РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

# Поперечная дифференциальная направленная защита линий 35-220 кв

8

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

gost.e-ecolog.ru

# РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

*ВЫПУСК 8*

# ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ 35—220 *кв*

*(СОСТАВЛЕНО ВСЕСОЮЗНЫМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИМ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ ИНСТИТУТОМ ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ МИНИСТЕРСТВА ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР)*

«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1970

6П2.13
Р 84

УДК 621.315.1:621.3.027.63/22:621.316.925.2(083.96)

Р84 Руководящие указания по релейной защите, вып. 8. Поперечная дифференциальная направленная защита линий 35—220 *кв*., М., «Энергия», 1970.

56 с. с. илл.

В данном выпуске Руководящих указаний по релейной защите приведены схемы поперечной дифференциальной направленной защиты от междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю, используемой на двух параллельных линиях 110—220 *кв* в сетях с большим током замыкания на землю, а также от многофазных коротких замыканий, используемой на двух параллельных линиях 35 *кв* в сетях с малым током замыкания на землю.

Рассмотрены также особенности схем этих защит для двух параллельных линий с ответвлениями.

В выпуске приведены методы расчета поперечных дифференциальных направленных защит двух параллельных линий без ответвлений и двух параллельных линий с ответвлениями. Для иллюстрации методов расчета защиты дан пример выбора параметров защиты и оценки ее чувствительности.

В выпуске учтены директивные материалы Главтехуправления Министерства энергетики и электрификации СССР (заместитель начальника Ф. И. Синьчугов), а также отзывы энергетических систем и проектных организаций.

В схемах использована как выпускаемая промышленностью аппаратура, так и намечаемая к выпуску в ближайшее время.

Данный выпуск Руководящих указаний разработан институтом Энергосетьпроект (заместитель главного инженера Б. С. Успенский) — сектором типовых работ отдела релейной защиты, автоматики, устойчивости и моделирования (ОРЗАУМ): начальник сектора В. А. Рубинчик, консультант А. Б. Чернин, главные инженеры проекта Т. Н. Дороднова, Б. Я. Смелянская, Э. П. Смирнов, руководители групп А. А. Рудман и А. Н. Кожин, под общим руководством А. М. Федосеева.

Много ценных соображений и рекомендаций по данному выпуску дали специалисты по релейной защите Тулэнерго, Ленэнерго, Ярэнерго, Главного управления энергетики и электрификации при Совете Министров БССР, Южного отделения института Энергосетьпроект, ОРГРЭС, Мосэнергопроекта и других организаций.

3-3-13
89-69

6П2.13

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный выпуск Руководящих указаний по релейной защите подготовлен институтом Энергосетьпроект и утвержден Главтехстройпроектом и Главтехуправлением Министерства энергетики и электрификации СССР.

Настоящие Руководящие указания соответствуют разделу III «Защита и автоматика» ПУЭ издания 1966 г. и директивным материалам. Однако не исключена возможность временных расхождений между Руководящими указаниями и этими документами, которые будут изданы в дальнейшем. В таких случаях обязательными являются ПУЭ и директивные материалы.

Руководящие указания являются рекомендуемым материалом, которому должны следовать как проектные, так и эксплуатационные организации с целью максимального применения типовых решений, удешевления и ускорения строительства электроустановок, внедрения в эксплуатацию наиболее совершенных и проверенных опытом решений. Отступления от соответствующих решений, приведенных в Руководящих указаниях, допускаются в случаях, когда это обосновано конкретными местными условиями, а также для ранее запроектированных, монтируемых или действующих устройств, если эти отступления не ведут к серьезным недостаткам и не противоречат принципиальному направлению Руководящих указаний.

**Руководящие указания по релейной защите, вып. 8.**

**Поперечная дифференциальная направленная защита линий 35—220 *кв*.**

Редактор *Т. Н. Дороднова*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова* Корректор *И. С. Соколова*

Сдано в набор 19/V 1969 г. Подписано к печати 17/II 1970 г. Т-04049
Формат 60/×90/$_8$ Бумага типографская № 2
Печ. л. 7+1 вкл. Уч.-изд. л. 9,77 Тираж 15 000 экз. Цена 49 коп. Зак. 2249

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

*Глава первая*

# СХЕМЫ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 35—220 *кв*

**Поперечная дифференциальная направленная защита** может использоваться в качестве основной для двух параллельных линий 35—220 *кв* с односторонним питанием, а также для линий с двусторонним питанием преимущественно в сетях 35 *кв* и распределительных сетях 110 *кв*. При этом в качестве резервной защиты при работе двух линий и основной при отключении одной из них применяются токовые защиты от замыканий на землю и токовые или дистанционные защиты от многофазных замыканий; последние могут быть включены на сумму токов параллельных линий (дистанционная защита в целях уменьшения количества используемой аппаратуры и для повышения чувствительности; токовые защиты в целях повышения чувствительности).

Поперечная дифференциальная направленная защита может в отдельных случаях устанавливаться в дополнение к ступенчатым токовым или дистанционным защитам для снижения времени отключения повреждения на защищаемых линиях, когда по условиям сохранения устойчивости работы системы применение ее не является обязательным, а также на линиях с ответвлениями для облегчения согласования защит от замыканий на землю.

В настоящей главе рассмотрены основные принципы выполнения схем поперечной дифференциальной направленной защиты двух параллельных линий и ее особенности для случая применения на линиях с ответвлениями. Рассмотрены отдельные схемы защиты параллельных линий 110—220 *кв* в сетях с большим током замыкания на землю от всех видов коротких замыканий (рис. 1—6 и 9) и только от замыканий на землю (рис. 7), а также параллельных линий 35 *кв* в сетях с малым током замыкания на землю от всех видов многофазных коротких замыканий (рис. 8).

Схемы на рис. 1—3 и 5—9 выполнены для случая, когда защита установлена на линиях, отходящих от сборных шин подстанций (станций); схемы даны для двойной системы шин при параллельной работе последних только через шиносоединительный выключатель. Эти схемы могут быть применены и для одиночной секционированной системы шин.

Схема на рис. 4 выполнена для случая соединения шин подстанции (станции) по схеме четырехугольника.

На рис. 1—4 даны схемы поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектом от замыканий между фазами и комплектом от замыканий на землю; при этом первый комплект выполнен:

на рис. 1 и 4 — с пуском по току,

на рис. 2 — с пуском по току и напряжению,

на рис. 3 — с пуском по току и по току и напряжению.

Комплект от замыканий на землю выполнен с пуском по току и напряжению нулевой последовательности.

На рис. 5 дана схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектом обратной последовательности от несимметричных коротких замыканий и комплектом от симметричных коротких замыканий.

На рис. 6 дана схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектом от замыканий между фазами, выполненным с пуском по току и по току и напряжению, и комплектом от замыканий на землю, выполненным с пуском по току обратной последовательности и по напряжению нулевой последовательности.

На рис. 7 дана схема поперечной дифференциальной направленной защиты нулевой последовательности от замыканий на землю параллельных линий 110—220 *кв* с пуском по току и напряжению.

На рис. 8 дана схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 35 *кв*.

На рис. 9 в качестве примера приведена схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв*, выполненной с использованием типовой панели защиты типа ЭПЗ-626-64 (для случая наличия на подстанции сборных шин).

Следует отметить, что для параллельных линий 110—220 *кв* помимо панели типа ЭПЗ-626-64 выпускается панель типа ЭПЗ-628-64, схема поперечной дифференциальной направленной защиты которой не отличается от таковой для панели типа ЭПЗ-626-64, однако, в отличие от последней, на этой же панели предусмотрены фазные токовые отсечки и трехступенчатые токовые направленные защиты нулевой последовательности, включенные на ток каждой линии; в качестве резервной предполагается использование дистанционной защиты, включенной на сумму токов параллельных линий.

Для параллельных линий 35 *кв* в настоящее время промышленностью выпускаются следующие типовые панели поперечной дифференциальной токовой направленной защиты:

типа ЭПЗ-607-61 для питающего конца параллельных линий с односторонним питанием и для параллельных линий с двусторонним питанием; в качестве резервной предполагается использование дистанционной защиты, включенной на сумму токов параллельных линий;

типа ЭПЗ-608-61 — для питающего конца параллельных линий с односторонним питанием; в качестве резервной защиты на этой же панели предусмотрена трехступенчатая токовая защита, включенная на сумму токов параллельных линий;

типа ЭПЗ-606-61 для приемного конца параллельных линий с односторонним питанием.

Схемы поперечной дифференциальной направленной защиты указанных панелей практически не отличаются от приведенной на рис. 8.

На рис. 10 приведена схема поперечной дифференциальной токовой (ненаправленной) защиты, устанавливаемой на автотрансформаторах понижающих подстанций, при отсутствии питания со сторон среднего и низшего напряжений и схеме электрических соединений на стороне высшего напряжения два блока линия — автотрансформатор.

На рис. П-19 (в приложении XI) дана схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв*, выполненной с использованием новой типовой панели, разработанной институтом Энергосетьпроект; схема дана для двойной системы шин с возможностью параллельной работы последних как через последовательно соединенные обходной и шиносоединительный выключатели, так и только через шиносоединительный выключатель; в схеме предусмотрена возможность перевода поперечной дифференциальной токовой направленной защиты на обходной выключатель. Во всем остальном схема подобна приведенной на рис. 1.

## А. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМ ЗАЩИТЫ

1. Для сетей с большим током замыкания на землю в схемах по рис. 1—4, 6, 9 и 10 принято выполнение защиты с двумя комплектами: двухфазным комплектом от замыканий между фазами и комплектом от замыканий на землю. Такое выполнение дает возможность обеспечить при замыканиях на землю бóльшую чувствительность по сравнению с выполнением защиты одним трехфазным комплектом, действующим при всех видах повреждения. Схема по рис. 7 содержит только комплект от замыканий на землю.

При этом в указанных схемах используются следующие комплекты от замыканий на землю:

в схемах по рис. 1—4, 7 и 9 — нулевой последовательности с пуском по току и напряжению,

в схеме по рис. 10 — токовый нулевой последовательности,

в схеме по рис. 6 — нулевой последовательности с пуском по току обратной последовательности и по напряжению нулевой последовательности.

Схема по рис. 5 выполнена также с двумя комплектами: комплектом обратной последовательности от несимметричных коротких замыканий и однофазным комплектом от трехфазных коротких замыканий.

Применение этой схемы может оказаться целесообразным в случаях, когда комплект нулевой последовательности не обеспечивает требуемой чувствительности.

2. Для сетей с малым током замыкания на землю принято двухфазное выполнение защиты для действия при замыканиях между фазами и двойных замыканиях на землю. Двухфазное выполнение защиты обеспечивает при двойных замыканиях на землю отключение только одного из мест повреждений не менее чем в 67% случаев.

3. В схемах по рис. 1—4, 6 и 9 предусмотрено выведение из действия комплекта от замыканий между фазами при замыканиях на землю на защищаемых линиях, осуществляемое с помощью пускового органа комплекта от замыканий на землю. Указанное необходимо в связи с тем, что этот комплект может действовать в неповрежденных фазах от токов неповрежденной линии при каскадном отключении замыкания на землю со стороны, противоположной месту установки защиты, что могло бы привести к неправильному отключению неповрежденной линии.

В схеме по рис. 5 предусмотрено выведение из действия комплекта обратной последовательности при трехфазном коротком замыкании на защищаемых линиях, осуществляемое с помощью пускового органа комплекта от симметричных коротких замыканий. Указанное необходимо в связи с тем, что комплект обратной последовательности может действовать на отключение неповрежденной линии от токов и напряжений небаланса при трехфазном коротком замыкании на другой защищаемой линии.

4. В схемах предусмотрено выведение защиты из действия при отключении выключателя любой из защищаемых линий, осуществляемое разрывом цепи оперативного постоянного тока контактами реле положения «включено» выключателей линий. Указанное необходимо в связи со следующим:

а) при каскадном действии защит обоих концов линий после отключения выключателя поврежденной линии с одной стороны оставшаяся в работе защита с этой стороны, переориентируясь, могла бы неправильно отключить выключатель неповрежденной линии;

б) после отключения одной из параллельных линий оставшаяся в работе защита могла бы неправильно отключить и вторую линию при внешнем коротком замыкании и направлении мощности короткого замыкания от шин в сторону линии.

Необходимо, однако, учитывать, что введение в цепь оперативного тока контактов реле положения выключателей не предотвращает возможность неправильного действия защиты в последнем случае, если линия будет отключена только со стороны, противоположной месту установки рассматриваемой защиты; в связи с этим в таком режиме работы оперативный ток должен сниматься с защиты вручную отключающими устройствами.

Следует отметить, что для поперечной дифференциальной направленной защиты, установленной на приемном конце параллельных линий с односторонним питанием, указанное выведение защиты из действия при отключении выключателя одной из защищаемых линий может не предусматриваться, если в этом случае защита не может подействовать неправильно в условиях, рассмотренных в пп. а) и б), от тока, проходящего в неповрежденной линии со стороны приемной подстанции.

Использование для выведения защиты контактов реле положения «включено» выключателей линий обусловлено необходимостью разрыва цепи оперативного тока до размыкания главных контактов выключателя; применение для указанной цели блок-контактов выключателя потребовало бы их специальной регулировки, что практически может оказаться затруднительным.

Необходимо учитывать, что при низких коэффициентах возврата промежуточного реле, используемого в качестве реле положения «включено», время его возврата может быть столь велико, что требование разрыва его контактом цепи оперативного тока до размыкания главных контактов выключателя не будет выполнено. Указанное требование при применении реле типа РП-23 удовлетворяется в случае, если коэффициент возврата этого реле не меньше 0,5 при $U_{с.р}$ порядка (0,6÷0,7) $U_{ном}$.

5. В схемах по рис. 1—3 и 5—9 предусмотрено также выведение защиты из действия при отключении шиносоединительного (секционного) выключателя, осуществляемое разрывом цепи оперативного постоянного тока контактом реле положения «включено» этого выключателя. Указанное необходимо в случае, когда защищаемые параллельные линии присоединены к разным системам (секциям) шин, для предотвращения неправильного действия защиты при внешних коротких замыканиях в режиме работы с отключенным шиносоединительным (секционным) выключателем.

При переводе обеих параллельных линий на одну систему шин выведение защиты из действия в случае отключения шиносоединительного выключателя должно быть исключено, что достигается в схемах шунтированием контакта реле положения «включено» этого выключателя переключающим устройством.

6. В качестве пусковых органов использованы:

а) в комплекте от замыканий между фазами защиты линий 110—220 *кв* и в защите линий 35 *кв*:

реле тока, включенные на разность токов одноименных фаз защищаемых линий (рис. 1, 3, 4, 6, 8 и 9);

реле тока, включенные на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, и реле напряжения, включенные на междуфазные напряжения (рис. 2, 3 и 6);

б) в комплекте от замыканий на землю защиты линий 110—220 *кв* (рис. 1—4, 6, 7 и 9):

реле тока, включенное на разность токов $3I_0$ или $I_2$ (рис. 6) защищаемых линий, и реле напряжения, включенное на напряжение $3U_0$;

в) в комплекте от несимметричных коротких замыканий защиты линий 110—220 *кв* (рис. 5):

элемент тока устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности, включенного на разности токов одноименных фаз защищаемых линий и междуфазные напряжения;

г) в комплекте от симметричных коротких замыканий защиты линии 110—220 *кв* (рис. 5):

реле тока, включенное на разность токов одной фазы защищаемых линий.

Выполнение пускового органа комплекта от замыканий на землю по п. «б» практически всегда обеспечивает бо́льшую чувствительность по сравнению с пусковым органом, выполненным только с реле тока, так как наличие реле напряжения нулевой последовательности дает возможность не отстраивать реле тока от тока небаланса при междуфазных коротких замыканиях на защищаемой линии вблизи места установки защиты, который может оказаться весьма значительным (в ряде случаев бо́льшим максимального рабочего тока $I_{раб.макс}$ — см. гл. 2, разд. А, п. 1). При отсутствии реле напряжения указанная отстройка реле тока необходима для предотвращения возможности неправильного действия от токов небаланса комплекта от замыканий на землю на отключение неповрежденной линии (схемы по рис. 1—4, 6, 7 и 9) и выведения из действия комплекта от замыканий между фазами при рассматриваемом коротком замыкании — см. п. 3 (схемы по рис. 1—4, 6 и 9).

7. В качестве реле направления мощности использованы реле мощности двустороннего действия, при этом:

а) в защите линий 110—220 *кв* (комплект от замыканий между фазами) и линий 35 *кв* использованы реле, реагирующие на

$$S_р = U_р I_р \cos(\varphi + \alpha),$$

где $\alpha = 30°$ или 45° и включенные по 90-градусной схеме;

б) в защите линий 110—220 *кв* (комплект от замыканий на землю) использовано реле, реагирующее на

$$S_р = U_р I_р \sin(\varphi_р + 20°)$$

и включенное на утроенные ток и напряжение нулевой последовательности.

В схеме по рис. 5 комплект от несимметричных коротких замыканий выполнен с использованием устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности; реле мощности реагирует на

$$S_р = U_р I_р \cos(\varphi_р - 110°).$$

8. Комплекты от замыканий между фазами в схемах по рис. 1—4, 6, 8 и 9 выполнены с пофазным пуском. Указанное необходимо для предотвращения возможного неправильного действия реле направления мощности неповрежденной фазы на отключение неповрежденной линии при замыкании между

двумя фазами под влиянием тока небаланса и при каскадном отключении замыкания между двумя фазами под влиянием тока в неповрежденной фазе неповрежденной линии.

9. Все схемы имеют тот недостаток, что при обрыве с односторонним замыканием между фазами, а в сетях с большим током замыкания на землю и при обрыве с односторонним замыканием на землю защита, установленная со стороны обрыва, может действовать на отключение неповрежденной линии. Однако в связи с повышением качества монтажа и эксплуатации линий обрывы с короткими замыканиями являются относительно редкими видами повреждений. Поэтому схемы, предотвращающие неправильную работу защит при обрывах с короткими замыканиями, как усложняющие защиту в целом, используются только в некоторых особых случаях и в настоящем выпуске Руководящих указаний не рассматриваются.

10. Рассматриваемая защита при применении ее для сетей с малым током замыкания на землю имеет тот недостаток, что при каскадном отключении двойного замыкания на землю, когда одно место повреждения находится на одной из параллельных линий, а второе — вне их на фазе с трансформаторами тока, защита может действовать на отключение неповрежденной линии.

11. Схемы по рис. 1, 2 и 4 выполнены с использованием комплектов защиты типов КЗ-6 (комплект от замыканий между фазами) и КЗ-7 (комплект от замыканий на землю); схема по рис. 8 — с использованием комплекта типа КЗ-6, а схемы по рис. 3, 5—7, 9 и 10 выполнены с использованием отдельных реле и устройств.

12. В качестве выходных промежуточных реле защиты предусмотрены реле, имеющие замедление при срабатывании. Последнее необходимо: а) для предотвращения неправильного действия защиты параллельных линий, разведенных на разные системы (секции) шин, в течение времени ликвидации короткого замыкания на шинах дифференциальной защитой последних при наличии разброса во временах отключения выключателей параллельных линий и шиносоединительного (секционного) выключателя [1], б) для предотвращения действия защиты при работе устанавливаемых на линиях трубчатых разрядников. При этом в схемах по рис. 1, 2, 4 и 8 с комплектами защиты типов КЗ-6 и КЗ-7, а также в схеме по рис. 9 используются предусмотренные в комплекте типа КЗ-6 и в панели типа ЭПЗ-626-64 реле, выполненные по типу РП-251, а в схемах по рис. 3, 5—7 — реле типа РП-253. Последнее имеет малое время при возврате, что желательно, если на подстанции применяется устройство резервирования при отказе выключателей.

13. В целях облегчения работы контактов выходных промежуточных реле защиты целесообразно предусматривать удерживание отключающего сигнала до момента размыкания блок-контактов выключателя в цепи отключения.

Схемы по рис. 1, 2, 4, 8, 9 и 10 выполнены в предположении, что указанное удерживание отключающего сигнала осуществляется в схеме управления выключателя.

В схемах по рис. 3, 5—7 выходные промежуточные реле типа РП-253 имеют сериесные удерживающие обмотки, которые могут использоваться для удерживания отключающего сигнала при установке защиты на линиях с масляными выключателями; при установке защиты на линиях 110—220 *кв* с воздушными выключателями эти обмотки должны быть исключены для предотвращения возможного повреждения отключающей катушки при отказе в отключении одной из фаз выключателя.

14. Необходимо иметь в виду, что при работе параллельных линий, на которых установлена поперечная дифференциальная направленная защита, на одном из концов на разные системы (секции) шин от действия указанной защиты при неуспешном АПВ шин отключится:

а) в случае включения первым шиносоединительного (секционного) выключателя — с противоположного конца линия, присоединенная к неповрежденой системе (секции) шин;

б) в случае включения первым выключателя одной из параллельных линий — с противоположного конца эта линия, что нежелательно (например, для линии с ответвлениями такое отключение приведет к обесточению промежуточных подстанций).

По указанной причине в рассматриваемом случае включение первым при АПВ шин шиносоединительного (секционного) выключателя не должно предусматриваться; допустимость включения первым выключателя одной из параллельных линий должна рассматриваться в каждом конкретном случае.

15. Следует отметить, что при АПВ одной из защищаемых параллельных линий в случае, когда вторая параллельная линия включена, принципиально возможно неправильное срабатывание защиты. Указанное может иметь место при включении линии от устройства АПВ с одной из сторон, если к этому моменту развились качания. Однако на основании опыта эксплуатации возможность рассматриваемого неправильного действия защиты при АПВ одной из линий, если вторая линия не отключалась, можно считать маловероятной.

Возможно также неправильное действие защиты в случае АПВ после отключения обеих параллельных линий, если включение от устройства АПВ второй линии происходит при качаниях или асинхронном ходе (возникших, например, в результате несинхронного включения первой линии).

Отстройка защиты от тока качаний или асинхронного хода привела бы к ее недопустимому загрублению.

16. При каскадном включении одной из защищаемых линий от устройства АПВ на неустранившееся короткое замыкание возможно неправильное действие рассматриваемой защиты со стороны, которая включается последней.

Указанное может иметь место вследствие восстановления цепи оперативного тока защиты контактом реле положения «включено» выключателя поврежденной линии раньше, чем замкнутся его главные контакты, если к моменту подведения оперативного тока к защите еще не отключился уже включенный от устройства АПВ выключатель противоположного конца и в связи с этим по неповрежденной линии проходит ток повреждения (направление мощности с рассматриваемой стороны — от шин в сторону линии).

Следует отметить, что описанное неправильное действие защиты не может иметь места в случае применения устройств АПВ, обеспечивающих определенную последовательность включения выключателей линии, например, устройств АПВ с контролем наличия напряжения на линии или с контролем синхронизма. Во всех остальных случаях возможность неправильного действия защиты должна быть предотвращена специальным выбором выдержек времени устройств АПВ обоих концов линии.

17. Схемы выполнены для случая присоединения защиты к трансформаторам напряжения, установленным в сети напряжения защищаемых линий; при этом питание цепей напряжения защиты осуществляется:

а) при двойной системе шин через контакты реле повторителей положения разъединителей одной из линий (на схемах не показаны);

б) при одиночной секционированной системе шин непосредственно от трансформатора напряжения одной из секций.

Схемы даны для наиболее часто встречающегося случая применения поперечной дифференциальной направленной защиты — при установке трансформаторов напряжения на шинах. При установке трансформаторов напряжения на линиях следует рассмотреть вопрос о необходимости осуществления мероприятий по обеспечению действия защиты и устройства резервирования при отказе выключателей, выполненного без удерживания сигнала от защиты на определенное время, соответственно при неполнофазных включениях на однофазное короткое замыкание и неполнофазных отключениях однофазного короткого замыкания (по аналогии с решением № Э-5/65 Технического управления по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР).

18. В схемах по рис. 1—7 предусмотрены контакты выходного промежуточного реле для пуска устройства резервирования при отказе выключателей.

19. Для сигнализации действия защиты в схемах предусмотрены указательные реле в цепях обмоток выходных промежуточных реле.

Для предотвращения возможного срабатывания указательных реле при действии установленных на линиях трубчатых разрядников обмотки этих реле шунтированы размыкающими контактами соответствующего выходного промежуточного реле.

20. В цепях переменного тока и в цепях напряжения защиты по рис. 1—9 предусмотрены испытательные блоки.

21. В цепях отключения каждой из двух защищаемых линий и в цепях пуска устройства резервирования при отказе выключателей этих линий предусмотрены отключающие устройства для выведения из действия защиты в следующих случаях:

---

[1] Подробнее см. «Руководящие указания по релейной защите, вып. 3. Защита шин 6—220 *кв* станций и подстанций», Госэнергоиздат, 1961.

а) при неисправностях в цепях защиты;

б) при проверках защиты;

в) при отключении одной из линий с противоположного конца;

г) при отключении шиносоединительного (секционного) выключателя с противоположного конца, если защищаемые параллельные линии присоединены там к разным системам (секциям) шин.

Следует отметить, что переключающее устройство, предусмотренное в схемах для шунтирования контакта реле положения «включено» шиносоединительного (секционного) выключателя (см. п. 5), может быть использовано также для выведения защиты, если выполнение указанного с помощью отключающих устройств в выходных цепях защиты оказывается нежелательным.

22. В схемах типы указательных реле и значения добавочных сопротивлений даны для напряжения оперативного тока 220 *в*.

## Б. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ НА ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

1. В настоящем разделе рассматриваются особенности выполнения поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий с ответвлениями, выполненных по схемам, приведенным на рис. 11. При рассмотрении вопросов использования защиты на линиях с ответвлениями подстанции, через шины которых осуществляется непосредственная электрическая связь между защищаемыми параллельными линиями (подстанции *I* и *II* на рис. 11), именуются опорными; остальные подстанции, которые могут присоединяться как к одной линии (подстанции *III* и *IV* на рис. 11,*а*), так и к двум линиям (подстанция *III* на рис. 11,*б*), именуются промежуточными.

Поперечная дифференциальная направленная защита (выполненная, например, по схемам рис. 1—10) может использоваться на параллельных линиях, когда допустимо не учитывать режимы по п. 2,*а* (см. ниже) ввиду их малой продолжительности и если эта защита обеспечивает требуемую чувствительность.

Ниже, в настоящей главе, а также в главе 3, рассматривается только защита, устанавливаемая со стороны опорных подстанций.

На промежуточных подстанциях, трансформаторы или автотрансформаторы которых присоединены к двум линиям, работают параллельно на сторонах среднего или низшего напряжений и не имеют питания с этих сторон, может устанавливаться поперечная дифференциальная защита, выполненная, например, по схеме рис. 10.

2. Применение поперечной дифференциальной направленной защиты на параллельных линиях с ответвлениями ограничено в связи со следующим.

а) Для части таких линий необходимо считаться с возможностью режимов работы при отключении одного из участков (например, во время ремонта по участкам линии с промежуточной подстанцией по типу подстанции *III* на рис. 11,*а*) или при отключении линии с одного из концов (например, во время ремонта выключателя линии со стороны опорной подстанции при отсутствии на ней обходного выключателя); в указанных режимах поперечная дифференциальная направленная защита должна быть выведена из действия.

б) Комплект от замыканий между фазами (схемы по рис. 1—4, 6 и 9), комплект обратной последовательности от несимметричных коротких замыканий и комплект от симметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) защиты для сетей с большим током замыкания на землю, а также защита для сетей с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8) должны быть отстроены от повреждений за трансформаторами промежуточных подстанций (гл. 3, разд. А, п. 1; разд. Б, п. 2; разд. Г, пп. 1 и 3 и разд. Е).

в) Токовый пусковой орган комплекта от замыканий между фазами (схемы по рис. 1, 3, 4, 6 и 9) и комплекта от симметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) защиты для сетей с большим током замыкания на землю, а также токовый пусковой орган защиты для сетей с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8) должны отстраиваться от внешних коротких замыканий (на шинах опорных подстанций) с учетом тока в защите, обусловленного неодинаковыми значениями нагрузок и мощностей генерирующих источников промежуточных подстанций и несимметричным присоединением последних к защищаемым линиям, например, когда на защищаемых линиях имеются промежуточные подстанции по рис. 11,*а*, присоединенные к одной из линий (гл. 3, разд. А, п. 2; разд. Г. п. 3 и разд. Е).

Кроме того, перечисленные в пп. «б» и «в» пусковые органы и комплекты защиты должны дополнительно отстраиваться от максимального тока в защите в условиях каскадного включения одной из защищаемых линий при успешном АПВ, когда кроме тока нагрузки в работающей линии, в защиту проходит также ток самозапуска нагрузки промежуточных подстанций, присоединенных к включаемой от АПВ линии, или бросок тока намагничивания трансформаторов этих подстанций.

г) Комплект обратной последовательности от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) и устройство фильтр-реле тока обратной последовательности комплекта от замыканий на землю (рис. 6) должны отстраиваться от внешних несимметричных коротких замыканий с учетом тока обратной последовательности в защите, обусловленного неодинаковыми значениями нагрузок и несимметричным присоединением питающих их подстанций к защищаемым линиям, например, когда на защищаемых линиях имеются промежуточные подстанции по рис. 11,*а*, присоединенные к одной из линий (гл. 3, разд. Г, п. 2).

д) Комплект от симметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) должен отстраиваться от тока в неповрежденной фазе при каскадном отключении замыкания на землю на одной из защищаемых линий с учетом заземления нейтралей трансформаторов промежуточных подстанций (гл. 3, разд. Г, п. 3).

е) Комплект от замыканий на землю при выполнении его реагирующим только на нулевую последовательность (схемы по рис. 1—4, 7 и 9) должен отстраиваться от внешних замыканий на землю (на шинах опорных подстанций) с учетом тока нулевой последовательности в защите, обусловленного неодинаковыми мощностями заземленных трансформаторов и несимметричным присоединением их к защищаемым линиям (гл. 3, разд. В, п. 1), например, когда трансформаторы с заземленными нейтралями присоединены к параллельным линиям на неодинаковых расстояниях от опорной подстанции или трансформатор с заземленной нейтралью, присоединяемый к одной из линий, временно отключен (рис. 12,*а*).

Кроме того, комплект от замыканий на землю должен отстраиваться дополнительно от тока в нулевом проводе защиты в условиях каскадного включения одной из защищаемых линий при успешном АПВ, когда в защиту проходит бросок тока намагничивания трансформаторов промежуточных подстанций, присоединенных к включаемой линии.

ж) Наличие заземленных нейтралей трансформаторов промежуточных подстанций снижает чувствительность комплекта от замыканий на землю, а при наличии питания на стороне низшего или среднего напряжения промежуточных подстанций или при параллельной работе на этих сторонах промежуточных подстанций по рис. 11,*б*, присоединенных к двум линиям, снижается также и чувствительность комплекта от замыканий между фазами, комплекта от несимметричных коротких замыканий и защиты для сетей с малым током замыкания на землю.

з) Зона каскадного действия защиты на линиях с ответвлениями может быть значительно больше, чем на аналогичных линиях без ответвлений, особенно при наличии промежуточных подстанций, присоединенных к двум линиям, с параллельной работой трансформаторов на стороне низшего или среднего напряжения. В последнем случае возможно каскадное действие защиты с последовательным отключением нескольких выключателей; при этом будет иметь место значительное увеличение времени отключения повреждения.

Кроме того, следует иметь в виду, что реле направления мощности нулевой последовательности комплекта от замыканий на землю может действовать неправильно (на отключение неповрежденной линии) при возникновении замыкания на землю в режиме несимметричного присоединения к защищаемым линиям трансформаторов с заземленными нейтралями. Указанное может иметь местое при повреждении на противоположном (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) конце линии (рис. 12,*б*). Однако неправильное действие защиты предотвращается тем, что в указанном случае не будет действовать пусковое реле тока.

В связи с необходимостью учета условий по пп. «б»—«ж», защита значительно загрубляется.

3. При использовании защиты на линиях с ответвлениями может оказаться необходимым выполнять токовый пусковой орган комплекта от замыканий между фазами (в схемах по рис. 1—4 и 6), комплекта от симметричных коротких замыканий (в схеме по рис. 5) и токовый пусковой орган защиты для сетей с малым током замыкания на землю (в схеме по рис. 8) с помощью реле тока с насыщающимся транс-

форматором (типа РНТ-565 или РНТ-566). Указанное может потребоваться в целях облегчения отстройки от броска тока намагничивания трансформаторов промежуточных подстанций, если условие по п. 2,в окажется расчетным.

Аналогично может оказаться необходимым использовать реле тока с насыщающимся трансформатором в комплекте от замыканий на землю (в схемах по рис. 1—4 и 7), что облегчит отстройку защиты от броска тока намагничивания в нулевом проводе и отстройку от токов небаланса при внешних замыканиях на землю в условиях по п. 2,е.

При использовании в защите реле тока с насыщающимися трансформаторами схемы выполняются по аналогии с рассмотренными в разд. В, но без использования комплектов защиты типов КЗ-6 и КЗ-7. В качестве примера комплект от симметричных к. з. в схеме по рис. 5 и защита от замыканий на землю по рис. 7 выполнены с реле типа РНТ 565.

4. В случаях, когда комплект от замыканий на землю недопустимо загрубляется при отстройке от внешних замыканий на землю (по п. 2,е) из-за тока нулевой последовательности в защите, обусловленного неодинаковыми мощностями трансформаторов с заземленными нейтралями, питающихся от промежуточных подстанций, и их несимметричным присоединением к защищаемым линиям, может оказаться целесообразным предусматривать по отдельному дополнительному реле направления мощности на каждую линию, осуществляющему блокирование защиты при направлении мощности короткого замыкания к шинам подстанции, на которой она установлена [1]. Указанное дает возможность не отстраивать рассматриваемый комплект от замыканий на землю на шинах ближайшей опорной подстанции.

5. Режим заземления нейтралей трансформаторов промежуточных подстанций, присоединенных к защищаемым линиям 110 *кв*, следует принимать по условию возможного повышения чувствительности комплекта от замыканий на землю (например, заземлять нейтрали наименьшего числа трансформаторов). При этом также необходимо учитывать требования защиты трансформаторов от перенапряжений.

При отсутствии питания и раздельной работе на сторонах низшего и среднего напряжений этих трансформаторов их нейтрали могут не заземляться в случаях, если это допустимо по условиям защиты от перенапряжений.

При наличии питания или параллельной работе на сторонах среднего или низшего напряжений трансформаторов по условиям защиты от перенапряжений, как правило, допустимо заземлять на каждой линии нейтраль только одного трансформатора.

6. В случаях, когда при выполнении комплекта от замыканий на землю реагирующим только на нулевую последовательность не обеспечивается требуемая чувствительность по току, может оказаться целесообразным выполнять этот комплект с пуском от реле тока обратной последовательности и реле напряжения нулевой последовательности (последнее необходимо для отстройки от повреждений за трансформаторами промежуточных подстанций по п. 2,*б*), как это сделано в схеме по рис. 6.

7. На параллельных линиях с ответвлениями при заземлении нейтралей трансформаторов промежуточных подстанций может оказаться целесообразной установка комплекта от замыканий на землю поперечной дифференциальной направленной защиты без комплекта от замыканий между фазами (схема по рис. 7). Такое выполнение защиты может потребоваться для обеспечения селективного действия ступенчатой токовой направленной защиты нулевой последовательности и уменьшения времени отключения замыкания на землю в случаях, когда комплект от замыканий между фазами поперечной дифференциальной направленной защиты не может быть использован из-за плохой чувствительности.

На рис. 13 в качестве примера показано каскадное отключение замыкания на землю, когда благодаря наличию взаимоиндукции между линиями $I_{0I} > I_{0II}$; в этом случае согласование II ступени защиты 1 с I ступенью защиты 2 невозможно. При установке комплекта от замыканий на землю поперечной дифференциальной направленной защиты со стороны подстанции *II* II ступень защиты 1 в условиях, приведенных на рис. 13, должна согласовываться не с I ступенью защиты 2, а с более чувствительным реле тока пускового органа поперечной дифференциальной направленной защиты, что позволяет обеспечить селективность действия ступенчатой токовой направленной защиты и уменьшить время отключения замыкания на землю.

[1] Н. В. Мурашко, Поперечная дифференциальная направленная защита нулевой последовательности для линий с ответвлениями, «Электрические станции» 1962, № 4.

## В. ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМ ЗАЩИТЫ ПО РИС. 1—10

**Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности (рис. 1).**

1. Схема применима в тех случаях, когда пусковой орган комплекта от замыканий между фазами, выполненный только с реле тока, обеспечивает требуемую чувствительность.

2. Комплекты от замыканий между фазами и от замыканий на землю выполнены с использованием комплектов защит соответственно типов КЗ-6 и КЗ-7.

3. Пусковой орган комплекта от замыканий между фазами выполнен с помощью двух реле тока *1РТ* и *2РТ*, включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий.

Пусковой орган комплекта от замыканий на землю выполнен с помощью реле тока *РТ*, включенного на разность токов $3I_0$ защищаемых линий и отстроенного от тока небаланса при внешних замыканиях на землю, и реле напряжения *РН*, включенного на напряжение $3U_0$ (см. гл. 2, разд В).

Пуск комплекта от замыканий на землю осуществляется последовательно включенными замыкающими контактами реле тока *РТ* и реле напряжения *РН*.

4. Реле направления мощности двустороннего действия *1РМ* и *2РМ* комплекта от замыканий между фазами включены по 90-градусной схеме и реагируют на

$$S_р = U_р I_р \cos(\varphi_р + \alpha), \text{ где } \alpha = 30° \text{ или } 45°,$$

а реле *РМ* комплекта от замыканий на землю включено на утроенные ток и напряжение нулевой последовательности и реагирует на

$$S_р = U_р I_р \sin(\varphi_р + 20°).$$

5. Выведение из действия комплекта от замыканий между фазами при замыканиях на землю производится размыканием параллельно включенных размыкающих контактов реле тока *РТ* и реле напряжения *РН* пускового органа комплекта от замыканий на землю. Использование контакта реле тока *РТ* предотвращает выведение комплекта от замыканий между фазами при замыкании на землю двух фаз и отказе по чувствительности реле тока *РТ*.

В случае, если при замыкании двух фаз на землю обеспечивается требуемая чувствительность реле тока *РТ* комплекта от замыканий на землю, его контакт в цепи выведения из действия комплекта от замыканий между фазами является необязательным.

Помимо параллельно включенных контактов реле *РТ* и *РН* в цепях выведения комплекта от замыканий между фазами предусмотрен размыкающий контакт реле *РП*. Он предназначен для разрыва обходной цепи пуска выходного промежуточного реле неповрежденной линии через контакты реле тока и реле направления мощности указанного комплекта.

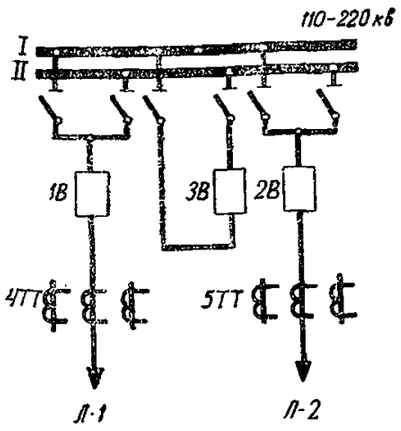
Эта обходная цепь появляется при каскадном отключении замыкания на землю на конце, противоположном месту установки защиты, в одной из фаз, в которых установлена защита от междуфазных коротких замыканий. В этом случае в цепи выходного промежуточного реле поврежденной линии будут замкнуты контакты реле тока и реле направления мощности поврежденной фазы, а в цепи выходного промежуточного реле неповрежденной линии могут быть замкнуты контакты реле тока и реле направления мощности неповрежденной фазы; указанное могло бы привести к отключению неповрежденной линии.

Так, например, при каскадном отключении замыкания на землю фазы *А* на линии *Л-1* оперативный постоянный ток при отсутствии контакта $РП_1$ подавался бы на выходное промежуточное реле *2РПВ* по цепи контактов реле $РП_2$ и $РМ_1$, $1РМ_1$, *1РТ*, *2РТ* и $2РМ_2$, что привело бы к неправильному отключению линии *Л-2*.

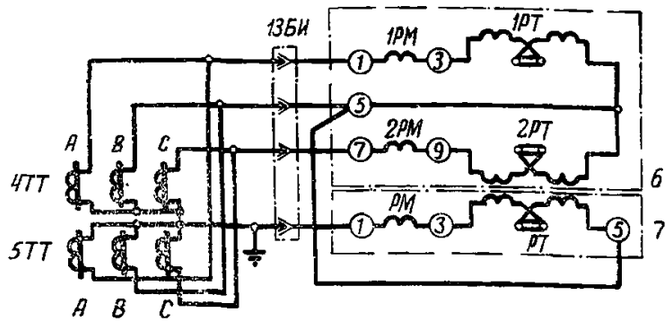
6. Пофазный пуск комплекта от замыканий между фазами обеспечивается в схеме тем, что оперативный постоянный ток подается к контактам реле направления мощности только поврежденной фазы.

7. Предусмотренные в схеме выходные промежуточные реле *1РПВ* и *2РПВ* имеют замедление при срабатывании (см. разд. А, п. 12).

