}}$, 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:

$$I_{\text{нб}} = I'_{\text{нб}} + I''_{\text{нб}} + I'''_{\text{нб}} \quad (7.8)$$

где $I'_{\text{нб}}$ — 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; $I''_{\text{нб}}$ — 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 (*ПВВ*) в пределах $\pm 5\%$, то ожидаемое значение тока небаланса $I_{Нб}$ будет равно $0,21 \cdot I_{к.макс.вн}$ (при КЗ на стороне СН). Если принять $I_{Нб} = 0,1 \cdot I_{к.макс.вн}$ и условно считать $I_{Нб} = 0,04 \cdot I_{к.макс.вн}$, то ожидаемое значение тока небаланса составит $I_{Нб} \approx 0,35 \cdot I_{к.макс.вн}$.

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

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

Следовательно, расчетное значение тока небаланса составит

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

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

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

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.

2 Аппаратура и материалы

Исследование принципа функционирования дифференциальной защиты линии электропередачи выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием нижеследующей аппаратуры:

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
A1, A2	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
A3, A5, A8, A9	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A4	Трехфазная трансформаторная группа	347.1	3 × 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A6	Активная нагрузка	306.1	220/380 В; 50Гц; 3×0...50 Вт;
A7	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50Гц; 3×0...40 Вар;
A10, A11	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A12	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
A13	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
			«сухой контакт»; 8 релейных выходов
A14	Коннектор	330	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A15	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

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

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

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

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

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

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

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

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

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

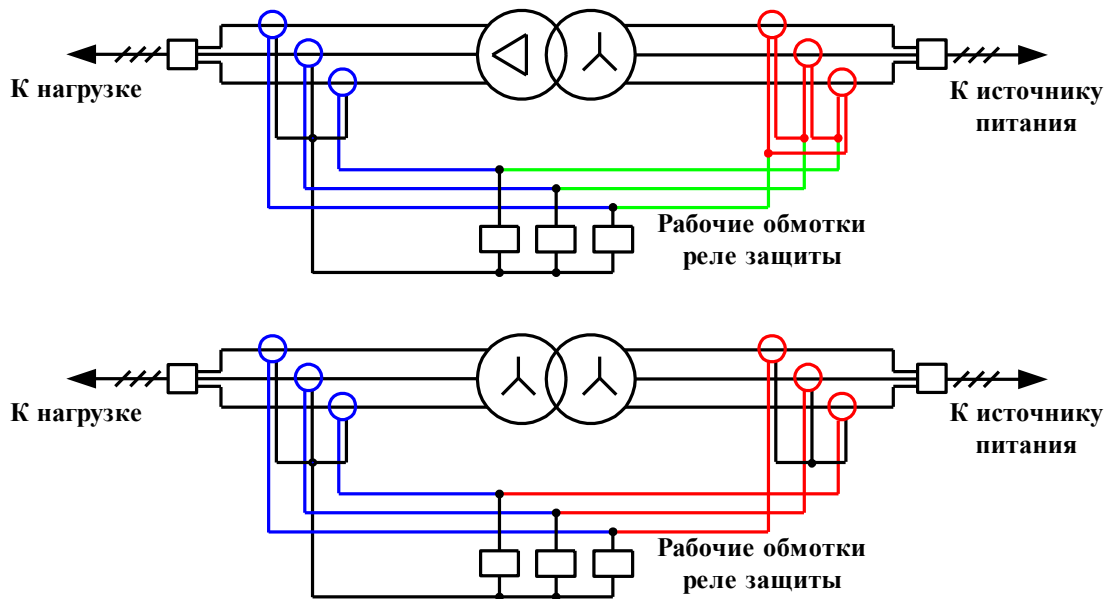


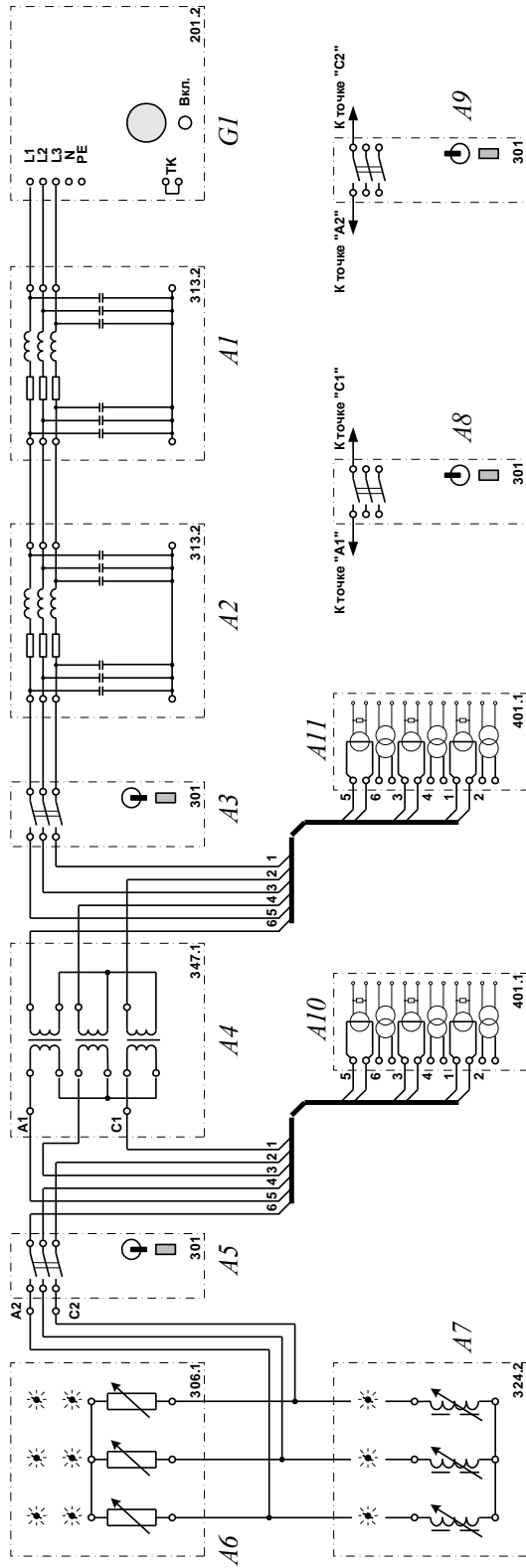
Рисунок 7.2 – Функциональная схема продольной дифференциальной защиты силового трансформатора

В данном эксперименте моделируется трансформатор (рисунок 7.2), обмотки которого могут иметь схему соединения звезда-звезда или звезда-треугольник. Одна сторона трансформатора подключена к источнику питания, другая – к нагрузке. С обеих сторон трансформатора включены измерительные трансформаторы тока и трехполюсные выключатели. Существует возможность устраивать короткие замыкания на выводах трансформатора и на шинах нагрузки.