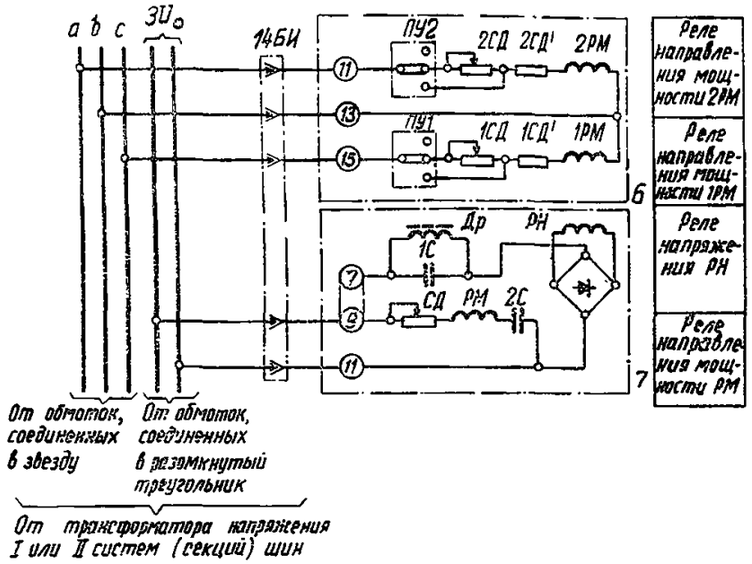
Следует отметить, что в качестве выходных промежуточных реле в данной схеме используются предусмотренные в комплектах КЗ-6 и КЗ-7 реле, выполненные по типу РП-251. Указанные реле имеют значительное время (0,2—0,3 *сек*) при возврате, что может потребовать либо повышения выдержки времени устройства резервирования при отказе выключателей, либо применения специальных мероприятий



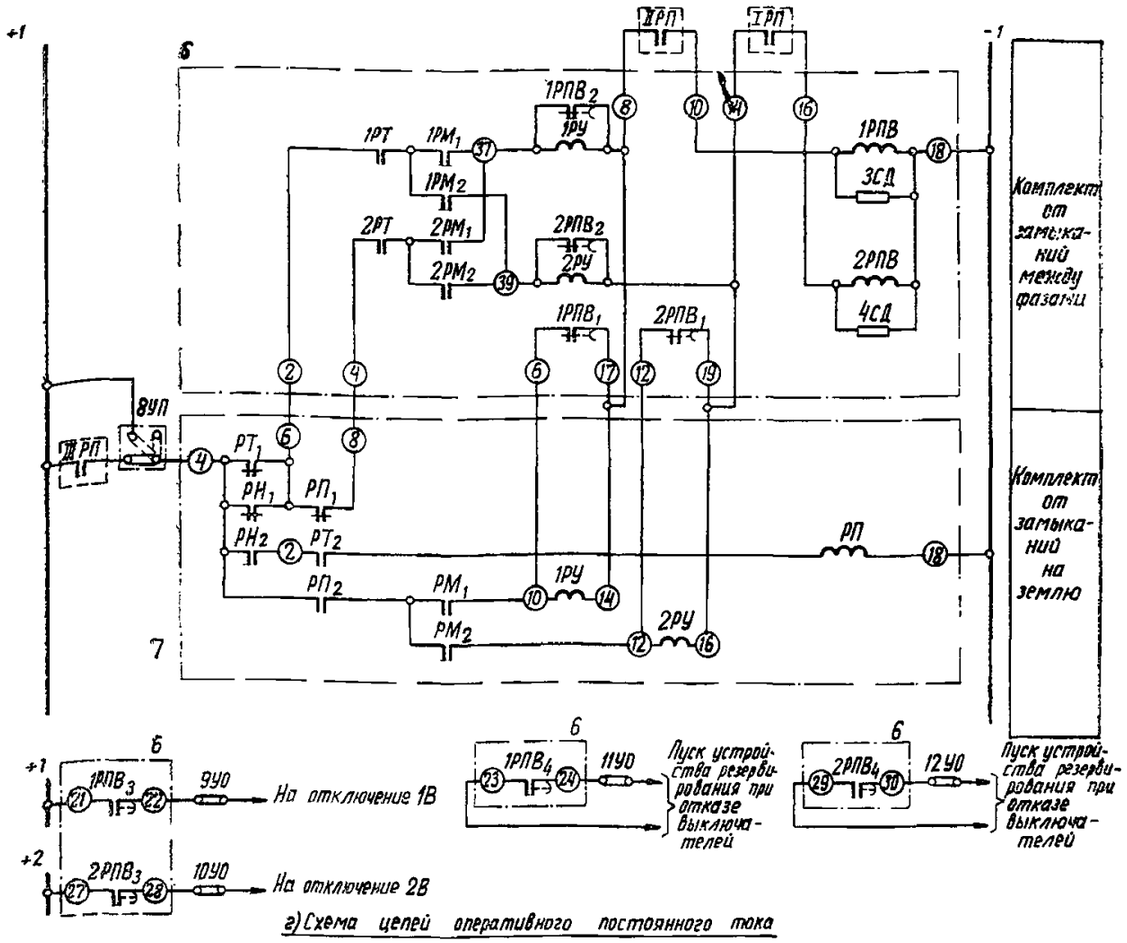

а) Поясняющая схема




б) Схема цепей переменного тока




в) Схема цепей напряжения



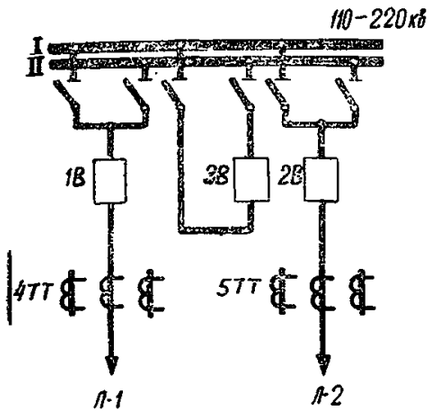

г) Схема цепей оперативного постоянного тока

д) Схема цепей сигнализации

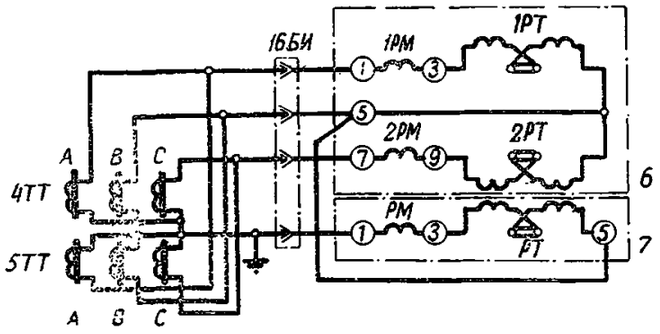
Рис. 1. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6* — комплект поперечной дифференциальной токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий типа КЗ-6 (*1РТ, 2РТ* — реле тока по типу РТ-40; *1РМ, 2РМ* — реле мощности по типу РБМ-271; *1РПВ, 2РПВ* — реле промежуточные по типу РП-251; *1РУ, 2РУ* — реле указательные по типу РУ-21/0,025; *3СД, 4СД* — сопротивления добавочные 8 200 *ом* типа ПЭВ-15); *7* — комплект поперечной дифференциальной направленной защиты от замыканий на землю типа КЗ-7 (*РТ* — реле тока по типу РТ-40; *РН* — реле напряжения по типу РНН-57; *РМ* — реле мощности по типу РБМ-278; *РП* — реле промежуточное типа КДР-1; *1РУ, 2РУ* — реле указательные по типу РУ-21/0,025); *8УП* — устройство переключающее; *9УО — 12УО* — устройства отключающие; *13БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *14БИ* — блок испытательный типа БИ-6.

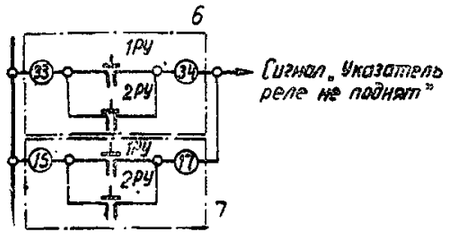
Примечание. *IРП, IIРП, IIIРП* — контакты реле положения «включено» выключателей *1В, 2В* и *3В*.



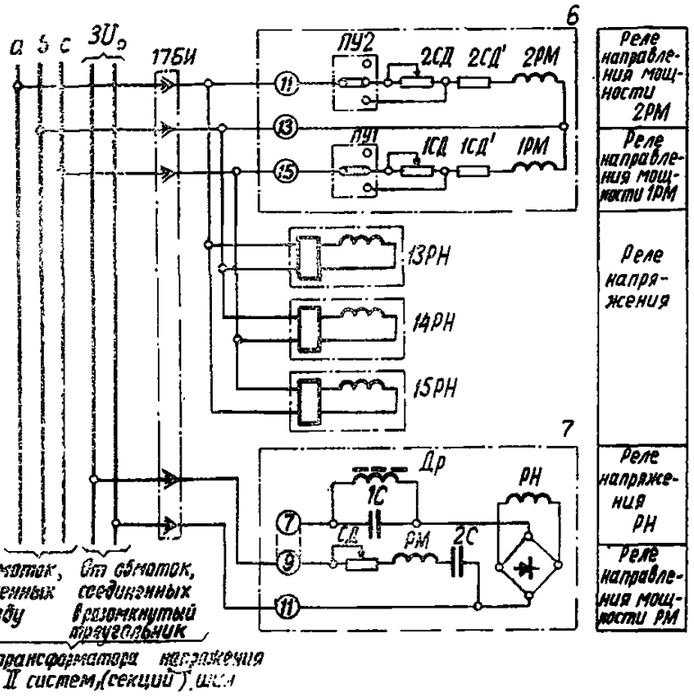

а) Поясняющая схема



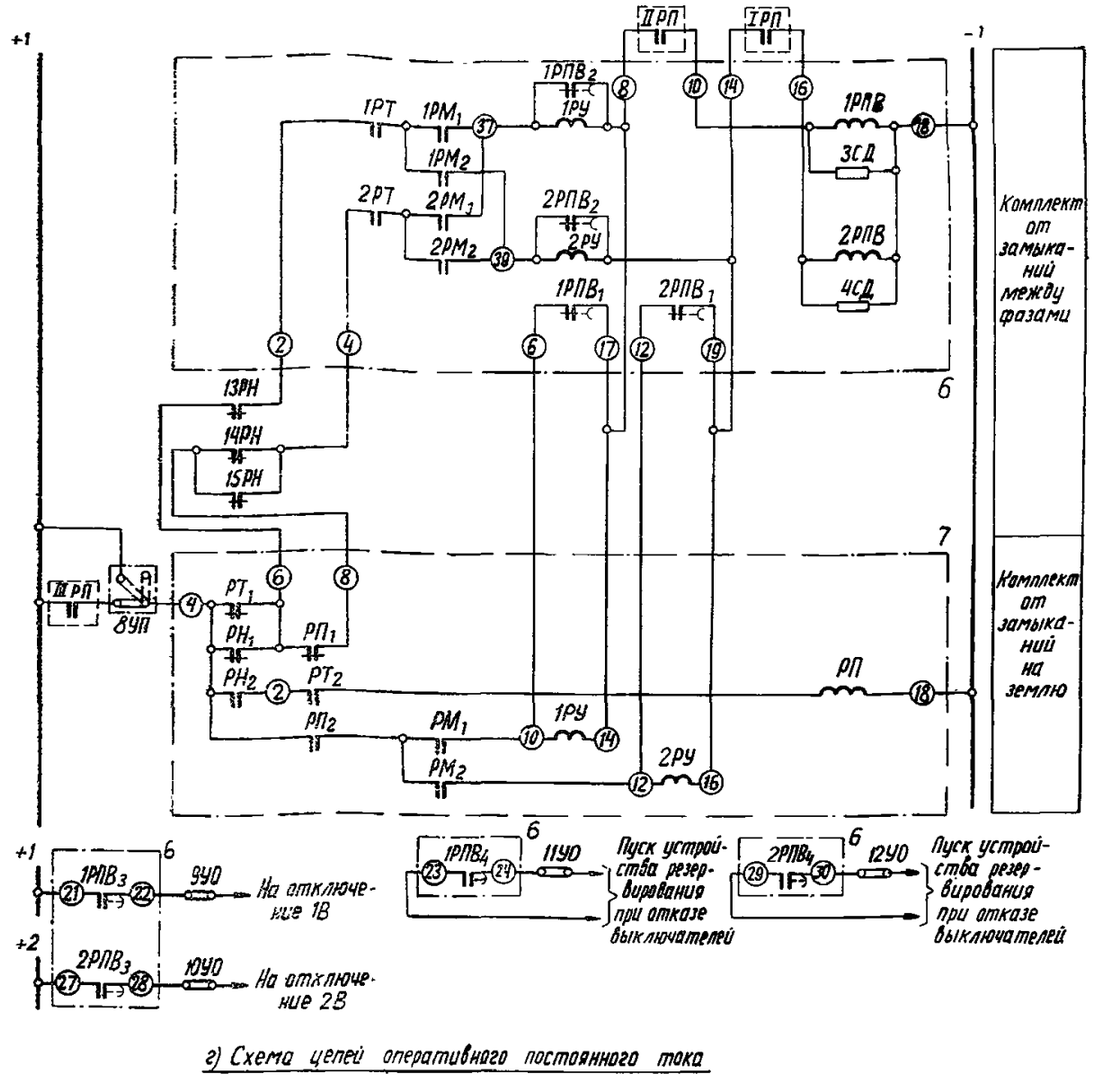

б) Схема цепей переменного тока




д) Схема цепей сигнализации




в) Схема цепей напряжения

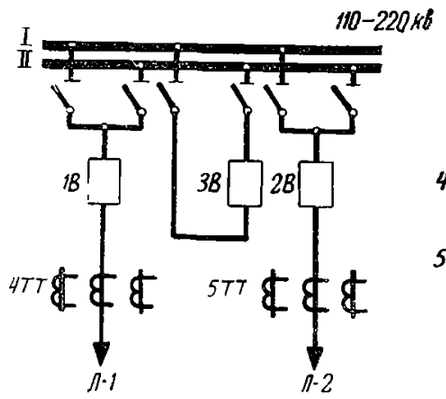



г) Схема цепей оперативного постоянного тока

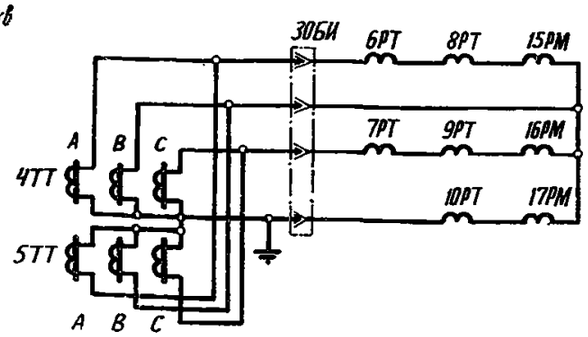
Рис. 2. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и напряжению и от замыканий на землю нулевой последовательности.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6* — комплект поперечной дифференциальной токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий типа КЗ-6 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *7* — комплект поперечной дифференциальной направленной защиты от замыканий на землю типа КЗ-7 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *8УП* — устройство переключающее; *9УО—12УО* — устройства отключающие; *13РН—15РН* — реле напряжения типа РН-54/160; *16БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *17БИ* — блок испытательный типа БИ-6.

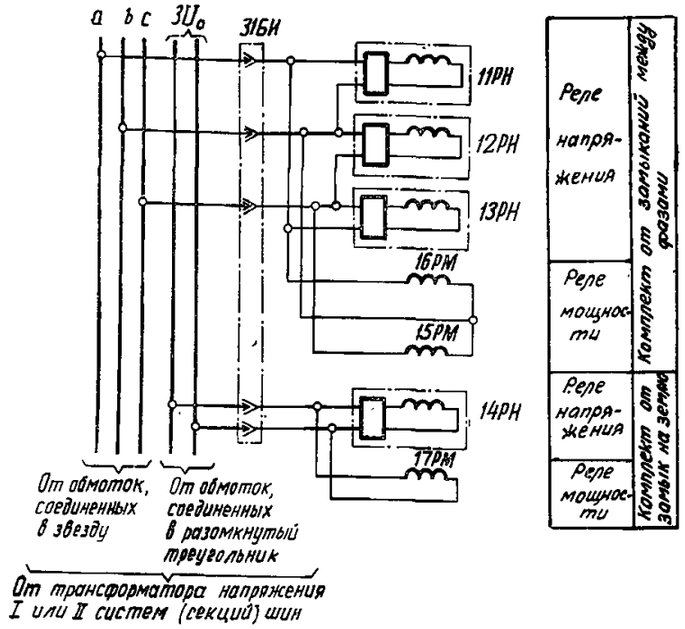
Примечание. См. примечание к рис. 1.



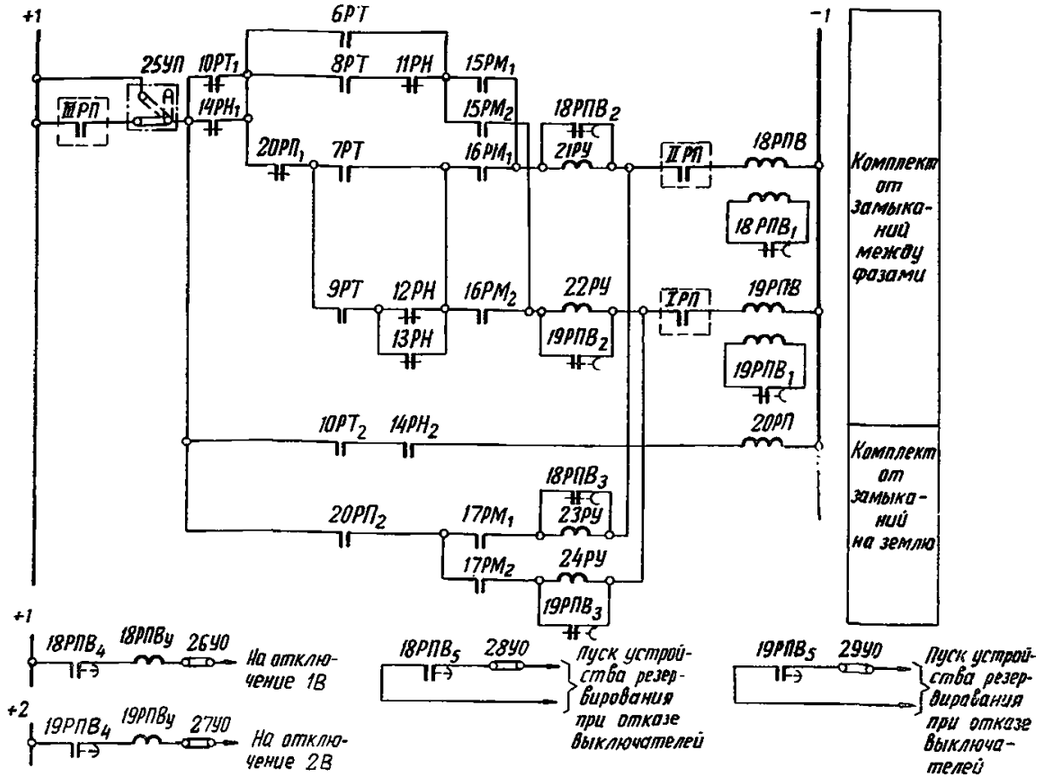

а) Пояснящая схема



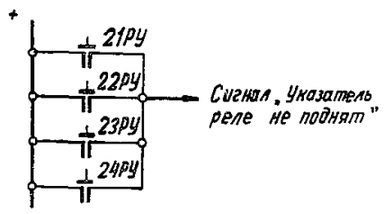

б) Схема цепей переменного тока




в) Схема цепей напряжения




г) Схема цепей оперативного постоянного тока




д) Схема цепей сигнализации

Рис. 3. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и по току и напряжению и от замыканий на землю нулевой последовательности.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6РТ—10РТ* — реле тока типа РТ-40; *11РН—13РН* — реле напряжения типа РН-54/160; *14РН* — реле напряжения типа РНН-57; *15РМ, 16РМ* — реле мощности типа РБМ-271; *17РМ* — реле мощности типа РБМ-277; *18РП, 19РП* — реле промежуточные типа РП-253; *20РП* — реле промежуточное типа РП-23; *21РУ—24РУ* — реле указательные типа РУ-21/0,015; *25УП* — устройство переключающее; *26УО—29УО* — устройства отключающие; *30БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *31БИ* — блок испытательный типа БИ-6.

Примечания: 1. См. примечание к рис. 1.

2. Удерживающие обмотки выходных реле в цепи отключения используются при установке на линиях масляных выключателей; в случае установки на линиях воздушных выключателей указанные обмотки должны быть исключены.

в этом устройстве для обеспечения его надежного возврата в случае короткого замыкания без отказа выключателя (например, дублирования реле тока).

8. Выведение защиты из действия при отключении выключателя одной из защищаемых линий (в целях предотвращения неправильного действия защиты при каскадном отключении повреждения и при внешнем коротком замыкании в случае работы одной линии — см. раздел А, п. 4) осуществляется в схеме разрывом цепи обмотки каждого выходного промежуточного реле *1РПВ* и *2РПВ* контактом реле положения «включено» выключателя параллельной линии (соответственно *IIРП* и *IРП*).

Такое выполнение схемы, а не последовательное включение контактов *IРП* и *IIРП* в цепи подведения к защите «плюса» оперативного постоянного тока, принято в предположении наличия на подстанции (станции) устройства резервирования при отказе выключателей в случае, когда в его цепях не предусматривается удерживание сигнала от защиты на определенное время; указанное выполнение схемы необходимо для обеспечения подачи длительного сигнала на пуск устройства резервирования от выходного промежуточного реле защиты параллельных линий при коротком замыкании на одной из них и отказе ее выключателя.

Следует отметить, что при принятом выполнении схемы в случае работы одной линии и возникновении внешнего короткого замыкания, при котором мощность короткого замыкания направлена к шинам, будет иметь место неправильное срабатывание указательного реле отключенной линии.

Последовательное включение контактов *IРП* и *IIРП* в цепи подведения к защите «плюса» оперативного постоянного тока целесообразно выполнять при наличии на подстанции (станции) устройства резервирования при отказе выключателей в случае, когда в его цепях предусматривается удерживание сигнала от защиты на определенное время, или при отсутствии этого устройства; при этом для обеспечения надежного отключения выключателей параллельных линий при действии защиты обязательно требуется удерживание отключающего сигнала (в схеме управления).

В схеме предусмотрено также выведение защиты из действия при отключении шиносоединительного (секционного) выключателя, осуществляемое контактом реле положения «включено» этого выключателя *IIIРП* (см. раздел А, п. 5).

9. Добавочные сопротивления *3СД* и *4СД* предусмотрены для обеспечения надежного срабатывания указательных реле в случае, если на выходные промежуточные реле *1РПВ* и *2РПВ* помимо рассматриваемой поперечной защиты будут действовать и другие защиты линий (например, цепи ускорения дистанционной защиты, включенной на сумму токов параллельных линий).

### Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и напряжению и от замыканий на землю нулевой последовательности (рис. 2)

1. Рассматриваемая схема может применяться в случаях, когда схема по рис. 1 не может быть применена по условию чувствительности комплекта от замыканий между фазами и когда чувствительность этого комплекта оказывается удовлетворительной при использовании пуска по току и напряжению.

В связи с указанным, в отличие от схемы по рис. 1, в данной схеме пусковой орган помимо реле тока *1РТ* и *2РТ*, включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, содержит также три реле напряжения *13РН—15РН*, включенные на междуфазные напряжения. Во всем остальном схема выполнена аналогично приведенной на рис. 1.

### Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и по току и напряжению и от замыканий на землю нулевой последовательности (рис. 3)

1. Схема применима в тех случаях, когда пусковой орган комплекта от замыканий между фазами, выполненный только с реле тока по схеме рис. 1 или с реле тока и напряжения по схеме рис. 2, не обеспечивает требуемой чувствительности.

В связи с указанным в данной схеме предусмотрены два параллельно действующих пусковых органа:

а) токовый пусковой орган, выполненный с помощью реле тока *6РТ* и *7РТ* и предназначенный для действия в максимальных режимах, особенно в случае каскадного отключения повреждения со стороны, противоположной месту установки рассматриваемой защиты;

б) пусковой орган по току и напряжению, выполненный с помощью реле тока *8РТ* и *9РТ* и напряжения *11РН—13РН* и предназначенный для действия в минимальных режимах.

2. Схема выполнена без использования комплектов защит, однако в части заложенных в нее принципов схема аналогична приведенной на рис. 2.

### Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности для случая соединения шин по схеме четырехугольника (рис. 4 см. вклейку).

1. Схема выполнена в основном аналогично приведенной на рис. 1. Отличие обусловлено лишь тем, что в данном случае каждая из линий имеет два выключателя.

2. Принятый способ выведения защиты из действия при отключении выключателей одной из защищаемых линий (обусловленный наличием устройства резервирования при отказе выключателей), помимо отмеченного в описании схемы по рис. 1 (п. 8) имеет в рассматриваемом случае также еще и следующий недостаток: при коротком замыкании в трансформаторе, сопровождающемся отказом выключателя, в режиме, когда длительно отключен выключатель, смежный с отказавшим, возможно неправильное действие защиты на отключение линии (так, например, при коротком замыкании в трансформаторе *Т-1*, сопровождающемся отказом выключателя *2В*, в режиме работы с длительно отключенным выключателем *1В* рассматриваемая защита неправильно отключит линию *Л-2*).

Однако сочетание условий, при которых будет иметь место указанное неправильное действие защиты, можно считать маловероятным, а его предотвращение потребовало бы значительного усложнения схемы.

При отсутствии на подстанции (станции) устройства резервирования при отказе выключателей или при наличии этого устройства, выполненного с удерживанием сигнала от защиты на определенное время, во избежание отмеченного недостатка выведение защиты целесообразно выполнить по схеме, приведенной в примечании 1 к рис. 4; однако следует отметить, что при таком выполнении схемы для обеспечения надежного отключения выключателей параллельных линий при действии защиты обязательно требуется удерживание отключающего сигнала (в схеме управления).

### Схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от несимметричных коротких замыканий обратной последовательности и от симметричных коротких замыканий (рис. 5)

1. Схема может применяться в тех случаях, когда не обеспечивается требуемая чувствительность реле напряжения нулевой последовательности при каскадном отключении замыкания на землю (например, на длинных линиях со стороны систем с малыми сопротивлениями нулевой последовательности).

2. Схема содержит комплект обратной последовательности от всех несимметричных коротких замыканий и комплект от симметричных коротких замыканий.

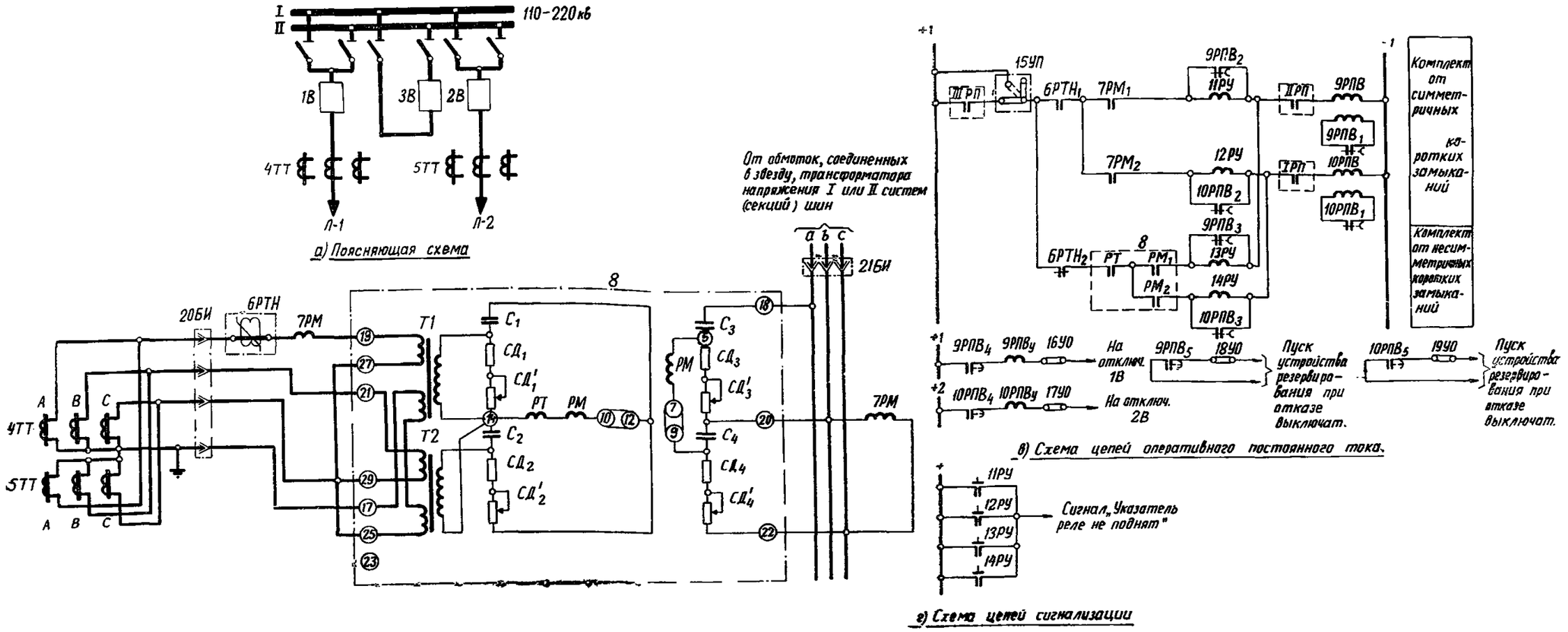
3. Комплект от несимметричных коротких замыканий выполнен с помощью устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности *8*, включенного на разность токов защищаемых линий и междуфазные напряжения на шинах подстанции.

Токовый элемент устройства используется для пуска рассматриваемого комплекта в предположении, что на нем может быть выполнен необходимый ток срабатывания; в противном случае в схеме должно быть предусмотрено отдельное устройство фильтр-реле тока обратной последовательности.

В устройстве фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности, используемом в схеме, элемент мощности должен быть выполнен с контактной системой двустороннего действия.

Пуск комплекта от несимметричных коротких замыканий не содержит реле напряжения обратной последовательности в предположении, что в рассматриваемых условиях (п. 1) не обеспечивается его чувствительность при каскадном отключении повреждения. Следует отметить, что в случае, когда такая чувствительность обеспечивается, может быть использована защита, выполненная по аналогии со схемами по рис. 1—4, но содержащая комплект от замыканий на землю обратной последовательности с пуском по току и напряжению обратной последовательности.

4. Для действия при трехфазных коротких замыканиях предусмотрено реле тока *6РТН*, включенное на разность то-




*а) Схема цепей переменного тока и напряжения*

Рис. 5. Схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от несимметричных коротких замыканий обратной последовательности и от симметричных коротких замыканий.

***1В—3В*** — **выключатели;** ***4ТТ, 5ТТ*** — **трансформаторы тока;** ***6РТН*** — реле тока с насыщающимся трансформатором типа РНТ-565; ***7РМ*** — реле мощности типа РБМ-271; ***8*** — устройство фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности; ***9РП, 10РП*** — реле промежуточные типа РП-253; ***11РУ—14РУ*** — реле указательные типа РУ-21/0,015; ***15УП*** — устройство переключающее; ***16УО—19УО*** — устройства отключающие; ***20БИ, 21БИ*** — блоки испытательные типа БИ-4.

Примечания: 1. См. примечание к рис. 1 и примечание 2 к рис. 3.

2. Размыкающий контакт реле *6РТН* типа РНТ-565 должен быть выведен на зажимы реле.

3. Устройство фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности (поз. *8*) выполняется на базе устройства типа РМОП-1; элемент мощности устройства должен быть выполнен с контактной системой двустороннего действия.

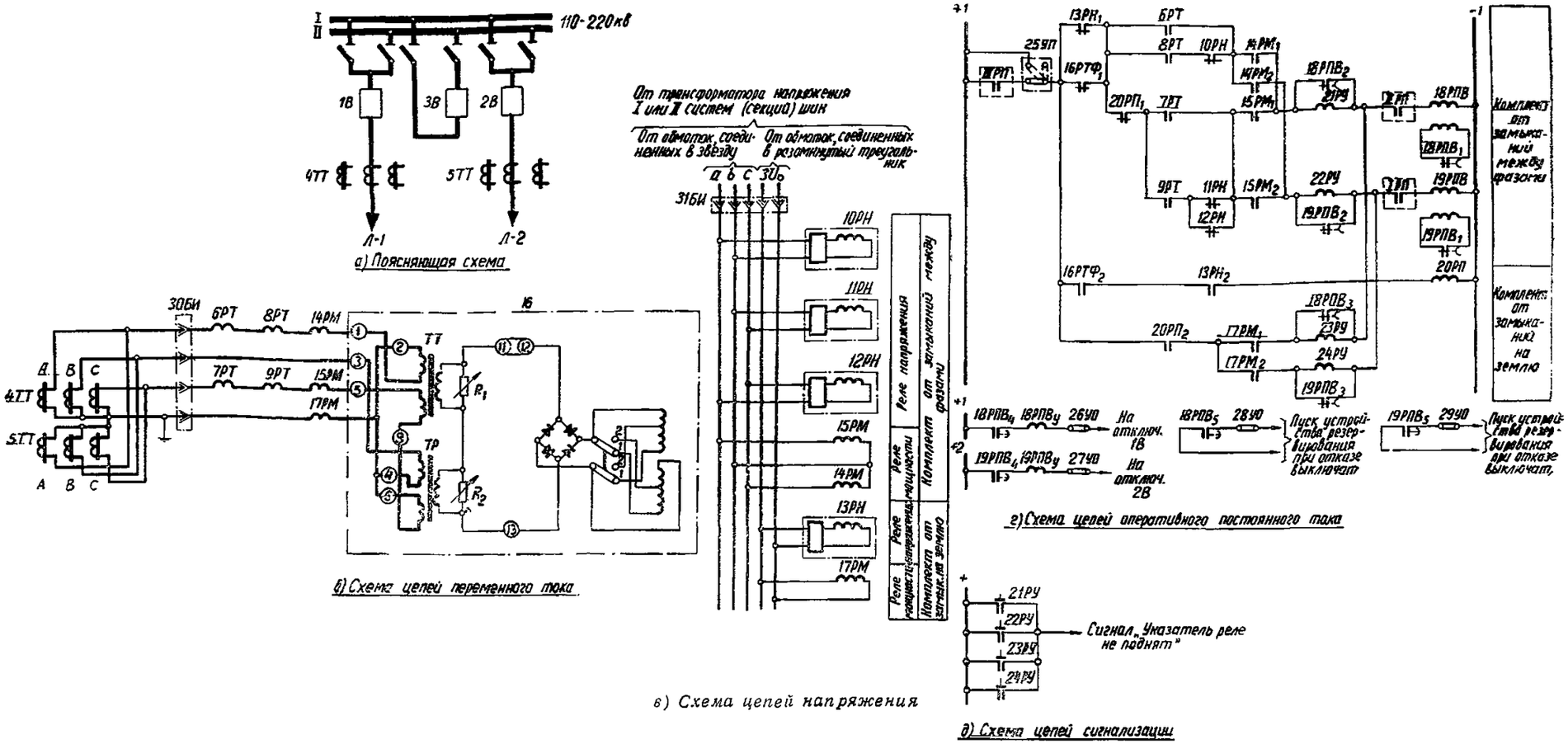



Рис. 6. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и по току и напряжению и от замыканий на землю с пуском по току обратной последовательности и напряжению нулевой последовательности.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6РТ—9РТ* — реле тока типа РТ-40; *10РН—12РН* — реле напряжения типа РН-54/160; *13РН* — реле напряжения типа РНН-57; *14РМ, 15РМ* — реле мощности типа РБМ-271; *16РТФ* — реле тока обратной последовательности типа РТФ-1М; *17РМ* — реле мощности типа РБМ-277; *18РП, 19РП* — реле промежуточные типа РП-253; *20РП* — реле промежуточное типа РП-23; *21РУ—24РУ* — реле указательные типа РУ-21/0,015; *25УП* — устройство переключающее; *26УО—29УО* — устройства отключающие; *30БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *31БИ* — блок испытательный типа БИ-6.

Примечания: 1. См. примечание к рис. 1 и примечание 2 к рис. 3.

2. Размыкающий контакт реле типа РТФ-1М (поз. *16*) должен быть выведен на зажимы этого реле.

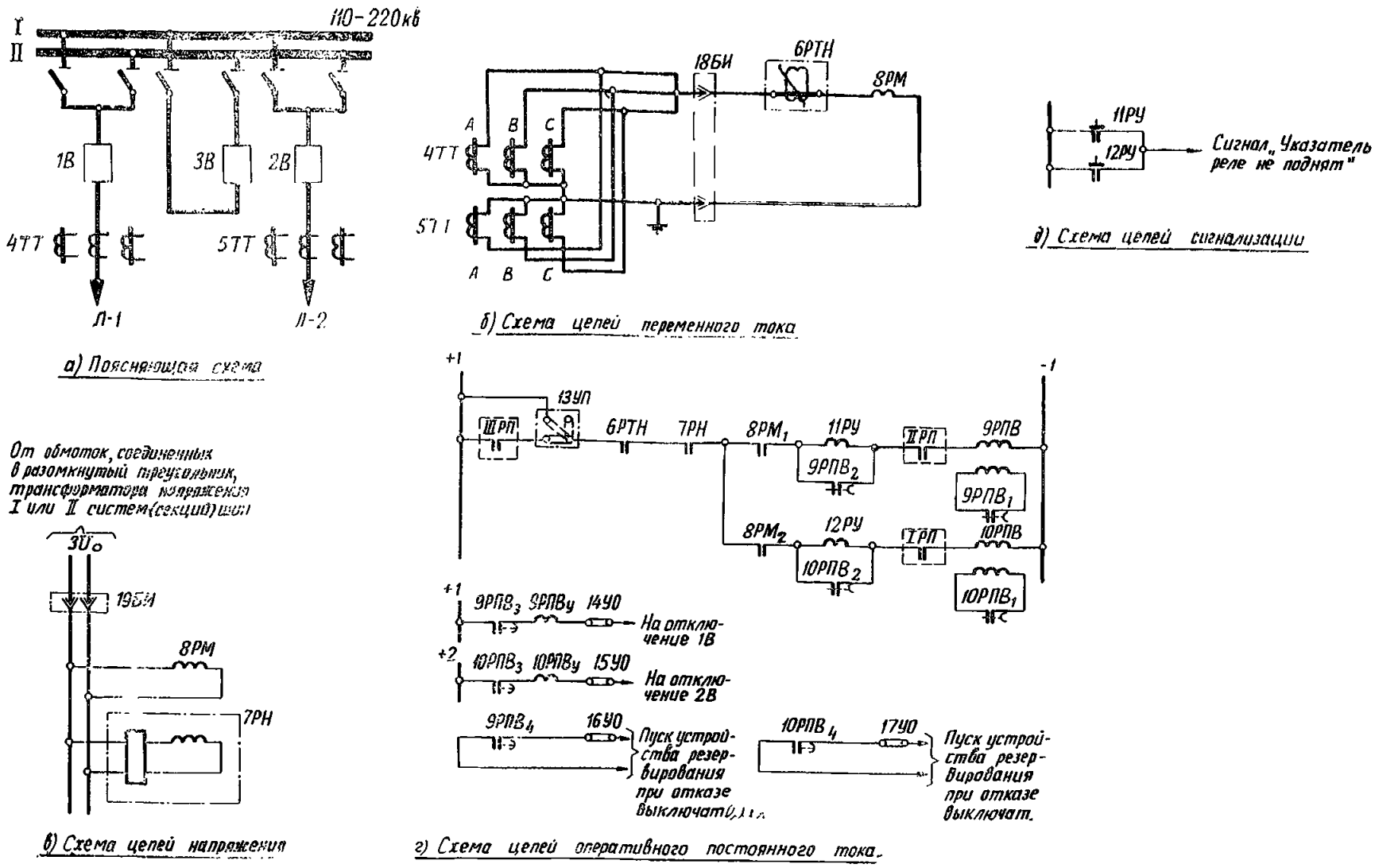



Рис. 7. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты нулевой последовательности от замыканий на землю параллельных линий 110—220 *кв*.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6РТН* — реле тока с насыщающимся трансформатором типа РНТ-565; *7РН* — реле напряжения типа РНН-57; *8РМ* — реле мощности типа РБМ-277; *9РП, 10РП* — реле промежуточные типа РП-253; *11РУ, 12РУ* — реле указательные типа РУ-21/0,015; *13УП* — устройство переключающее; *14УО—17УО* — устройства отключающие; *18БИ, 19БИ* — блоки испытательные типа БИ-4.

**Примечания:** 1. См. примечание к рис. 1 и примечание 2 к рис. 3.

ков фазы *А* защищаемых параллельных линий, и реле мощности *7РМ*.

В качестве реле *6РТН* использовано реле тока с насыщающимся трансформатором (типа РНТ-565), что облегчает его отстройку от тока в защите в условиях АПВ одной из защищаемых линий при применении защиты на линиях с ответвлениями (раздел Б, п. 2,в); при применении защиты на линиях без ответвлений это реле может быть заменено на реле тока без насыщающегося трансформатора (типа РТ-40).

5. В схеме предусмотрено выведение из действия комплекта обратной последовательности при трехфазном коротком замыкании на защищаемых линиях, осуществляемое размыкающим контактом реле тока *6РТН*. Указанное необходимо в связи с тем, что этот комплект может действовать на отключение неповрежденной линии от токов и напряжений небаланса при трехфазном коротком замыкании на другой защищаемой линии.

### Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и по току и напряжению и от замыканий на землю с пуском по току обратной последовательности и напряжению нулевой последовательности (рис. 6)

1. Схема предназначена для линий с ответвлениями, от которых питаются подстанции с мощными трансформаторами, имеющими заземленную нейтраль. Схема может применяться в случаях, когда при выполнении комплекта от замыканий на землю с реле тока нулевой последовательности не обеспечивается требуемая чувствительность защиты по току нулевой последовательности (раздел Б, п. 2,е и ж).

2. Комплект от замыканий между фазами выполнен с двумя параллельно действующими пусковыми органами (как в схеме по рис. 3):

а) токовым пусковым органом (реле тока *6РТ* и *7РТ*),

б) пусковым органом по току и напряжению (реле тока *8РТ, 9РТ* и реле напряжения *10РН—12РН*).

Однако, если необходимость рассмотренного пуска не обусловлена требуемой чувствительностью, комплект от замыканий между фазами может быть выполнен с пуском по току (как в схеме по рис. 1) или по току и напряжению (как в схеме по рис. 2).

3. Комплект от замыканий на землю выполнен с пуском от реле тока обратной последовательности *16РТФ* и реле напряжения нулевой последовательности *13РП*, которое предотвращает действие защиты при повреждениях за трансформаторами промежуточных подстанций.

### Схема поперечной дифференциальной направленной защиты нулевой последовательности от замыканий на землю параллельных линий 110—220 *кв* (рис. 7)

1. Схема может применяться на линиях с ответвлениями в случаях, когда использование комплекта от замыканий на землю поперечной дифференциальной направленной защиты целесообразно для обеспечения селективного действия ступенчатой токовой направленной защиты нулевой последовательности и уменьшения времени отключения замыкания на землю, а комплект от замыканий между фазами поперечной дифференциальной направленной защиты не может быть использован из-за плохой чувствительности (раздел Б, п. 7).

2. Схема содержит только комплект от замыканий на землю, отличающийся от аналогичных комплектов в схемах по рис. 1—4 тем, что пусковой орган его выполнен с реле тока с насыщающимся трансформатором (типа РНТ-565 или РНТ-566).

Указанное облегчает отстройку защиты от броска тока намагничивания в нулевом проводе в условиях каскадного включения одной из защищаемых линий, а также отстройку от тока небаланса при внешних замыканиях на землю (раздел Б, п. 2,е и 3).

В связи с применением реле тока с насыщающимся трансформатором защита выполнена не с использованием комплекта защиты (типа КЗ-7), а с помощью отдельно устанавливаемых реле.

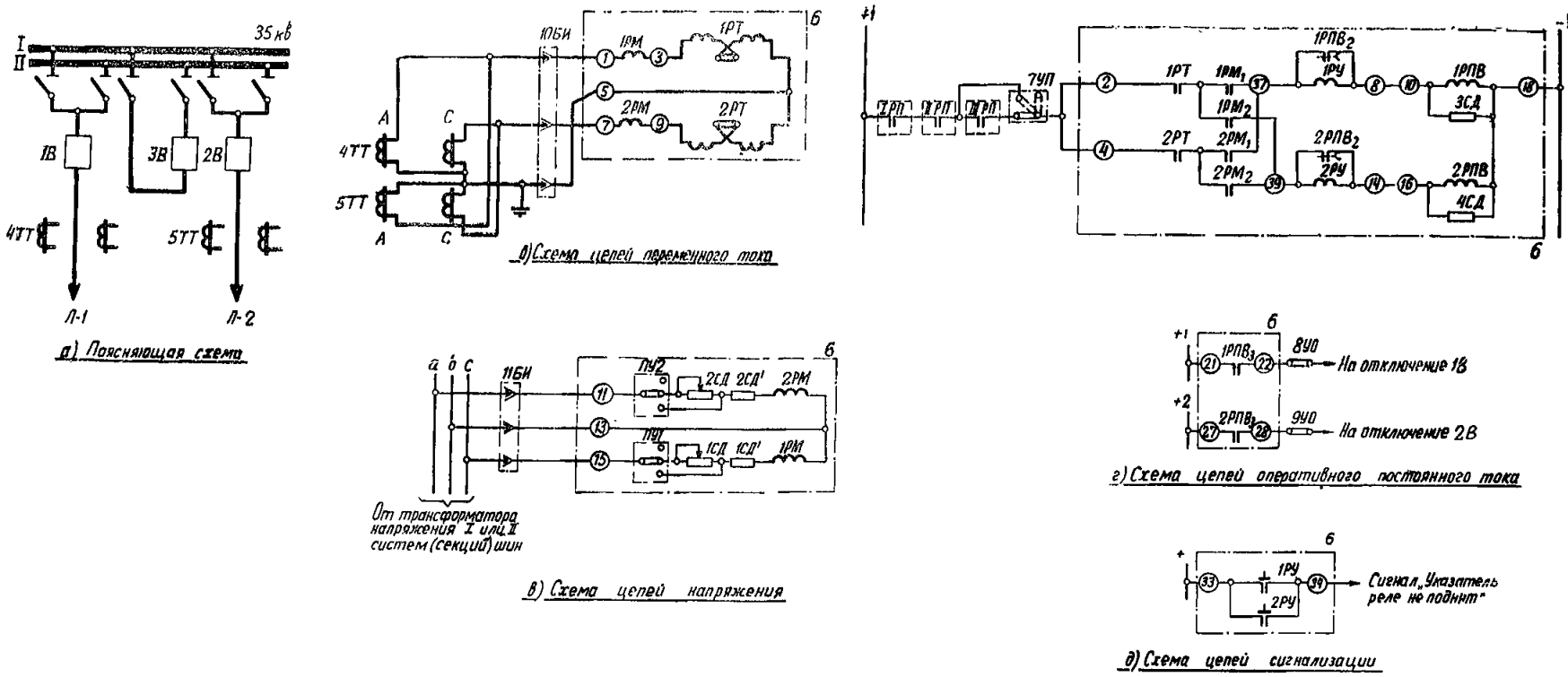



Рис. 8. Схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 35 *кв*.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *6* — комплект поперечной дифференциальной токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий типа КЗ-6 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *7УП* — устройство переключающее; *8УО, 9УО* — устройства отключающие; *10БИ, 11БИ* — блоки испытательные типа БИ-4.

Примечание. См. примечание к рис. 1.

**Схема поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 35 *кв* (рис. 8)**

1. В данной схеме, как и в комплекте от замыканий между фазами схемы по рис. 1, пусковой орган выполнен с помощью двух реле тока *1РТ* и *2РТ*, включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий.

2. Для выведения защиты из действия при отключении выключателя одной из параллельных линий, в отличие от схемы по рис. 1—7, предусмотрены последовательно соединенные замыкающие контакты реле положения «включено» *1РП* и *2РП* выключателей защищаемых линий в цепи подведения к защите «плюса» оперативного постоянного тока. Такое выполнение схемы принято в связи с отсутствием, как правило, устройства резервирования при отказе выключателей на стороне 35 *кв* подстанции (станции) — см. рис. 1 (п. 8).

Следует отметить, что при данном на рис. 8 способе выведения защиты при отключении одного из выключателей для обеспечения надежного отключения выключателей параллельных линий при действии защиты обязательно требуется удерживание отключающего сигнала в схеме управления.

3. В остальном схема по рис. 8 не отличается от комплекта от замыканий между фазами схемы по рис. 1.

**Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектом от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности, выполненной с использованием типовой панели защиты типа ЭПЗ-626-64 (рис. 9)**

1. Схема выполнена в основном подобно приведенной на рис. 1. В отличие от схемы по рис. 1 в данной схеме для выведения защиты при отключении выключателя одной из параллельных линий предусматриваются в цепи подведения к защите «плюса» оперативного постоянного тока последовательно включенные замыкающие контакты реле положения «включено» *1РП* и *2РП* выключателей защищаемых линий, как в схеме по рис. 8. В связи с этим схема может применяться только при отсутствии на подстанции (станции) устройства резервирования при отказе выключателей или при наличии этого устройства в случае, когда в его цепях предусматривается удерживание сигнала от защиты на определенное время (см. описание схемы по рис. 1, п. 8).

**Схема поперечной дифференциальной токовой защиты параллельных линий 220 *кв* со стороны понижающей подстанции со схемой электрических соединений на стороне высшего напряжения два блока линия — автотрансформатор при отсутствии питания со сторон среднего и низшего напряжений (рис. 10).**

1. Поперечная дифференциальная токовая (ненаправленная) защита в принятом исполнении предусмотрена для использования на подстанциях (тупиковых или промежуточных) с автотрансформаторами 220/110/6—35 *кв*, питаемыми по двум параллельным линиям 220 *кв* и работающими параллельно на стороне 110 *кв* и раздельно на стороне низшего напряжения. Защита предназначена для разделения систем (секций) шин стороны 110 *кв* при повреждении на одной из питающих параллельных линий 220 *кв*.

Данная защита может быть использована также при установке на подстанции трехобмоточных трансформаторов 110—220/35/6—10 *кв*, имеющих заземленные нейтрали.

2. Рассматриваемая защита может быть применена в случае, когда линии, отходящие от систем (секций) шин среднего напряжения, на приемных сторонах работают раздельно.

3. Комплект от замыканий между фазами выполнен с помощью реле тока *6РТ* и *7РТ*, а комплект от замыканий на землю — с помощью реле тока *8РТ*. Реле тока защиты присоединены к трансформаторам тока, встроенным во втулки автотрансформатора стороны 220 *кв*.

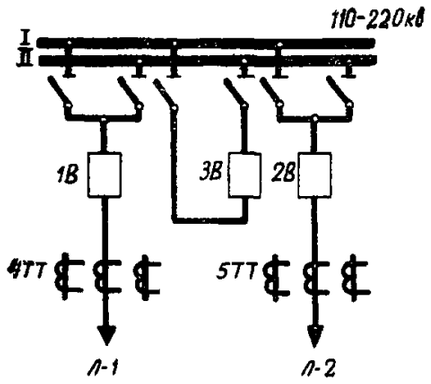
4. Для предотвращения неправильного действия защиты при бросках тока намагничивания автотрансформатора, а также для отстройки от дифференциальной защиты автотрансформатора рассматриваемая защита выполнена с выдержкой времени порядка 0,5 *сек*. В целях упрощения для обоих комплектов защиты используется одно реле времени *9РВ*.

5. Защита должна быть отстроена по току от коротких замыканий на сторонах среднего и низшего напряжений (см. гл. 2, разд. з, п. 1 и 2). Однако, если отстройка от короткого замыкания на шинах низшего напряжения приводит к недопустимому загрублению защиты, в качестве расчетного может рассматриваться более удаленное короткое замыкание. При этом в ряде случаев допускается действие защиты при коротком замыкании на стороне низшего напряжения.

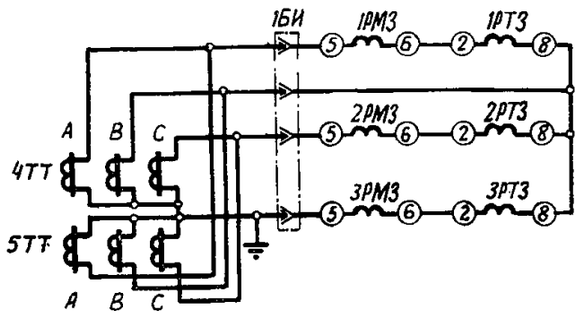
6. Для предотвращения неправильного действия защиты при отключении одного из выключателей стороны среднего напряжения автотрансформатора в цепи подведения «плюса» оперативного постоянного тока к защите предусмотрены контакты реле положения «включено» выключателей *1В* и *2В*.

7. Установка рассматриваемой защиты принята на стороне 220 *кв*, а не 110 *кв*, поскольку при этом может обеспечиваться более высокая чувствительность (см. гл. 2, разд. з, п. 4).

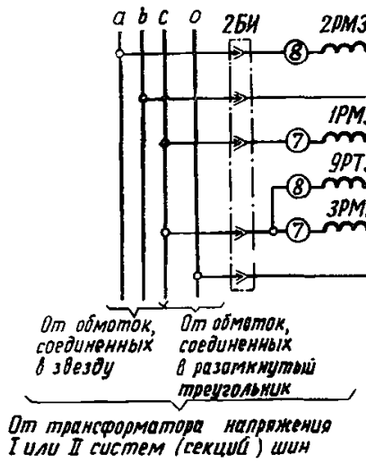
8. Следует отметить, что в ряде случаев может оказаться целесообразным выполнение рассматриваемой защиты направленной и действующей на отключение выключателя автотрансформатора со стороны среднего напряжения, а не на разделение систем (секций) шин указанного напряжения. Такое выполнение защиты допустимо, если соблюдается условие отстройки защиты по току от короткого замыкания на шинах низшего напряжения.



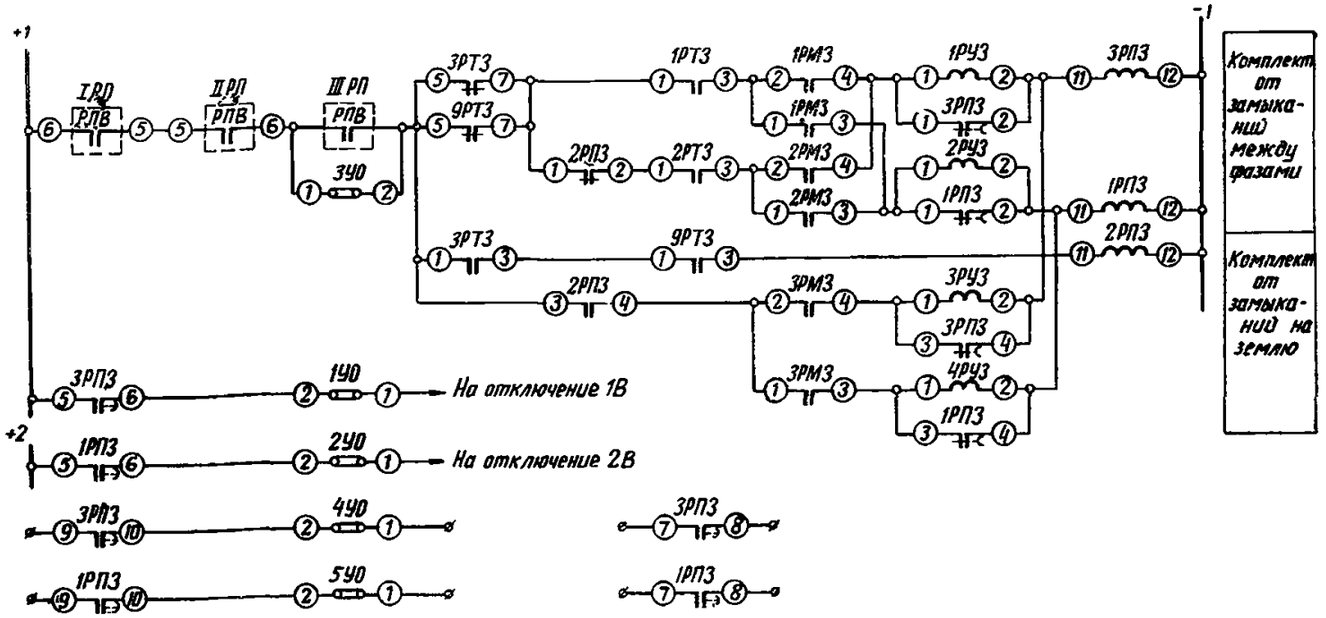

а) Поясняющая схема



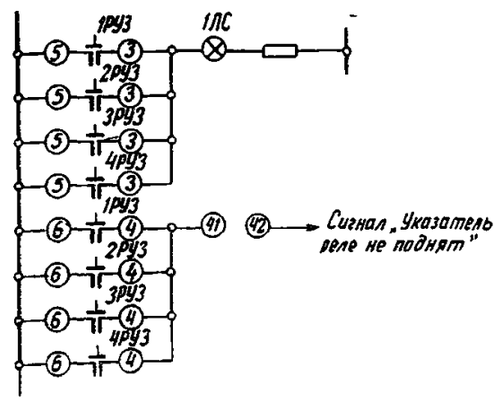

б) Схема цепей переменного тока




в) Схема цепей напряжения




г) Схема цепей оперативного постоянного тока

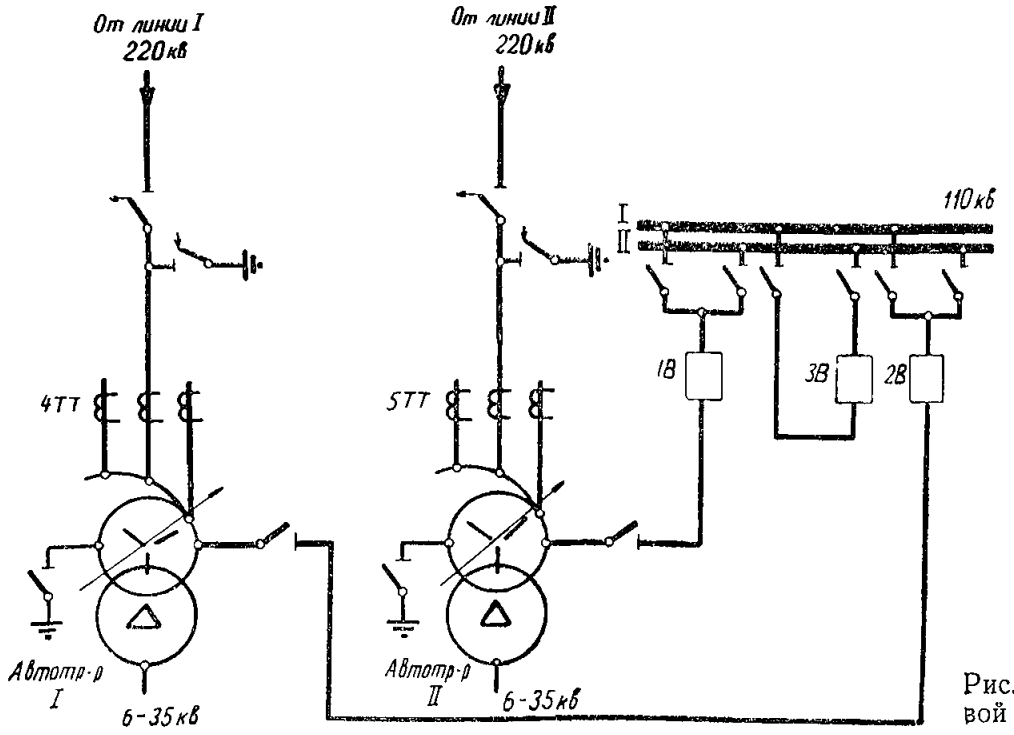



д) Схема цепей сигнализации

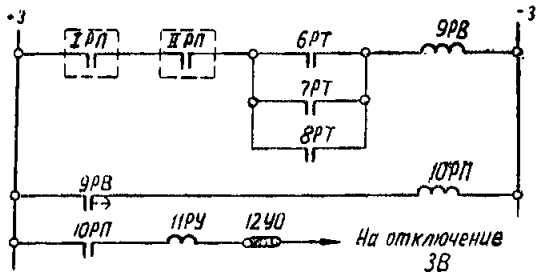
Рис. 9. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектом от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности, выполненной с использованием типовой панели защиты типа ЭПЗ-626-64.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ, 5ТТ* — трансформаторы тока; *1РТ3—3РТ3* реле тока типа РТ-40; *9РТ3* — реле тока типа РТ-40/0,2; *1РМ3, 2РМ3* — реле мощности типа РБМ-271; *3РМ3* — реле мощности типа РБМ-278; *1РП3, 3РП3* — реле промежуточные типа РП-251; *2РП3* — реле промежуточное типа РП-23; *1РУ3—4РУ3* — реле указательные типа РУ-21/0,015; *1УО—5УО* — устройства отключающие; *1БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *2БИ* — блок испытательный типа БИ-6; *1ЛС* — лампа сигнальная.

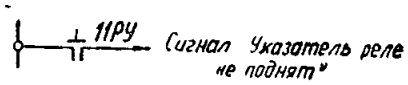
Примечание. См. примечание к рис. 1.



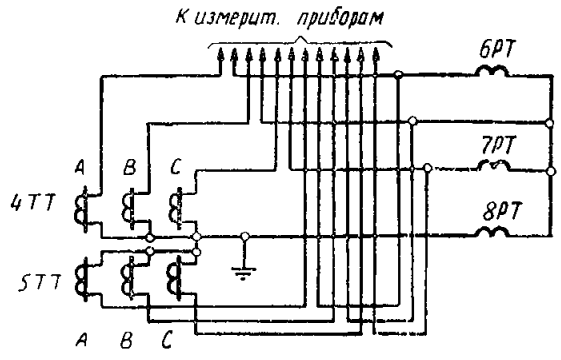

а) Поясняющая схема




в) Схема цепей оперативного постоянного тока




г) Схема цепей сигнализации

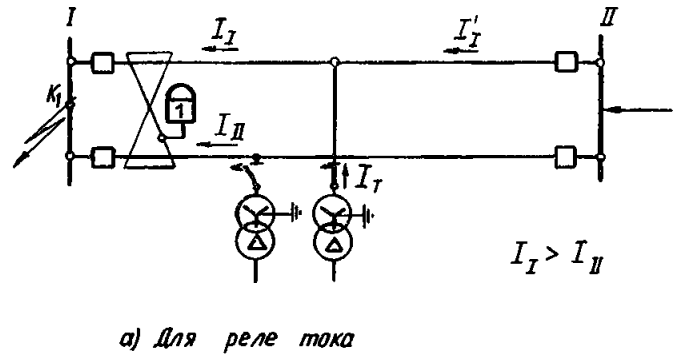



б) Схема цепей переменного тока

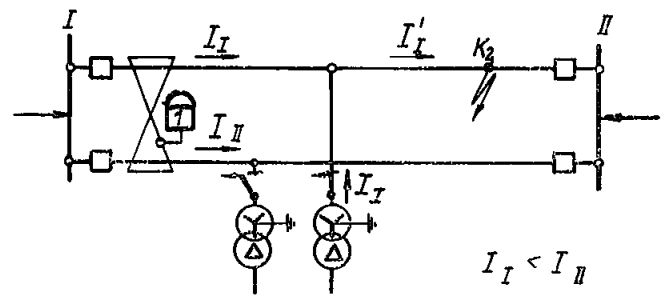
Рис. 10. Схема поперечной дифференциальной токовой защиты параллельных линий 220 *кв* со стороны понижающей подстанции со схемой электрических соединений на стороне высшего напряжения два блока линия — автотрансформатор при отсутствии питания со сторон среднего и низшего напряжений.

*1В—3В* — выключатели; *4ТТ*, *5ТТ* — трансформаторы тока (встроенные); *6РТ—8РТ* — реле тока типа РТ-40; *9РВ* — реле времени типа ЭВ-124; *10РП* — релепромежуточное типа РП-23; *11РУ* — реле указательное типа РУ-21/1; *12УО* — устройство отключающее.

Примечание. *1РП* и *11РП* — контакты реле положения «включено» выключателей *1В* и *2В*.




а) Для реле тока




б) Для реле направления мощности

Рис. 12. Расчетные случаи повреждения для комплекта от замыканий на землю нулевой последовательности поперечной дифференциальной направленной защиты.

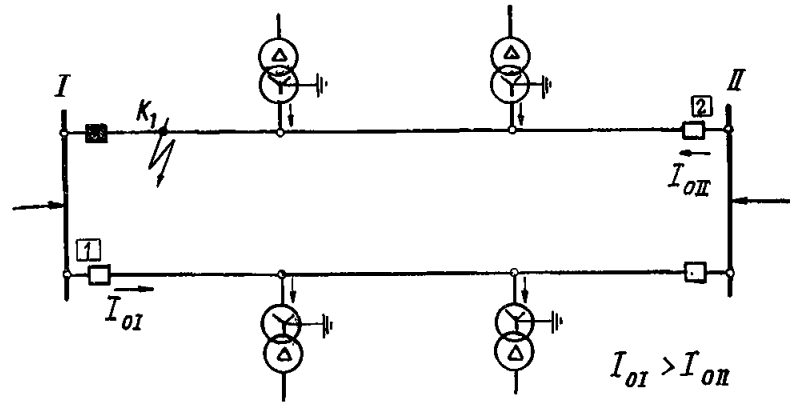
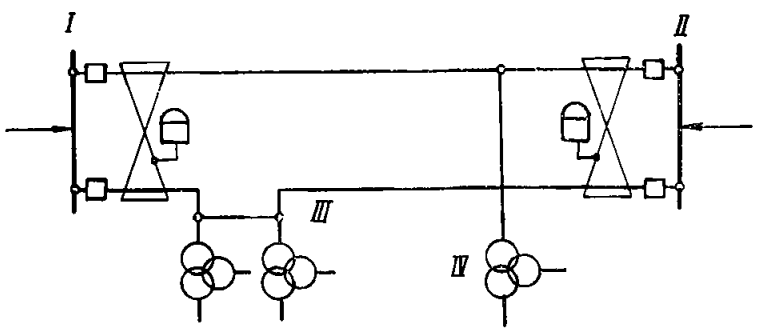
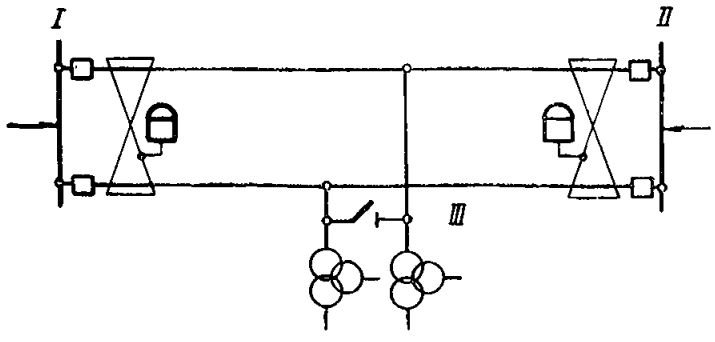



Рис. 13. Каскадное отключение замыкания на землю на линиях с ответвлениями.




а) Параллельные линии с промежуточными подстанциями, присоединенными к одной линии,




б) Параллельные линии с промежуточной подстанцией, присоединенной к двум линиям.

Рис. 11. Примеры параллельных линий с ответвлениями.

*Глава вторая*

# РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ БЕЗ ОТВЕТВЛЕНИЙ

Расчет защиты производится для выбора схемы и параметров (напряжения, тока) срабатывания, а также для оценки чувствительности защиты.

В настоящей главе расчеты поперечной дифференциальной направленной защиты производятся по первичным величинам.

Приведенные в настоящей главе указания даны в предположении, что трансформаторы тока, используемые для защиты, удовлетворяют кривым предельной кратности при 10% погрешности.

## А. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ С ПУСКОМ ПО ТОКУ ДЛЯ СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМЫ ПО РИС. 1, 3, 4 и 9)

1. Ток срабатывания пускового органа комплекта от замыканий между фазами защиты для сети с большим током замыкания на землю, при выполнении этого органа с помощью только реле тока (без минимальных реле напряжения), включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, выбирается по следующим условиям.

а) По условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса при переходном режиме внешнего короткого замыкания между фазами (на шинах подстанций, соединяемых защищаемыми линиями) или при несинхронном включении

$$I_{\text{с.з}} \geqslant k'_{\text{н}} I'_{\text{нб.расч}} + k''_{\text{н}} I''_{\text{нб.расч}}. \qquad (1)$$

Ток $I'_{\text{нб.расч}}$ обусловлен неравенством токов в трансформаторах тока защиты вследствие неодинаковых сопротивлений параллельных линий, а $I''_{\text{нб.расч}}$ — погрешностью трансформаторов тока.

В выражении (1) $k'_{\text{н}}$ и $k''_{\text{н}}$ — коэффициенты надежности, могут быть приняты равными соответственно 1,3 и 1,2.

В большинстве случаев сопротивления параллельных линий можно принимать одинаковыми; при этом, учитывая, что $I'_{\text{нб.расч}}=0$, и принимая $I''_{\text{нб.расч}}=I_{\text{нб.расч}}$, а $k''_{\text{н}}=k_{\text{н}}$, из выражения (1) получим:

$$I_{\text{с.з}} \geqslant k_{\text{н}} I_{\text{н.б.расч}}. \qquad (1')$$

б) По условию обеспечения возврата после отключения внешнего короткого замыкания в режиме работы одной линии или после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из рассматриваемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями

$$I_{\text{с.з}} \geqslant \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{нагр.макс}}, \qquad (2)$$

где $I_{\text{нагр.макс}}$ — максимальный ток нагрузки, проходящий по одной из параллельных линий, после отключения другой линии; при отсутствии данных о токе $I_{\text{нагр.макс}}$ можно принимать его равным максимальному рабочему току при работе обеих линий (т. е. $I_{\text{нагр.макс}}=I_{\text{раб.макс}}$),

$k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимаемый в (2) равным 1,2;

$k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле.

При невыполнении этого условия возможно неправильное действие защиты после появления сигнала на включение выключателя отключенной линии (в первом из указанных выше случаев — от ключа управления, во втором — от устройства АПВ) и замыкания контакта реле положения «включено» выключателя включаемой линии в цепях оперативного тока защиты (см. гл. 1, разд. А, п. 4); при этом в зависимости от направления мощности может иметь место неправильное отключение выключателя работающей линии или включаемого выключателя второй линии.

в) По условию отстройки от тока неповрежденной фазы $I^{(2)}_{\text{неп}}$ при каскадном отключении замыкания между двумя фазами

$$I_{\text{с.з}} \geqslant k_{\text{н}} I^{(2)}_{\text{неп}}, \qquad (3)$$

где $k_{\text{н}}$ может быть принят равным 1,3.

г) По условию отстройки от расчетного тока неповрежденных фаз $I_{\text{неп.расч}}$ при каскадном отключении двухфазного или однофазного замыкания на землю, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания,

$$I_{\text{с.з}} \geqslant k_{\text{н}} I_{\text{неп.расч}}, \qquad (4)$$

где $k_{\text{н}}$ принимается так же, как в (3).

Необходимость учета этого условия объясняется тем, что при несрабатывании комплекта от замыканий на землю комплект от замыканий между фазами не выводится из действия.

2. Ток $I_{\text{нб.расч}}$ в выражении (1′) можно определить приближенно по следующему выражению:

$$I_{\text{нб.расч}} = k_{\text{одн}} k_{\text{апер}} f_i \frac{I_{\text{л.расч}}}{2}, \qquad (5)$$

где $I_{\text{л.расч}}$ — расчетный суммарный максимальный ток (периодическая составляющая), проходящий по обеим параллельным линиям при металлическом замыкании между тремя фазами вне защищаемой зоны, т. е. на шинах подстанций, соединяемых защищаемыми линиями ($I_{\text{л.расч}}=I_{\text{к.з.вн.макс}}$), или при несинхронном включении ($I_{\text{л.расч}}=I_{\text{асинхр.макс}}$);

$f_i$ — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока; при выборе последних по кривым предельной кратности тока при 10% погрешности принимается равным 0,1;

$k_{\text{одн}}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока, установленных на параллельных линиях, может быть принят равным порядка 0,5;

$k_{\text{апер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической слагающей тока); при использовании реле тока без насыщающегося трансформатора может быть принят равным порядка 2,0.

3. Условие отстройки от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ неповрежденной фазы при каскадном отключении замыкания между двумя фазами (п. 1,в) при учете отмеченных ниже упрощающих положений оказывается расчетным только для защиты, установленной с питающей стороны на линиях с односторонним питанием. Указанные упрощающие положения заключаются в следующем.

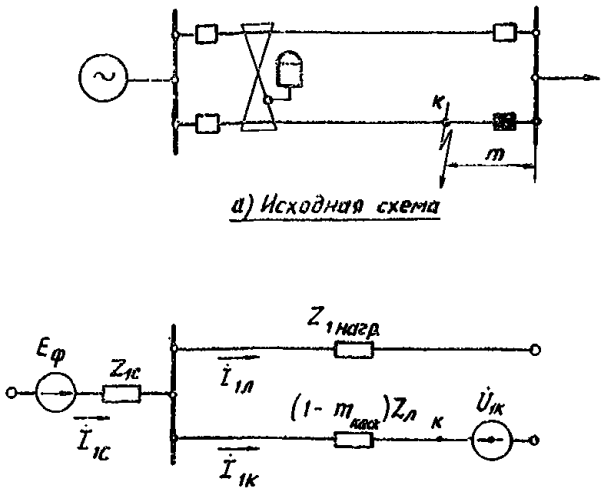
При каскадном действии защиты линии, когда второй работает защита приемного конца, ток $I^{(2)}_{\text{неп}}$ направлен к шинам (в нагрузку) и поэтому не представляет опасности с точки зрения излишнего срабатывания защиты, установленной на приемном конце.

При двустороннем же питании с током $I^{(2)}_{\text{неп}}$ можно не считаться, поскольку можно полагать, что для рассматриваемого случая ток $I^{(2)}_{\text{неп}}$ не превышает тока $I_{\text{нагр.макс}}$ (см. разд. А приложения *I*).

При расчете тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ для защиты, установленной со стороны питания параллельных линий с односторонним питанием рекомендуется исходить из следующих указаний.

Исходная схема и схемы замещения отдельных последовательностей для рассматриваемого случая показаны на рис. 14. Особенности расчета определяются тем, что режим, в котором возможно излишнее срабатывание защиты из-за тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$, возникает приблизительно через 0,15—0,2 *сек* и существует тоже 0,15—0,2 *сек*. Систему, имеющую источники питания, приближенно можно учитывать такими же параметрами, как при расчете периодической составляющей тока начального момента ($t=0$). Двигатели, напротив, более обоснованно учитывать сопротивлениями установившегося режима, считая, что э. д. с. двигателей полностью затухли. При этом ветвь с нагрузкой может быть замещена в схеме прямой последовательности индуктивным сопротивлением $z_{1\text{нагр}}=1{,}2\,z_{\text{нагр}}$, а в схеме обратной последовательности — сопротивлением $z_{2\text{нагр}}=0{,}35 z_{\text{нагр}}$ (где $z_{\text{нагр}}=U^2_{\text{ном}}/S$, $S$ — мощность нагрузки, *Мва*).

Как показали исследования, расчетным является случай металлического короткого замыкания на границе зоны каскад-




*а) Исходная схема*

*б) Схема замещения прямой последовательности*

*в) Схема замещения обратной последовательности*

**Рис. 14.** Исходная схема и схемы замещения отдельных последовательностей для расчета тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ неповрежденной фазы при каскадном отключении короткого замыкания между двумя фазами.

ного действия (о расчете зоны каскадного действия см. ниже п. «ж»), когда второй срабатывает рассматриваемая защита, установленная со стороны питания. Но зона каскадного действия сама зависит от искомого тока срабатывания комплекта от замыканий между фазами. Поэтому приходится ее определять приблизительно, без учета условия отстройки тока срабатывания от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$. При этом допускается после вычисления тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ (исходя из этой ориентировочно оцененной зоны каскадного действия) уточнения расчета не производить, так как оно мало повлияет на результат.

На рис. 15 приведена ориентировочная область значений

$$\mu = \frac{z_c}{z_{\text{нагр}}} = \frac{z_c I_{\text{раб.макс}}}{E_{\text{ф}}}$$

и

$$\lambda = (1 - m_{\text{каск}}) \frac{z_л}{z_{\text{нагр}}} = \frac{(1 - m_{\text{каск}})\, z_л I_{\text{раб.макс}}}{E_{\text{ф}}},$$

при которых по рассматриваемому условию требуется больший ток срабатывания, чем по условию отстройки от максимального рабочего тока (п. 1,б). Здесь $m_{\text{каск}}$ — длина зоны каскадного действия при металлических коротких замыканиях между двумя фазами для защиты, установленной с питающей стороны. Диаграмма на рис. 15 построена на основании расчета, приведенного в приложении *I*, разд. А.

4. Условие отстройки от расчетного тока неповрежденных фаз $I_{\text{неп.расч}}$ при каскадном отключении двухфазного или однофазного замыкания на землю (п. 1,г) может оказаться расчетным только в случае двустороннего питания. При одностороннем же питании более тяжелым является условие отстройки от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$. Объясняется это тем, что ток $I_{\text{неп.расч}}$ определяется для условий, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания, в то время как ток $I^{(2)}_{\text{неп}}$ определяется для металлического короткого замыкания.

Ток $I_{\text{неп.расч}}$ может быть вычислен методом наложения, как геометрическая сумма токов режима нагрузки, предшествовавшего короткому замыканию, и аварийных токов. Приближенно с некоторым запасом этот ток может быть определен как арифметическая сумма тока нагрузки и аварийного тока (см. приложение *I*, разд. Б). Аварийный ток в предположении того, что сопротивления прямой и обратной последова-

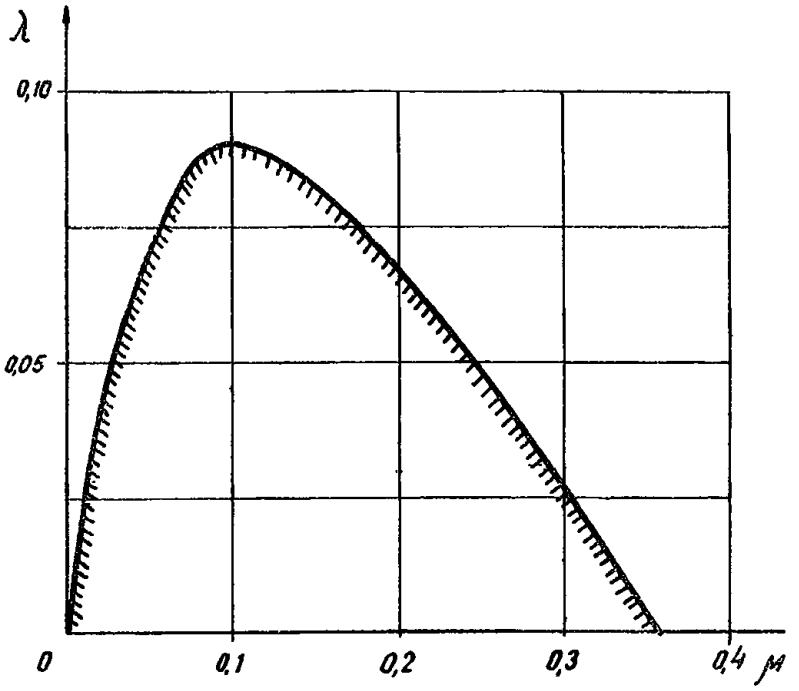



**Рис. 15.** Область значений параметров сети по рис. 14, при которых условие отстройки от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ является расчетным.

Обозначения:

$$\mu = \frac{z_c I_{\text{раб.макс}}}{E_{\text{ф}}};$$

$$\lambda = \frac{(1 - m_{\text{каск}})\, z_л I_{\text{раб.макс}}}{E_{\text{ф}}}.$$

тельностей всех элементов схемы одинаковы, определяется по следующему выражению, вывод которого дан в приложении *I*, разд. Б:

$$I^{(\text{ав})}_{\text{неп.л}} = (k_{\text{от}} - k_{1\text{т}})\, I_{\text{0к.расч}}, \qquad (6)$$

где $I_{\text{0к.расч}}$ — расчетный ток нулевой последовательности поврежденной линии (т. е. в месте короткого замыкания), определенный по двум условиям:
а) реле напряжения комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания,
б) реле тока указанного комплекта находится на грани срабатывания;

$k_{1\text{т}}$, $k_{\text{от}}$ — коэффициенты токораспределения схем прямой (обратной) и нулевой последовательностей, равные отношению тока в неповрежденной линии к току в поврежденной линии.

При определении тока $I_{\text{0к.расч}}$ удобно воспользоваться коэффициентами пересчета

$$m_{\text{т}} = \frac{3I_{\text{0з}}}{I_{\text{0с.з}}} \text{ и } m_{\text{н}} = \frac{3U_{\text{0з}}}{U_{\text{0с.з}}},$$

где $I_{\text{0з}}$ и $U_{\text{0з}}$ — ток нулевой последовательности в защите и напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты при металлическом замыкании на землю в расчетной точке (см. ниже в данном пункте) в режиме после отключения выключателя поврежденной линии с противоположной стороны;

$I_{\text{0с.з}}$ — первичный ток срабатывания реле тока нулевой последовательности;

$U_{\text{0с.з}}$ — первичное напряжение срабатывания реле напряжения нулевой последовательности.

В выражении (6) учитывается больший из токов

$$I_{\text{0к.расч}} = \frac{I_{\text{0к}}}{m_{\text{т}}} \text{ и } I_{\text{0к.расч}} = \frac{I_{\text{0к}}}{m_{\text{н}}}, \qquad (7)$$

где $I_{\text{0к}}$ — ток нулевой последовательности в поврежденной линии при металлическом замыкании на землю того же вида, при котором определяются $I_{\text{0з}}$ и $U_{\text{0з}}$ в выражениях для $m_{\text{т}}$ и $m_{\text{н}}$; при этом вид замыкания на землю выбирается произвольно.

Для определения $I_{\text{0к.расч}}$ можно также воспользоваться следующими выражениями, вывод которых дан в приложении I, разд. Б:

для условий, когда реле напряжения нулевой последовательности находится на грани срабатывания

$$I_{\text{0к.расч}} = \frac{U_{\text{0с.з}}}{3\,(z_{0\gamma} + (1 - k_{\text{от}})\, z_{0\alpha})}; \qquad (8а)$$

для условий, когда реле тока нулевой последовательности находится на грани срабатывания

$$I_{0\text{к.расч}} = \frac{I_{0\text{с.з}}}{3\,(1 + k_{0\text{т}})}. \qquad (8б)$$

В выражении (8а)

$z_{0\alpha}$ и $z_{0\gamma}$ — сопротивления, входящие в схему замещения нулевой последовательности, составленную для исходной схемы параллельных линий при наличии обходных связей между подстанциями, связанными данными линиями (рис. 16).

Анализ выражений (6), (8а) и (8б) показывает, что расчетным местом повреждения для определения $I_{0\text{к.расч}}$ теоретически может быть либо конец линии, противоположный месту установки защиты, либо та точка, которая до отключения выключателя противоположного конца была точкой одинаковой чувствительности защит, установленных на разных концах линии. При этом короткие замыкания на части линии между местом установки рассматриваемой защиты и указанной точкой одинаковой чувствительности не должны учитываться, поскольку они не могут привести к такому каскадному действию защит, когда рассматриваемая защита срабатывает второй.