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

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

Электрическая схема соединений (вариант 1)



Электрическая схема соединений (вариант 2)

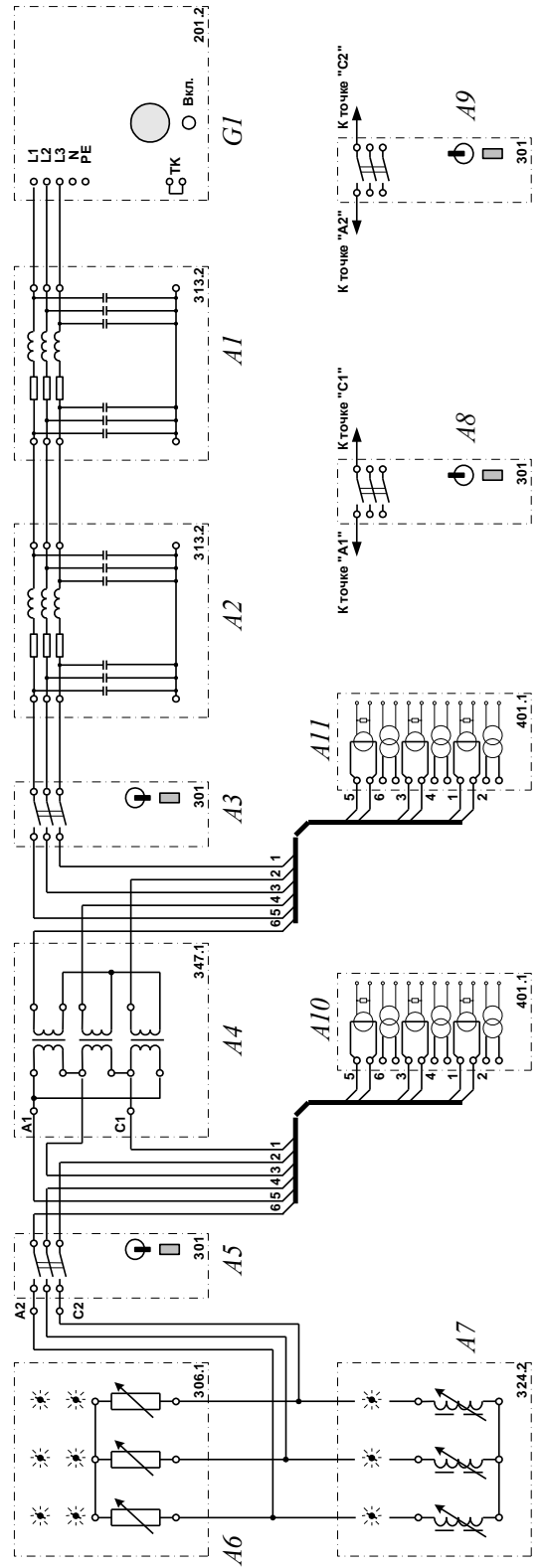


Рисунок 7.3 – Схема соединений для проведения экспериментов

Продолжение электрической схемы соединений

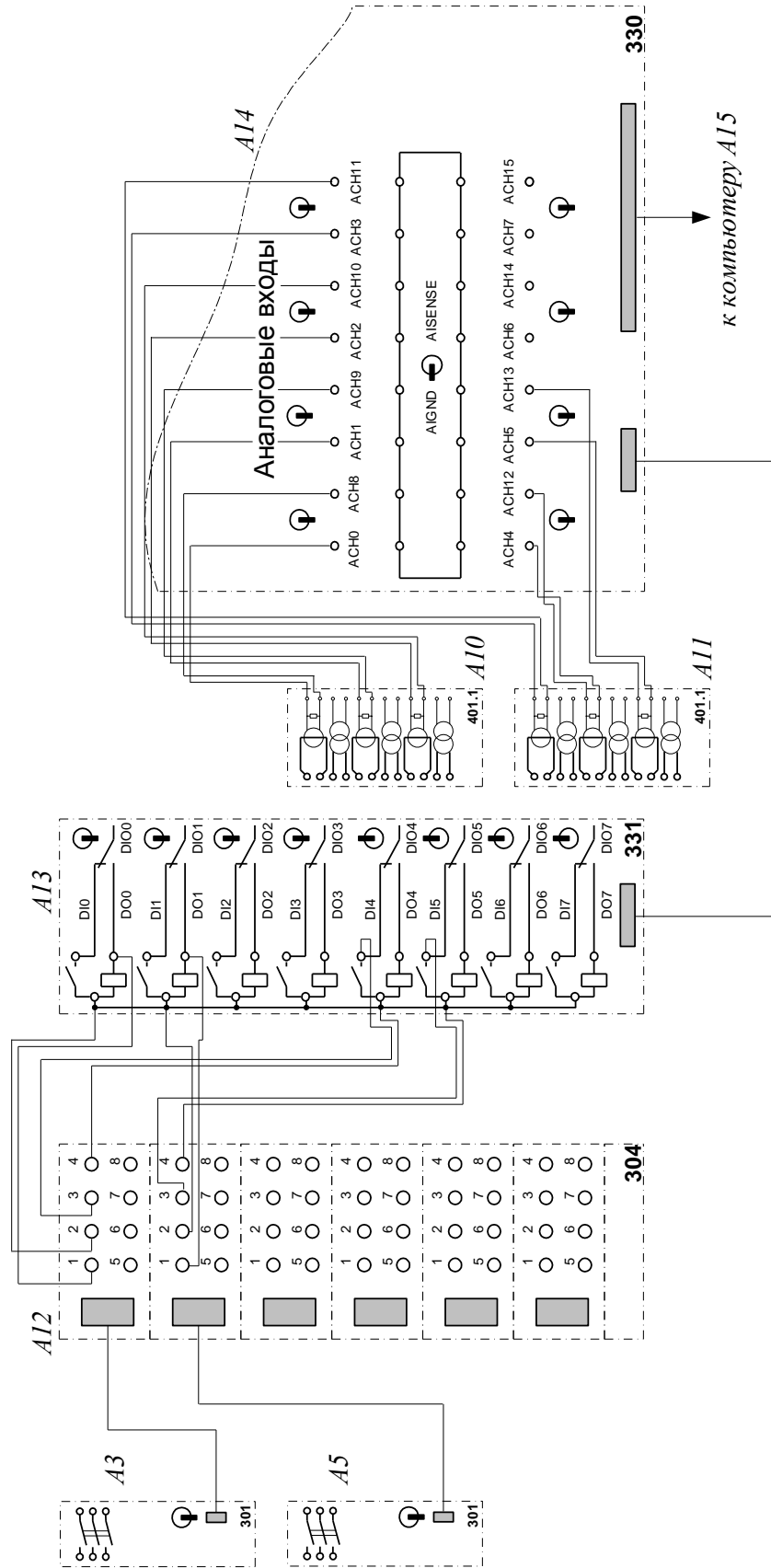


Рисунок 7.4 – Схема соединений цепей управления и измерительных для проведения экспериментов

3.2 Описание электрической схемы соединений

Активная и индуктивная нагрузки А6 и А7 подключены к трехфазному источнику питания G1 через последовательно соединенные линии электропередачи А1 и А2, трехполюсные выключатели А3 и А5 и трехфазную трансформаторную группу А4, первичная обмотка которой соединена в звезду, а вторичная (регулируемая) может соединяться как в звезду (вариант 1), так и в треугольник (вариант 2).

Токи фаз первичной и вторичной обмоток трехфазной трансформаторной группы А4 фиксируются с помощью измерительных трансформаторов тока блоков А11 и А10 соответственно.

Трехполюсные выключатели А8 и А9 включаются как короткозамыкатели в указанные на электрической схеме соединений точки.

Вторичные обмотки трансформаторов тока блоков А10 и А11 подключены к аналоговым входам коннектора А14, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода PCI6024E персонального компьютера А15.

Розетки «УПР.» трехполюсных выключателей А3 и А5 гибкими кабелями подключены к розеткам терминала А12, гнезда которого соединены с гнездами блока А13 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

4 Методика и порядок выполнения работы

4.1 Порядок проведения экспериментов

- Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
- Соедините гнезда «ТК» источника А1.

- Соедините гнезда защитного заземления " \oplus " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
- Соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (вариант 1).
- Переключатели режимов работы трехполюсных выключателей A3 и A5 установите в положение «АВТ.», выключателей A8 и A9 – в положение «РУЧН.». Номинальное вторичное фазное напряжение трехфазной трансформаторной группы A4 выставьте равным, например 230 В. Параметры линий электропередачи A1 и A2 переключателями установите, например, следующими: $R = 200 \text{ Ом}$, $L/R_L = 1,2/32 \text{ Гн/Ом}$, $C1=C2=0 \text{ мкФ}$. Величины обеих нагрузок переключателями выставьте равными 100 % во всех трех фазах.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A3, A5, A8, A9 блока A13 ввода-вывода цифровых сигналов.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A15, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «Дифференциальная защита трансформатора.exe».