Исследования также показали, что случаи, когда расчетной оказывается точка одинаковой чувствительности, а не конец линии, весьма редки. Если все же такие условия имеют место, то превышение тока $I_{\text{неп.расч}}$, определенного по точке одинаковой чувствительности, по сравнению с током при коротком замыкании в конце линии невелико.

В связи с этим рекомендуется в качестве расчетной точки для определения $I_{0\text{к.расч}}$ принимать конец линии.

5. В условиях, описанных в п. 1,*б* настоящего раздела, после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из рассматриваемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями, и восстановления схемы оперативного тока контактами реле положения при включении от устройства АПВ выключателя принципиально возможно неправильное срабатывание защиты под влиянием тока качаний. Однако опыт эксплуатации не подтверждает этих опасений. Малая вероятность указанного неправильного срабатывания защиты объясняется сохранением связи между двумя частями системы по неповрежденной линии. Отстройка защиты от тока качаний, рассчитываемого в рассматриваемом режиме, привела бы к недопустимому загрублению защиты.

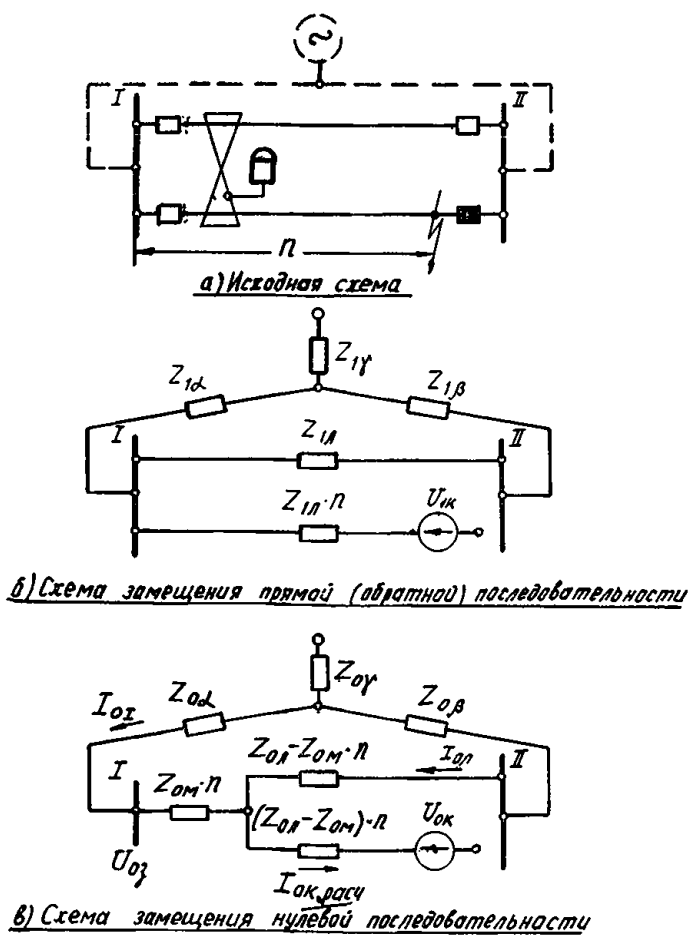



Рис. 16. Исходная схема и схемы замещения отдельных последовательностей для расчета токов $I_{\text{неп.расч}}$ неповрежденных фаз при каскадном отключении замыканий на землю одной и двух фаз.

Примечание. При замыкании на конце линии, противоположном месту установки защиты, $n$=1, а при замыкании вблизи места установки защиты $n$=0.

## Б. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ С ПУСКОМ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ ДЛЯ СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМЫ ПО РИС, 2 и 3)

1. Ток срабатывания реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами защиты для сети с большим током замыкания на землю при выполнении этого органа с помощью реле тока и реле напряжения выбирается по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса $I_{\text{нб.расч}}$ при повреждениях вне защищаемой зоны по выражениям (1) или (1′).

2. Напряжение срабатывания минимального реле напряжения указанного пускового органа выбирается:

а) По условию обеспечения возврата после отключения короткого замыкания (внешнего или на одной из рассматриваемых параллельных линий)

$$U_{\text{с.з}} \leqslant \frac{U_{\text{раб.мин}}}{k_{\text{н}} k_{\text{в}}}, \qquad (9)$$

где $U_{\text{раб.мин}}$ — минимальное рабочее напряжение в месте установки защиты;

$k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности, принимаемый в (9) равным 1,2;

$k_{\text{в}}$ — коэффициент возврата реле.

б) По условию отстройки от напряжений между неповрежденной и поврежденной фазой $U^{(2)}_{\text{неп}}$ при замыкании между двумя фазами с противоположного конца защищаемых линий на границе зоны каскадного действия защиты

$$U_{\text{с.з}} \leqslant \frac{U^{(2)}_{\text{неп}}}{k_{\text{н}}}, \qquad (10)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности; может быть принят равным 1,3.

в) По условию отстройки от расчетного напряжения между поврежденной и неповрежденной фазой $U_{\text{неп.расч}}$ при двухфазных или однофазных замыканиях на землю на границе зоны каскадного действия защиты, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю после отключения выключателя, ближайшего к месту повреждения, находится на грани срабатывания,

$$U_{\text{с.з}} \leqslant \frac{U_{\text{неп.расч}}}{k_{\text{н}}}, \qquad (11)$$

где $k_{\text{н}}$ принимается так же, как в (10).

Наличие этого условия объясняется тем, что при несрабатывании комплекта от замыканий на землю комплект от замыканий между фазами не выводится из действия.

В выражениях (10) и (11) имеются в виду напряжения в месте установки защиты до отключения выключателя противоположного конца. После отключения указанного выключателя напряжения на реле увеличиваются, однако производить отстройку реле напряжения по ним недопустимо, так как при небольшом увеличении напряжения реле напряжения возвращается медленно. Это могло бы привести к неправильному действию защиты на отключение неповрежденной линии при каскадном отключении повреждения.

Условия отстройки от напряжений неповрежденных фаз при каскадном отключении короткого замыкания (пп. «б» и «в»), как правило, не являются расчетными.

## В. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (СХЕМЫ ПО РИС. 1—4 и 9)

1. Ток срабатывания реле тока, включенного на разность токов нулевой последовательности защищаемых линий, пускового органа комплекта от замыканий на землю, содержащего указанное реле тока и реле напряжения нулевой последовательности, выбирается по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нулевом проводе $I_{\text{нб.расч}}$ при переходном режиме внешнего замыкания на землю. По аналогии с выражением (1) ток срабатывания

рассматриваемого реле тока может быть получен по выражению

$$I_{\text{ос.з}} \geqslant k'_{\text{н}} I'_{\text{нб.расч}} + k''_{\text{н}} I''_{\text{нб.расч}}. \qquad (12)$$

Ток $I'_{\text{нб.расч}}$ обусловлен неравенством сопротивлений параллельных линий в нулевой последовательности, а также неодинаковой взаимной индуктивностью с другими линиями, а $I''_{\text{нб.расч}}$ — погрешностью трансформаторов тока. Коэффициенты надежности могут быть приняты равными $k'_{\text{н}}=1{,}3$ и $k''_{\text{н}}=1{,}2$.

Ток небаланса $I''_{\text{нб.расч}}$ в выражении (12) можно определить приближенно по следующему выражению:

$$I''_{\text{нб.расч}} = k_{\text{оди}} k_{\text{апер}} f_i \beta \frac{I_{\text{к.з. вн. макс}}}{2}, \qquad (13)$$

где $I_{\text{к.з.вн.макс}}$ — расчетный суммарный фазный максимальный ток (периодическая составляющая), проходящий по обеим параллельным линиям при металлическом коротком замыкании на землю вне защищаемой зоны, т. е. на шинах подстанций, соединяемых защищаемыми линиями;

$f_i$ — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока; при выборе последних по кривым предельной кратности тока при 10%-ной погрешности принимается равным 0,1;

$k_{\text{оди}}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока, установленных на параллельных линиях; может быть принят равным порядка 0,5;

$k_{\text{апер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической слагающей тока); при использовании реле тока без насыщающегося трансформатора может быть принят равным порядка 2;

$\beta$ — коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания.

При внешнем замыкании одной фазы на землю определяющим является сравнение двух токов (одной и другой линии) в поврежденной фазе, и поэтому $\beta=1$. При внешнем замыкании двух фаз на землю, как показано в приложении *II*, разд. А, $\beta_{\text{макс}}=2$, а $\beta_{\text{мин}}=\sqrt{2}$. Значение коэффициента $\beta$ при этом зависит от угла $\gamma$ между векторами токов поврежденных фаз, а именно $\beta=2\cos\frac{\gamma}{2}$.

Таким образом, как правило, расчетным видом повреждения является замыкание на землю двух фаз.

В расчетах по выражению (13) следует принимать $\beta=2$. При этом принимается во внимание, что в большей части практических случаев этот коэффициент лежит в пределах $\sqrt{3}$—2. В случаях, когда комплект от замыканий на землю с током срабатывания, удовлетворяющим условию (13) с $\beta=2$, оказывается недостаточно чувствительным, с целью некоторого повышения чувствительности коэффициент $\beta$ может быть уточнен.

2. Напряжение срабатывания реле, включенного на напряжение нулевой последовательности указанного пускового органа, должно выбираться по условию отстройки от напряжения небаланса при коротком замыкании между фазами на защищаемых линиях. Практически напряжение срабатывания указанного реле выбирается отстроенным от напряжения небаланса нормального режима.

При применении реле напряжения типа РНН-57, выполненного с фильтром третьей гармоники, исходя из опыта эксплуатации напряжение срабатывания может быть принято порядка 4 *в*, если в нормальном режиме отсутствует первая гармоника напряжения нулевой последовательности (линия транспонирована).

## Г. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ПО РИС. 5.

1. Ток срабатывания устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от несимметричных повреждений, включенного на разность токов защищаемых линий и на междуфазные напряжения, выбирается по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса $I_{\text{нб.расч}}$ при переходном режиме внешнего короткого замыкания. По аналогии с выражением (1′) для случая равенства сопротивлений параллельных линий ток срабатывания рассматриваемого устройства может быть получен по выражению

$$I_{\text{2с.з}} \geqslant k_{\text{н}} I_{\text{нб.расч}}, \qquad (14)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент надежности; может быть принят равным 1,2.

Ток небаланса в выражении (14) $I_{\text{нб.расч}}$ обусловливается различием токов одноименных фаз и может быть определен приближенно по выражению (13), где $I_{\text{к.з.вн.макс}}$ — расчетный суммарный фазный максимальный ток (периодическая составляющая), проходящий по обеим параллельным линиям при металлическом коротком замыкании вне защищаемой зоны, т. е. на шинах подстанций, соединяемых защищаемыми линиями; $k_{\text{апер}}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической слагающей тока); может быть принят равным порядка 1,5, так как реле включено через фильтр, промежуточный трансформатор которого в известной мере сглаживает переходный режим; $k_{\text{оди}}$, $f_i$, $\beta$ — то же, что и в выражении (13).

Расчетным видом повреждения является замыкание между двумя фазами. При этом коэффициент $\beta$ равен $1/\sqrt{3}$ (см. приложение *II*, разд. Б).

2. Ток срабатывания реле тока, включенного на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, комплекта от симметричных коротких замыканий выбирается по тем же условиям, что и ток срабатывания токового пускового органа комплекта от замыканий между фазами [разд. А, выражения (1)—(4)].

Однако отстройка от тока неповрежденных фаз $I_{\text{неп.расч}}$ при каскадном отключении двухфазного или однофазного замыкания на землю по выражению (4) производится при максимально возможном токе неповрежденной фазы, поскольку рассматриваемый комплект не выводится из действия при замыканиях на землю.

## Д. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ДЛЯ СЕТИ С МАЛЫМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМА ПО РИС. 8)

1. Ток срабатывания пускового органа рассматриваемой защиты, выполняемого с помощью только реле тока (без минимальных реле напряжения), включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, выбирается по следующим условиям:

а) По условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса $I_{\text{нб.расч}}$ при переходном режиме внешнего короткого замыкания между фазами (на шинах подстанций, соединяемых защищаемыми линиями) или при несинхронном включении — по выражению (1) или (1′).

б) По условию обеспечения возврата после отключения внешнего короткого замыкания в режиме работы одной линии или после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из рассматриваемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями, по выражению (2).

По условию отстройки от тока неповрежденной фазы $I^{(2)}_{\text{неп}}$ при каскадном отключении короткого замыкания между двумя фазами и двойного замыкания на землю по выражению (3).

Расчет по п. в) производится в соответствии с рекомендациями п. 3 разд. А.

## Е. ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАЩИТЫ

Ниже рассматривается расчет чувствительности пусковых органов комплектов от замыканий между фазами (схемы по рис. 1—4 и 9), от замыканий на землю (схемы по рис. 1—4 и 9) и от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) защит для сетей с большим током замыкания на землю. Чувствительность пусковых органов комплекта от симметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) защит для сетей с большим током замыкания на землю и пусковых органов защит для сетей с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8) рассчитывается так же, как и пускового органа комплекта от замыканий между фазами защиты для сетей с большим током замыкания на землю с тем отличием, что для комплекта от симметричных коротких замыканий должно рассматриваться трехфазное короткое замыкание.

Чувствительность пусковых органов всех рассматриваемых комплектов защиты в общем случае проверяется для двух режимов:

а) при включенных выключателях с обеих сторон поврежденной линии;

б) в режиме каскадного отключения, когда выключатель с противоположной стороны поврежденной линии отключен.

В режиме по п. «а» должна обеспечиваться требуемая чувствительность при коротком замыкании на защищаемой линии в точке одинаковой чувствительности (см. ниже п. I,I и приложение *III*, разд. А). В соответствии с Правилами устройства электроустановок минимальное значение коэффициента чувствительности при этом должно быть порядка 2.

В режиме по п. «б» должна обеспечиваться требуемая чувствительность при коротком замыкании на противоположном конце защищаемой линии при отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения. В соответствии с Правилами устройства электроустановок минимальное значение коэффициента чувствительности при этом должно быть порядка 1,5.

*I. Режим с включенными выключателями с обеих сторон линии*

1. Коэффициент чувствительности пускового органа комплекта от замыканий между фазами, выполненного только с реле тока (рис. 1, 3, 4 и 9), при коротком замыкании в точке одинаковой чувствительности, т. е. точке, где чувствительность реле тока, установленных с разных сторон защищаемых линий, одинакова, определяется по выражению

$$k'_{ч.т} = \frac{I_{зI}}{I_{с.зI}} = \frac{I_{зII}}{I_{с.зII}}, \qquad (15)$$

где $I_{зI}$ и $I_{зII}$ — фазные токи в защитах с токами срабатывания соответственно $I_{с.зI}$ и $I_{с.зII}$ при металлическом замыкании между двумя фазами в точке одинаковой чувствительности в минимальном режиме работы систем.

Положение точки одинаковой чувствительности может быть найдено по следующему выражению [выражение (П-31) из приложения *III*, разд. А]:

$$m_ч = \frac{I_{с.зI}}{I_{с.зI} + I_{с.зII}}, \qquad (16)$$

где $m_ч$ — расстояние в долях длины линии до точки одинаковой чувствительности от места установки защиты с током срабатывания $I_{с.зII}$ (рис. 17,*а*).

В случаях, когда для выбора тока срабатывания защит с обеих сторон расчетным оказывается условие «а» или «б» (см. раздел А, п. 1) $I_{с.зI} = I_{с.зII}$ и $m_ч = 0{,}5$, т. е. точка одинаковой чувствительности лежит на середине линии.

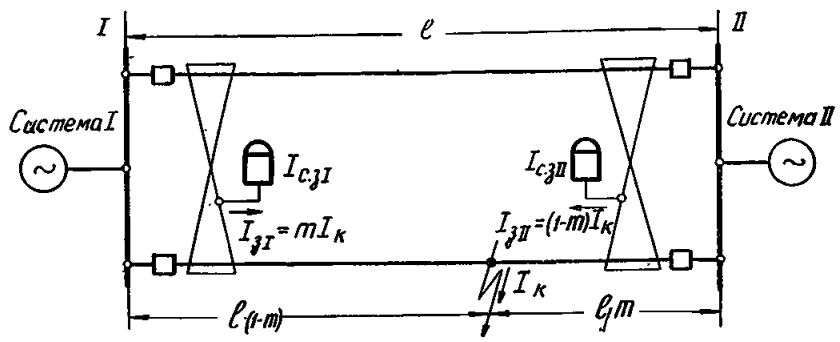
2. Чувствительность пусковых органов, выполненных с помощью реле тока и реле напряжения, как для комплекта от замыканий между фазами (рис. 2 и 3), так и для комплекта от замыканий на землю нулевой последовательности (рис. 1—4 и 9), должна определяться только для реле тока (см. приложения *V* и *VI*).

Расчет последней производится аналогично расчету чувствительности пускового органа, выполненного с реле тока (см. п. 1).

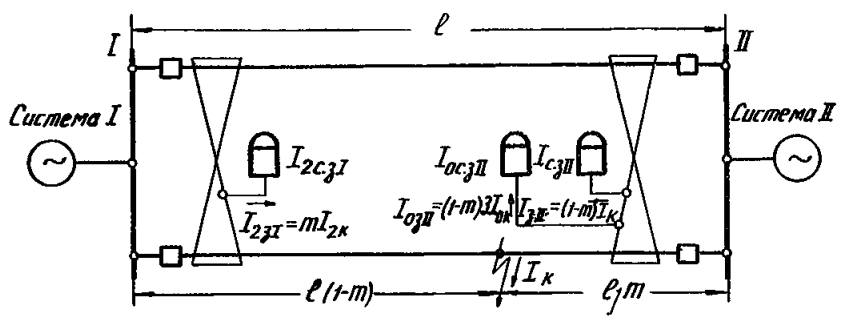
При этом расчет чувствительности комплекта от замыканий на землю характеризуется следующими особенностями:

а) принципиально достаточно обеспечить чувствительность рассматриваемого комплекта только при однофазных замыканиях на землю. Указанное объясняется тем, что при двухфазных замыканиях на землю комплект от замыканий между фазами имеет не меньшую чувствительность, чем при замыканиях между двумя фазами. В связи с этим в выражении (15) при определении чувствительности комплекта от замыканий на землю взамен $I_{зI}$ и $I_{зII}$ следует подставить значения утроенного тока нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю, т. е. соответственно $3I_{0зI}$ и $3I_{0зII}$.

б) в случае, если рассматривается вопрос об исключении из цепи выведения комплекта от замыканий между фазами размыкающего контакта реле тока комплекта от замыканий на землю (см. описание схемы по рис. 1, п. 5), может дополнительно потребоваться оценка чувствительности реле тока комплекта от замыканий на землю при двухфазных замыканиях на землю;




*а) При установке однотипных защит с обеих сторон линий*




*б) При установке неоднотипных защит с разных сторон линий (комплекта от несимметричных к.з. со стороны I и комплектов от замыканий между фазами и от замыканий на землю со стороны II).*

Рис. 17. Определение чувствительности защиты в режиме с включенными выключателями с обеих сторон линий.

в) для пускового органа комплектов от замыканий на землю $I_{ос.зI} = I_{ос.зII}$, поэтому точкой одинаковой чувствительности всегда является середина линии.

Чувствительность реле напряжения не проверяется, поскольку рассматриваемый режим для него не является расчетным (см. приложения *V* и *VI*).

Чувствительность реле направления мощности, выполненных на индукционном принципе, не проверяется, поскольку для комплекта от замыканий между фазами чувствительность этих реле Правилами устройства электроустановок не нормируется,

на основании выводов, данных в приложении IV, можно полагать, что реле направления мощности комплекта от замыканий на землю обладает требуемой чувствительностью, если и реле тока, и реле напряжения обладают требуемой чувствительностью.

3. Коэффициент чувствительности пускового органа комплекта от несимметричных коротких замыканий (рис. 5) определяется так же, как и для пускового органа комплекта от замыканий между фазами, выполненного с реле тока (см. п. 1), т. е. по выражению (15), в котором $I_{зI}$ и $I_{зII}$ — токи обратной последовательности в комплектах от несимметричных коротких замыканий с токами срабатывания соответственно $I_{2с.зI}$ и $I_{2с.зII}$, при расчетном виде несимметричного короткого замыкания в точке одинаковой чувствительности в минимальном режиме работы системы.

Точкой одинаковой чувствительности для двух комплектов от несимметричных коротких замыканий всегда является середина линии, поскольку $I_{2с.зI} = I_{2с.зII}$.

Положение точек одинаковой чувствительности комплекта от несимметричных коротких замыканий защиты *I* с комплектом от замыканий между фазами и комплектом от замыканий на землю защиты *II* может быть определено для расчетного вида несимметричного короткого замыкания соответственно по выражениям [выражения (П-32) и (П-33) из приложения *III*, разд. А]

$$m_ч = \frac{I_{2с.зI}}{I_{2с.зI} + \frac{I_{2к}}{I_к} \cdot I_{с.зII}}; \qquad (17)$$

$$m_ч = \frac{I_{2с.зI}}{I_{2с.зI} + \frac{I_{2к}}{3I_{0к}} \cdot I_{0с.зII}}, \qquad (18)$$

где $m_ч$ — расстояние в долях длины линии до соответствующих точек одинаковой чувствительности от места установки

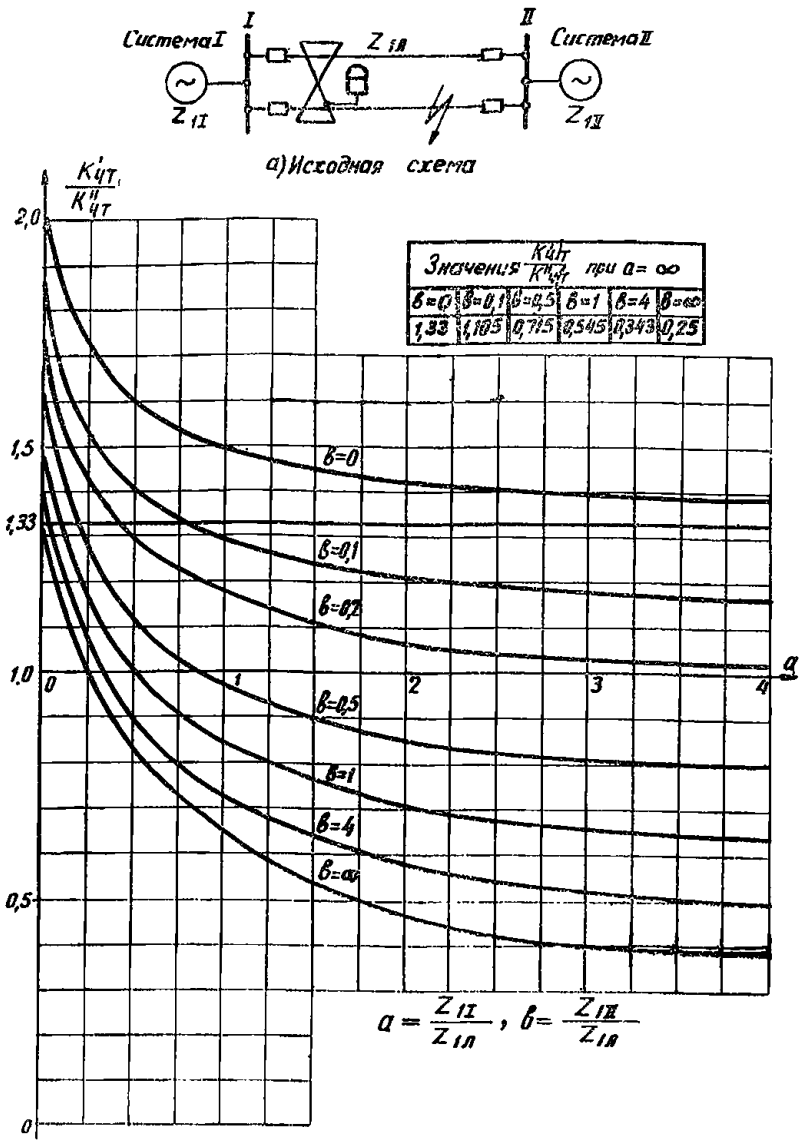



Рис. 18. Кривые зависимости от параметров сети отношения коэффициентов чувствительности реле тока комплекта от замыканий между фазами в режимах с включенными выключателями с обеих сторон линий и в режиме каскадного отключения.

$k'_{чт}$ — коэффициент чувствительности в режиме с включенными выключателями с обеих сторон линий; $k''_{чт}$ — коэффициент чувствительности в режиме каскадного отключения повреждения со стороны системы *II*; $Z_{1I}$ и $Z_{1II}$ — сопротивления прямой последовательности систем *I* и *II*; $Z_{1л}$ — сопротивления прямой последовательности линии.

защиты *II* с комплектами от замыканий между фазами и от замыканий на землю (рис. 17,*б*);

$I_{2с.зI}$, $I_{с.зII}$ и $I_{0с.зII}$ — токи срабатывания соответственно комплекта от несимметричных коротких замыканий, установленного со стороны *I* и комплектов от замыканий между фазами и от замыканий на землю, установленных со стороны *II*;

$I_к$, $I_{2к}$ и $I_{0к}$ — соответственно полный ток и токи обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания.

## *II. Режим каскадного отключения*

1. Коэффициент чувствительности реле тока пускового органа комплекта от размыканий между фазами (рис. 1—4 и 9) при повреждении на противоположном конце защищаемой линии и отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения, определяется по выражению

$$k''_{ч.т}=\frac{I_з}{I_{с.з}}, \qquad (19)$$

где $I_з$ — фазный ток в защите при металлическом замыкании между двумя фазами в рассматриваемой точке в минимальном режиме работы систем.

При одинаковых токах срабатывания реле тока комплекта от замыканий между фазами защит, установленных с разных сторон защищаемых линий ($I_{с.зI}=I_{с.зII}$), достаточно проверить только чувствительность реле тока защиты, установленной с одной из сторон, а именно (приложение *III*, разд. Б):

а) со стороны питания — для линий с односторонним питанием;

б) со стороны большего питания в минимальном режиме — для линий с двусторонним питанием.

В приложении *III*, разд. Д, произведено сравнение значений коэффициентов чувствительности для реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами в обоих расчетных режимах (с включенными выключателями с обеих сторон и после отключения выключателя с противоположной стороны линии).

Для случая параллельных линий без обходных связей при одинаковых токах срабатывания пусковых органов защит, установленных с разных сторон защищаемых линий, на рис. 18 приведены кривые зависимости отношения коэффициентов чувствительности в обоих расчетных режимах от параметров сети в предположении, что сопротивления прямой и обратной последовательностей всех элементов сети одинаковы.

$$a=z_{1I}/z_{1л} \text{ и } b=z_{1II}/z_{1л},$$

где $z_{1I}$ — сопротивление прямой последовательности системы со стороны рассматриваемой защиты;

$z_{1II}$ — то же, но для системы, противоположной по отношению к месту установки защиты;

$z_{1л}$ — сопротивление прямой последовательности одной линии.

Эти кривые дают возможность для случая параллельных линий без обходных связей при одинаковых токах срабатывания пусковых органов проверять чувствительность защиты только для одного (более тяжелого) из двух рассмотренных выше расчетных режимов.

Поскольку для обеспечения достаточного запаса чувствительности реле тока пускового органа защиты необходимо иметь

$$k'_{ч.т}\geqslant 2 \text{ и } k_{ч.т}''\geqslant 1{,}5$$

($k'_{ч.т}$ и $k''_{ч.т}$ — коэффициенты чувствительности указанного реле для режима соответственно с включенными выключателями с обеих сторон и после отключения выключателя с противоположной стороны), все точки на диаграмме рис. 18, расположенные выше прямой $\frac{k'_{ч.т}}{k''_{ч.т}}=\frac{2}{1{,}5}=1{,}33$, соответствуют тем случаям, в пределах которых проверку чувствительности реле тока защиты достаточно производить только в режиме после отключения поврежденной линии с противоположной стороны, а точки, расположенные ниже этой прямой, — тем случаям, в пределах которых проверку чувствительности достаточно производить только в режиме с включенными выключателями с обеих сторон. Как видно из рис. 18,б, в большинстве возможных случаев при принятых условиях проверку чувствительности достаточно производить только в режиме с включенными выключателями с обеих сторон.

Коэффициент чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю нулевой последовательности (рис. 1—4 и 9) при повреждении на противоположном конце защищаемой линии и отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения, определяется по выражению (19). При этом следует учитывать отмеченные при рассмотрении режима с включенными выключателями с обеих сторон линии особенности расчета чувствительности реле тока комплекта от замыканий на землю по п. 2,*а* и 2,*б*.

Для параллельных линий, расположенных настолько близко, что взаимная индукция между ними должна учитываться, наименьший ток нулевой последовательности в защите в режиме каскадного отключения может оказаться при повреждении не на конце линии, противоположном месту установки защиты, а в более близкой точке. Это возможно лишь в тех случаях, когда отношения сопротивлений прямой последовательности систем, примыкающих к защищаемым линиям, к сопротивлению одной линии $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1II}/z_{1л}$ велики ($z_{1I}$ — сопротивление системы со стороны установки защиты).

Например, для параллельных линий, расположенных на общих опорах, при неучете влияния тросов на значения сопротивлений нулевой последовательности и при отсутствии обходных связей указанное имеет место, когда значения $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1II}/z_{1л}$ оба превышают примерно 3 (приложение *III*, разд. В).

В связи с указанным значение требуемого коэффициента чувствительности по выражению (19) при повреждении в кон-

це линии должно приниматься в рассматриваемых случаях несколько большим 1,5 (для случая без обходных связей в пределе 1,7).

Коэффициент чувствительности реле тока пускового органа комплекта от несимметричных коротких замыканий (рис. 5) при повреждении на противоположном конце защищаемой линии и отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения, определяется по выражению (19). Под $I_з$ в этом случае следует понимать ток обратной последовательности в месте установки защиты при расчетном виде несимметричного короткого замыкания в минимальном режиме работы систем.

2. Коэффициент чувствительности реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий между фазами (рис. 2 и 3) должен проверяться при коротком замыкании на противоположном конце защищаемых линий. Значение коэффициента чувствительности в этом случае

$$k_{ч.н} = \frac{U_{с.з}}{U_з}, \qquad (20)$$

где $U_з$ — междуфазное напряжение в месте установки защиты при металлическом коротком замыкании расчетного вида в расчетном режиме работы систем.

Для случая отсутствия обходных связей на рис. 19 приведена кривая, показывающая, при каких соотношениях между сопротивлениями питающих систем и защищаемой линии обеспечивается требуемая чувствительность реле напряжения в режиме каскадного отключения и, следовательно, возможно использование схем с пусковым органом, выполненным с помощью реле тока и реле напряжения (рис. 2 и 3). Построение этой кривой дано в приложении V.

Коэффициент чувствительности реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю (рис. 1—4 и 9) должен проверяться также при повреждениях на противоположном конце защищаемой линии при отключенном выключателе с противоположного конца.

Значение коэффициента чувствительности в этом случае

$$k_{ч.н} = \frac{3U_{0з}}{U_{0с.з}}, \qquad (21)$$

где $U_{0з}$ — напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты при металлическом замыкании на землю одной фазы в указанной точке в расчетном режиме работы систем.

Чувствительность реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю при замыканиях на землю двух фаз не проверяется, так как при коротких замыканиях указанного вида комплект от замыканий между фазами имеет не меньшую чувствительность, чем при замыканиях между двумя фазами.

3. Чувствительность реле направления мощности в рассматриваемом режиме, как и в режиме с включенными выключателями обеих сторон поврежденной линии (разд. Е, I, п. 2), не проверяется.

## Ж. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ КАСКАДНОГО ДЕЙСТВИЯ

1. Зона каскадного действия является вспомогательной характеристикой поперечной дифференциальной направленной защиты (Правилами устройства электроустановок зона каскадного действия защиты не нормируется).

Эта зона расположена со стороны линии, противоположной месту установки рассматриваемой защиты. При металлическом коротком замыкании в пределах зоны каскадного действия защита не действует из-за недостаточной чувствительности пускового органа или органа направления мощности до момента отключения короткого замыкания с противоположной стороны.

2. Значение зоны каскадного действия (в долях от длины защищаемой линии) комплекта от замыканий между фазами защиты для сетей с большим током замыкания на землю (схемы по рис. 1—4 и 9), а также защиты для сетей с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8), обусловливаемой отказом реле тока пускового органа при повреждениях на другом конце защищаемых линий из-за того, что ток в реле мал, определяется выражением

$$m_{каск} = \frac{I_{с.з}}{I_к}, \qquad (22)$$

где $I_{с.з}$ — первичный ток срабатывания реле тока;

$I_к$ — фазный ток в месте короткого замыкания при повреждении на границе зоны каскадного действия (рис. 17 для $m = m_{каск}$).

С некоторым приближением ток короткого замыкания в выражении (22) может определяться при повреждении на

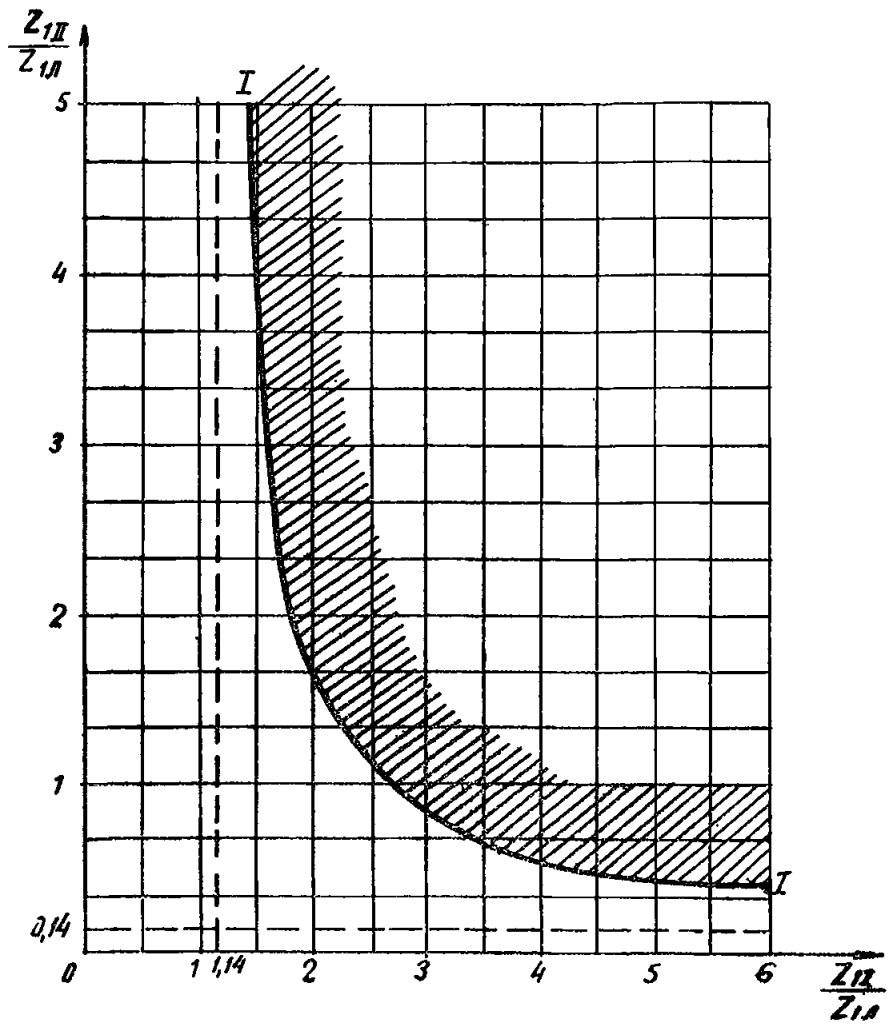



Рис. 19. Область применимости минимального пуска напряжения.

$Z_{II}$ — сопротивление прямой последовательности системы, примыкающей к защищаемым линиям со стороны установки рассматриваемой защиты; $Z_{III}$ — то же, но для системы, примыкающей к защищаемым линиям с противоположной стороны. Точки, лежащие выше кривой *I—I*, соответствуют случаям, в которых может быть использован минимальный пуск напряжения.

шинах подстанции, противоположной по отношению к месту установки рассматриваемой защиты. Однако в ряде случаев (в особенности при относительно малых значениях сопротивления системы со стороны места установки рассматриваемой защиты) расчет по выражению (22) с указанным приближением приводит к значительным погрешностям.

Более точный расчет зоны каскадного действия может производиться графически (рис. 20). Для этого:

а) строится зависимость $I_з = f(m)$ тока в защите от расстояния (в долях длины линии) от места повреждения до противоположного по отношению к месту установки рассматриваемой защиты конца линии;

б) в тех же координатах наносится ток срабатывания защиты $I_{с.з}$, который изображается прямой, параллельной оси абсцисс.

Очевидно, что точка пересечения кривой $I_з = f(m)$ и прямой $I_{с.з}$ ограничивает зону каскадного действия защиты.

Следует отметить, что для параллельных линий без обходных связей при одинаковых токах срабатывания защит, установленных с разных сторон защищаемых линий, зона каскадного действия комплекта от замыканий между фазами (с каждого конца защищаемых линий) не может превысить 30% от длины линии при любых параметрах сети, если обеспечивается требуемая чувствительность защиты ($k_{ч.т} \geqslant 2$) к повреждениям в середине линии при включенных выключателях с обеих сторон. Указанное вытекает из соотношения между значениями коэффициента чувствительности (при повреждении в середине линии) и зоны каскадного действия защиты, полученного в приложении *VII*.

3. При коротких замыканиях между фазами на другом конце защищаемых линий из-за малого значения тока, попадающего в реле, может иметь место также и отказ реле направления мощности рассматриваемого комплекта от замыканий между фазами.

Зона, в которой реле направления мощности отказывает по току, как правило, меньше зоны каскадного действия защиты, обусловленной реле тока пускового органа. Это объясняется тем, что реле направления мощности чувствительнее реле тока пускового органа, а напряжения, подводимые к ре-

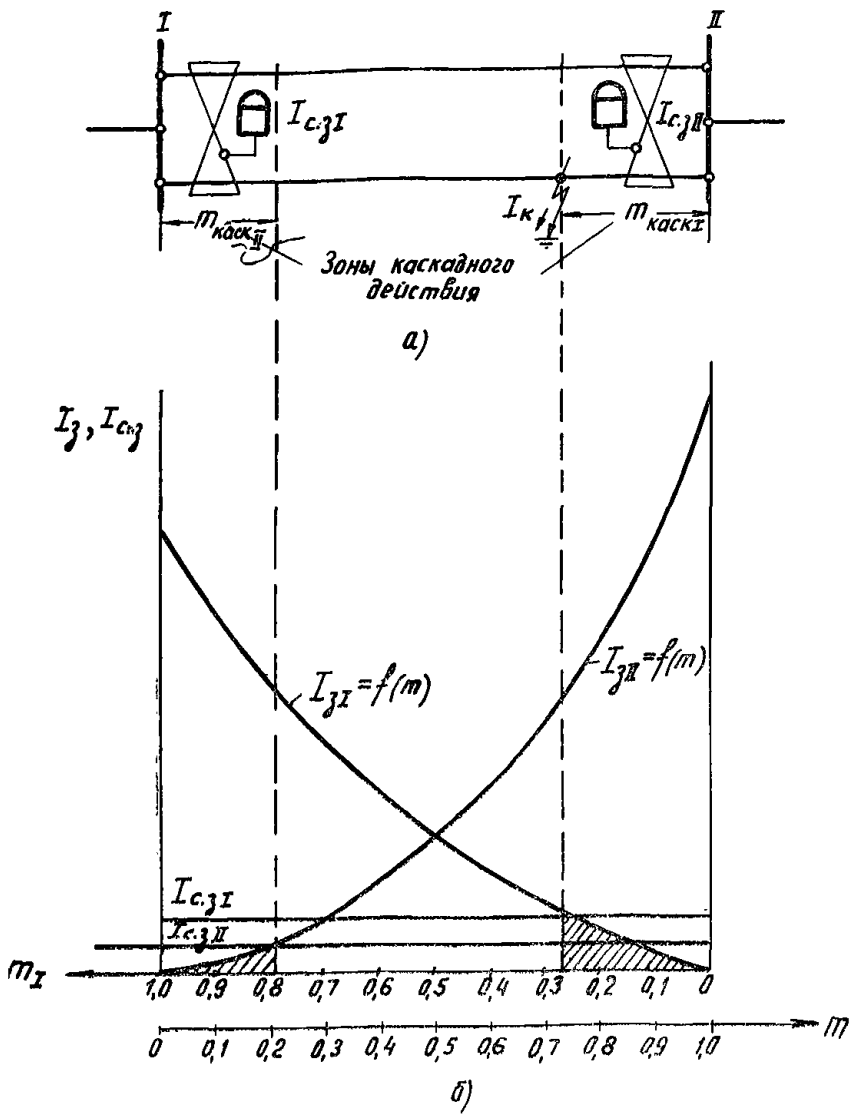



Рис. 20. Определение зон каскадного действия реле тока пусковых органов поперечной дифференциальной направленной защиты.

ле направления мощности при любом виде повреждения на другом конце защищаемых линий, достаточно велики.

4. Значение зоны каскадного действия комплекта от замыканий на землю (схемы рис. 1—4 и 9), обусловливаемой отказом реле тока пускового органа при замыкании на землю на противоположном конце защищаемой линии из-за того, что ток в реле мал, может быть приближенно определено по выражению (22), в котором под током $I_к$ следует понимать утроенный ток нулевой последовательности в месте замыкания при повреждении на шинах подстанции, противоположной по отношению к месту установки рассматриваемой защиты.

Более точный расчет зоны каскадного действия может производиться графически аналогично тому, как для реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами (см. п. 2).

Следует отметить, что для параллельных линий без обходных связей зона каскадного действия комплекта от замыканий на землю (с каждого конца защищаемых линий) не может превысить 33% от длины линии при любых параметрах сети, если обеспечивается требуемая чувствительность защиты ($k_{ч.т} \geqslant 2$) к повреждениям в середине линии при включенных выключателях с обеих сторон (см. приложение *VII*).