- Задайте уставки защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку; например, используйте уставки, заданные по умолчанию. Обратите внимание, что схема соединения обмоток трансформатора и его вторичное напряжение в окне задания уставок защиты должны соответствовать аналогичным параметрам, реально присутствующим в схеме.
- Начните запись, введите защиту.

- Смоделируйте короткое замыкание вне зоны действия дистанционной защиты, включив выключатель А9.
- Через 0,5-1 секунду отключите выключатель А9, выведите защиту, остановите запись. Проанализируйте записанные программой токи защиты.
- Вновь начните запись, введите защиту.
- Смоделируйте короткое замыкание в зоне действия защиты, включив выключатель А8.
- После срабатывания защиты проанализируйте состояние схемы и записанные программой осциллограммы токов.
- Измените вторичное напряжение трансформаторной группы А4, в окне задания уставок защиты измените значение соответствующего поля ввода. Повторите эксперименты.
- Соедините вторичную обмотку трехфазной трансформаторной группы А4 в треугольник (согласно электрической схеме соединений, вариант 2).
- Соответствующим образом измените уставки защиты.
- Повторите эксперименты.
- При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:
 - Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
 - Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.

- Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
- На экране также отображается состояние выключателей А3 и А5.
- Программа позволяет моделировать дифференциальную защиту с торможением от тока внешнего короткого замыкания.
- Погрешность трансформаторов тока можно задать в главном меню программы в пункте «Настройки».
- Запись электромагнитных процессов в схеме производится программой в циклический буфер. Параметры буфера, а именно его полную длину и длину «эпилога» (фактически – время записи после свершения интересующего события, в данном случае – срабатывания защиты) можно изменять в пункте меню «Настройки». Например, если срабатывание защиты ожидается через 0,1 секунду 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 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, А5, А8, А9, А13.

Содержание отчета и его форма

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

Отчет должен содержать:

Название и цель работы.

Используемые в экспериментах схемы.

Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.

Письменные выводы и ответы на поставленные в соответствующих пунктах экспериментальной части вопросы.