5. Значение зоны каскадного действия комплекта от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5), обусловливаемой отказом реле тока пускового органа при несимметричном коротком замыкании на противоположном конце защищаемой линии из-за того, что ток в реле мал, может быть приближенно определено по выражению (22), в котором под током $I_к$ следует понимать ток обратной последовательности в месте короткого замыкания при повреждении на шинах подстанции, противоположной по отношению к месту установки рассматриваемой защиты.

Более точный расчет зоны каскадного действия может производиться графически аналогично тому, как для реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами (см. п. 2).

## 3. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ПО РИС. 10

1. В общем случае ток срабатывания комплекта от замыканий между фазами должен выбираться по двум условиям.

а) По условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса при замыканиях между тремя фазами на сторонах среднего и низшего напряжений в расчетных точках *К-1* и *К-2* рис. 21 (точка *К-1* расположена в конце зоны действующих без замедления ступеней защит присоединений, отходящих от шин среднего напряжения, а точка *К-2* — на шинах низшего напряжения)

$$I_{с.з} \geqslant k'_н I'_{нб.расч} + k''_н I''_{нб.расч}. \qquad (23)$$

Ток $I'_{нб.расч}$ обусловлен неравенством токов в трансформаторах тока защиты, например, вследствие неодинаковых сопротивлений параллельных ветвей; при равенстве сопротивлений параллельных линий указанное может иметь место:

при коротком замыкании в точке *К-2* в случае, когда сопротивление обмотки среднего напряжения автотрансформаторов (трансформаторов) не равно нулю $z_{с.н} \neq 0$ (рис. 21,*б*),

при коротких замыканиях в точках *К-1* и *К-2* из-за возможного различия в значениях сопротивлений двух автотрансформаторов) (рис. 21,*б* и *в*), а также из-за наличия нагрузки.

Различие сопротивлений автотрансформаторов (трансформаторов) и влияние нагрузки практически можно не учитывать.

Коэффициенты надежности в выражении (23) могут быть приняты равными $k'_н = 1{,}3$ и $k''_н = 1{,}2$.

Ток $I''_{нб.расч}$ обусловлен погрешностью трансформаторов тока защиты. Для случая короткого замыкания в точке *К-2* $I''_{нб.расч}$ при $z_{сн} \neq 0$ определяется по выражению

$$I''_{нб.расч} = k_{одн} k_{апер} f_i I'_{к.в.\ вн.\ макс}, \qquad (24)$$

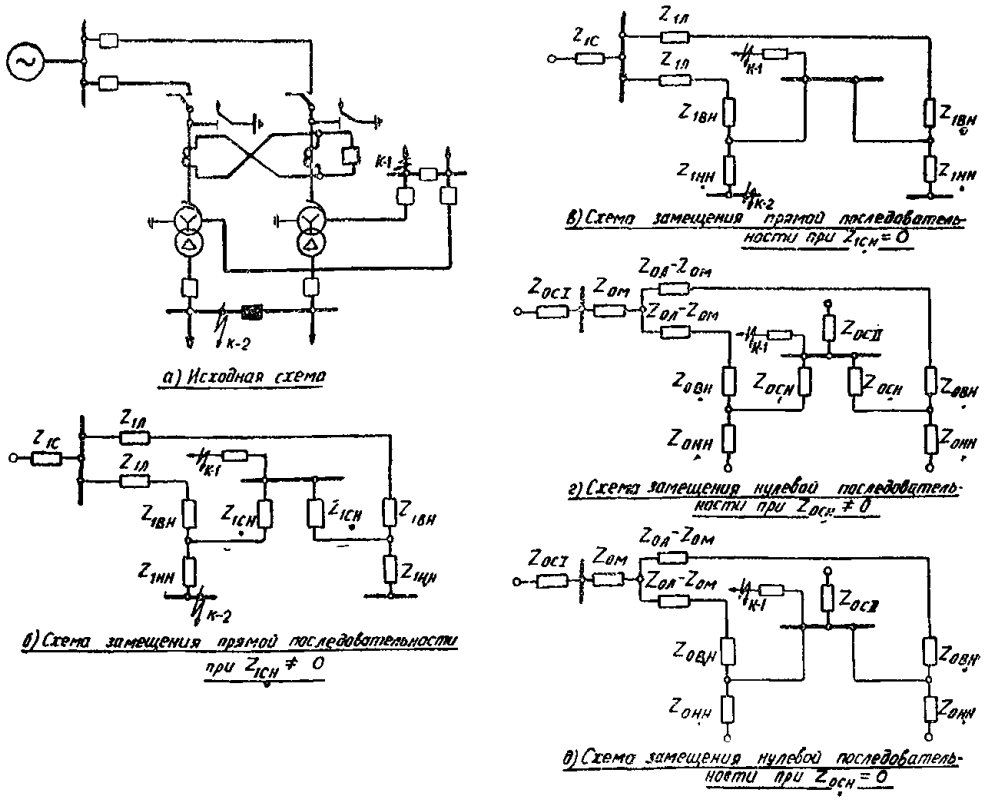



Рис. 21. Расчетные точки короткого замыкания при выборе параметров защиты по рис. 10.

где $I'_{к.з.вн.макс}$ — меньший из двух токов, проходящих по трансформаторам тока защиты при металлическом замыкании между тремя фазами в точке *К-2*; погрешность трансформатора тока с бо́льшим первичным током приводит к уменьшению результирующего тока в реле из-за снижения разницы между вторичными токами трансформаторов тока обеих линий;

$k_{одн}$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока защиты; принимается равным 0,5—1,0, причем меньшие из указанных значений принимаются в случаях, когда по трансформаторам тока защиты проходят мало различающиеся между собою токи;

$k_{апер}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической слагающей тока); может быть принят равным порядка 1,2, поскольку защита выполнена с выдержкой времени $\approx 0{,}5$ *сек;*

$f_i$ — относительное значение полной погрешности трансформаторов тока; при выборе последних по кривым предельной кратности тока при 10% погрешности принимается равным 0,1.

Для случая короткого замыкания в точке *К-1*, а также при коротком замыкании в точке *К-2*, когда $z_{с.н}=0$, ток $I'_{нб.расч}=0$, а

$$I''_{нб.расч} = k_{одн}k_{апер}f_i\frac{I_{к.з.\,вн.макс}}{2}, \qquad (25)$$

где $I_{к.з.вн.макс}$ — суммарный максимальный ток, проходящий по обеим параллельным цепям при металлическом замыкании между тремя фазами в расчетной точке;

$k_{одн}$, $k_{апер}$ и $f_i$ — то же, что в выражении (24).

Если выбор тока срабатывания по условию отстройки от короткого замыкания на шинах низшего напряжения (в точке *К-2* на рис. 21) приводит к недопустимому загрублению защиты, то в качестве расчетного можно рассматривать короткое замыкание не на шинах, а более удаленное короткое замыкание, допуская в некоторых случаях действие защиты при повреждении на стороне низшего напряжения; при этом следует иметь в виду, что рассматриваемая защита действует только на отключение секционного (шиносоединительного) выключателя на стороне среднего напряжения, который затем включается устройством автоматики.

При указанном выборе тока срабатывания рассматриваемой поперечной дифференциальной токовой защиты в случае, когда на элементах стороны низшего напряжения имеется действующая без замедления ступень защиты, за расчетную точку *К-2* принимается короткое замыкание в конце зоны действия этой ступени.

При отсутствии на элементах стороны низшего напряжения действующей без замедления ступени защиты в целях ограничения зоны действия рассматриваемой поперечной защиты целесообразно ее ток срабатывания выбирать не меньшим, чем это необходимо для обеспечения требуемой чувствительности (при сохранении условия отстройки от короткого замыкания на стороне среднего напряжения).

б) В случае, когда допускается действие защиты при коротком замыкании на стороне низшего напряжения (см. выше п. «а»), должно учитываться также условие отстройки от тока в защите при самозапуске нагрузки, когда отключены секционный (шиносоединительный) выключатель на стороне среднего напряжения и выключатель одного автотрансформатора на стороне низшего напряжения

$$I_{с.з} \geqslant \frac{k_н k_{самозап}}{k_в} I_{раб.расч}, \qquad (26)$$

где $I_{раб.расч}$ — ток в защите, обусловленный неравенством токов в ее трансформаторах тока в указанном нагрузочном режиме;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,2;

$k_в$ — коэффициент возврата реле;

$k_{самозап}$ — коэффициент, учитывающий самозапуск заторможенных двигателей; может быть принят порядка 1,5—2.

Выполнение рассматриваемого условия необходимо для обеспечения возможности последующего включения секционного (шиносоединительного) выключателя от устройства автоматики.

2. Ток срабатывания комплекта от замыканий на землю должен выбираться по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса в нулевом проводе при коротких замыканиях на сторонах среднего и низшего напряжений (в точках *К-1* и *К-2*, рис. 21,*а*).

$$I_{ос.з} = k_н I_{нб.расч}, \qquad (27)$$

где $k_н = 1{,}2$ [по аналогии с выражением (23)].

Ток $I_{нб.расч}$ в выражении (27) может быть рассчитан следующим образом:

$$I_{нб.расч} = k_{одн}k_{апер}f_i\beta I''_{к.з.\,вн.макс}, \qquad (28)$$

где $I''_{к.з.вн.макс}$ — больший из двух фазных токов, проходящих по трансформаторам тока защиты при коротком замыкании расчетного вида в расчетной точке (схемы замещения отдельных последовательностей см. на рис. 21,*б*—*д*);

$k_{одн}$, $k_{апер}$ и $f_i$ — то же, что в выражении (24);

$\beta$ — коэффициент, зависящий от вида повреждения; при внешних коротких замыканиях на землю в точке *К-1* (рассчитываемых при установке защиты на автотрансформаторах) он соответственно равен при замыкании на землю одной фазы $\beta^{(1)}=1$ и при замыкании на землю двух фаз $\beta^{(1,1)}_{макс}=2$ (см. приложение *II*).

Проведя для случая внешнего трехфазного короткого замыкания рассуждения, подобные приведенным в приложении *II*, разд. А, и рассматривая предельный случай, когда, например, трансформаторы тока фаз *А* и *В* одной линии и фазы *С* второй линии имеют максимальные погрешности $f_i=0{,}1$, а остальные, трансформаторы тока работают без погрешностей, можно получить, что $\beta^{(3)}_{макс}=2$.

Следовательно, в качестве $I''_{к.з.вн.макс}$ в выражении (28) должен приниматься больший из токов, полученных при расчете трехфазного короткого замыкания и двухфазного замыкания на землю.

3. Чувствительность защиты должна проверяться по короткому замыканию расчетного вида на одной из линий при отключении ее от питающих систем, работающих в минимальном режиме.

Минимальный коэффициент чувствительности должен быть порядка 1,5.

4. Следует отметить, что установка рассматриваемой защиты принята на стороне 220 *кв*, а не 110 *кв* в связи с тем, что при этом:

а) в ряде случаев обеспечивается более высокая чувствительность комплекта от замыканий на землю при коротких замыканиях на защищаемых линиях [например, при $z_{с.н}\neq 0$ ток в реле защиты будет больше в связи с тем, что ток нулевой последовательности в сопротивлении $z_{0н.н}$ (рис. 21,*г*) автотрансформатора, присоединенного к поврежденной линии, больше тока в $z_{0н.н}$ другого автотрансформатора];

б) при отстройке комплекта от замыканий между фазами от коротких замыканий на стороне низшего напряжения ток срабатывания защиты в ряде случаев будет значительно меньше (например, при $z_{с.н}=0$ через реле защиты проходит только ток небаланса).

## И. Пример расчета поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110 *кв* для сети с большим током замыкания на землю

Защищаемые линии длиной 70 *км* связывают системы *I* и *II*.

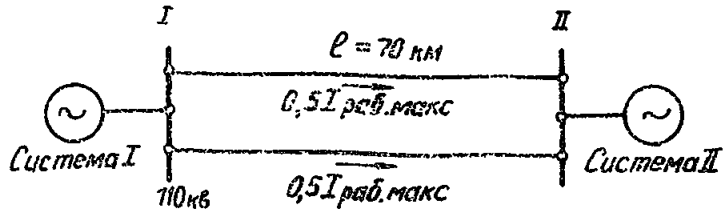
Исходная схема и исходные данные приведены на рис. 22,*а*. Схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей приведены на рис. 22,*б* и *в*.

Пример рассчитан в именованных единицах, приведенных к ступени напряжения 115 *кв*.

Результаты расчетов токов и напряжений при коротких замыканиях в схеме по рис. 22,*а* приведены на рис. 23 и 24.

Токи неповрежденных фаз при каскадном отключении замыканий на землю вычислялись с учетом токов предшествующего нагрузочного режима (гл. 2, разд. А, п. 4 и приложение *I*, разд. Б).

В примере дан расчет параметров срабатывания и коэффициентов чувствительности пусковых органов комплекта от замыканий между фазами и комплекта от замыканий на землю.




$S_{к.з.сист.макс I} = 2000$ Мва

$S_{к.з.сист.мин.I} = 1200$ Мва

$S_{к.з.сист.макс.II} = 1000$ Мва

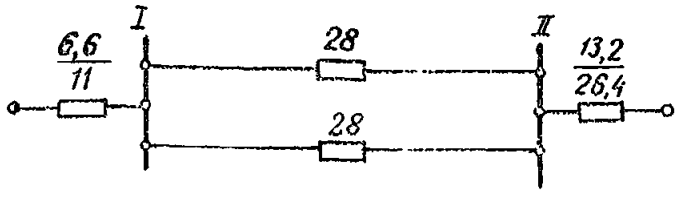
$S_{к.з.сист.мин.II} = 500$ Мва

$x_{0.сист.I} = 1{,}5\, x_{1\,сист\,I}$

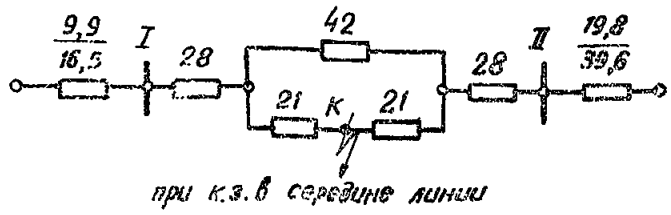
$x_{0.сист.II} = 1{,}5\, x_{1\,сист.II}$

$I_{раб.макс} = 0{,}6\,\angle -35°$ ка

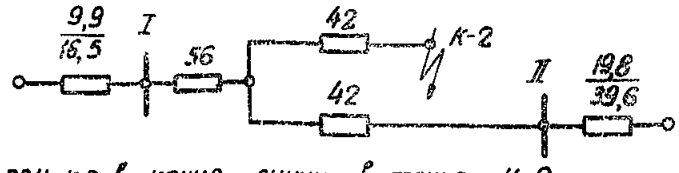
а) Исходная схема



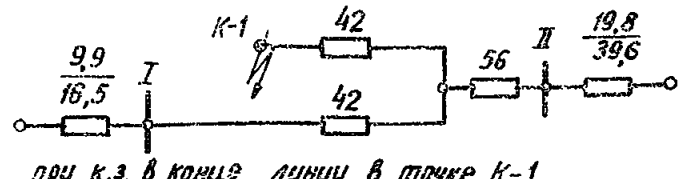

б) Схема замещения прямой (обратной) последовательности



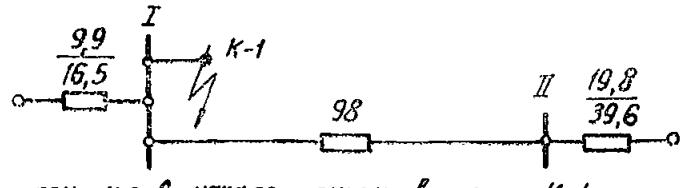

при к.з. в середине линии



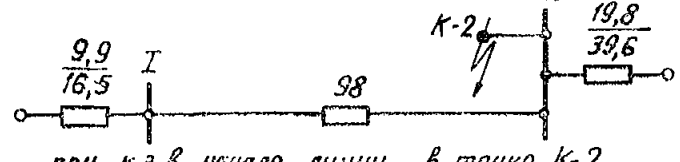

при к.з. в конце линии в точке К-2 (режим каскадного отключения)




при к.з. в конце линии в точке К-1 (режим каскадного отключения)




при к.з. в начале линии в точке К-1 (режим каскадного отключения)




при к.з. в начале линии в точке К-2 (режим каскадного отключения)

в) Схемы замещения нулевой последовательности

Рис. 22. Исходная схема и схемы замещения отдельных последовательностей для примера расчета поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110 *кв*.

Примечания: 1. В схемах замещения по рис. *б* и *в* в числителе даны сопротивления систем в максимальном, а в знаменателе — в минимальном режимах.

2. Сопротивления линий приняты $z_{1л}=0{,}4$ *ом/км*; $z_{0л}=3{,}5\, z_{1л}$; $z_{0м}=2z_{1л}$.

Таблица 1

**Значения токов и напряжений к рис. 24, *а***

| Величина | Вид повреждения и режим | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Замыкание на землю фазы *A* | | Замыкание на землю фаз *B* и *C* | |
| | макс. | мин. | макс. | мин. |
| $I_{0лI}$ | 0,632 | 0,529 | 0,462 | 0,397 |
| $I_{0лII}$ | 0,578 | 0,445 | 0,422 | 0,333 |
| $I_{0лI\,II}$ | 0,027 | 0,042 | 0,020 | 0,032 |
| $I_{0сI}$ | 0,659 | 0,571 | 0,482 | 0,429 |
| $I_{0сII}$ | 0,551 | 0,402 | 0,402 | 0,301 |
| $U_{0I}$ | 6,53 | 9,45 | 4,77 | 7,10 |
| $U_{0II}$ | 10,9 | 16,0 | 8,0 | 12,0 |

## *I. Комплект от замыканий на землю*

1. Пусковой орган комплекта выполнен с помощью реле тока и реле напряжения.

2. Ток срабатывания токового пускового органа защит обеих сторон выбирается по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса $I_{нб.расч}$ при внешнем замыкании на землю двух фаз [выражения (12) и (13) и рис. 23,*а*]

$$I''_{нб.расч}=k_{одн}k_{апер}f_i\beta\frac{I_{к.з.\,вн.макс}}{2}=$$

$$=0{,}5\cdot 2\cdot 0{,}1\cdot 2\cdot 1{,}41=0{,}282 \text{ ка};$$

$$I''_{ос.з}=k_п I_{нб.расч}=1{,}2\cdot 0{,}282=0{,}34 \text{ ка}.$$

Таблица 2

**Значения токов и напряжений к рис. 24, *б* и *в***

| Вид повреждения | Величина | Точка повреждения и режим | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *K-2* | | *K-1* | |
| | | макс. | мин. | макс. | мин. |
| Замыкание на землю фазы *A* | $I_{ок}$ | 0,470 | 0,430 | 0,450 | 0,400 |
| | $I_{ол}$ | 0,242 | 0,200 | 0,266 | 0,248 |
| | $I_{ос}$ | 0,228 | 0,230 | 0,184 | 0,152 |
| | $U_0$ | 2,26 | 3,80 | 3,65 | 6,0 |
| Замыкание на землю фаз *B* и *C* | $I_{ок}$ | 0,368 | 0,335 | 0,362 | 0,332 |
| | $I_{ол}$ | 0,190 | 0,157 | 0,215 | 0,206 |
| | $I_{ос}$ | 0,178 | 0,178 | 0,147 | 0,126 |
| | $U_0$ | 1,76 | 2,94 | 2,90 | 5,0 |

Примечание. В табл. 1 и 2 значения токов даны в килоамперах, напряжений — в киловольтах.

3. Вторичное напряжение срабатывания реле напряжения пускового органа принимается равным $U_{с.р}=4$ *в* (в соответствии с указаниями гл. 2 разд. В, п. 2) или, будучи отнесенным к первичной стороне,

$$U_{ос.з} = U_{с.р} n_н = 4 \frac{1\,100}{\sqrt{3}} = 2{,}54 \text{ кв},$$

где $n_н = \frac{110\,000}{\sqrt{3}\cdot 100} = \frac{1\,100}{\sqrt{3}}$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

4. Чувствительность реле тока пускового органа защит, установленных со сторон *I* и *II*, в минимальном режиме работы при замыкании на землю одной фазы в середине линии (точке одинаковой чувствительности) — см. табл. 1:

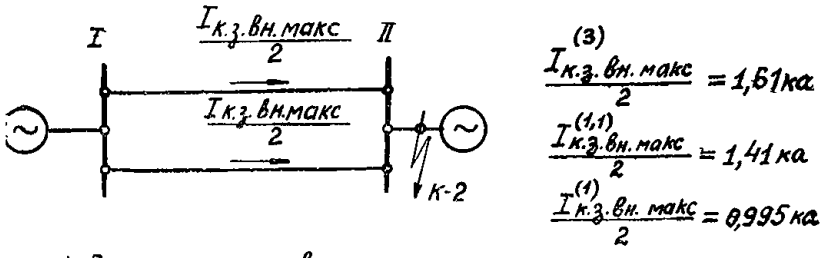
$$k^{(1)}_{ч.тI} = k^{(1)}_{ч.тII} = \frac{3I^{(1)}_{0з}}{I_{ос.з}} = \frac{3\cdot 0{,}487}{0{,}34} = 4{,}3 > 2.$$

Чувствительность реле тока пускового органа в минимальном режиме при каскадном действии защиты проверяется по замыканию на землю одной фазы на противоположном конце защищаемой линии при отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения (см. табл. 2)

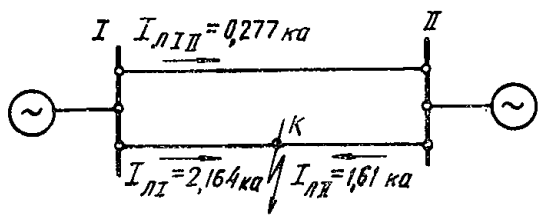
$$k^{(1)}_{ч.тI} = \frac{3\cdot 0{,}63}{0{,}34} = 5{,}57 > 1{,}5;$$

$$k^{(1)}_{ч.тII} = \frac{3\cdot 0{,}648}{0{,}34} = 5{,}7 > 1{,}5.$$

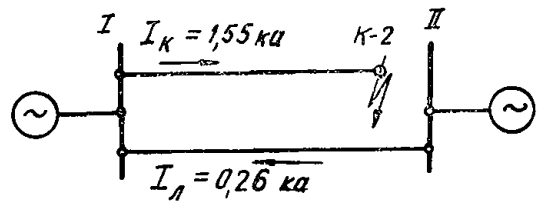
5. Чувствительность реле тока пускового органа защит в минимальном режиме работы при двухфазных замыканиях на землю в середине линии (см. табл. 1), определяемая дополнительно для решения вопроса об исключении из цепи выведения из действия комплекта от замыканий между фазами



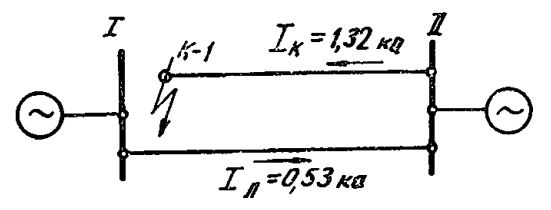

*а) Внешнее к.з. в максимальном режиме*




*б) Замыкание между фазами В и С в середине линии в минимальном режиме*




*в) Замыкание между фазами В и С вблизи шин п/ст II (каскадное отключение) в минимальном режиме*




*г) Замыкание между фазами В и С вблизи шин п/ст I (каскадное отключение) в минимальном режиме.*

Рис. 23. Распределение токов поврежденных фаз при коротких замыканиях в схеме по рис. 22,*а*.

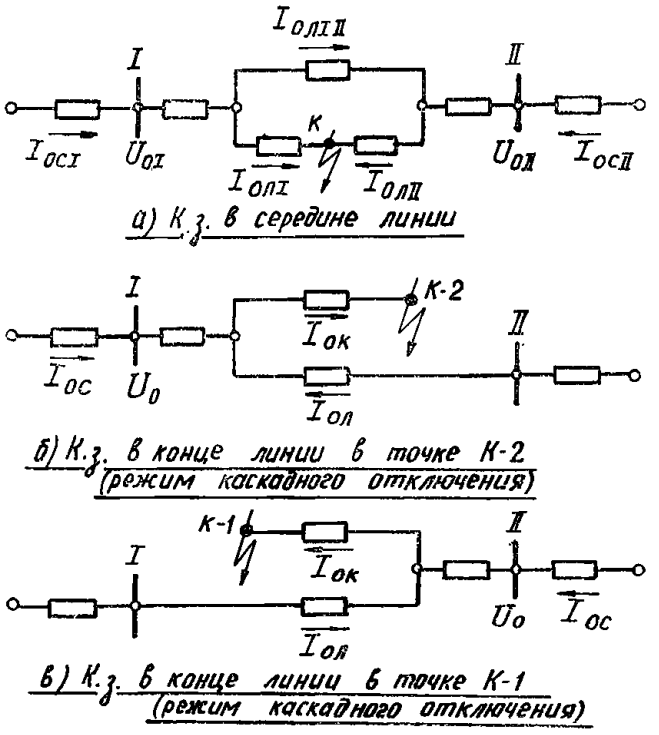



Рис. 24. Распределение токов нулевой последовательности при замыканиях на землю в схеме по рис. 22,*а*.

размыкающего контакта реле тока комплекта от замыканий на землю (см. описание схемы по рис. 1, п. 5 и указания раздела Е главы 2):

$$k^{(1,1)}_{ч.тI} = k^{(1,1)}_{ч.тII} = \frac{3I^{(1,1)}_{0з}}{I_{ос.з}} = \frac{3\cdot 0{,}365}{0{,}34} = 3{,}2 > 2.$$

Чувствительность реле тока защит в минимальном режиме работы при каскадном действии защит (табл. 2), определяемая дополнительно также для указанных выше целей:

$$k^{(1,1)}_{ч.тI} = \frac{3\cdot 0{,}492}{0{,}34} = 4{,}35 > 1{,}5;$$

$$k^{(1,1)}_{ч.тII} = \frac{3\cdot 0{,}538}{0{,}34} = 4{,}73 > 1{,}5.$$

Поскольку пусковой орган комплекта от замыканий на землю обладает требуемой чувствительностью при двухфазных замыканиях на землю, использование размыкающего контакта реле тока этого комплекта в цепи выведения комплекта от замыканий между фазами является необязательным (описание схемы по рис. 1, п. 5).

6. Чувствительность реле напряжения пускового органа согласно указаниям гл. 2, разд. Е, п. II, 2, проверяется в режиме каскадного отключения замыкания на землю одной фазы по выражению (21); при этом в максимальном режиме работы для защит, установленных со стороны *I* и *II*, получим (табл. 2):

$$k^{(1)}_{ч.нI} = \frac{3U^{(1)}_{0з}}{U_{ос.з}} = \frac{3\cdot 2{,}26}{2{,}54} = 2{,}66 > 1{,}5;$$

$$k^{(1)}_{ч.нII} = \frac{3\cdot 3{,}65}{2{,}54} = 4{,}32 > 1{,}5.$$

Как указано в гл. 2, разд. Е, п. II, 2, режим с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии для пускового органа напряжения не является расчетным.

Поскольку и реле тока и реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю обладают требуемой чувствительностью, реле направления мощности данного комплекта также обладает требуемой чувствительностью (см. приложение *IV*).

## *II. Комплект от замыканий между фазами*

1. Ток срабатывания пускового органа при выполнении его с помощью только реле тока (без минимального реле напряжения) выбирается в соответствии с гл. 2, разд. А, п. I по следующим условиям:

а) По условию отстройки от тока небаланса $I_{\text{нб.расч}}$ при внешнем трехфазном коротком замыкании [выражения (1′) и (5) и рис. 23,*а*].

$$I_{\text{нб.расч}} = k_{\text{одн}} k_{\text{апер}} f_i \frac{I_{\text{к.з. вн.макс}}}{2} =$$

$$= 0{,}5 \cdot 2 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}61 = 0{,}161 \text{ ка};$$

$$I_{\text{с.з}} \geqslant k_{\text{н}} I_{\text{нб.расч}} = 1{,}2 \cdot 0{,}161 = 0{,}194 \text{ ка}.$$

б) По условию обеспечения возврата после отключения внешнего короткого замыкания в режиме работы одной линии, а также после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из рассматриваемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями [выражение (2) и рис. 22]:

$$I_{\text{с.з}} \geqslant \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{в}}} I_{\text{раб.макс}} = \frac{1{,}2}{0{,}8} 0{,}6 = 0{,}9 \text{ ка}.$$

в) По условию отстройки от тока неповрежденной фазы при каскадном отключении короткого замыкания между двумя фазами; это условие не является расчетным для линии с двусторонним питанием (гл. 2, разд. А, п. 3) и в данном примере не рассматривается.

г) По условию отстройки от расчетного тока неповрежденных фаз $I_{\text{неп.расч}}$ при каскадном отключении замыкания на землю, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания [по выражению (4)].

Согласно гл. 2 разд. А, п. 4 $I_{\text{неп.расч}}$ определяется как арифметическая сумма тока нагрузки и аварийного тока. Аварийный ток вычисляется по выражению (6).

*Для защиты, установленной со стороны I*, рассматривается короткое замыкание в расчетной точке в максимальном режиме; в данном случае расчетной точкой является конец линии (точка *К-2* на рис. 24,*б*).

Вычисляются коэффициенты пересчета и соответствующие им значения $I_{\text{ок.расч}}$ по выражениям, приведенным в гл. 2, разд. А, п. 4, исходя из данных табл. 2:

$$m_{\text{т}} = \frac{3I_{0\text{з}}}{I_{\text{ос.з}}} = \frac{3 \cdot 0{,}712}{0{,}34} = 6{,}27;$$

$$I_{\text{0к.расч}} = \frac{I_{0\text{к}}}{m_{\text{т}}} = \frac{0{,}47}{6{,}27} = 0{,}075 \text{ ка};$$

$$m_{\text{н}} = \frac{3U_{0\text{з}}}{U_{\text{ос.з}}} = \frac{3 \cdot 2{,}26}{2{,}54} = 2{,}67;$$

$$I_{\text{0к.расч}} = \frac{I_{0\text{к}}}{m_{\text{н}}} = \frac{0{,}47}{2{,}67} = 0{,}176 \text{ ка}.$$

Из схемы замещения на рис. 22,*б* определяется

$$k_{1\text{т}} = \frac{6{,}6}{6{,}6 + 28 + 13{,}2} = 0{,}138.$$

Из рис. 24,*б* и табл. 2

$$k_{\text{от}} = \frac{0{,}242}{0{,}47} = 0{,}517.$$

По выражению (6)

$$I^{(\text{ав})}_{\text{неп.л}} = (k_{\text{от}} - k_{1\text{т}}) I_{\text{0к.расч}} =$$

$$= (0{,}517 - 0{,}138)\, 0{,}176 = 0{,}067 \text{ ка};$$

$$I_{\text{неп.расч}} = I_{\text{раб.макс}} + I^{(\text{ав})}_{\text{неп.л}} =$$

$$= 0{,}6 + 0{,}067 = 0{,}667 \text{ ка};$$

$$I_{\text{с.з}} \geqslant 1{,}3 \cdot 0{,}667 = 0{,}87 \text{ ка}.$$

*Для защиты, установленной со стороны II,* рассматривалось короткое замыкание в расчетной точке *К-1*; при этом $I^{(\text{ав})}_{\text{неп. л}}$ получилось меньшим 0,067 *ка*.

Таким образом, для защит, установленных с обеих сторон, расчетным оказывается условие б) и ток срабатывания рассматриваемого комплекта принимается равным

$$I_{\text{с.з}} = 0{,}9 \text{ ка}.$$

2. Чувствительность защит, установленных со сторон *I* и *II*, в минимальном режиме работы при замыкании между двумя фазами в середине линии (точке одинаковой чувствительности) — рис. 23,*б*:

$$k^{(2)}_{\text{ч.тI}} = k^{(2)}_{\text{ч.тII}} = \frac{I^{(2)}_{\text{з}}}{I_{\text{с.з}}} = \frac{1{,}887}{0{,}9} = 2{,}1 > 2.$$

В соответствии с разделом Е, п. II, 1 чувствительность реле тока в минимальном режиме при каскадном действии защит проверяется для защиты, установленной со стороны бо́льшего питания. Таким образом для реле тока защиты, установленной со стороны *I*, рассматривается замыкание между двумя фазами на противоположном конце защищаемой линии в точке *К-2* при отключенном выключателе, ближайшем к месту повреждения (рис. 23,*в*):

$$k^{(2)}_{\text{ч.тI}} = \frac{1{,}81}{0{,}9} = 2{,}01 > 1{,}5,$$

т. е. пусковой орган комплекта от замыканий между фазами, выполненный с помощью только реле тока, обладает требуемой чувствительностью.

Следует отметить, что в соответствии с рис. 18 в условиях рассматриваемого примера чувствительность реле тока комплектов от замыканий между фазами достаточно проверить в режиме с включенными выключателями с обеих сторон линии (разд. Е, п. II, 1).

*Глава третья*

# РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Ниже рассматриваются особенности расчета, обусловленные использованием защиты на линиях с ответвлениями (например, по рис. 11), для комплекта от замыканий между фазами с пуском по току (схемы по рис. 1,3,4,6 и 9) и с пуском по току и напряжению (схемы по рис. 2, 3 и 6), комплекта от замыканий на землю с пуском по току и напряжению нулевой последовательности (схемы по рис. 1—4, 7 и 9) защит сетей с большим током замыкания на землю, а также защиты по рис. 5 с комплектами от несимметричных коротких замыканий обратной последовательности и от симметричных коротких замыканий с пуском по току и защиты по рис. 8 для сетей с малым током замыкания на землю.

Кроме того, рассматривается расчет комплекта от замыканий на землю с пуском по току обратной и напряжению нулевой последовательности защиты по рис. 6, предназначенной специально для линий с ответвлениями.

Расчеты поперечной дифференциальной направленной защиты производятся в настоящей главе по первичным величинам.

Приведенные в настоящей главе указания даны в предположении, что трансформаторы тока, используемые для защиты, удовлетворяют кривым предельной кратности при 10%-ной погрешности.

## А. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ С ПУСКОМ ПО ТОКУ ДЛЯ СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМЫ ПО РИС. 1, 3, 4, 6 и 9).

1. Ток срабатывания пускового органа комплекта от замыканий между фазами защиты для сети с большим током замыкания на землю при выполнении этого органа с помощью только реле тока (без минимальных реле напряжения), включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, должен выбираться по тем же условиям, по которым выбирается ток срабатывания рассматриваемого пускового органа на линиях без ответвлений (гл. 2, разд. А, п. 1) с учетом особенностей, приведенных ниже, в п. 2, а также дополнительно должен удовлетворять условию отстройки от тока в защите при повреждениях на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций

$$I_{с.з} \geqslant k_н I_{к.з.\,расч}, \qquad (29)$$

где $I_{к.з.расч}$ — максимально возможное значение тока в защите при металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций в максимальном режиме работы систем, примыкающих к защищаемым линиям;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,3.

Для промежуточных подстанций, питающихся от обеих линий (п/ст *III* на рис. 11,*б*), расчетной при определении $I_{к.з.расч}$ является раздельная работа трансформаторов на сторонах низшего и среднего напряжений.

Определение $I_{к.з.расч}$ следует производить с учетом имеющихся на промежуточных подстанциях генерирующих источников, а также нагрузок, поскольку при рассматриваемом повреждении в защиту проходит также ток нагрузки, что обусловлено неодинаковыми значениями нагрузок промежуточных подстанций и несимметричным присоединением последних к защищаемым линиям, а также снижением напряжения в месте присоединения к линии промежуточной подстанции, за трансформатором которой рассматривается повреждение.

Следует учитывать, что в случаях, когда трансформаторы промежуточных подстанций имеют регулирование напряжения под нагрузкой, расчетным является минимально возможное при регулировании сопротивление трансформатора, обусловливающее при прочих равных условиях наибольший ток в защите.

2. Расчет тока срабатывания рассматриваемого пускового органа по условиям, перечисленным в гл. 2, разд. А, п. 1, должен производиться с учетом следующего:

а) При отстройке от переходного режима внешнего короткого замыкания между фазами на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями, и от несинхронного включения (гл. 2, разд. А, п. 1,а), кроме максимального тока небаланса $I''_{нб}$, обусловленного погрешностью трансформаторов тока, должен учитываться также и ток небаланса $I'_{нб}$, обусловленный в этом случае неодинаковыми значениями нагрузок и мощностей генерирующих источников промежуточных подстанций и несимметричным присоединением последних к защищаемым параллельным линиям, а также неравенством сопротивлений защищаемых линий.

Отстройка производится по выражению (1).

Ток $I''_{нб.расч}$ в выражении (1) может определяться приближенно по выражению (5), в котором для рассматриваемого случая под током $I_{л.расч}/2$ следует понимать меньший из проходящих по защищаемым линиям в расчетных условиях максимальных фазных токов, поскольку погрешность трансформатора тока с большим первичным током приводит к уменьшению результирующего тока в защите из-за снижения разницы между вторичными токами трансформаторов тока обеих линий.

Следует также отметить, что при выполнении рассматриваемого токового пускового органа с помощью реле тока с насыщающимся трансформатором (типа РНТ-565 или РНТ-566) $k_{апер}$ в выражении (5) может приниматься равным 1.

б) В дополнение к отстройке от максимального тока нагрузки по выражению (2) должна производиться также отстройка от тока в защите в условиях АПВ одной из защищаемых линий, когда в защиту, кроме тока нагрузки в работающей линии, проходит также ток самозапуска нагрузки или бросок тока намагничивания трансформаторов промежуточных подстанций, питающихся от включаемой от АПВ линии, по выражениям:

при нагруженных трансформаторах промежуточных подстанций

$$I_{с.з} \geqslant k_н (I_{нагр.макс} + k_{ток} k_{самозап} I_{раб.пр}). \qquad (30)$$

при ненагруженных трансформаторах промежуточных подстанций

$$I_{с.з} \geqslant k_н (I_{нагр.макс} + k_{ток} k I_{ном.тр.пр}), \qquad (31)$$

где $I_{нагр.макс}$ — максимальный ток нагрузки, проходящий по одной из параллельных линий после отключения другой линии;

$I_{раб.пр}$ — суммарный максимальный ток нагрузки трансформаторов промежуточных подстанций, присоединенных к включаемой линии;

$I_{ном.тр.пр}$ — суммарный номинальный ток трансформаторов промежуточных подстанций, присоединенных к включаемой линии;

$k_{самозап}$ — коэффициент, учитывающий увеличение тока нагрузки трансформаторов промежуточных подстанций при самозапуске двигателей, ориентировочно может приниматься равным 1,5—2 в зависимости от конкретных условий и должен уточняться расчетом;

$k$ — коэффициент отстройки защиты от броска тока намагничивания по номинальному току; при выполнении рассматриваемого пускового органа с помощью реле тока без насыщающегося трансформатора (типа РТ-40) может приниматься порядка 3—4, а с помощью реле тока с насыщающимся трансформатором (типа РНТ-565 или РНТ-566) до уточнения при наладке — равным 1—1,3;

$k_{ток}$ — коэффициент токораспределения, учитывающий кратность тока самозапуска нагрузки или броска тока намагничивания трансформаторов промежуточной подстанции, проходящего в защиту; для защиты, установленной на линии с односторонним питанием, со стороны питания $k_{ток}=1$, со стороны приемной подстанции $k_{ток}=2$; для защиты, установленной на линии с двусторонним питанием, $k_{ток}$ находится между указанными крайними значениями;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимаемый, как в выражении (2), равным 1,2.

Необходимо отметить, что для защиты, установленной на питающем конце линии с односторонним питанием, ток $I_{нагр.макс}$ в выражении (31) следует принимать равным нулю.

в) Отстройка от тока неповрежденной фазы при каскадном отключении замыкания между двумя фазами [по выражению (3)] и замыкания на землю [по выражению (4)] должна производиться исходя из тока в защите, равного разности токов одноименных неповрежденных фаз неповрежденной и поврежденной линий. При этом должен учитываться такой режим работы промежуточных подстанций, приключенных к защищаемым линиям (режим присоединения нагрузки, генерирующих источников, число включенных трансформаторов и т. д.), при котором ток в защите имеет наибольшее значение.

## Б. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ С ПУСКОМ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ ДЛЯ СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМЫ ПО РИС. 2, 3 и 6)

1. Ток срабатывания реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами защиты для сети с большим током замыкания на землю при выполнении этого органа с помощью реле тока и реле напряжения должен быть отстроен от переходного режима внешнего короткого замыкания

между фазами на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями, и от несинхронного включения с учетом тока небаланса $I'_{нб}$, обусловленного неодинаковыми значениями нагрузок и мощностей генерирующих источников промежуточных подстанций и несимметричным присоединением последних к защищаемым параллельным линиям, а также неравенством сопротивлений защищаемых линий. Отстройка производится по выражению (1).

2. Напряжение срабатывания минимального реле напряжения рассматриваемого пускового органа в дополнение к условию обеспечения возврата после отключения короткого замыкания [выражение (9)] и условиям отстройки от напряжений между неповрежденной и поврежденной фазами [выражения (10) и (11)], если ток срабатывания реле тока пускового органа не удовлетворяет выражению (29), должно удовлетворять также условию отстройки от напряжения в месте установки защиты при повреждениях на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций, когда в защиту проходит ток, равный току срабатывания реле тока пускового органа,

$$U_{с.з} \leqslant \frac{U_{к.з.\,расч}}{k_н}, \qquad (32)$$

где $U_{к.з.расч}$ — минимально возможное напряжение в месте установки защиты при таком металлическом трехфазном коротком замыкании на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточной подстанции, при котором ток в защите равен первичному току срабатывания реле тока пускового органа;

$k_н$ — коэффициент надежности, равный 1,3.