5 Вопросы для защиты работы

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 уравнильных обмоток в реле типа РНТ-565.
9. Можно ли в реле использовать уравнильные 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. 6.16)?
14. Каково назначение резисторов $R_{ш}$, $R_{к}$ 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. 6.16) заземлена (сеть с глухозаземленной нейтралью). Как поведет себя дифзащита трансформатора, если в сети будет КЗ типа $K^{(1)}$?

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ЗАЩИТЫ
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы – исследовать принципы работы защиты асинхронного двигателя от ненормальных режимов и различных повреждений

1 Теоретическое обоснование

Общие положения. Если ориентироваться, например, на тепловые электростанции, то в качестве привода механизмов собственных нужд широко используются асинхронные, а ряде случаев и синхронные двигатели самой различной мощности вплоть до 8000 кВт.

Электродвигатели мощностью от 200 кВт до 8000 кВт выпускаются с $U_{ном} = 6$ кВ (10 кВ).

Электродвигатели мощностью менее 200 кВт выпускаются на $U_{ном} = 0,4$ кВ. На практике можно встретить двигатели с различными параметрами.

Короткие замыкания могут происходить:

- на выводах двигателя
- в питающих кабелях
- муфтах
- кабельных воронках

Наиболее опасны многофазные КЗ, разрушающие медь обмоток, железо статора и т.д. Для защиты от многофазных КЗ применяют МТО и ПДЗ, действующие на отключение. Однофазные замыкания менее опасны.

На напряжениях 3÷10 кВ они сопровождаются протеканием токов емкостного характера.

На электродвигателях мощностью до 2000 кВт защита от замыканий на землю на них устанавливается при $I_3 > 10$ А.

Для электродвигателей мощностью более 2000 кВт такая защита устанавливается при $I_3 > 5$ А. Во всех случаях защита действует на отключение.

Защита от витковых замыканий на электродвигателях не устанавливается.

Защита электродвигателей с $U_{НОМ}$ до 500 В может быть укомплектована плавкими предохранителями (что нежелательно) или быстродействующими автоматическими воздушными выключателями.

Аномальные режимы.

Основной аномальный режим - перегрузка обмотки статора током больше номинального. Допустимое время перегрузки определяется по формуле:

$$t_{\text{доп}} = A / (k^2 - 1), \quad (8.1)$$

где $t_{\text{доп}}$ - допустимое время перегрузки; A - коэффициент, учитывающий мощность и вариант исполнения электродвигателя. Для мощных электродвигателей закрытого исполнения $A = 250$, для остальных $A = 150$.

K - кратность перегрузки.

Защита от перегрузки должна быть отстроена от режима пуска и самозапуска электродвигателей.

Условия пуска электродвигателей делятся на три основные категории: – легкие условия при $k_{\text{пер}} = 2-3$; – средние при условии $k_{\text{пер}} = 3-4$; – тяжелые условия при $k_{\text{пер}} = 4-6$.

Релейная защита асинхронных двигателей.

Асинхронные и синхронные электродвигатели являются одними из основных потребителей электрической энергии. Релейная защита электродвигателей должна учитывать специфические свойства, связанные с наличием вращающихся частей (ротора) и прежде всего с режимами пуска и

торможения. При реализации защитных функций электродвигателей необходимо учитывать, как и в защитах генераторов, внутренние повреждения обмотки статора и сверхтоки, возникающие при внешних КЗ и перегрузках.

Защиты от многофазных КЗ в обмотке статора должны обеспечивать отключение электродвигателя по возможности с минимальным временем срабатывания. Для этой цели используется максимальная токовая защита с зависимой и независимой выдержкой времени, например с использованием реле типа РТ-80 (или его электронных аналогов). При этом для быстрого отключения при сверхтоках КЗ используется токовая отсечка, отстраиваемая по току срабатывания от максимального значения пускового тока в момент включения двигателя. Остальной диапазон возможных токов КЗ перекрывается ступенями МТЗ с независимой выдержкой времени и МТЗ с зависимой выдержкой времени, отстраиваемыми своими уставками по току и времени от пусковых токов электродвигателя.

На электродвигателях мощностью до 2000 кВт защита выполняется по простейшей однорелейной схеме с включением одного токового реле типа РТ-40 на разность токов двух фаз с формированием выдержки времени на электромеханическом реле времени или электронном реле времени. Однако недостаток этой схемы может проявиться при проверке коэффициента чувствительности, так как эта схема имеет разный коэффициент чувствительности при двухфазных КЗ.

Двухрелейная схема может использоваться на электродвигателях мощностью менее 2000 кВт в тех случаях, когда однорелейная схема не обеспечивает необходимую чувствительность.

Дифференциальная защита применяется на двигателях сравнительно большой мощности (при > 5000 кВт), а также в случаях, когда МТЗ и токовая отсечка не обеспечивают необходимую чувствительность к внутренним междуфазным КЗ, ввиду необходимости отстройки от пусковых токов. В схеме дифзащиты используется реле типа РНТ-565.

Защиты от замыканий на землю в обмотке статора зависят от вида заземления нейтрали сети и принципиально не отличаются от рассмотренных ранее. В сетях с большим током КЗ на землю применяется токовая защита, реагирующая на ток $3I_0$. Так как емкость обмотки статора обычно намного меньше результирующей емкости сети, возможно использование ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности и в сетях с малым током замыкания на землю. В особых случаях соизмеримости емкостей двигателя и сети необходимо использование направленной токовой защиты нулевой последовательности, либо защиты, реагирующей на активную составляющую тока нулевой последовательности.

Защиты по току обратной последовательности. Ток обратной последовательности возникает как при несимметричном питании, так и при обрыве фазы или несимметричном КЗ. Как электрическая машина с вращающимся ротором двигатель имеет значительно меньшее сопротивление для составляющих обратной последовательности, зависящее от скольжения. Поэтому составляющая тока обратной последовательности, возникающая в обмотке ротора и имеющая более высокую частоту ввиду обратного направления вращения относительно поля статора, приводит к увеличению тепловых потерь двигателя и его разогреву. К такому же результату приводит и обрыв фазы двигателя во время пуска или работы под нагрузкой, а также неправильное чередование фаз. Общие принципы выполнения защиты на основе измерения симметричных составляющих тока I_2 , в том числе выполнение защиты от обрыва фазы.