Для промежуточных подстанций, питающихся от обеих линий (п/ст *III* на рис. 11,*б*) при определении $U_{к.з.расч}$ рассматривается раздельная работа трансформаторов на сторонах низшего и среднего напряжений, поскольку при параллельной работе трансформаторов не срабатывает реле тока пускового органа.

Расчетным, т. е. обусловливающим наименьшее напряжение в месте установки защиты, является токораспределение, соответствующее минимальному режиму работы системы, примыкающей к опорной подстанции, на которой установлена рассматриваемая защита, и максимальному режиму работы системы, примыкающей к опорной подстанции с противоположного конца защищаемых линий, приложение *VIII*). Определение $U_{к.з.расч}$ целесообразно производить с учетом нагрузок.

Следует учитывать, что в случаях, когда трансформаторы промежуточных подстанций имеют регулирование напряжения под нагрузкой, расчетным является минимально возможное при регулировании сопротивление трансформатора, обусловливающее при прочих равных условиях наименьшее напряжение в месте установки защиты.

Для облегчения отстройки реле напряжения по условию (32) в ряде случаев целесообразно загрублять реле тока пускового органа, т. е. выбирать его ток срабатывания по условию обеспечения необходимой чувствительности при замыкании между двумя фазами в минимальном режиме.

Кроме отстройки от повреждений на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций, напряжение срабатывания рассматриваемого реле напряжения должно быть отстроено от напряжения в месте установки защиты в момент включения от АПВ одной из защищаемых линий, когда это напряжение будет снижено за счет самозапуска заторможенных двигателей нагрузки промежуточных подстанций, присоединенных к включаемой линии, или броска тока намагничивания трансформаторов этих подстанций. Эта отстройка может производиться по выражению (32), в котором $U_{к.з.расч}$ должно быть определено в указанных условиях.

## В. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ (СХЕМЫ ПО РИС. 1—4, 7 и 9)

1. Ток срабатывания реле тока, включенного на разность токов нулевой последовательности защищаемых линий, пускового органа комплекта от замыканий на землю, содержащего указанное реле тока и реле напряжения нулевой последовательности, выбирается по условию отстройки от переходного режима внешнего замыкания на землю на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями. При этом, кроме максимального тока небаланса, в нулевом проводе $I''_{нб}$ (обусловленного погрешностью трансформаторов тока) должен учитываться также ток небаланса $I'_{нб}$, обусловленный в рассматриваемом случае неодинаковыми мощностями трансформаторов с заземленными нейтралями, питающихся от промежуточных подстанций, и несимметричным присоединением последних к защищаемым линиям, а также неравенством сопротивлений параллельных линий в нулевой последовательности и неодинаковой взаимной индуктивностью с другими линиями.

Отстройка производится по выражению (12).

Ток $I''_{нб.расч}$ в выражении (12) может определяться приближенно по выражению (13), в котором для рассматриваемого случая под током $I_{к.з.вн.макс}/2$ следует понимать меньший из проходящих по защищаемым линиям в расчетных условиях максимальных фазных токов, поскольку погрешность трансформатора тока с большим первичным током приводит к уменьшению результирующего тока нулевой последовательности в защите из-за снижения разницы между вторичными токами трансформаторов тока обеих линий.

Следует также отметить, что при использовании в рассматриваемом пусковом органе реле тока с насыщающимся трансформатором (типа РНТ-565 или РНТ-566) $k_{апер}$ в выражении (13) может приниматься равным 1.

2. Напряжение срабатывания реле, включенного на напряжение нулевой последовательности, принимается порядка 4 *в*, как на линиях без ответвлений (гл. 2, разд. В, п. 2).

3. В случаях, когда в рассматриваемом комплекте от замыканий на землю (в целях увеличения его чувствительности) предусматривается по отдельному дополнительному реле направления мощности нулевой последовательности на каждую линию (гл. 1, разд. Б, п. 4) в целях блокирования защиты при направлении мощности короткого замыкания к шинам подстанции, отстройка реле тока пускового органа от переходного режима внешнего замыкания на землю производится также по выражению (12). При этом, однако, должны рассматриваться только внешние замыкания на землю на шинах опорной подстанции, присоединенной к противоположному (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) концу линии.

## Г. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ПО РИС. 5

1. Ток срабатывания устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от несимметричных коротких замыканий, включенного на разность токов защищаемых линий и на междуфазные напряжения в дополнение к условию отстройки от переходного режима внешнего короткого замыкания на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями (гл. 2, разд. Г, п. 1) должен удовлетворять также условию отстройки от тока обратной последовательности в защите при замыканиях между двумя фазами на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций:

$$I_{2с.з} \geqslant k_н I_{2к.з.\,расч}, \qquad (33)$$

где $I_{2к.з.расч}$ — максимально возможное значение тока обратной последовательности в защите при металлическом замыкании между двумя фазами на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций в максимальном режиме работы систем, примыкающих к защищаемым линиям;

$k_н$ — коэффициент надежности, принимается равным 1,4.

Для промежуточных подстанций, питающихся от обеих линий (п/ст *III* на рис. 11,*б*) расчетной при определении $I_{2к.з.расч}$ является раздельная работа трансформаторов на сторонах низшего и среднего напряжений.

2. При отстройке рассматриваемого устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности от переходного режима внешнего короткого замыкания на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями, кроме максимального тока небаланса $I''_{нб}$ (обусловленного погрешностью трансформаторов тока), который учитывается в расчете защиты линий без ответвлений (гл. 2, разд. Г, п. 1), должен учитываться также ток небаланса $I'_{нб}$, обусловленный неодинаковыми значениями нагрузок и мощностей генерирующих источников промежуточных подстанций и несимметричным присоединением последних к защищаемым параллельным линиям, а также неравенством сопротивлений защищаемых линий:

$$I_{2с.з} \geqslant k'_н I'_{нб.расч} + k''_н I''_{нб.расч}, \qquad (34)$$

где $k'_н$ и $k''_н$ — коэффициенты надежности, могут быть приняты равными $k'_н = 1{,}3$ и $k''_н = 1{,}2$.

Ток $I''_{\text{нб.расч}}$ может определяться с учетом рекомендаций, приведенных в расчете аналогичной защиты для линий без ответвлений (гл. 2, разд. Г, п. 1) по выражению (13), в котором для рассматриваемого случая под током $I_{\text{к.з.вн.макс}}/2$ следует понимать меньший из проходящих по защищаемым линиям в расчетных условиях максимальных фазных токов, поскольку погрешность трансформатора тока с большим первичным током приводит к уменьшению результирующего тока к защите из-за снижения разницы между вторичными токами трансформаторов тока обеих линий.

3. Ток срабатывания реле тока, включенного на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, комплекта от симметричных коротких замыканий выбирается по тем же условиям, что и ток срабатывания токового пускового органа комплекта от замыканий между фазами на линиях с ответвлениями (разд. А).

Однако отстройка от тока неповрежденных фаз при каскадном отключении замыкания на землю [по выражению (4)] производится исходя из максимально возможного тока в неповрежденной фазе, поскольку рассматриваемый комплект от симметричных коротких замыканий не выводится из действия при замыканиях на землю.

## Д. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЗАЩИТЫ ПО РИС. 6

1. Ток срабатывания устройства фильтр-реле тока обратной последовательности, включенного на разность токов защищаемых линий, комплекта от замыканий на землю выбирается по условию отстройки от переходного режима внешнего замыкания на землю на шинах опорных подстанций соединяемых защищаемыми линиями.

Отстройка производится по выражению (34).

2. Напряжение срабатывания реле, включенного на напряжение нулевой последовательности, выбирает так же, как в комплекте от замыканий на землю с пусковым органом, выполненным с помощью реле тока и реле напряжения нулевой последовательности (разд. В, п. 2 настоящей главы и гл. 2, разд. В, п. 2), т. е. принимается порядка 4 *в*.

## Е. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ДЛЯ СЕТИ С МАЛЫМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ (СХЕМА ПО РИС. 8)

Ток срабатывания пускового органа рассматриваемой защиты, выполняемого с помощью только реле тока (без минимальных реле напряжения), включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий, выбирается по следующим условиям:

а) по условию отстройки от тока в защите $I_{\text{к.з.расч}}$ при повреждениях на шинах низшего (среднего) напряжения промежуточных подстанций — по выражению (29);

б) по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса $I_{\text{нб.расч}}$ при переходном режиме внешнего короткого замыкания между фазами на шинах опорных подстанций, соединяемых защищаемыми линиями, или при несинхронном включении — по выражению (1);

в) по условию обеспечения возврата после отключения внешнего короткого замыкания в режиме работы одной линии или после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из защищаемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями, — по выражению (2);

г) по условию отстройки от тока в защите при АПВ одной из защищаемых линий, когда в защиту, кроме тока нагрузки в работающей линии, проходит также ток самозапуска нагрузки или бросок тока намагничивания трансформаторов промежуточных подстанций, питающихся от включаемой от АПВ линии, — по выражениям (30) и (31);

д) по условию отстройки от тока неповрежденной фазы $I^{(2)}_{\text{неп}}$ при каскадном отключении короткого замыкания между двумя фазами и двойных коротких замыканий на землю — по выражению (3) с учетом рекомендаций разд. А, п. 2,*в*.

## Ж. ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАЩИТЫ

1. Чувствительность реле тока и реле напряжения всех рассматриваемых пусковых органов как в режиме с включенными выключателями со сторон обеих опорных подстанций, так и в режиме каскадного отключения проверяется по тем же выражениям [(15), (19)—(21)], что и для защиты линий без ответвлений. Однако при определении тока в защите в расчетных условиях должны учитываться максимальные подпитки места повреждения от промежуточных подстанций, присоединенных к поврежденной линии, и минимальные подпитки от промежуточных подстанций, присоединенных к неповрежденной линии, а при определении напряжения в месте установки защиты должны учитываться максимальные подпитки от всех промежуточных подстанций, присоединенных к защищаемым линиям.

Чувствительность реле пускового органа комплекта от замыканий на землю защиты по рис. 6 проверяется так же, как для аналогичных реле в комплектах от несимметричных коротких замыканий схемы по рис. 5 и от замыканий на землю схем по рис. 1—4 и 9 (см. гл. 2, разд. Е).

2. Положение точки одинаковой чувствительности реле тока, установленных с разных сторон защищаемых линий, в режиме с включенными выключателями обеих сторон линий может быть определено аналитически в следующих случаях.

а) Для реле тока комплекта от замыканий между фазами и комплекта от симметричных коротких замыканий, включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий (схемы по рис. 1—6, 8 и 9), когда на промежуточных подстанциях, присоединенных к защищаемым линиям (по рис. 11,*а* и *б*), не имеется генерирующих источников, а трансформаторы промежуточных подстанций, питающихся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*), работают раздельно на сторонах низшего (и среднего) напряжения, — по выражению (16). Однако полученная точка будет несколько приближенной в связи с неучетом нагрузок промежуточных подстанций.

б) Для реле тока комплекта от замыканий между фазами и комплекта от симметричных коротких замыканий, включенных на разность токов одноименных фаз защищаемых линий (схемы по рис. 1—6, 8 и 9), когда к защищаемым линиям присоединены промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*) с параллельной работой трансформаторов на сторонах низшего (или среднего) напряжения, при наличии или отсутствии генерирующих источников на сторонах параллельной работы, а также могут быть присоединены и промежуточные подстанции, рассмотренные в п. а. В этом случае положение точки одинаковой чувствительности может быть определено по специальной схеме замещения, приведенной в приложении IX.

в) Для реле тока комплекта от замыканий на землю, включенного на разность токов нулевой последовательности защищаемых линий (схемы по рис. 1—4, 7 и 9), когда заземлены только нейтрали обоих трансформаторов промежуточных подстанций, питающихся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*), а нейтрали трансформаторов промежуточных подстанций, питающихся от одной из линий, не заземлены. В этом случае положение точки одинаковой чувствительности также может быть определено по специальной схеме замещения, приведенной в приложении IX.

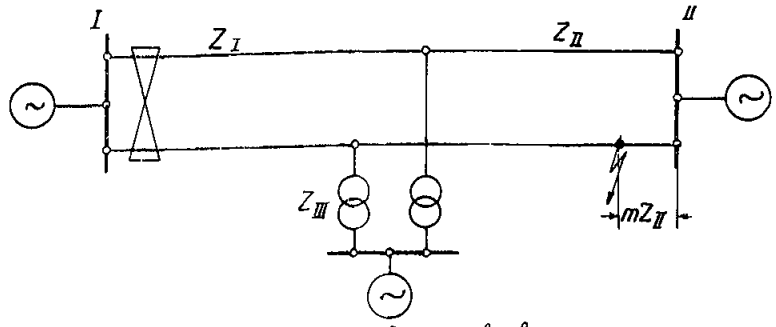
г) Для устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) и устройства фильтр-реле тока обратной последовательности комплекта от замыканий на землю (схема по рис. 6), когда на промежуточных подстанциях, присоединенных к защищаемым линиям (по рис. 11,*а* и *б*), не имеется генерирующих источников, а промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*), работают раздельно на сторонах низшего (и среднего) напряжения, — по выражению (16), составленному для токов срабатывания обратной последовательности.

Полученная точка будет несколько приближенной в связи с неучетом нагрузок промежуточных подстанций.

д) Для устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) и устройства фильтр-реле тока обратной последовательности комплекта от замыканий на землю (схема по рис. 6), когда к защищаемым линиям присоединены промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*) с параллельной работой трансформаторов на сторонах низшего (или среднего) напряжения (при наличии или отсутствии генерирующих источников на сторонах параллельной работы) и могут быть присоединены промежуточные подстанции, рассмотренные в п. «г».

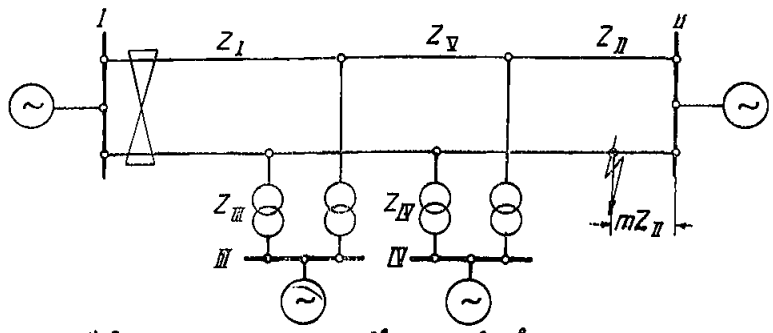
В этом случае положение точки одинаковой чувствительности может быть определено по специальной схеме замещения, приведенной в приложении IX.

е) Для реле тока комплекта от замыканий между фазами (схемы по рис. 1—4, 6, 8 и 9), установленного с одной стороны защищаемых линий и устройства фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от не-




а) Параллельные линии с одним ответвлением

$$m_{каск}=\frac{I_{с.з\,I}}{I_{к.з}}\cdot\frac{Z_I\cdot Z_{II}+Z_I\cdot Z_{III}+Z_{II}Z_{III}}{Z_{II}\cdot Z_{III}}$$

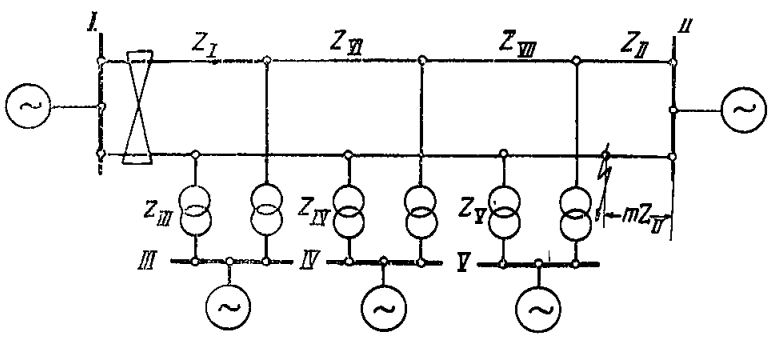



б) Параллельные линии с двумя ответвлениями

$$m_{каск}=\frac{I_{с.з\,I}}{I_{к.з}}\cdot\frac{(Z_{II}\cdot Z_{IV}+Z_{II}\cdot Z_{VI}+Z_{IV}Z_{VI})(Z_I+Z_{III})}{Z_{II}\cdot Z_{III}\;Z_{IV}},$$

где:

$$Z_{VI}=\frac{Z_I\;Z_{III}}{Z_I+Z_{III}}+Z_V$$



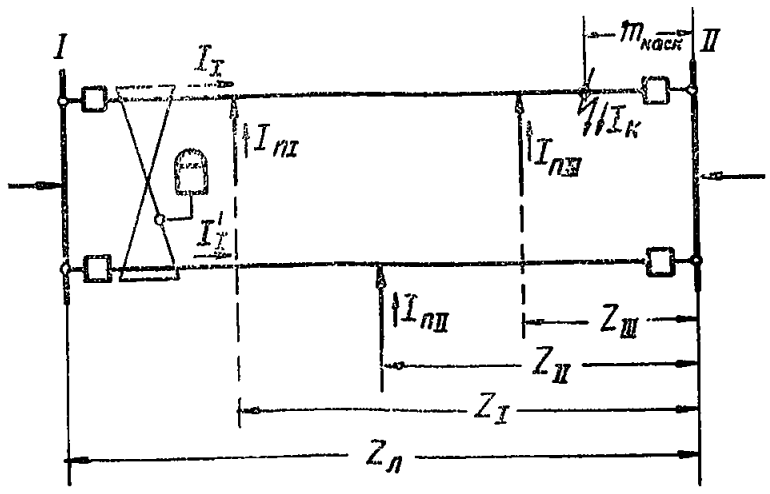

в) Параллельные линии с тремя ответвлениями

$$m_{каск}=\frac{I_{с.з\,I}}{I_{к.з}}\cdot\frac{\left[Z_{IX}\cdot Z_V+Z_{II}(Z_{IX}+Z_V)\right](Z_I+Z_{III})(Z_{IV}+Z_{VIII})}{Z_{II}\;Z_{III}\cdot Z_{IV}\cdot Z_V}$$

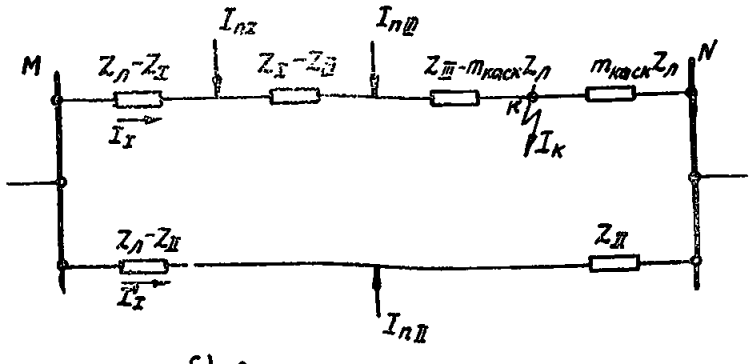
где:

$$Z_{VIII}=\frac{Z_I\cdot Z_{III}}{Z_I+Z_{III}}+Z_{VI}\qquad Z_{IX}=\frac{Z_{IV}\cdot Z_{VIII}}{Z_{IV}+Z_{VIII}}+Z_{VII}$$

**Рис. 25.** Выражения для определения зоны каскадного действия защиты на линиях с ответвлениями.
$m_{каск}$ — значение зоны каскадного действия в долях от длины поврежденного участка; $I_{с.зI}$ — ток срабатывания защиты $I$; $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания в месте повреждения.




а) Исходная схема




б) Схема замещения

**Рис. 26.** Исходная схема и схема замещения для определения зоны каскадного действия защиты на линиях с «несимметричными» ответвлениями.

симметричных коротких замыканий (схема по рис. 5), установленного с другой стороны, когда на промежуточных подстанциях, присоединенных к защищаемым линиями (по рис. 11,*а* и *б*), не имеется генерирующих источников, а промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*), работают раздельно на сторонах низшего (и среднего) напряжения, — по выражению (17). Однако полученная точка будет несколько приближенной в связи с неучетом нагрузок промежуточных подстанций.

3. В случаях, когда схема замещения соответствующей последовательности несимметрична (т. е. имеются условия, отличные от перечисленных в п. 2) или с двух сторон защищаемых линий установлены неодинаковые защиты за исключением случая, рассмотренного в п. 2,е, проверка чувствительности ввиду сложности соответствующих аналитических расчетов проводится графически. При этом определяется чувствительность в точке пересечения кривых коэффициентов чувствительности защит, установленных со сторон обеих опорных подстанций.

4. Чувствительность реле направления мощности так же, как и для случая линий без ответвлений (гл. 2, разд. Е), не проверяется. Однако это не относится к реле направления мощности нулевой последовательности схемы по рис. 6, чувствительность которого должна проверяться. Указанное обусловлено тем, что в этой схеме пусковой орган комплекта от замыканий на землю вместо реле тока нулевой последовательности содержит реле тока обратной последовательности.

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ КАСКАДНОГО ДЕЙСТВИЯ

1. Значение зоны каскадного действия комплекта от замыканий между фазами и комплекта от симметричных коротких замыканий (схемы по рис. 1—6, 8 и 9) может быть определено:

а) в случаях, когда на промежуточных подстанциях, присоединенных к защищаемым линиям (по рис. 11,*а* и *б*) не имеется генерирующих источников, а промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*),

работают раздельно на сторонах низшего (и среднего) напряжения, — по выражению (22), однако такой расчет является еще более приближенным, чем для линий без ответвлений в связи с неучетом нагрузок промежуточных подстанций;

б) в случаях, когда кроме промежуточных подстанций, рассмотренных в п. «а», к защищаемым линиям присоединены также промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*) с параллельной работой трансформаторов на сторонах низшего (или среднего) напряжения, при наличии или отсутствии генерирующих источников на сторонах параллельной работы, — по выражениям приведенным на рис. 25, составленным для линий с одним, двумя и тремя ответвлениями на основании специальной схемы замещения, приведенной в приложении IX;

в) в случаях, когда на промежуточных подстанциях, присоединенных к защищаемым линиям (по рис. 11,*а* и *б*) имеются генерирующие источники, а промежуточные подстанции, питающиеся одновременно от обеих линий (рис. 11,*б*), работают раздельно на сторонах низшего (и среднего) напряжения, — по выражению, составленному для схемы по рис. 26 (вывод которого дан в приложении X):

$$m_{\text{к аск}} = \frac{I_{\text{с.з}} + I_{n\text{I}} m_{\text{I}} - I_{n\text{II}} m_{\text{II}} + I_{n\text{III}} m_{\text{III}}}{I_{\text{к}}}, \qquad (35)$$

где $I_{\text{к}}$, $I_{n\text{I}}$, $I_{n\text{II}}$, $I_{n\text{III}}$ — первичные фазные токи соответственно в месте короткого замыкания и приходящие от промежуточных подстанций при повреждении на границе зоны каскадного действия;

$I_{\text{с.з}}$ — ток срабатывания защиты;

$m_{\text{I}}$, $m_{\text{II}}$, $m_{\text{III}}$ — расстояния в долях от длины линии от соответствующей промежуточной подстанции до противоположного (по отношению к месту установки защиты) конца линии.

С некоторым приближением токи $I_{\text{к}}$, $I_{n\text{I}}$, $I_{n\text{II}}$ и $I_{n\text{III}}$ в выражении (35) могут определяться при повреждении на шинах опорной подстанции противоположного (по отношению к месту установки рассматриваемой защиты) конца.

Расчетным для определения значения зоны каскадного действия по выражению (35) является режим максимальных подпиток от промежуточных подстанций, присоединенных к поврежденной линии, и минимальных подпиток от подстанций, присоединенных к неповрежденной линии.

2. Значение зоны каскадного действия комплекта от замыканий на землю с реле тока, включенным на разность токов нулевой последовательности защищаемых линий (схемы по рис. 1—4, 7 и 9) может быть определено по выражению (35), в котором под токами $I_{\text{к}}$, $I_{n\text{I}}$, $I_{n\text{II}}$ и $I_{n\text{III}}$ следует понимать утроенные первичные токи нулевой последовательности. Расчетным в этом случае является режим с максимальным заземлением нейтралей промежуточных подстанций, присоединенных к поврежденной линии и минимальным заземлением нейтралей промежуточных подстанций, присоединенных к неповрежденной линии.

3. Значение зоны каскадного действия комплекта от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5) и комплекта от замыканий на землю с устройством фильтр-реле тока обратной последовательности (схема по рис. 6) может быть определено также по выражению (35), в котором под токами $I_{\text{к}}$, $I_{n\text{I}}$, $I_{n\text{II}}$ и $I_{n\text{III}}$ следует понимать соответствующие токи обратной последовательности. Расчетным в этом случае является режим с максимальной подпиткой от промежуточных подстанций, присоединенных к поврежденной линии, и минимальной подпиткой от промежуточных подстанций, присоединенных к неповрежденной линии.

*ПРИЛОЖЕНИЕ I*

## РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ОТСТРОЙКИ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ ОТ ТОКОВ НЕПОВРЕЖДЕННЫХ ФАЗ ПРИ КАСКАДНОМ ОТКЛЮЧЕНИИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

### А. Расчет тока неповрежденной фазы при каскадном отключении замыкания между двумя фазами

Одно из условий выбора тока срабатывания пускового органа комплекта от замыканий между фазами, выполненного без минимального реле напряжения, — условие отстройки от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$ неповрежденной фазы при каскадном отключении замыкания между двумя фазами (гл. 2, разд. А, п. 1).

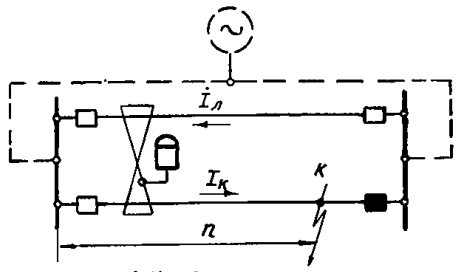
Ниже дается вывод выражения для определения тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$. На рис. П-1,*а* приведена исходная схема для рассматриваемого режима.

Известно, что

$$I^{(2)}_{\text{неп}} = I^{(2)}_{1\text{неп.л}} + I^{(2)}_{2\text{неп.л}}, \qquad \text{(П-1)}$$

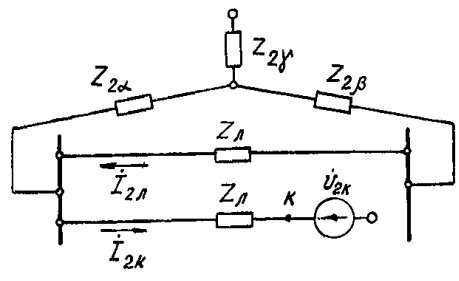
где $I^{(2)}_{1\text{неп.л}}$ и $I^{(2)}_{2\text{неп.л}}$ — составляющие тока неповрежденной фазы соответственно прямой и обратной последовательностей, проходящие в неповрежденной линии.

Далее,
$$\left.\begin{aligned} I^{(2)}_{1\text{неп.л}} &= \dot{k}_{1\text{т}} I^{(2)}_{1\text{неп.к}}; \\ I^{(2)}_{2\text{неп.л}} &= \dot{k}_{2\text{т}} I^{(2)}_{2\text{неп.к}}, \end{aligned}\right\} \qquad \text{(П-2}$$




*а) Исходная схема*

*б) Схема замещения прямой последовательности*




*в) Схема замещения обратной последовательности*

**Рис. П-1. Исходная схема и схемы замещения отдельных последовательностей для режима** каскадного отключения замыкания между двумя фазами.

где $I^{(2)}_{1\text{неп.к}}$ и $I^{(2)}_{2\text{неп.к}}$ — составляющие тока в месте короткого замыкания, т. е. в неповрежденной фазе поврежденной линии, соответственно прямой и обратной последовательностей;

$\dot{k}_{1\text{т}}$ и $\dot{k}_{2\text{т}}$ — комплексные коэффициенты токораспределения схем прямой и обратной последовательностей.

С учетом того, что $I^{(2)}_{2\text{неп.к}} = -I^{(2)}_{1\text{неп.к}}$, из (П-1) и (П-2) получим:

$$I^{(2)}_{\text{неп}} = (\dot{k}_{1\text{т}} - \dot{k}_{2\text{т}})\, I^{(2)}_{1\text{неп.к}}. \qquad \text{(П-3)}$$

На рис. П-1,*б* и П-1,*в* показаны схемы замещения прямой и обратной последовательностей для рассматриваемого режима при двустороннем питании. Из схем видно, что при пренебрежении различием фаз э. д. с. отдельных частей энергосистемы комплексные коэффициенты $\dot{k}_{1\text{т}}$ и $\dot{k}_{2\text{т}}$ совпадают по фазе. Так как при двустороннем питании допустимо считать все сопротивления в схемах прямой и обратной последовательностей одинаковыми, то из (П-3) можно найти, что при равенстве значений указанных э. д. с. $I^{(2)}_{\text{неп}} = 0$. В действительности э. д. с. различных частей системы могут различаться по фазе и значению; при этом ток неповрежденной фазы неповрежденной линии является уравнительным током, определяемым различием указанных э. д. с. и сопротивлением неповрежденной фазы. Поэтому, если считать э. д. с. генераторов неизменными в течение некоторого времени после возникновения короткого замыкания и пренебречь различием сопротивлений прямой и обратной последовательностей, а также учесть, что одна из линий отключена, можно найти, что $I^{(2)}_{\text{неп}} < I_{\text{раб}}$, (где $I_{\text{раб}}$ — ток по двум линиям в режиме, предшествовавшем короткому замыканию). Рассматриваемые рассуждения весьма ориентировочны, но они тем не менее могут служить основанием для решения о неучете условия отстройки тока срабатывания защиты от тока $I^{(2)}_{\text{неп}}$.

На рис. 14,*б* и *в* показаны схемы замещения прямой и обратной последовательностей для случая, когда со стороны, противоположной месту установки защиты, питание отсутствует.

В этом случае коэффициенты $\dot{k}_{1\text{т}}$ и $\dot{k}_{2\text{т}}$ находятся в противофазе, и поэтому согласно выражению (П-3) ток $I^{(2)}_{\text{неп}}$ может достигать таких значений, при которых условие отстройки защиты от этого тока оказывается расчетным при выборе тока срабатывания комплекта от замыканий между фазами.

Ниже приближенно определена область параметров сети, при которых по рассматриваемому условию требуется бо́льший ток срабатывания, чем по условию отстройки от максимального рабочего тока. При этом питающая система учитывается такими же сопротивлением $z_{1\text{с}}$ и э. д. с. $E_{\text{ф}}$, как при расчете периодической составляющей тока начального момента, а ветвь с нагрузкой замещена в схеме прямой последовательности индуктивным сопротивлением $z_{1\text{нагр}} = 1{,}2\, z_{\text{нагр}}$, (где $z_{\text{нагр}} = U^2_{\text{ном}}/S$, $S$ — мощность нагрузки), а в схеме обратной последовательности — сопротивлением $z_{2\text{нагр}} = 0{,}35 z_{\text{нагр}}$.

Как показали исследования, расчетным следует принимать случай металлического замыкания между двумя фазами на границе зоны каскадного действия.

Ток прямой последовательности в месте короткого замыкания

$$I^{(2)}_{1\text{неп.к}} = I^{(2)}_{1\text{к}} = \frac{E_{\Sigma}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma}}, \qquad \text{(П-4)}$$

где $E_{\Sigma}$ — результирующая э. д. с. схемы замещения прямой последовательности;

$z_{1\Sigma}$ и $z_{2\Sigma}$ — результирующие сопротивления схем замещения прямой и обратной последовательностей.

Указанные результирующие сопротивления, принимая

$$\left.\begin{aligned} z_{1c} &= z_{2c} = z_c, \\ z_{1\Sigma} &= \frac{z_c z_{1нагр}}{z_c + z_{1нагр}} + y; \\ z_{2\Sigma} &= \frac{z_c z_{2нагр}}{z_c + z_{2нагр}} + y, \end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}5)$$

где $y = (1 - m_{каск}) z_л;$

$m_{каск}$ — зона каскадного действия в долях от длины линии, отсчитываемая от шин приемной подстанции;

$z_л$ — сопротивление линии.

В свою очередь

$$E_\Sigma = \frac{E_ф z_{1нагр}}{z_{1нагр} + z_c}. \qquad (П\text{-}6)$$

Из (П-4)—(П-6) найдем:

$$I^{(2)}_{1к} = \frac{E_ф z_{1нагр}(z_c + z_{2нагр})}{\alpha}, \qquad (П\text{-}7)$$

где

$$\alpha = z_c^2 z_{1нагр} + 2 z_c z_{1нагр} z_{2нагр} + z_c^2 z_{2нагр} + 2 z_c^2 y + 2 z_c z_{2нагр} y + 2 z_c z_{1нагр} y + 2 z_{1нагр} z_{2нагр} y.$$

Ток прямой последовательности в неповрежденной линии

$$I^{(2)}_{1неп.л} = \frac{E_\Sigma - I^{(2)}_{1к} \dfrac{z_c z_{1нагр}}{(z_c + z_{1нагр})}}{z_{1нагр}}. \qquad (П\text{-}8)$$

Подставив (П-6) и (П-7) в (П-8), получим:

$$I^{(2)}_{1неп.л} = \frac{E_ф}{(z_c + z_{1нагр})} \frac{(\alpha - z_c^2 z_{1нагр} - z_c z_{1нагр} z_{2нагр})}{\alpha}. \qquad (П\text{-}9)$$

Ток обратной последовательности в неповрежденной линии при учете выражения (П-7) и того, что $I^{(2)}_{2к} = I^{(2)}_{1к}$,

$$I^{(2)}_{2неп.л} = I^{(2)}_{2к} \frac{z_c}{(z_c + z_{2нагр})} = \frac{E_ф z_c z_{1нагр}}{\alpha}. \qquad (П\text{-}10)$$

Из выражений (П-9) и (П-10), принимая во внимание отмеченное выше положение, что в рассматриваемом случае ток неповрежденной фазы (в неповрежденной линии) представляет собой арифметическую сумму токов прямой и обратной последовательностей, найдем:

$$I^{(2)}_{неп} = \frac{E_ф}{(z_c + z_{1нагр})} \times \frac{[(z_c^2 + 2 z_c y)(z_{1нагр} + z_{2нагр}) + \cdots \rightarrow}{\cdots \rightarrow [(z_c^2 + 2 z_c y)(z_{1нагр} + z_{2нагр}) + \cdots \rightarrow} \frac{\cdots \rightarrow + (z_c + 2y) z_{1нагр} z_{2нагр} + z_c z_{1нагр}^2 + 2 z_c^2 y]}{\cdots \rightarrow + (2 z_c + 2y) z_{1нагр} z_{2нагр} + 2 z_c^2 y)}. \qquad (П\text{-}11)$$

Разделим числитель и знаменатель правой части выражения (П-11) на величину $E_ф / I_{раб.макс}$ и учтем, что в соответствии с принятым выше

$$\frac{z_{1нагр} I_{раб.макс}}{E_ф} = 1{,}2$$

и

$$\frac{z_{2нагр} I_{раб.макс}}{E_ф} = 0{,}35,$$

тогда выражение (П-11) приведется к виду

$$I^{(2)}_{неп} = \varepsilon \cdot I_{раб.макс}, \qquad (П\text{-}12)$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{(1{,}2 + \mu)} \frac{(1{,}55\mu^2 + 2\lambda\mu^2 + 3{,}1\mu\lambda + 0{,}84\lambda + 1{,}86\mu)}{(1{,}55\mu^2 + 2\lambda\mu^2 + 3{,}1\mu\lambda + 0{,}84\lambda + 0{,}84\mu)};$$

$$\mu = \frac{z_c I_{раб.макс}}{E_ф};$$

$$\lambda = \frac{y I_{раб.макс}}{E_ф}.$$

Таким образом, выражение для $I^{(2)}_{неп}$ приведено к такому виду, при котором его легко можно сравнить с условием отстройки защиты от тока $I_{раб.макс}$, при этом величина $\varepsilon$ зависит только от двух параметров — $\mu$ и $\lambda$.

Условие отстройки от $I_{раб.макс}$ по выражению (2), приведенному в гл. 2, разд. А, п. 1, при $k_н = 1{,}2$ и $k_в = 0{,}8$ можно записать как

$$I_{с.з} \geqslant 1{,}5 I_{раб.макс}. \qquad (П\text{-}13)$$

Условие отстройки от $I^{(2)}_{неп}$ по выражению (3), приведенному там же, при $k_н = 1{,}3$ можно записать как [с учетом (П-12)]

$$I_{с.з} \geqslant 1{,}3\varepsilon I_{раб.макс}. \qquad (П\text{-}14)$$

Из сравнения (П-13) и (П-14) следует, что условие отстройки от $I^{(2)}_{неп}$ требует большого тока срабатывания, чем условие отстройки от максимального рабочего тока, если

$$\varepsilon > 1{,}15. \qquad (П\text{-}15)$$

Раскрывая величину $\varepsilon$, входящую в выражение (П-12), приведем неравенство (П-15) к виду

$$1{,}02\mu > 1{,}78\mu^3 + 2{,}3\lambda\mu^3 + 1{,}55\mu^2 + 4{,}32\mu^2\lambda + 2{,}15\lambda\mu + 0{,}32\lambda. \qquad (П\text{-}16)$$

По условию (П-16) построена область значений $\mu$ и $\lambda$ (рис. 15), при которых отстройка защиты от $I^{(2)}_{неп}$ является расчетной.

### Б. Расчет токов неповрежденных фаз при каскадном отключении замыканий на землю одной и двух фаз

Другое условие выбора тока срабатывания пускового органа комплекта от замыканий между фазами, выполненного без минимального реле напряжения, — условие отстройки от расчетного тока неповрежденных фаз $I_{неп.расч}$ при каскадном отключении двухфазного или однофазного замыкания на землю, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания (гл. 2, разд. А, п. 1).

Это условие может оказаться расчетным только в случае двустороннего питания. При одностороннем же питании более тяжелым является условие отстройки от тока $I^{(2)}_{неп}$. Объясняется это тем, что ток $I_{неп.расч}$ определяется для условий, когда реле тока или реле напряжения пускового органа находится на грани срабатывания, в то время как ток $I^{(2)}_{неп}$ определяется для металлического короткого замыкания. При двустороннем питании условие отстройки от тока $I^{(2)}_{неп}$, как отмечалось выше в разделе А настоящего приложения, не является расчетным.

Ниже дается вывод выражения для определения тока $I_{неп.расч}$ при двустороннем питании. На рис. 16,*а* приведена исходная схема, а на рис. 16,*б* и *в* — схемы замещения для рассматриваемого случая.

По методу наложения указанный ток неповрежденной фазы можно представить как геометрическую сумму тока режима нагрузки, предшествовавшего короткому замыканию, и аварийной составляющей тока

$$\dot{I}_{неп.расч} = \dot{I}_{раб.макс} + \dot{I}^{(ав)}_{неп.л}. \qquad (П\text{-}17)$$

Исследования показали, что входящие в выражение (П-17) векторные величины $\dot{I}_{раб.макс}$ и $\dot{I}^{(ав)}_{неп.л}$ могут оказаться в одном квадранте. Расчеты конкретных примеров также показали, что углы указанных векторов в большинстве случаев близки. В связи с этим в целях упрощения можно заменить геометрическую сумму выражения (П-17) арифметической суммой, что дает резкое упрощение расчета.

При любом из указанных видов короткого замыкания на землю для неповрежденной линии

$$\dot{I}^{(ав)}_{неп.л} = \dot{I}^{(ав)}_{1неп.л} + \dot{I}_{2неп.л} + \dot{I}_{0л}, \qquad (П\text{-}18)$$

где $\dot{I}^{(ав)}_{1.неп.л}$ — аварийная составляющая тока прямой последовательности неповрежденной фазы;

$I_{2неп.л}$ и $I_{0л}$ — составляющие тока неповрежденной фазы соответственно обратной и нулевой последовательностей.

В целях упрощения приближенно можно принять сопротивления прямой и обратной последовательностей всех элементов схемы одинаковыми; при этом выражение (П-18) можно привести к следующему виду:

$$\dot{I}^{(ав)}_{неп.л} = k_{1т}(\dot{I}_{1неп.к} + \dot{I}_{2неп.к}) + k_{0т}\dot{I}_{0к.расч}, \qquad (П\text{-}19)$$

где $\dot{I}_{1неп.к}$, $\dot{I}_{2неп.к}$, $\dot{I}_{0к.расч}$ — токи неповрежденной фазы поврежденной линии соответственно прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$k_{1т}$, $k_{0т}$ — коэффициенты токораспределения схем прямой и нулевой последовательностей, равные отношению тока неповрежденной линии к току в поврежденной линии.

Из выражения (П-19) с учетом того, что

$$\dot{I}_{1неп.к} + \dot{I}_{2неп.к} + \dot{I}_{0к.расч} = 0,$$

следует:

$$I^{(ав)}_{неп.л} = (k_{0т} - k_{1т})\, I_{0к.расч}. \qquad (П\text{-}20)$$

Входящий в выражение (П-20) ток $I_{0к.расч}$, как отмечалось, должен быть определен для условий, когда реле тока или реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю находится на грани срабатывания. Для этого удобно воспользоваться следующими коэффициентами пересчета:

$$m_т = \frac{3I_{0з}}{I_{ос.з}} \text{ и } m_н = \frac{3U_{0з}}{U_{0.\,с.з}}, \qquad (П\text{-}21)$$

где $I_{0з}$ и $U_{0з}$ — ток нулевой последовательности в защите и напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты при металлическом замыкании на землю в расчетной точке (конец или начало линии — см. ниже) в режиме после отключения выключателя поврежденной линии с противоположной стороны.