Защита от снижения напряжения. Устойчивость работы двигателя зависит от значения и длительности снижения напряжения. Чем кратковременнее и меньше снижение напряжения, тем более благоприятны условия для самозапуска двигателя при восстановлении напряжения. В зависимости от типа двигателя и характера нагрузки определяются условия по снижению напряжения, при которых повторный запуск двигателя невозможен и

двигатель необходимо отключить, обеспечив при этом функционировании других объектов сети.

Для этой цели используются защиты с контролем глубины снижения напряжения, которые могут иметь ступени как с независимой выдержкой времени, так и с выдержкой времени, зависящей от глубины снижения напряжения, в частности

$$t = \frac{T_{уст}}{1 - \frac{U}{U_{уст}}} \quad (8.2)$$

где $T_{уст}$ — параметр, определяющий масштаб времени отключения; U — измеряемое фазное напряжение; $U_{уст}$ — уставка защиты по напряжению.

Данная защита должна автоматически выводиться из действия при отключении двигателя или при неисправности цепей напряжения.

Защита от тепловой перегрузки может быть выполнена на основе использования МТЗ с зависящей от тока выдержкой времени, например на реле типа РТ-80 или на основе соответствующий дифференциального уравнения нагрева двигателя.

При повторяющихся с короткими паузами пусках двигателя возможен перегрев обмотки ротора. Рассмотрены вопросы автоматического контроля числа пусков двигателя на основе решения дифференциального уравнения нагрева и предложены схмотехнические решения соответствующей защиты.

Защита электродвигателей от перегрузки.

Защита от перегрузки устанавливается только на электродвигателях, поддержанных технологическим перегрузкам (мельничные вентиляторы, дымососы, дробилки и т.д.).

Как правило, защита от перегрузки выполняется с действием сигнал или на разгрузку механизма. В некоторых случаях защита может выполняться с действием на отключение:

1. В тех случаях, когда перегрузка не может быть устранена без остановки

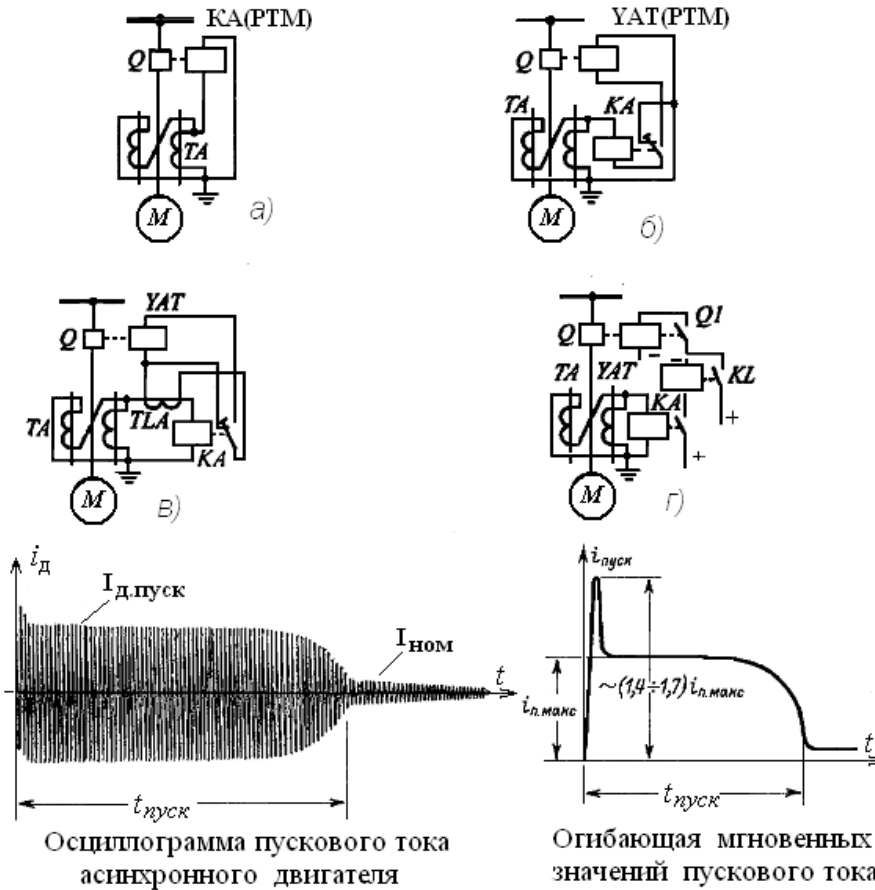
электродвигателя.

2. В электроустановках без постоянного обслуживающего персонала.

Защита от перегрузки должна быть отстроена от режима пуска или самозапуска. Отстройка от этих режимов производится введением в схему реле времени с установкой $t_{с3} = (10-20) с$.

Наиболее распространена схема реле РТ-40 и реле времени ЭВ-144.

В тех случаях, когда необходимы уставки по времени больше 20 с, применяют специальное *полупроводниковое реле времени* ВЛ-34 с диапазоном уставок 1-100с.



Риснуок 8.1 – Защита асинхронного двигателя: а) однорелейная схема, б) однорелейная схема с дешунтированием, в) защита с промежуточными трансформатором тока, г) защита на постоянном оперативном токе

Групповая защита минимального напряжения.

Самозапуск электродвигателя может не произойти, если напряжение снизится до $65 \div 55\%$ от $U_{\text{ном}}$.

Для обеспечения нормального самозапуска ответственных электродвигателей защита минимального напряжения отключает менее ответственные электродвигатели, отсутствие которых в течение некоторого времени не отразится на производственном процессе. При этом ответственные электродвигатели быстро набирают номинальные обороты, напряжение на шинах восстанавливается и действием АПВ включается в работу менее ответственные электродвигатели.

Примеры вариантов выполнения защит асинхронных двигателей приведены на рисунке 8.1 и особых пояснений не требуют.

Особенности выполнения защиты синхронного двигателя от асинхронного хода

Традиционный способ выполнения защиты двигателя от потери синхронизма — фиксация периодических колебаний тока статора. Другим критерием может являться потребление синхронным двигателем в асинхронном режиме сравнительно большого тока с низким коэффициентом мощности $\cos\varphi$.

2 Аппаратура и материалы

Исследование принципа функционирования защиты электродвигателя выполняется на универсальном стенде базовых экспериментов РЗ.001 РБЭ (908) с использованием нижеследующей аппаратуры:

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.2	400 В ~; 16 А
G2	Преобразователь угловых перемещений	104	6 выходных сигналов
G3	Источник питания двигателя постоянного тока	206.1	0...250 В –; 5 А (якорь) 200 В –; 1 А (возбуждение)
A1	Трёхфазная трансформаторная группа	347.1	3 x 80 В·А;

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
			230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
A2, A4	Трехполюсный выключатель	301	400 В ~; 10 А
A3	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
A5	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	401.1	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
A6	Терминал	304	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
A7	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	331	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
A8	Коннектор	330	8 аналог. Диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/ выходов
A9	Персональный компьютер	310	IBM совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E

Релейная защита электродвигателей, также как и защита генераторов и трансформаторов, должна реагировать на внутренние повреждения и опасные ненормальные режимы. Весьма важно, чтобы электродвигатели не отключались защитой при неопасных ненормальных режимах, так как такие отключения могут иметь массовый характер и нанести большой ущерб промышленности.

Большое значение для бесперебойной работы промышленных предприятий и особенно собственных нужд электростанций является самозапуск электродвигателей. Самозапуск электродвигателей заключается в том, что при кратковременном понижении напряжения в сети, питающей

электродвигатели, они не отключаются и после восстановления напряжения вновь разворачиваются до нормальной скорости вращения. Наиболее часто кратковременные понижения напряжения происходят в результате короткого замыкания (КЗ) и автоматическом переключении двигателей с одного источника питания на другой в результате действия устройства автоматического включения резерва (АВР).

В связи с этим защита электродвигателей должна обеспечивать возможность их самозапуска, т.е. она не должна преждевременно отключать электродвигатели как при понижении напряжения, так и при его восстановлении.

Наибольшее распространение как в промышленности, так и в системах собственных нужд электрических станций имеют асинхронные электродвигатели.

Защита от КЗ между фазами является основной защитой электродвигателей. В качестве такой защиты применяется токовая защита мгновенного действия (токовая отсечка), отстроенная от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателей.

Защита, выполненная при помощи реле типа РТ-86, применяется для электродвигателей, подверженных перегрузке. При этом отсечка используется в качестве защиты от КЗ, а индукционный элемент – в качестве защиты от перегрузки.

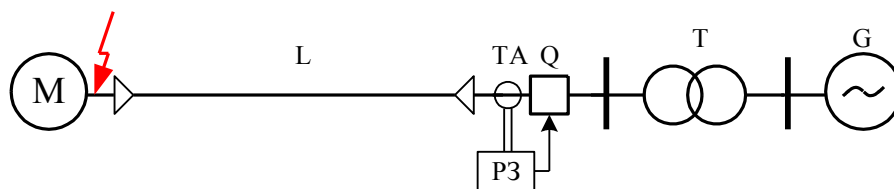


Рисунок 8.2 – Схема модели для исследования МТЗ асинхронного электродвигателя

В данном эксперименте моделируется асинхронный двигатель М, питающийся через кабельную линию электропередачи L и силовой трансформатор Т от трехфазного источника G (см. рис.). Двигатель нагружен на приводной механизм, подверженный перегрузкам (смоделированный машиной постоянного тока). Имеется возможность устраивать короткие замыкания на выводах двигателя, а также плавно изменять момент сопротивления приводного механизма.

На компьютере с помощью специальной программы смоделирована защита двигателя от КЗ и перегрузки. Характеристика защиты может быть зависимой от тока КЗ или независимой от него. Кроме того, в случае зависимой характеристики, последняя может иметь или не иметь участок отсечки.

В рамках эксперимента можно провести опыт короткого замыкания электродвигателя; убедиться в том, что защита отстроена (или нет) от пусковых токов и токов самозапуска; смоделировать перегрузку двигателя из-за увеличения момента сопротивления приводного механизма.