В выражении (П-20) учитывается бо́льший из токов

$$I_{0к.расч} = \frac{I_{0к}}{m_т} \text{ и } I_{0к.расч} = \frac{I_{0к}}{m_н}, \qquad (П\text{-}22)$$

где $I_{0к}$ — ток нулевой последовательности в поврежденной линии при металлическом замыкании на землю того же вида, при котором определяются $I_{0з}$ и $U_{0з}$ в выражениях (П-21); $I_{0к.расч}$ можно также выразить через параметры схемы замещения нулевой последовательности, приведенной на рис. 16,*в*.

Для условий, когда реле напряжения нулевой последовательности находится на грани срабатывания,

$$\frac{U_{ос.з}}{3} = I_{0к.расч}z_{0т} + I_{0I}z_{0α}. \qquad (П\text{-}23)$$

Так как $I_{0I} = (1 - k_{0т})\, I_{0к.расч}$, из выражения (П-23) можно получить:

$$I_{0к.расч} = \frac{U_{ос.з}}{3[z_{0т} + (1 - k_{0т})\, z_{0α}]} \qquad (П\text{-}24)$$

($z_{0т}$ и $z_{0α}$ показаны на схеме рис. 16,*в*).

Для условий, когда реле тока нулевой последовательности находится на грани срабатывания,

$$\frac{I_{ос.з}}{3} = I_{0з} = I_{0к.расч} + I_{0л}. \qquad (П\text{-}25)$$

Так как $I_{0л} = k_{0т}I_{0к.расч}$, из выражения (П-25) можно получить:

$$I_{0к.расч} = \frac{I_{ос.з}}{3(1 + k_{0т})}. \qquad (П\text{-}26)$$

Анализ выражений (П-24) и (П-26) совместно с (П-20) показывает, что расчетным местом повреждения для определения $I_{0к.расч}$ может быть либо начало линии (т. е. непосредственно у места установки защиты), либо конец линии, противоположный месту установки защиты.

*ПРИЛОЖЕНИЕ II*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА β, ВХОДЯЩЕГО В ВЫРАЖЕНИЕ (13) ДЛЯ ТОКА НЕБАЛАНСА В РЕЛЕ ТОКА КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И В УСТРОЙСТВЕ ФИЛЬТР-РЕЛЕ ТОКА И МОЩНОСТИ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КОМПЛЕКТА ОТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Как показано в гл. 2, разд. В и Г, ток срабатывания реле тока комплектов от замыканий на землю и от симметричных повреждений выбирается по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса, вычисляемого по выражению (13) гл. 2, разд. В. При этом комплект от замыканий на землю отстраивается от тока небаланса нулевой последовательности при внешних замыканиях на землю, а комплект от несимметричных повреждений — от тока небаланса обратной последовательности при всех видах внешних повреждений.

Ниже определены значения входящего в выражение (13) коэффициента β.

### А. Определение коэффициента β при расчете тока небаланса нулевой последовательности для отстройки комплекта от замыканий на землю

При внешнем замыкании на землю фаз *B* и *C* в точке *K* в схеме по рис. П-2,*а* ток в комплекте защиты от замыканий на землю определяется суммой четырех показанных на диаграмме рис. П-2,*б* фазных токов

$$\dot{I}_з = (\dot{I}_{BI} - \dot{I}_{BII}) + (\dot{I}_{CI} - \dot{I}_{CII}). \qquad (П\text{-}27)$$

Рассматриваются два предельных случая, когда:

а) трансформаторы тока фаз *B* и *C* линии *II* имеют максимальные погрешности $f_i = 0{,}1$, а трансформаторы тока этих же фаз линии *I* работают без погрешностей,

б) трансформаторы тока фазы *B* линии *II* и фазы *C* линии *I* имеют максимальные погрешности $f_i = 0{,}1$, а трансформаторы тока фазы *C* линии *II* и фазы *B* линии *I* работают без погрешностей.

При этом расчетный ток небаланса в защите может быть определен как результат геометрического сложения двух токов, абсолютные значения которых составляют 10% первичного тока.

$\frac{I_{к.з.вн.макс}}{2}$ [с учетом коэффициентов $k_{апер}$ и $k_{одн}$ по выражению (13) из гл. 2, разд. *В*, п. 1]: $\Delta\dot{I}_{BI}$ и $\Delta\dot{I}_{CI}$ в случае „а", $\Delta\dot{I}_{BI}$ и $-\Delta\dot{I}_{CII}$ в случае „б". Векторы этих токов для случая „а" и случая „б" показаны на рис. П-2,*в* и П-2,*г*.

Обозначим для случая „а" $|\Delta\dot{I}_{BI}| = |\Delta\dot{I}_{CI}| = \Delta I_а$ и для случая „б" $|\Delta\dot{I}_{BI}| = |\Delta\dot{I}_{CII}| = \Delta I_б$.

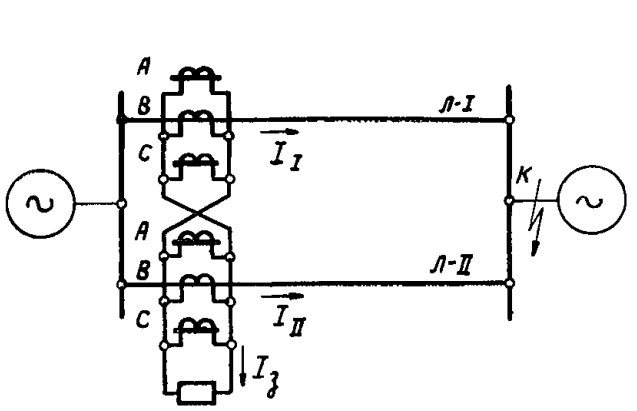
Коэффициент β представляет собой большее из отношений

$$\beta_а = \frac{I_з}{\Delta I_а} \text{ и } \beta_б = \frac{I_з}{\Delta I_б}.$$

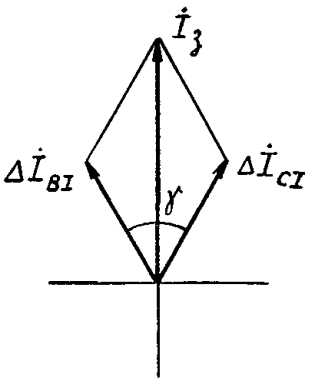
Коэффициенты $\beta_а$ и $\beta_б$ зависят от значения угла γ (рис. П-2,*в* и *г*) между токами поврежденных фаз. Этот угол определяется в свою очередь соотношением между токами отдельных последовательностей; при этом предельные значения угла γ имеют место при

$$I_2 = 0 \quad \gamma = 60°;$$
$$I_0 = 0 \quad \gamma = 180°.$$

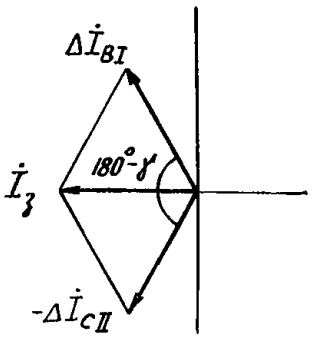
На рис. П-2,*д* показаны зависимости $\beta_а = f(\gamma)$ и $\beta_б = f(\gamma)$. Результирующая кривая, составленная из максимальных значений $\beta_а$ или $\beta_б$ в диапазоне $\gamma = 60 \div 180°$, и представляет собой зависимость $\beta = f(\gamma)$ (на рис. П-2,*д* показана



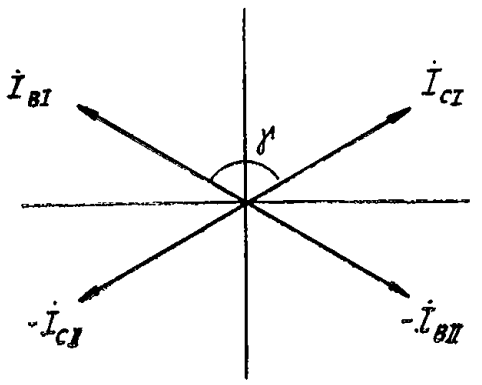

а) Исходная схема



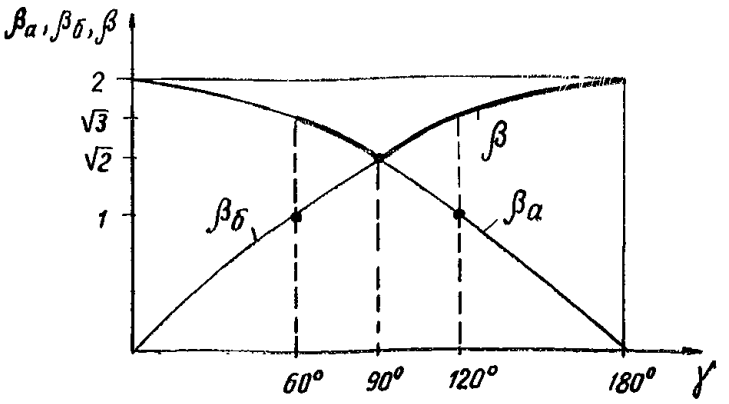
в) Токи в защите для случая „а"




г) Токи в защите для случая „б"



б) Векторная диаграмма токов, подводимых к защите при замыкании на землю фаз B и C в точке K




д) Зависимости $\beta_а = f(\gamma)$, $\beta_б = f(\gamma)$ и $\beta = f(\gamma)$ (зависимость $\beta = f(\gamma)$ показана толстой линией)

Рис. П-2. Определение значения $I_{нб.расч}$ для комплекта от замыканий на землю.
Случай «а» — трансформаторы тока фаз *B* и *C* линии *II* имеют максимальные погрешности $f_i$=0,1, а трансформаторы тока этих же фаз линии *I* работают без погрешностей; случай «б» — трансформаторы тока фазы *B* линии *II* и фазы *C* линии *I* имеют максимальные погрешности $f_i$=0,1, а трансформаторы тока фазы *C* линии *II* и фазы *B* линии *I* работают без погрешностей.

толстой линией).

Нетрудно видеть, что при внешнем замыкании на землю двух фаз

$$\beta_{мин} = \sqrt{2}, \text{ а } \beta_{макс} = 2.$$

В наиболее вероятных случаях, когда $\gamma$ лежит в пределах 120—180°, $\beta$ находится в диапазоне $\sqrt{3}$—2.

### Б. Определение коэффициента β при расчете тока небаланса обратной последовательности для отстройки комплекта от несимметричных повреждений

Ток небаланса в устройстве фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности в схеме рис. П-3,*а* определяется системой векторов токов небаланса ($\Delta\dot{I}_A$, $\Delta\dot{I}_B$ и $\Delta\dot{I}_C$), подводимых к устройству фильтр-реле при внешнем повреждении. Последние представляют собой разности вторичных токов трансформаторов тока одноименных фаз защищаемых линий и значения их при внешнем повреждении определяются погрешностью трансформаторов тока защиты.

Очевидно, что значение тока небаланса обратной последовательности в устройстве фильтр-реле, от которого должен быть отстроен комплект от несимметричных повреждений, может быть вычислено по выражению

$$I_{нб.расч} = \left| \frac{\Delta\dot{I}_A + a^2\Delta\dot{I}_B + a\Delta\dot{I}_C}{3} \right|, \qquad (П\text{-}28)$$

где $\Delta\dot{I}_A$, $\Delta\dot{I}_B$ и $\Delta\dot{I}_C$ — векторы токов небаланса, подводимых соответственно в фазах *A*, *B* и *C* к устройству фильтр-реле при внешнем повреждении.

На рис. П-3,*б* приведены векторные диаграммы первичных токов в трансформаторах тока защиты при различных видах внешнего повреждения, а на рис. П-3,*в* — соответствующие векторные диаграммы токов небаланса, подводимых к устройству фильтр-реле. Последние даны для расчетных условий, т. е. для случая, когда трансформаторы тока защиты работают с погрешностями в таких фазах, что это обусловливает максимальное значение тока небаланса обратной последовательности. В частности, при трехфазном коротком замыкании с максимальными погрешностями должны работать трансформаторы тока двух фаз одной из линий (например, фаз *B* и *C* *Л-II*), а при замыкании между двумя фазами, двух и одной фаз на землю — трансформаторы тока поврежденных фаз одной из линий; все остальные трансформаторы тока должны работать без погрешностей.

Исходя из выражения (П-28) и векторных диаграмм рис. П-3,*в* для разных видов повреждения можно получить:

для трехфазного короткого замыкания

$$I_{нб.расч} = \left| \frac{a^2\Delta\dot{I}_B + a\Delta\dot{I}_C}{3} \right| = \frac{\Delta I_{фаз}}{3};$$

для замыкания между двумя фазами

$$I_{нб.расч} = \left| \frac{a^2\Delta\dot{I}_B + a\Delta\dot{I}_C}{3} \right| = \frac{\sqrt{3}\Delta I_{фаз}}{3} = \frac{\Delta I_{фаз}}{\sqrt{3}};$$

для замыкания на землю одной фазы

$$I_{нб.расч} = \left| \frac{\Delta\dot{I}_A}{3} \right| = \frac{\Delta I_{фаз}}{3}.$$

Через $\Delta I_{фаз}$ обозначен модуль тока небаланса, подводимого к устройству фильтр-реле в поврежденных фазах.

Замыкание на землю двух фаз в предельном случае (угол $\gamma$=180°, т. е. $I_0$=0) сводится к замыканию между двумя фазами. Таким образом, расчетным видом повреждения для определения тока небаланса $I_{нб.расч}$ является замыкание между двумя фазами. При этом коэффициент $\beta$ в выражении (13) равен $1/\sqrt{3}$.

## РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛЕ ТОКА ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ

### А. Выражение для определения точки одинаковой чувствительности реле тока в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии

В рассматриваемом режиме необходимо обеспечить требуемую чувствительность защиты хотя бы с одной стороны при коротком замыкании в любой точке защищаемой линии. Поскольку чувствительность защиты с приближением точки короткого замыкания к месту установки защиты увеличивается, для обеспечения указанного требования достаточно иметь необходимый запас чувствительности при коротком замыкании в такой точке, где чувствительность защит с обеих сторон линий одинакова. При этом, очевидно, в случае короткого замыкания в любой другой точке защищаемой линии обеспечивается требуемая чувствительность защиты хотя бы с одной стороны.

Точка одинаковой чувствительности реле тока однотипных комплектов (комплектов от замыканий между фазами, комплектов от замыканий на землю или комплектов от несимметричных коротких замыканий) может быть определена из следующих соотношений.

Известно, что

$$\frac{I_{з\,I}}{I_к} = m \text{ и } \frac{I_{з\,II}}{I_к} = 1 - m, \qquad (П\text{-}29)$$

где $I_{з\,I}$ и $I_{з\,II}$ — токи в защитах, установленных со сторон соответственно *I* и *II* при коротком замыкании на одной из параллельных линий и включенных выключателях с обеих сторон этой линии (рис. 17,*а*);

$I_к$ — ток в месте короткого замыкания;

$m$ — доля длины линии от шин стороны *II* до места короткого замыкания.

При коротком замыкании в точке одинаковой чувствительности

$$m = m_ч \text{ и } \frac{I_{з\,I}}{I_{с.з\,I}} = \frac{I_{з\,II}}{I_{с.з\,II}}, \qquad (П\text{-}30)$$

где $m_ч$ — доля длины линии от шин стороны *II* до точки одинаковой чувствительности;

$I_{с.з\,I}$ и $I_{с.з\,II}$ — токи срабатывания защит соответствующих сторон.

Из выражений (П-29) и (П-30) можно получить:

$$\frac{m_ч}{1 - m_ч} = \frac{I_{с.з\,I}}{I_{с.з\,II}},$$

откуда

$$m_ч = \frac{I_{с.з\,I}}{I_{с.з\,I} + I_{с.з\,II}}. \qquad (П\text{-}31)$$

В частном случае, когда защиты обеих сторон линий имеют одинаковые токи срабатывания, точкой одинаковой чувствительности является середина линии ($m_ч = 0{,}5$).

Положение точки одинаковой чувствительности реле тока при установке неоднотипных защит с разных сторон защищаемых линий, а именно: комплекта от несимметричных коротких замыканий (схема по рис. 5), включенного на составляющие обратной последовательности токов и напряжений (установлен со стороны *I* на рис. 17,*б*) и комплектов от замыканий между фазами (схемы по рис. 1—4, 6 и 9) и от замыканий на землю (схемы по рис. 1—4, 7 и 9), включенного на составляющие нулевой последовательности токов и напряжений (установлены со стороны *II* на рис. 17,*б*), может быть определено по приведенным ниже выражениям, составленным по аналогии с выражением (П-31).

Для точки одинаковой чувствительности реле тока комплекта от несимметричных коротких замыканий и комплекта

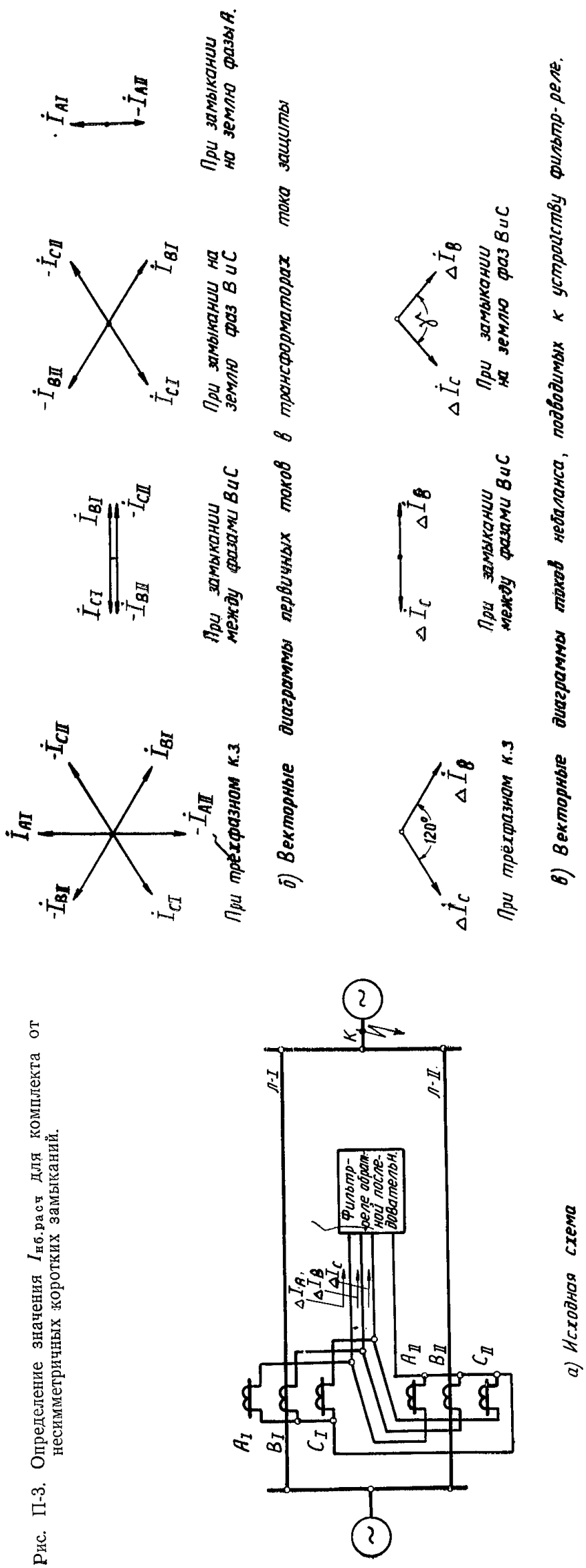



Рис. П-3. Определение значения $I_{нб.расч}$ для комплекта от несимметричных коротких замыканий.

от замыканий между фазами

$$m_{\text{ч}} = \frac{I_{2\text{с.з I}}}{I_{2\text{с.з I}} + \frac{I_{2\text{к}}}{I_{\text{к}}} I_{\text{с.з II}}}. \qquad \text{(П-32)}$$

Для точки одинаковой чувствительности реле тока комплекта от несимметричных коротких замыканий и комплекта от замыканий на землю

$$m_{\text{ч}} = \frac{I_{2\text{с.з I}}}{I_{2\text{с.з I}} + \frac{I_{2\text{к}}}{3I_{0\text{к}}} I_{0\text{с.з II}}}. \qquad \text{(П-33)}$$

В выражениях (П-32) и (П-33)

$I_{2\text{с.з I}}$, $I_{\text{с.з II}}$ и $I_{0\text{с.з II}}$ — токи срабатывания комплекта от несимметричных коротких замыканий, установленного со стороны *I*, и комплектов от замыканий между фазами и от замыканий на землю, установленных со стороны *II* защищаемых линий по рис. 17,*б*;

$I_{\text{к}}$, $I_{2\text{к}}$ и $I_{0\text{к}}$ — полный ток и токи обратной и нулевой последовательностей в месте короткого замыкания;

$m_{\text{ч}}$ — доля длины линии от шин стороны *II* до соответствующих точек одинаковой чувствительности.

**Б. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами в режиме каскадного отключения**

Для комплекта от замыканий между фазами в режиме каскадного отключения расчетным является короткое замыкание между двумя фазами в конце линии.

В указанном режиме оказывается достаточным проверить чувствительность защиты одной из сторон, находящейся в более тяжелых условиях.

При одинаковых токах срабатывания реле тока комплектов от замыканий между фазами защит, установленных с разных сторон защищаемых линий ($I_{\text{с.з.I}}=I_{\text{с.з.II}}$), в режиме каскадного отключения при одностороннем питании достаточно проверить чувствительность защиты, установленной со стороны питания. На рис. П-4,*а* дана схема для случая, когда защита, установленная с приемного конца, действует раньше защиты питающего конца (для режима после отключения выключателя приемного конца), а на рис. П-4,*б* — для случая, когда защита питающего конца действует раньше защиты приемного конца.

В первом случае в защите питающего конца проходит ток, равный току в месте повреждения, а во втором в защите приемного конца проходит ток, равный удвоенному току повреждения. При этом отношение тока повреждения первого

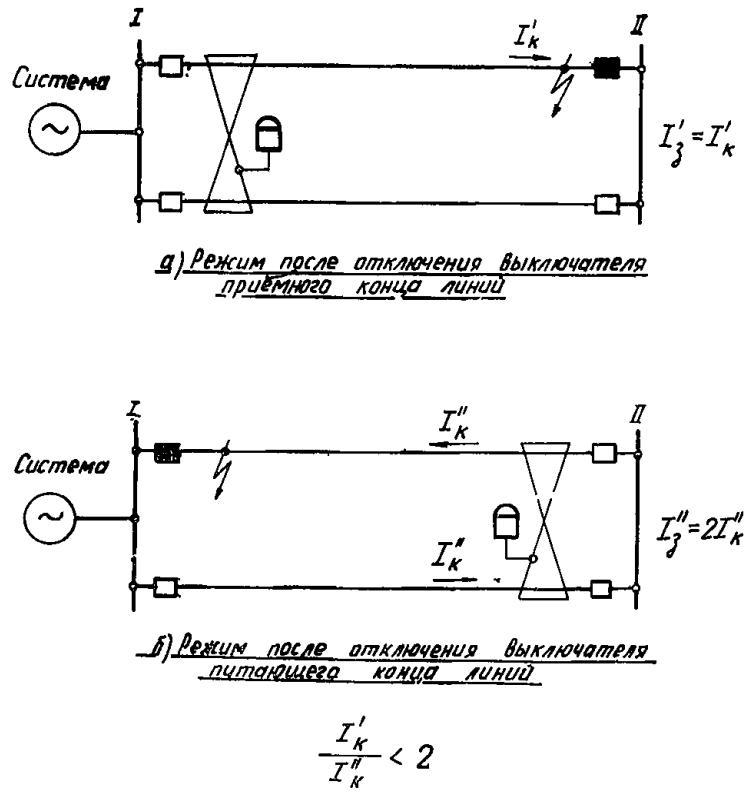



Рис. П-4. Определение расчетных условий для проверки чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами.

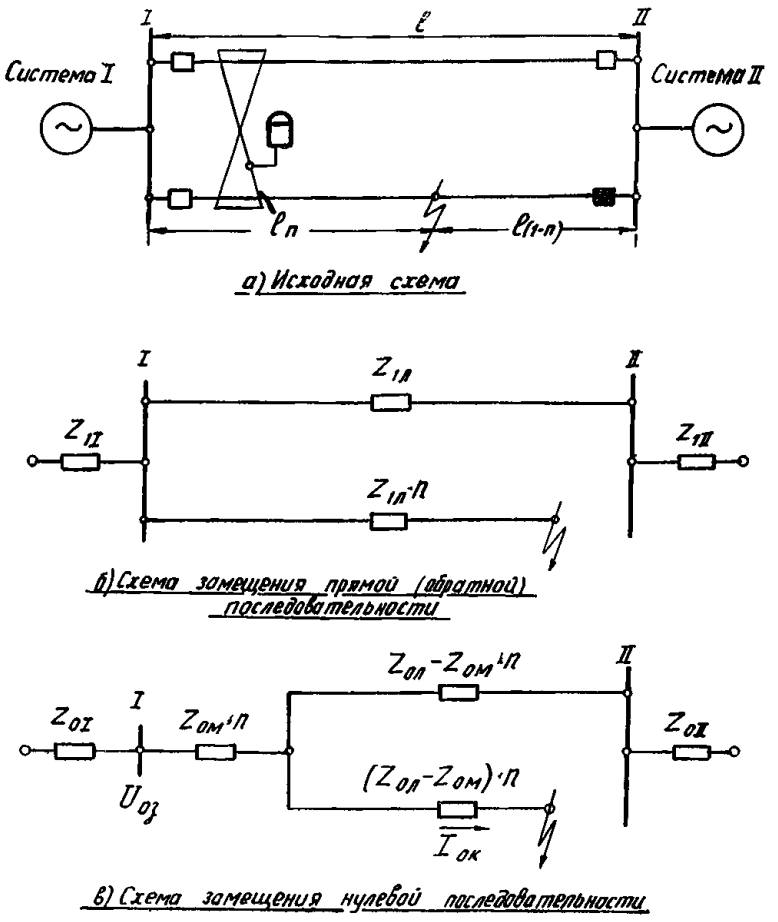



Рис. П-5. Определение расчетных условий для проверки чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю.

случая к току повреждения второго случая меньше двух из-за сопротивления системы. Поэтому ток в реле в первом случае меньше, чем во втором, т. е. первый случай является расчетным.

Поскольку при одностороннем питании в более тяжелых условиях оказывается защита питающего конца, а при равных мощностях короткого замыкания с обеих сторон обе защиты находятся в одинаковых условиях, во всех промежуточных случаях достаточно произвести проверку чувствительности защиты, установленной со стороны системы, имеющей меньшее сопротивление в расчетном минимальном режиме работы сети.

**В. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю в режиме каскадного отключения**

В случаях, когда параллельные линии значительно удалены друг от друга и допустимо пренебречь взаимоиндукцией между ними, расчетным местом повреждения для проверки чувствительности реле тока комплекта от замыканий на землю в рассматриваемом режиме является короткое замыкание на землю в конце линии аналогично тому, как для реле тока комплекта от замыканий между фазами (см. выше).

Для определения характера изменения тока нулевой последовательности в защите в рассматриваемом режиме при перемещении точки короткого замыкания вдоль линии в случаях, когда необходимо учитывать взаимоиндукцию между параллельными линиями, рассмотрим исходную схему и схемы замещения, показанные на рис. П-5.

Из схемы замещения рис. П-5 следует, что

$$I_{0\text{з}} = 3I_{0\text{к}}(1 + k_{0\text{т}}), \qquad \text{(П-34)}$$

где $I_{0\text{з}}$ — ток в реле тока комплекта от замыканий на землю;

$I_{0\text{к}}$ — ток нулевой последовательности в месте повреждения (т. е. ток, проходящий по поврежденной линии);

$k_{0\text{т}}$ — коэффициент токораспределения схемы замещения нулевой последовательности,

$$k_{0\text{т}} = \frac{z_{0\text{I}} + z_{0\text{м}}n}{z_{0\text{I}} + z_{0\text{II}} + z_{0\text{л}}}, \qquad \text{(П-35)}$$

где $z_{0\text{I}}$ — сопротивление нулевой последовательности той системы, со стороны которой установлена защита;

$z_{0\text{II}}$ — сопротивление нулевой последовательности системы с противоположной стороны;

$z_{0\text{м}}$ — сопротивление взаимоиндукции двух параллельных линий;

$z_{0л}$ — собственное реактивное сопротивление нулевой последовательности одной линии;

$n$ — доля длины линии от места установки защиты до места повреждения.

Если обозначить $1+k_{0т}=c_0$, то

$$I_{0з}=3I_{0к}c_0. \qquad (П\text{-}36)$$

Необходимо выяснить характер изменения величин, входящих в выражение (П-36), при изменении $n$.

При замыкании двух фаз на землю

$$I_{0к}=\frac{E_ф}{z_{1Σ}+\dfrac{z_{2Σ}z_{0Σ}}{z_{2Σ}+z_{0Σ}}}\cdot\frac{z_{2Σ}}{z_{2Σ}+z_{0Σ}}=$$

$$=\frac{E_ф z_{2Σ}}{z_{1Σ}(z_{2Σ}+z_{0Σ})+z_{2Σ}z_{0Σ}}, \qquad (П\text{-}37)$$

где $E_ф$ — фазная э. д. с., приведенная к той ступени напряжения, на которой определяется ток повреждения;

$z_{1Σ}$, $z_{2Σ}$ и $z_{0Σ}$ — результирующие сопротивления схем замещения соответствующих последовательностей.

Если принять $z_{1Σ}=z_{2Σ}$, то

$$I_{0к}=\frac{E_ф}{z_{1Σ}+2z_{0Σ}}. \qquad (П\text{-}37а)$$

Для определения характера изменения $I_{0к}$ в зависимости от $n$, необходимо провести анализ выражения $(z_{1Σ}+2z_{0Σ})$.

Если принять $z_{0л}=3{,}5z_{1л}$ и $z_{0м}=2z_{1л}$ ($z_{1л}$ — сопротивление прямой последовательности одной линии), то из схем замещения прямой и нулевой последовательностей по рис. П-5 можно получить:

$$z_{1Σ}+2z_{0Σ}=z_{1л}n+\frac{z_{1I}(z_{1II}+z_{1л})}{z_{1I}+z_{1II}+z_{1л}}+3z_{1л}n+$$

$$+\frac{2(z_{0II}+3{,}5z_{1л}-2z_{1л}n)(z_{0I}+2z_{1л}n)}{z_{0I}+z_{0II}+3{,}5z_{1л}}=$$

$$=4z_{1л}n+a+\frac{2(b-2z_{1л}n)(z_{0I}+2z_{1л}n)}{b+z_{0I}}=$$

$$=\frac{8z_{1л}bn+a(b+z_{0I})+2bz_{0I}-8z_{1л}^2n^2}{b+z_{0I}}, \qquad (П\text{-}38)$$

где $z_{1I}$ и $z_{1II}$ — сопротивления прямой последовательности систем, примыкающих соответственно к $I$ и $II$ сторонам линий;

$$a=\frac{z_{1I}(z_{1II}+z_{1л})}{z_{1I}+z_{1II}+z_{1л}};$$

$$b=z_{0II}+3{,}5z_{1л}.$$

Первая производная выражения (П-38) по $n$ имеет вид:

$$\frac{d(z_{1Σ}+2z_{0Σ})}{dn}=\frac{8z_{1л}b-16z_{1л}^2n}{b+z_{0I}}. \qquad (П\text{-}39)$$

Так как $n<1$, а $8z_{1л}b>16z^2{}_{1л}$, производная положительна во всем диапазоне изменения $n$, т. е. с увеличением $n$ (с удалением места повреждения от места установки защиты) $(z_{1Σ}+2z_{0Σ})$ увеличивается, а следовательно, ток $I_{0к}$ — уменьшается.

Аналогичное рассмотрение для случая короткого замыкания на землю одной фазы приводит к таким же результатам.

Из выражения (П-35) видно, что $k_{0т}$ с увеличением $n$ увеличивается.

Таким образом, при удалении точки повреждения от места установки защиты на изменение значения тока $I_{0з}$ по выражению (П-36) в рассматриваемом режиме влияют два противоречивых фактора: $I_{0к}$ уменьшается, а $c_0=1+k_{0т}$ — увеличивается.

Однако при изменении $n$ в пределах возможной зоны каскадного действия $0{,}66<n<1$ (приложение VII) $c_0$ возрастает незначительно.

При $n=0{,}66$

$$c'_0=1+k'_{0т}=\frac{2z_{0I}+z_{0II}+4{,}82z_{1л}}{z_{0I}+z_{0II}+3{,}5z_{1л}}. \qquad (П\text{-}40)$$

При $n=1$

$$c''_0=1+k''_{0т}=\frac{2z_{0I}+z_{0II}+5{,}5z_{1л}}{z_{0I}+z_{0II}+3{,}5z_{1л}}. \qquad (П\text{-}41)$$

Из выражений (П-40) и (П-41) можно найти:

$$\frac{c''_0}{c'_0}=\frac{2\dfrac{z_{0I}}{z_{1л}}+\dfrac{z_{0II}}{z_{1л}}+5{,}5}{2\dfrac{z_{0I}}{z_{1л}}+\dfrac{z_{0II}}{z_{1л}}+4{,}82}. \qquad (П\text{-}42)$$

$c''_0/c'_0$ по выражению (П-42) имеет тем большее значение, чем меньше $z_{0I}/z_{1л}$ и $z_{0II}/z_{1л}$. Для предельных значений $z_{0I}/z_{1л}=z_{0II}/z_{1л}=0$, имеем:

$$\frac{c''_0}{c'_0}=1{,}14.$$

Таким образом, при изменении $n$ в пределах возможной зоны каскадного действия $c_0$ возрастает не более чем в 1,14 раза.

Поскольку ток $I_{0к}$ при увеличении $n$ во всех случаях уменьшается, а $c_0$ даже в предельных случаях возрастает не более чем в 1,14 раза, можно ожидать, что в большинстве практических случаев характер изменения тока в защите $I_{0з}$ таков, что с увеличением $n$ он уменьшается.

В тех редких случаях, когда ток $I_{0з}$ при $n=1$ не является минимальным, отношение этого тока к току, соответствующему минимуму функции $I_{0з}=f(n)$ в рассматриваемом диапазоне изменения $n$, лишь не намного превышает 1 — в пределе оно составляет 1,14. Предельное значение этого соотношения соответствует предположению, что, во-первых, ток в защите не зависит от места повреждения, что имеет место при больших значениях $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1II}/z_{1л}$, а, во-вторых, что $\dfrac{z_{0I}}{z_{1л}}=\dfrac{z_{0II}}{z_{1л}}=0$.

Ввиду того что эти условия несовместимы, можно считать, что в практических случаях отношение тока в защите при повреждении в конце линии к току, соответствующему минимуму кривой $I_{0з}$, всегда меньше 1,14.

Сказанное подтверждается расчетами, которые показывают, что в большинстве случаев наименьший ток в защите соответствует повреждению в конце линии.

Учитывая все изложенное, приходим к выводу, что чувствительность реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю после отключения выключателя с противоположной стороны следует проверять по короткому замыканию на противоположном конце линии. При этом в тех случаях, когда $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1II}/z_{1л}$ велики, для учета возможного снижения значения тока при коротком замыкании в начале линии по сравнению с током короткого замыкания в конце линии, минимально допустимое значение коэффициента чувствительности должно быть принято большим 1,5. На основании большого количества расчетов было установлено, что, если значения $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1II}/z_{1л}$ оба превышают примерно 3, значение необходимого коэффициента чувствительности при повреждении в конце линии должно быть увеличено в пределе до 1,7.

### Г. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от несимметричных коротких замыканий в режиме каскадного отключения

Чувствительность рассматриваемого реле тока в режиме каскадного отключения определяется так же, как и реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами. При этом должны учитываться все указания, приведенные в п. Б настоящего приложения.

Расчетным местом повреждения для проверки чувствительности как при замыкании между фазами, так и при замыканиях на землю является конец линии, как для реле тока комплекта от замыканий между фазами.

### Д. Сравнение условий обеспечения чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами при включенных выключателях с обеих сторон поврежденной линии и в режиме каскадного отключения

Для сравнения условий обеспечения чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий между

фазами при включенных выключателях с обеих сторон поврежденной линии (режим по п. «а») и после отключения поврежденной линии с противоположной стороны (режим по п. «б») ниже определено отношение коэффициентов чувствительности в указанных режимах

$$\frac{k'_{ч.т}}{k''_{ч.т}} = \frac{I'_з}{I''_з}, \qquad (П\text{-}43)$$

где $k'_{ч.т}$ и $k''_{ч.т}$ — коэффициенты чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами при коротких замыканиях в расчетных точках соответственно в режимах «а» и «б»;

$I'_з$ и $I''_з$ — токи в защите при коротких замыканиях в расчетных точках в соответствующих режимах.

Токи срабатывания защит обеих сторон принимаются одинаковыми, поэтому в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии расчетной для проверки чувствительности точкой является середина линии. В режиме после отключения выключателя с противоположной стороны линии расчетной точкой является конец линии.

Рассматривается случай без обходных связей, сопротивления прямой и обратной последовательностей каждой системы приняты одинаковыми.

Исходная схема и схема замещения для режима с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии даны на рис. П-6, где $z_{1I}$ и $z_{1II}$ — сопротивления систем соответственно со стороны места установки защиты и с противоположной стороны, $z_{1л}$ — сопротивление одной линии.

Для определения эквивалентного сопротивления схемы замещения $z'_{1Σ}$ преобразуем треугольник *I-II-k* в звезду. Преобразованная схема замещения представлена на рис. П-6,*в*, где

$$z_{1III} = \frac{z_{1л}}{4}; \quad z_{1IV} = \frac{z_{1л}}{4}; \quad z_{1V} = \frac{z_{1л}}{8}.$$

Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$z'_{1Σ} = \frac{(z_{1I} + z_{1III})(z_{1II} + z_{1IV})}{z_{1I} + z_{1II} + z_{1III} + z_{1IV}} + z_{1V} =$$

$$= \frac{4z_{1I}z_{1II} + 1{,}5z_{1I}z_{1л} + 1{,}5z_{1II}z_{1л} + 0{,}5z^2_{1л}}{2(2z_{1I} + 2z_{1II} + z_{1л})}. \qquad (П\text{-}44)$$

Ток в месте повреждения, с учетом (П-44)

$$I'_к = \frac{\rho E_ф}{z'_{1Σ}} = \frac{\rho E_ф 2(2z_{1I} + 2z_{1II} + z_{1л})}{(4z_{1I}z_{1II} + 1{,}5z_{1I}z_{1л} + 1{,}5z_{1II}z_{1л} + 0{,}5z^2_{1л})}, \qquad (П\text{-}45)$$

где $E_ф$ — фазная э. д. с.;

ρ — коэффициент, зависящий от вида короткого замыкания между фазами $\left(\rho^{(3)} = 1, \rho^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$.

Ток в защите с учетом выражения (П-45)

$$I'_з = 0{,}5I'_к = \frac{\rho E_ф (2z_{1I} + 2z_{1II} + z_{1л})}{(4z_{1I}z_{1II} + 1{,}5z_{1I}z_{1л} + 1{,}5z_{1II}z_{1л} + 0{,}5z^2_{1л})}. \qquad (П\text{-}46)$$

Исходная схема и схема замещения режима после отключения выключателя со стороны, противоположной по отношению к месту установки защиты, даны на рис. П-7.