Электрическая схема соединений

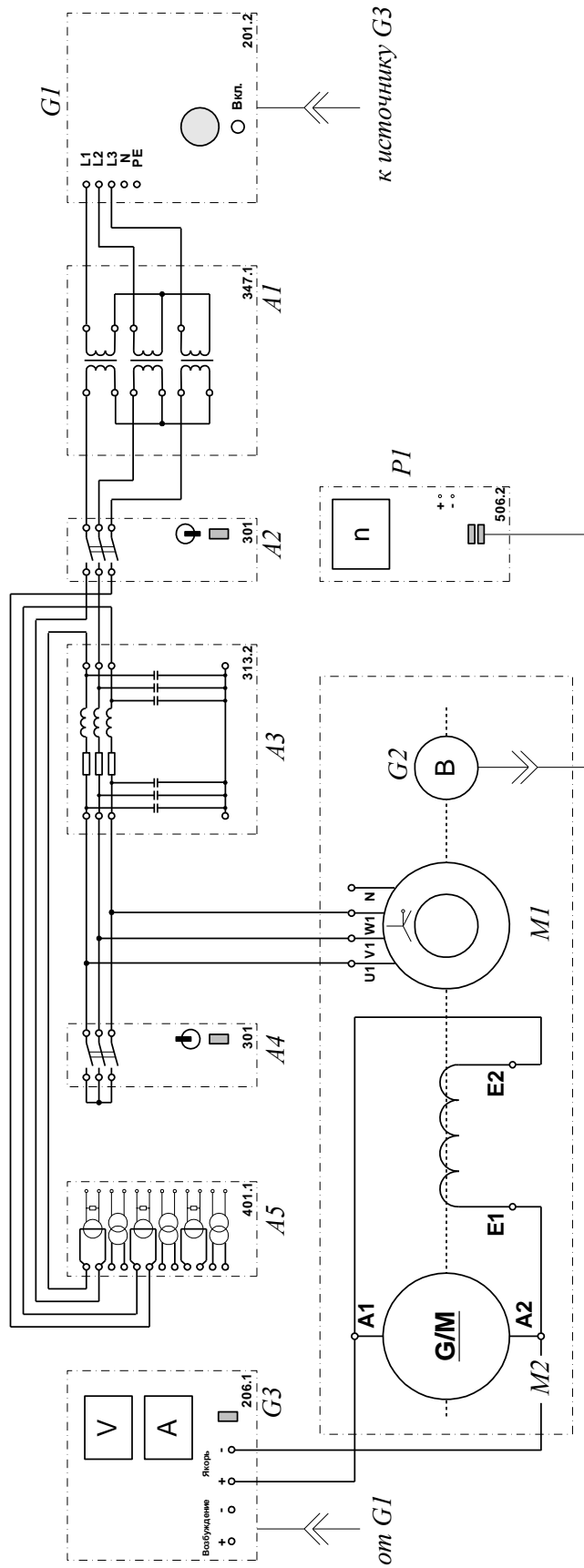


Рисунок 8.3 – Схема соединений для проведения экспериментов

Продолжение электрической схемы соединений

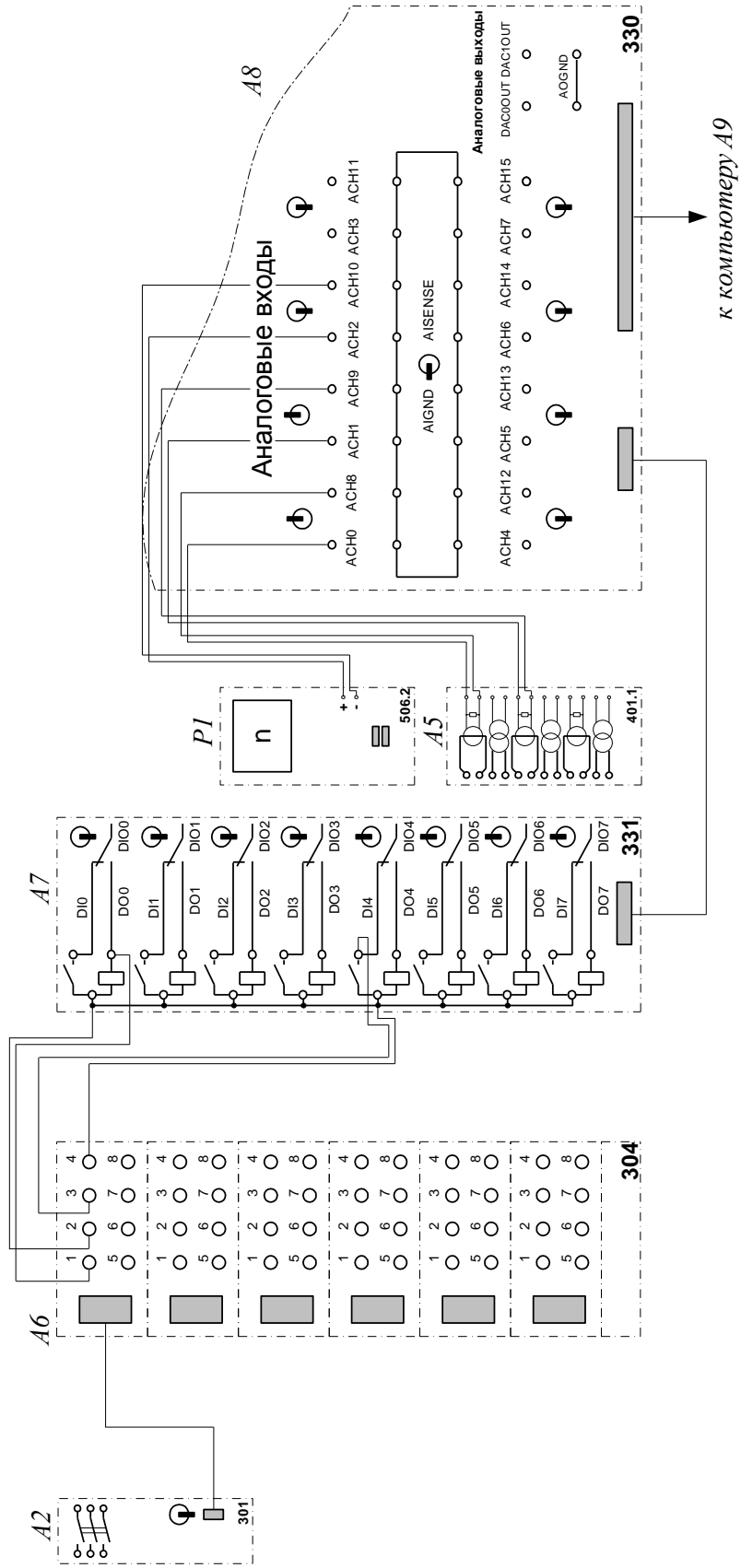


Рисунок 8.4 – Схема соединений цепей управления и измерительных для проведения экспериментов

3.2 Описание электрической схемы соединений

Машина переменного тока, работающая как асинхронный двигатель, питается от трехфазного источника G1 через последовательно включенные трехфазную трансформаторную группу A1, трехполюсный выключатель A2 и модель линии электропередачи A3.

Токи фаз А и С за выключателем A2 фиксируются с помощью включенных в схему измерительных трансформаторов тока блока A5.

Трехполюсный выключатель A4 подключен как короткозамыкатель к зажимам асинхронного двигателя.

На одном валу с двигателем располагается машина постоянного тока, включенная в режиме электромагнитного тормоза с параллельным возбуждением, получающая питание от регулируемого выхода «ЯКОРЬ» источника G3.


Вторичные обмотки трансформаторов тока блока A5 подключены к аналоговым входам коннектора A8, соединенного гибким шлейфом с платой ввода/вывода PCI6024E персонального компьютера A9.

Розетка «УПР.» трехполюсного выключателя A2 гибким кабелем подключена к розетке терминала A6, гнезда которого соединены с гнездами блока A7 ввода-вывода цифровых сигналов согласно электрической схеме соединений.

4 Методика и порядок выполнения работы

4.1 Порядок проведения экспериментов

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

- Соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока (стр. 12).
- 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 A2 установите в положение «АВТ.», выключателя A4 – в положение «РУЧН.». Номинальное вторичное фазное напряжение трехфазной трансформаторной группы A1 выставьте равным 230 В. Параметры линии электропередачи A3 переключателями установите, например, следующими: $R = 0$ Ом, $L/R_L = 0,6/16$ Гн/Ом, $C1=C2=0$ мкФ.
- Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
- Включите выключатели «СЕТЬ» выключателей A2, A4, блока A7 ввода-вывода цифровых сигналов, указателя частоты вращения P1, источника питания G3.
- Приведите в рабочее состояние персональный компьютер A9, войдите в соответствующий каталог и запустите прикладную программу «MT3 двигателя.exe».
- Задайте уставки защиты, нажав на соответствующую виртуальную кнопку. Например, используйте уставки, заданные по умолчанию.
- Начните запись, введите защиту. После того, как двигатель развернется, смоделируйте короткое замыкание, включив выключатель A4.
- После отключения защитой выключателя A2 проанализируйте записанные программой осциллограммы токов и изменения частоты вращения асинхронного двигателя.

- Вновь начните запись, введите защиту. Вращая рукоятку источника питания G3 двигателя постоянного тока, установите на его выходе напряжение, равное, например, 40 В.
- Смоделируйте перегрузку асинхронного двигателя, включив источник питания G3 кнопкой «ВКЛ».
- После отключения выключателя A2 отключите источник питания G3 нажатием на его кнопку «ОТКЛ» и поверните ручку регулирования напряжения этого источника влево до упора. Проанализируйте записанные программой осциллограммы токов и изменения частоты вращения асинхронного двигателя.
- При работе с программой следует пользоваться ее возможностями:
 - Масштабирование осциллограмм производится путем нажатия на графике левой клавиши мыши и, не отпуская ее, перемещения манипулятора слева направо и сверху вниз. Возврат к начальному масштабу осуществляется обратным перемещением манипулятора – справа налево и снизу вверх.
 - Двигать график осциллограмм относительно осей координат можно путем нажатия и удержания на нем правой кнопки мыши и ее одновременного перемещения в нужную сторону.
 - Для удобства определения значений величин по графикам на экране отображаются текущие координаты указателя мыши.
 - На экране также отображается состояние выключателя A2.
 - 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 две 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 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 А2, А4, Р1, G3.

Содержание отчета и его форма

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

Отчет должен содержать:

Название и цель работы.

Используемые в экспериментах схемы.

Таблицы с экспериментальными данными и соответствующими расчетами.

Письменные выводы и ответы на поставленные в соответствующих пунктах экспериментальной части вопросы.

5 Вопросы для защиты работы

- . Типы защит двигателей.
2. Особенности работы и пуска асинхронных электродвигателей.
3. Требования к защитам двигателей.
4. Принципы построения дифференциальной защиты двигателей.
5. Защита от замыканий в обмотках.
7. Максимальная токовая защита двигателя.
8. Защита от работы в неполнофазном режиме.
9. Простейшая защита на разность токов двух фаз.
10. Особенности выполнения защиты синхронного двигателя от асинхронного хода.
11. Защита двигателя от перегрузок.

12. Защита от замыкания на землю.
13. Защита от токов обратной последовательности.
14. Способы соединений обмоток двигателей.

Список литературы

1. ЭБС "Znanium": Электроэнергетика. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Ю. А. Ершов, О. П. Халезина, А. В. Малеев и др. - Красноярск: Сиб. Федер. ун-т, 2012. - 68 с.
2. ЭБС "Znanium": Дайнеко В. А. Эксплуатация электрооборудования и устройств автоматики: Учебное пособие/В.А.Дайнеко, Е.П.Забелло, Е.М.Прищепова - М.: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. - 333 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование)
3. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник для студентов вузов по специальности ""Электроснабжение"", направления ""Электроэнергетика"". - 6-е изд., стер. - М. : Высш. шк., 2008. - 639 с. -
4. Электроэнергетика учеб. пособие для студентов вузов по направлению 140200 "Электроэнергетики" / Ю. В. Шаров, В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, В. Н. Шемякин. - Ставрополь : АГРУС, 2011. - 456 с. - (Гр. УМО).
5. ЭБС "Лань": Фролов, Ю.М. Основы электроснабжения. [Электронный ресурс] : Учебные пособия / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 432 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/4544> — Загл. с экрана.
6. ЭБС "Znanium": Янукович Г. И. Электроснабжение сельского хозяйства: Практикум / Г.И. Янукович, И.В. Протосовицкий, А.И. Зеленкевич. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2015. - 516 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат).
7. ЭБС "Znanium": Гуревич, В.И. Устройства электропитания релейной защиты: проблемы и решения [Электронный ресурс] / В.И. Гуревич. - М.: Инфра-Инженерия, 2013. - 288 с.

8. Басс, Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем : учеб. пособие для студентов вузов по направлению "Электроэнергетика", по дисц. "Релейная защита электроэнергет. систем" / под ред. А. Ф. Дьякова. - 2-е изд., стер. - М. : Изд. дом МЭИ, 2006. - 299 с.

9. Михальчук, А. Н. Спутник сельского электрика : справ. - 2-е изд., перераб.и доп. - М. : Росагропромиздат, 1989. - 254 с. : ил.