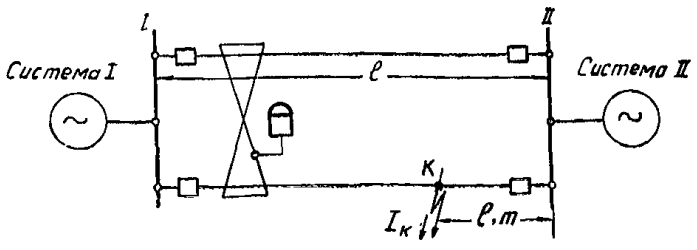
Эквивалентное сопротивление схемы замещения

$$z''_{1Σ} = z_{1л} + \frac{z_{1I}(z_{1III} + z_{1л})}{z_{1I} + z_{1III} + z_{1л}} =$$

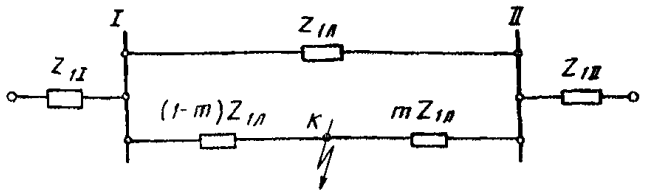
$$= \frac{z_{1I}z_{1III} + 2z_{1I}z_{1л} + z_{1III}z_{1л} + z^2_{1л}}{z_{1I} + z_{1III} + z_{1л}}. \qquad (П\text{-}47)$$

Ток в месте повреждения (т. е. ток, проходящий по поврежденной линии) может быть определен из следующего выражения, полученного с учетом (П-47):

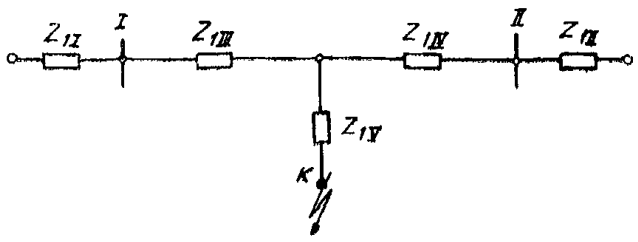
$$I''_к = \frac{\rho E_ф}{z''_{1Σ}} = \frac{\rho E_ф (z_{1I} + z_{1III} + z_{1л})}{(z_{1I}z_{1III} + 2z_{1I}z_{1л} + z_{1III}z_{1л} + z^2_{1л})}. \qquad (П\text{-}48)$$




*а) Исходная схема*




*б) Схема замещения*




*б) Преобразованная схема замещения*

**Рис. П-6. Определение тока в комплекте от замыканий между фазами при коротком замыкании в середине линии и включенных выключателях с обеих сторон этой линии.**

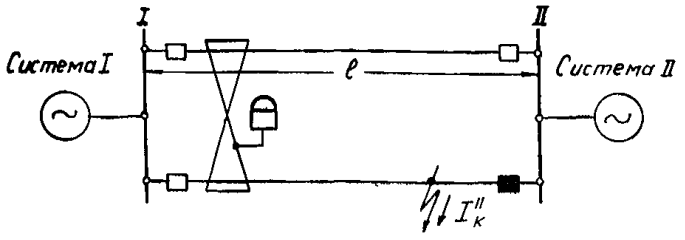
Из схемы замещения рис. П-7 при учете выражения (П-48) следует:

$$I''_з = I''_к + I''_к \frac{z_{1II}}{z_{1I} + z_{1III} + z_{1л}} =$$

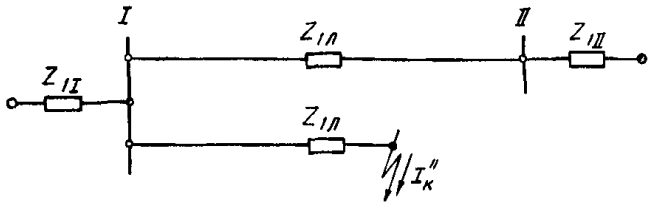
$$= \frac{\rho E_ф (2z_{1I} + z_{1III} + z_{1л})}{(z_{1I}z_{1III} + 2z_{1I}z_{1л} + z_{1III}z_{1л} + z^2_{1л})}. \qquad (П\text{-}49)$$

Из выражений (П-43), (П-46) и (П-49) можно получить:

$$\frac{k'_{ч.т}}{k''_{ч.т}} = \frac{(2a + 2b + 1)(ab + 2a + b + 1)}{(2a + b + 1)(4ab + 1{,}5a + 1{,}5b + 0{,}5)}, \qquad (П\text{-}50)$$




*а) Исходная схема*




*б) Схема замещения прямой (обратной) последовательности*

**Рис. П-7. Определение тока в комплекте от замыканий между фазами при коротком замыкании на противоположном конце линии в режиме каскадного отключения.**

где

$$a = z_{1\text{II}}/z_{1\text{л}} \text{ и } b = z_{1\text{III}}/z_{1\text{л}}.$$

На рис. 18 представлено семейство кривых, устанавливающих зависимость $k'_{\text{ч}}/k''_{\text{ч}}$ от параметров сети $a$ и $b$.

Из рис. 18 видно, что $k'_{\text{ч.т}}/k''_{\text{ч.т}}$ при изменении $a$ и $b$ колеблется в пределах $0{,}25 < \frac{k'_{\text{ч.т}}}{k''_{\text{ч.т}}} < 2$.

Поскольку для обеспечения достаточного запаса чувствительности реле тока пускового органа защиты необходимо иметь

$$k'_{\text{ч.т}} \geqslant 2 \text{ и } k''_{\text{ч.т}} \geqslant 1{,}5,$$

все точки на диаграмме рис. 18, расположенные выше прямой $\frac{k'_{\text{ч.т}}}{k''_{\text{ч.т}}} = \frac{2}{1{,}5} = 1{,}33$, соответствуют тем случаям, в пределах которых проверку чувствительности реле тока защиты достаточно произвести только в режиме после отключения поврежденной линии с какой-либо стороны, а точки, расположенные ниже этой прямой, — тем случаям, в пределах которых проверку чувствительности достаточно производить только в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии.

*ПРИЛОЖЕНИЕ IV*

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Ниже показано, что реле направления мощности комплекта защиты от замыканий на землю, выполненное на индукционном принципе, практически не ограничивает чувствительность защиты ни в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии, ни в режиме после отключения линии с противоположного конца. При этом предполагалось, что чувствительность указанного реле достаточно проверить по минимальной мощности срабатывания без учета насыщения по цепи тока.

В настоящем приложении, в отличие от остальных частей данного выпуска, для удобства изложения используются вторичные, а не первичные величины.

Мощность, подведенная к указанному реле направления мощности,

$$S_{\text{р}} = U_{\text{р}} I_{\text{р}}, \qquad \text{(П-51)}$$

где $U_{\text{р}}$ — напряжение, подведенное к реле направления мощности нулевой последовательности;

$I_{\text{р}}$ — ток в реле направления мощности нулевой последовательности.

Коэффициент чувствительности рассматриваемого реле

$$k_{\text{ч.м}} = \frac{S_{\text{р}}}{S_{0\,\text{с.р}}} = \frac{U_{\text{р}} I_{\text{р}}}{S_{0\,\text{с.р}}}, \qquad \text{(П-52)}$$

где $S_{0\text{с.р}}$ — минимальная мощность срабатывания реле направления мощности нулевой последовательности.

Выражение (П-52) можно преобразовать следующим образом:

$$k_{\text{ч.м}} = \frac{U_{\text{р}}}{U_{\text{0с.р}}} \frac{I_{\text{р}}}{I_{\text{0с.р}}} \frac{U_{\text{0с.р}} I_{\text{0с.р}}}{S_{\text{0с.р}}} = k_{\text{ч.н}} k_{\text{ч.т}} \frac{U_{\text{0с.р}} I_{\text{0с.р}}}{S_{\text{0с.р}}}, \qquad \text{(П-53)}$$

где $U_{\text{0с.р}}$ — напряжение срабатывания реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю;

$I_{\text{0с.р}}$ — ток срабатывания реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю;

$k_{\text{ч.н}}$ и $k_{\text{ч.т}}$ — коэффициенты чувствительности соответственно реле напряжения и реле тока указанного комплекта защиты.

Из выражения (П-53) при учете того, что для реле мощности типа РБМ-278 $S_{0\text{с.р}} = 1$ *ва*, а $U_{\text{0с.р}} = 4$ *в*, можно получить:

а) для режима с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии при $k_{\text{ч.н}} \geqslant 2$ и $k_{\text{ч.т}} \geqslant 2$

$$k_{\text{ч.м}} \geqslant 16 \cdot I_{\text{0с.р}}; \qquad \text{(П-54)}$$

б) для режима после отключения поврежденной линии со стороны, противоположной по отношению к месту установки защиты, при $k_{\text{ч.н}} \geqslant 1{,}5$ и $k_{\text{ч.т}} \geqslant 1{,}5$

$$k_{\text{ч.м}} \geqslant 9 I_{\text{0с.р}}. \qquad \text{(П-55)}$$

Из выражения (П-54) следует, что при принятых условиях в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии обеспечивается требуемый (в соответствии с Правилами устройства электроустановок) коэффициент чувствительности реле направления мощности $k_{\text{ч.м}} \geqslant 4$ при $I_{\text{0с.р}} \geqslant 0{,}25\ a$, а из выражения (П-55) следует, что в режиме каскадного отключения при тех же условиях обеспечивается требуемый (в соответствии с ПУЭ) $k_{\text{ч.м}} \geqslant 2{,}5$ при $I_{\text{0с.р}} \geqslant 0{,}28\ a$.

Поскольку практически всегда $I_{\text{0с.р}} > 0{,}28\ a$, можно прийти к выводу, что, если пусковой орган комплекта от замыканий на землю обладает требуемой чувствительностью по току и напряжению, то и реле направления мощности этого комплекта также обладает требуемой чувствительностью.

*ПРИЛОЖЕНИЕ V*

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНИМОСТИ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С МИНИМАЛЬНЫМ ПУСКОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Минимальный пуск напряжения применяется с целью повышения чувствительности реле тока пускового органа защиты. Напряжение срабатывания минимальных реле напряжения выбирается по условию обеспечения возврата после отключения внешнего короткого замыкания в режиме работы одной линии или после отключения короткого замыкания, возникшего на одной из рассматриваемых параллельных линий в режиме работы двумя линиями, а также по условию отстройки от напряжений между неповрежденными и поврежденными фазами при каскадном отключении повреждений (гл. 2, разд. Б, п. 2). Это позволяет ток срабатывания реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами выбирать только по условию отстройки от расчетного максимального тока небаланса при внешних коротких замыканиях, что, как правило, ведет к уменьшению значения указанного тока срабатывания.

Однако в ряде случаев минимальный пусковой орган напряжения сам ограничивает чувствительность защиты.

Требуемый коэффициент чувствительности минимальных реле напряжения должен быть обеспечен:

а) в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии (коэффициент чувствительности должен быть при этом не менее порядка 2);

б) в режиме каскадного отключения повреждения, т. е. после отключения поврежденной линии со стороны, противоположной по отношению к месту установки защиты (коэффициент чувствительности должен быть при этом не менее порядка 1,5).

Ниже определяется область применимости минимального пуска напряжения, исходя из условия б) для случая, когда отсутствуют обходные связи между системами.

Расчетным видом повреждения для проверки чувствительности минимальных реле напряжения по условию б) является трехфазное короткое замыкание или короткое замыкание между двумя фазами на противоположном конце защищаемой линии.

Для определения рассматриваемой области применимости необходимо условие обеспечения требуемой чувствительности выразить в зависимости от параметров сети. Сопротивления прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми для обеих систем. Исходная схема и схема замещения даны на рис. П-8, где $z_{1\text{I}}$ и $z_{1\text{II}}$ — сопротивления прямой последовательности систем соответственно *I* и *II* (рассматриваемая защита установлена со стороны *I*); $z_{1\text{л}}$ — сопротивление прямой последовательности одной линии; $U_{\text{ост}}$ — междуфазное напряжение в месте установки защиты при коротком замыкании в конце линии; $I_{\text{к}}$ — ток повреждения.

Как при трехфазном коротком замыкании, так и при коротком замыкании между двумя фазами междуфазное напряжение на шинах *I* (в месте установки защиты)

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{мф}} \frac{z_{1\text{л}}}{z_{1\Sigma}}, \qquad \text{(П-56)}$$

где $U_{мф}$ — междуфазное напряжение той ступени напряжения на которой установлена защита;

$z_{1\Sigma}$ — результирующее сопротивление схемы замещения прямой последовательности.

После отключения поврежденной линии с противоположного конца необходимо обеспечить

$$\frac{U_{с.з}}{U_{ост}} \geqslant 1{,}5. \qquad (П\text{-}57)$$

Учтя (П-56) и (П-57), а также приняв $U_{с.з}=0{,}7U_{мф}$ (что практически всегда имеет место), получим:

$$\frac{z_{1\Sigma}}{z_{1л}} \geqslant 2{,}14. \qquad (П\text{-}58)$$

Если в (П-58) подставить $z_{1\Sigma}$, выраженное через $z_{1III}$, $z_{1II}$ и $z_{1л}$, то можно привести его к виду

$$\frac{\left(\frac{z_{1II}}{z_{1л}}\right)\left(\frac{z_{1III}}{z_{1л}}\right)+\left(\frac{z_{1II}}{z_{1л}}\right)}{\left(\frac{z_{1II}}{z_{1л}}\right)+\left(\frac{z_{1III}}{z_{1л}}\right)+1} \geqslant 1{,}14. \qquad (П\text{-}59)$$

Последнее выражение устанавливает область случаев, в которых обеспечивается требуемый коэффициент чувствительности минимальных реле напряжения комплекта от замыканий между фазами в рассматриваемом режиме. На рис. 19 приведена кривая, изображающая границу таких случаев. Пользуясь рис. 19, можно для любого конкретного случая (при отсутствии обходных связей между системами, соединенными рассматриваемыми параллельными линиями) по соотношениям $z_{1II}/z_{1л}$ и $z_{1III}/z_{1л}$ определить, удовлетворяется ли условие обеспечения требуемой чувствительности. Все точки, расположенные выше кривой, соответствуют случаям, когда реле напряжения, если оно применяется, имеет в рассматриваемом режиме коэффициент чувствительности, больший 1,5.

При $z_{1I}=\infty$ (т. е. когда защита установлена с приемного конца линий с односторонним питанием) условие обеспечения требуемой чувствительности (П-59) приобретает вид:

$$\frac{z_{1III}}{z_{1л}} \geqslant 0{,}14. \qquad (П\text{-}59а)$$

Это означает, что кривая на рис. 19 при увеличении $z_{1I}/z_{1л}$ асимптотически стремится к прямой $z_{1III}/z_{1л}=0{,}14$. Следовательно, при одностороннем питании минимальный пуск напряжения приемного конца практически всегда обладает достаточным запасом чувствительности.

При $z_{1III}=\infty$ (защита установлена с питающего конца линий с односторонним питанием)

$$\frac{z_{1II}}{z_{1л}} \geqslant 1{,}14. \qquad (П\text{-}59б)$$

Поэтому кривая на рис. 19 при увеличении $z_{1III}/z_{1л}$ асимптотически стремится к прямой $z_{1I}/z_{1л}=1{,}14$. Таким образом, если $z_{1I}/z_{1л}<1{,}14$, а также если $z_{1III}/z_{1л}<0{,}14$, то в первом случае при любых значениях $z_{1III}$, а во втором — $z_{1I}$ применение минимального пуска напряжения недопустимо по условию чувствительности.

Область применимости минимального пуска напряжения, определенная для режима по п. «б», вся расположена внутри области применимости указанного пуска, определенной для режима по п. «а», т. е. область применимости минимального пуска напряжения, определенная исходя из условия «б», является расчетной.

Для того чтобы доказать это, выразим коэффициент чувствительности $k_{ч.ч}$ защиты по напряжению через параметры схемы при коротком замыкании в конце линии в режиме с включенными выключателями с обеих сторон этой линии (для случая двух параллельных линий без обходных связей).

Следует отметить, что указанное место повреждения не является расчетным для режима до начала отключения поврежденной линии, поскольку достаточно обеспечить $k_{ч.н}\geqslant 2$ в этом режиме в некоторой расчетной точке одинаковой чувствительности комплектов от замыканий между фазами с обеих сторон линий. Однако для доказательства указанного выше положения оказывается достаточным найти коэффициент чувствительности при коротком замыкании в конце линии, учитывая, что коэффициент чувствительности при коротком замыкании в точке одинаковой чувствительности выше, чем при коротком замыкании в конце линии.

Воспользуемся исходной схемой и схемой замещения по рис. П-11, считая, что $m=0$, где $m$ — доля длины линии от места повреждения до шин подстанции *II*, противоположной по отношению к месту установки защиты.

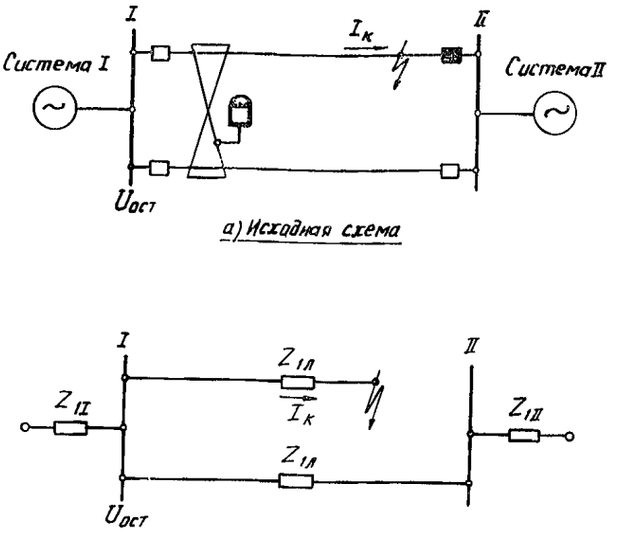



Рис. П-8. Расчетные условия для определения области применимости минимального пуска напряжения.

Из схемы по рис. П-11 следует, что в рассматриваемом режиме

$$U_{ост}=U_{мф}\frac{\frac{z_{1л}}{2}}{z_{1II}+\frac{z_{1л}}{2}}, \qquad (П\text{-}60)$$

$$k_{ч.н}=\frac{U_{с.з}}{U_{ост}}=0{,}7\frac{\left(z_{1II}+\frac{z_{1л}}{2}\right)}{\frac{z_{1л}}{2}}=1{,}4\frac{z_{1II}}{z_{1л}}+0{,}7. \qquad (П\text{-}61)$$

Из выражения (П-61) видно, что $k_{ч.н}\geqslant 2$ обеспечивается при

$$\frac{z_{1II}}{z_{1л}} \geqslant 0{,}93. \qquad (П\text{-}62)$$

Из материала данного приложения можно сделать следующие выводы:

1. При известных значениях параметров сети без обходных связей, пользуясь кривой по рис. 19, можно без подробных расчетов выяснить вопрос о применимости минимального пуска напряжения комплекта от замыканий между фазами, что может оказаться полезным на первоначальных стадиях проектирования.

2. При отсутствии обходных связей во всей области значений $z_{1I}/z_{1л}$ и $z_{1III}/z_{1л}$, в пределах которой обеспечивается $k_{ч.н}\geqslant 1{,}5$ в режиме после отключения поврежденной линии с противоположного конца, обеспечивается и $k_{ч.н}\geqslant 2$ в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии.

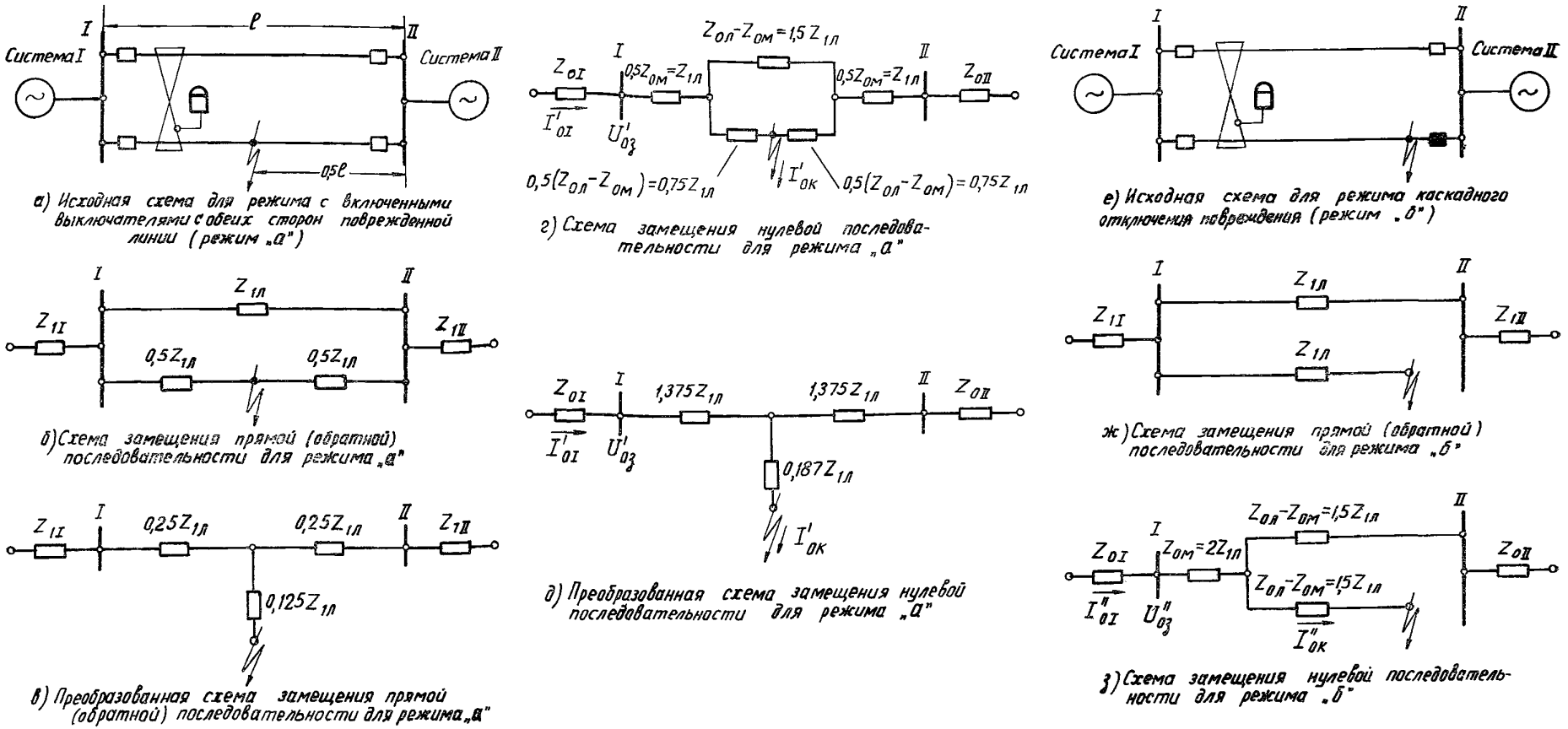
Поэтому при отсутствии обходных связей чувствительность реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий между фазами достаточно проверить только в режиме после отключения поврежденной линии с одной стороны.

3. Ввиду того что вывод по п. 2 сделан с большими запасами и появление обходных связей сравнительно мало влияет на значение отношения напряжений в месте установки защиты до и после отключения выключателя с противоположного конца, указанный вывод может быть распространен и на случай с сходными связями.

## *ПРИЛОЖЕНИЕ VI*

## РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПУСКОВОГО ОРГАНА КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Требуемый коэффициент чувствительности реле напряжения нулевой последовательности защиты должен быть обеспечен:




а) Исходная схема для режима с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии (режим „а")

б) Схема замещения прямой (обратной) последовательности для режима „а"

в) Преобразованная схема замещения прямой (обратной) последовательности для режима „а"

г) Схема замещения нулевой последовательности для режима „а"

д) Преобразованная схема замещения нулевой последовательности для режима „а"

е) Исходная схема для режима каскадного отключения повреждения (режим „б")

ж) Схема замещения прямой (обратной) последовательности для режима „б"

з) Схема замещения нулевой последовательности для режима „б"

Рис. П-9. Исходные схемы и схемы замещения отдельных последовательностей для сравнения условий чувствительности реле напряжения нулевой последовательности в режимах «а» — с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии и «б» — каскадного отключения повреждения.

а) в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии (коэффициент чувствительности должен быть при этом не менее порядка 2);

б) в режиме каскадного отключения повреждения, т. е. после отключения поврежденной линии со стороны, противоположной по отношению к месту установки защиты (коэффициент чувствительности должен быть при этом не менее порядка 1,5).

Ниже показано, что при отсутствии обходных связей между подстанциями, соединенными рассматриваемыми параллельными линиями, режим по п. «а» (с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии) не является расчетным для проверки коэффициента чувствительности реле напряжения нулевой последовательности и что достаточно проверить коэффициент чувствительности указанного реле в режиме по п. б (каскадного отключения повреждения).

На рис. П-9 даны исходные схемы и схемы замещения прямой и нулевой последовательностей как для режима по п. «а», так и для режима по п. «б» (сопротивления прямой и обратной последовательностей всех элементов исходных схем приняты одинаковыми).

В этих схемах принято, что собственное индуктивное сопротивление нулевой последовательности одной линии $z_{0л}=3{,}5z_{1л}$ ($z_{1л}$ — сопротивление прямой последовательности одной линии), а сопротивление взаимоиндукции двух линий $z_{0м}=2z_{1л}$.

Из схем замещения нулевой последовательности рис. П-9,*д* и *з* следует, что напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты стороны *I*

в режиме по п. «а»

$$U'_{0з}=I'_{0I}z_{0I}=I'_{0к}\frac{(z_{0II}+1{,}375z_{1л})\,z_{0I}}{(z_{0I}+z_{0II}+2{,}75z_{1л})}; \qquad (П\text{-}63)$$

в режиме „б“

$$U''_{0з}=I''_{0I}z_{0I}=I''_{0к}\frac{(z_{0II}+1{,}5z_{1л})\,z_{0I}}{(z_{0I}+z_{0II}+3{,}5z_{1л})}. \qquad (П\text{-}64)$$

В выражениях (П-63) и (П-64) $I'_{0к}$ и $I''_{0к}$ — токи нулевой последовательности в месте короткого замыкания в режимах соответственно по п. «а» и «б».

Сравнение условий чувствительности реле напряжения нулевой последовательности в режимах по п. «а» и «б» можно провести с помощью отношения

$$\frac{k'_{ч.н}}{k''_{ч.н}}=\frac{U'_{0з}}{U''_{0з}},$$

где $k'_{ч.н}$ и $k''_{ч.н}$ — коэффициенты чувствительности реле напряжения нулевой последовательности в режимах соответственно по п. «а» и «б».

Если отношение $\frac{U'_{0з}}{U''_{0з}}>1{,}33\left(\frac{2}{1{,}5}=1{,}33\right)$, то, очевидно, достаточно проверить коэффициент чувствительности в режиме по п. «б».

Для того чтобы выразить указанное отношение через параметры сети, воспользуемся выражениями (П-63) и (П-64)

$$\frac{U'_{0з}}{U''_{0з}}=\frac{I'_{0к}}{I''_{0к}}\varepsilon, \qquad (П\text{-}65)$$

где

$$\varepsilon=\frac{(z_{0II}+1{,}375\,z_{1л})\,(z_{0I}+z_{0II}+3{,}5z_{1л})}{(z_{0II}+1{,}5z_{1л})\,(z_{0I}+z_{0II}+2{,}75z_{1л})}. \qquad (П\text{-}66)$$

Анализ показывает, что величина $\varepsilon$ по выражению (П-66) относительно мало изменяется при варьировании параметров сети. Значение $\varepsilon$ лежит в пределах $1{,}18>\varepsilon>0{,}92$ (верхний предел соответствует случаю $z_{0I}=z_{0II}=0$, а нижний — случаю $z_{0I}=\infty$ и $z_{0II}=0$).

В случаях, когда $\varepsilon<1$, отношение $I'_{0к}/I''_{0к}$ достаточно велико, чтобы отношение $U'_{0з}/U''_{0з}$ превосходило 1,33 (см. выше).

В связи со сказанным для доказательства того, что практически расчетным по чувствительности является режим «б», необходимо и достаточно рассмотреть случаи, когда отношение $I'_{0к}/I''_{0к}$ мало.

Анализ показывает, что всегда $I'_{0к}/I''_{0к}>1$, так как результирующие сопротивления схем замещения находятся в соотношениях

$$z''_{0\Sigma}>z'_{0\Sigma} \text{ и } z''_{1\Sigma}>z'_{1\Sigma}.$$

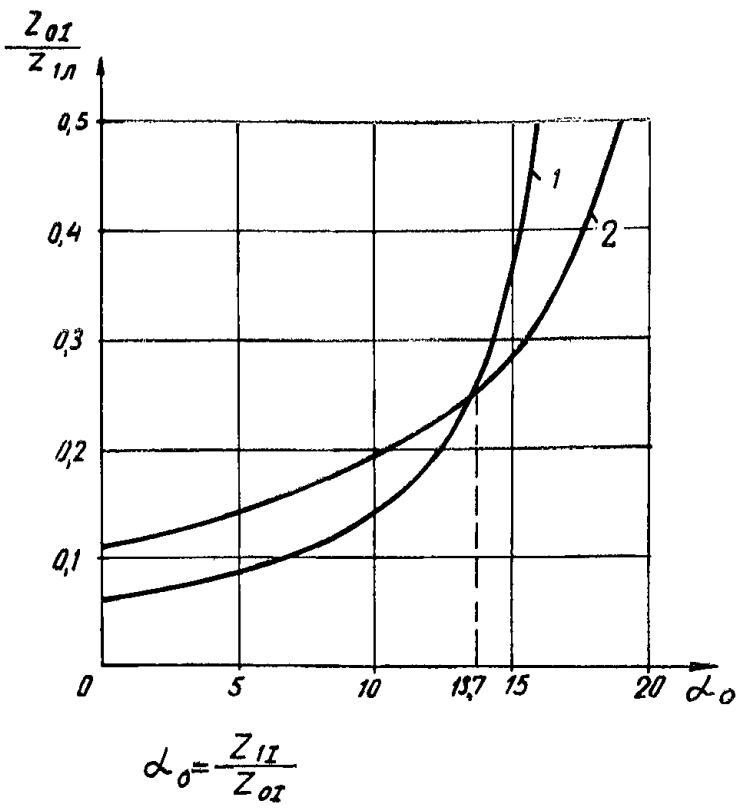



Рис. П-10. Кривые $\frac{z_{0I}}{z_{1л}}=f_1(\alpha_0)$ для условий, когда реле напряжения нулевой последовательности имеет минимально допустимый коэффициент чувствительности.

Примечание. Кривые построены для защиты, установленной со стороны системы *I* в сети по рис. П-9,*а*. *1* — для режима с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии ($k'_{ч.н}=2$); *2* — для режима каскадного отключения ($k''_{ч.н}=1{,}5$).

Из рассмотрения схем замещения на рис. П-9, *д* и *з* следует, что различие между $z''_{0\Sigma}$ и $z'_{0\Sigma}$, а также между $z''_{1\Sigma}$ и $z'_{1\Sigma}$ тем меньше (и тем меньше отношение $I'_{0к}/I''_{0к}$), чем больше $z_{0I}$ и $z_{0II}$, а также больше $z_{1I}$ и $z_{1II}$. Поэтому естественным является проанализировать случаи, когда $z_{0II}=z_{1II}=\infty$, а $z_{0I}$ и $\alpha_0=z_{1I}/z_{0I}$ рассматривать как параметры.

При однофазном замыкании на землю для условий, когда $z_{0II}=z_{1II}=\infty$, в режимах по п. «а» и «б» (рис. П-9,*д* и *з*)

$$k_{ч.н}=\frac{3E_ф z_{0I}}{(2z_{1\Sigma}+z_{0\Sigma})\,U_{ос.з}}, \qquad (П\text{-}67)$$

где $E_ф$ — фазная э. д. с.;

$U_{ос.з}$ — напряжение срабатывания реле напряжения нулевой последовательности.

Для режима по п. «а»

$$\left.\begin{aligned} z'_{1\Sigma}&=\alpha_0 z_{0I}+0{,}375z_{1л}\\ &\text{и}\\ z'_{0\Sigma}&=z_{0I}+1{,}56z_{1л}\end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}68)$$

Для режима „б“

$$\left.\begin{aligned} z''_{1\Sigma}&=\alpha_0 z_{0I}+z_{1л}\\ \text{и}\quad z''_{0\Sigma}&=z_{0I}+3{,}5z_{1л}.\end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}69)$$

Из выражений (П-67)—(П-69) можно получить, приняв $U_{ос.з}=0{,}04\,E_ф$ (что соответствует уставке на реле типа РНН-57):

$$k'_{ч.н}=\frac{75z_{0I}}{(2\alpha_0+1)\,z_{0I}+2{,}3z_{1л}}, \qquad (П\text{-}70)$$

$$k''_{ч.н}=\frac{75z_{0I}}{(2\alpha_0+1)\,z_{0I}+5{,}5z_{1л}}. \qquad (П\text{-}71)$$

Условие обеспечения требуемого коэффициента чувствительности реле напряжения нулевой последовательности для

режима по п. «а» имеет вид:

$$\frac{75z_{0I}}{(2\alpha_0+1)z_{0I}+2{,}3z_{1л}}\geqslant 2,$$

откуда

$$\frac{z_{0I}}{z_{1л}}\geqslant\frac{4{,}6}{75-2(2\alpha_0+1)}. \qquad (П\text{-}72)$$

Условие обеспечения требуемого коэффициента чувствительности рассматриваемого реле для режима по п б) имеет вид:

$$\frac{75z_{0I}}{(2\alpha_0+1)z_{0I}+5{,}5z_{1л}}\geqslant 1{,}5,$$

откуда

$$\frac{z_{0I}}{z_{1л}}\geqslant\frac{8{,}25}{75-1{,}5(2\alpha_0+1)}. \qquad (П\text{-}73)$$

На рис. П-10 построены зависимости $z_{0I}/z_{1л}=f(\alpha_0)$ по выражению (П-72) — кривая *1* и по выражению (П-73) — кривая *2*.

Все точки, расположенные выше кривой *1*, соответствуют случаям, когда $k'_ч>2$, а все точки, расположенные выше кривой *2*, соответствуют случаям, когда $k''_ч>1{,}5$.

Из кривых рис. П-10 видно, что при $k''_ч\geqslant 1{,}5$ обеспечивается $k'_ч\geqslant 2$, если

$$\alpha_0\leqslant 13{,}7. \qquad (П\text{-}74)$$

Тем что условие (П-74) практически всегда удовлетворяется, доказывается, что режим по п. а) не является расчетным для проверки коэффициента чувствительности реле напряжения нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю. К такому же выводу приводит аналогичное рассмотрение замыкания двух фаз на землю.

Ввиду того что вывод о расчетном для проверки коэффициента чувствительности реле напряжения нулевой последовательности режиме сделан с большими запасами и появление обходных связей сравнительно мало сказывается на отношении напряжения нулевой последовательности в месте установки защиты до и после отключения выключателя с противоположного конца, указанный вывод может быть распространен на случай с обходными связями.

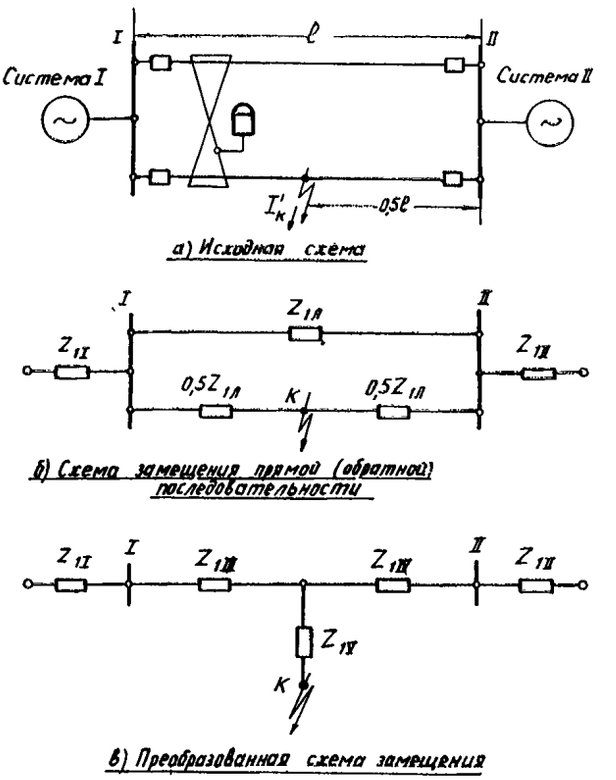



Рис. П-11. Исходная схема и схема замещения прямой последовательности для случая короткого замыкания при включенных выключателях с обеих сторон поврежденной линии.

## *ПРИЛОЖЕНИЕ VII*

## ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ТОЧКЕ ОДИНАКОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В РЕЖИМЕ С ВКЛЮЧЕННЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ С ОБЕИХ СТОРОН ПОВРЕЖДЕННОЙ ЛИНИИ И ЗНАЧЕНИЕМ ЗОНЫ КАСКАДНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ниже рассматриваемая зависимость определена сначала для комплекта защиты от замыканий между фазами в предположении, что точкой одинаковой чувствительности является середина линии. При этом коэффициент чувствительности

$$k_{ч.т}=\frac{I_{з(0.5)}}{I_{с.з}}, \qquad (П\text{-}75)$$

где $I_{з(0,5)}$ — ток в защите при коротком замыкании в середине линии ($m=0{,}5$).

Очевидно, что

$$I_{з\,(m_{каск})}=I_{с.з}, \qquad (П\text{-}76)$$

где $I_{з(m_{каск})}$ — ток в защите при коротком замыкании на границе зоны каскадного действия, примыкающей к противоположной стороне линий.

Из выражений (П-75) и (П-76) следует:

$$k_{ч.т}=\frac{I_{з(0.5)}}{I_{з(m_{каск})}}. \qquad (П\text{-}77)$$

Как известно,

$$m_{каск}=\frac{I_{з(m_{каск})}}{I_{к(m_{каск})}} \qquad (П\text{-}78)$$

или

$$I_{з(m_{каск})}=m_{каск}I_{к(m_{каск})}, \qquad (П\text{-}79)$$

где $I_{к(m_{каск})}$ — ток в месте короткого замыкания при повреждении на границе зоны каскадного действия.

Ток $I_{к(m_{каск})}$ может быть выражен через параметры сети.

Рассмотрим для этого схему сети с коротким замыканием на одной из параллельных линий, приведенную на рис. П-11. Предполагается, что сопротивления прямой и обратной последовательностей равны между собой для обеих систем.

На рис. П-11,*б*: $z_{1I}$ и $z_{1III}$ — сопротивления прямой последовательности систем соответственно со стороны рассматриваемой защиты и с противоположной стороны;

$z_{1л}$ — сопротивление прямой последовательности одной линии;

$m$ — доля длины линии от места повреждения до шин подстанции, противоположной по отношению к месту установки защиты.

Для определения результирующего сопротивления схемы замещения преобразуем треугольник *I-II-K* в звезду (рис. П-11,*б*). Преобразованная схема дана на рис. П-11,*в*, где

$$z_{1III}=\frac{1-m}{2}z_{1л};\quad z_{1IV}=\frac{m}{2}z_{1л};\quad z_{1V}=\frac{m(1-m)}{2}z_{1л}.$$

Результирующее сопротивление схемы замещения

$$z_{1\Sigma}=\frac{(z_{1I}+z_{1III})(z_{1III}+z_{1IV})}{z_{1I}+z_{1III}+z_{1III}+z_{1IV}}+z_{1V}=$$

$$=\frac{2z_{1I}z_{1III}+(1-m^2)z_{1III}z_{1л}+m(2-m)z_{1I}z_{1л}+m(1-m)z_{1л}^2}{2z_{1I}+2z_{1III}+z_{1л}}. \qquad (П\text{-}80)$$

При $m=m_{\text{каск}}$, т. е. при коротком замыкании на границе зоны каскадного действия, учитывая (П-80), получим:

$$I_{\text{к}(m_{\text{каск}})}=\frac{\rho E_{\Phi}(2z_{\text{II}}+2z_{\text{III}}+z_{1\text{л}})}{2z_{\text{II}}z_{\text{III}}+\left(1-m_{\text{каск}}^2\right)z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+}\cdots\rightarrow$$

$$\leftarrow\cdots\frac{}{+m_{\text{каск}}(2-m_{\text{каск}})z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+m_{\text{каск}}(1-m_{\text{каск}})z_{1\text{л}}^2}, \quad \text{(П-81)}$$

где $E_{\Phi}$ — фазная э. д. с.;

$\rho$ — коэффициент, зависящий от вида повреждения

$$\left(\rho^{(3)}=1 \text{ и } \rho^{(2)}=\frac{\sqrt{3}}{2}\right).$$

Из выражений (П-79) и (П-81) следует:

$$I_{\text{з}(m_{\text{каск}})}=\frac{\rho E_{\Phi}m_{\text{каск}}(2z_{\text{II}}+2z_{\text{III}}+z_{1\text{л}})}{2z_{\text{II}}z_{\text{III}}+\left(1-m_{\text{каск}}^2\right)z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+}\cdots\rightarrow$$

$$\leftarrow\cdots\frac{}{+m_{\text{каск}}(2-m_{\text{каск}})z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+m_{\text{каск}}(1-m_{\text{каск}})z_{1\text{л}}^2}; \quad \text{(П-82)}$$

$$I_{\text{з}(0,5)}=\frac{\rho E_{\Phi}2(2z_{\text{II}}+2z_{\text{III}}+z_{1\text{л}})}{8z_{\text{II}}z_{\text{III}}+3z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+3z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+z_{1\text{л}}^2}. \quad \text{(П-83)}$$

Из выражения (П-77) при учете (П-82) и (П-83) можно получить:

$$k_{\text{ч.т}}=\frac{2\left[2z_{\text{II}}z_{\text{III}}+\left(1-m_{\text{каск}}^2\right)z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+\right.}{m_{\text{каск}}(8z_{\text{II}}z_{\text{III}}+3z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+}\cdots\rightarrow$$

$$\leftarrow\cdots\frac{\left.+m_{\text{каск}}(2-m_{\text{каск}})z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+m_{\text{каск}}(1-m_{\text{каск}})z_{1\text{л}}^2\right]}{+3z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+z_{1\text{л}}^2)}. \quad \text{(П-84)}$$

Исходя из минимально допустимого коэффициента чувствительности $k_{\text{ч.т}}=2$, ниже определено соответствующее этому коэффициенту чувствительности наибольшее значение зоны каскадного действия.

Если в выражение (П-84) подставить $k_{\text{ч.т}}=2$, то получится:

$$(2-8m_{\text{каск}})z_{\text{II}}z_{\text{III}}+(1-m_{\text{каск}}^2-3m_{\text{каск}})z_{\text{III}}z_{1\text{л}}+$$
$$+(-m_{\text{каск}}-m_{\text{каск}}^2)z_{\text{II}}z_{1\text{л}}+\left(-m_{\text{каск}}^2\right)z_{1\text{л}}^2=0. \quad \text{(П-85)}$$

Уравнение (П-85) не может существовать в тех областях значений $m_{\text{каск}}$, в которых все члены, заключенные в скобки, имеют одинаковый знак. В результате исследования указанных членов можно установить, что при $m_{\text{каск}}>0{,}3$ уравнение (П-85) никогда не удовлетворяется. Это означает, что, если при коротком замыкании в середине линии в режиме с включенными выключателями с обеих сторон этой линии обеспечивается требуемый коэффициент чувствительности комплекта от замыканий между фазами $k_{\text{ч.т}}\geqslant 2$, зона каскадного действия никогда не превышает 30% (независимо от значений $z_{\text{II}}/z_{1\text{л}}$ и $z_{\text{III}}/z_{1\text{л}}$).

Аналогичное рассмотрение, проведенное для комплекта от замыканий на землю, показывает, что условие $k_{\text{ч.т}}=2$ при замыкании на землю в середине линии выражается в этом случае уравнением

$$(2-8m_{\text{каск}})A+\left(1-m_{\text{каск}}^2-3m_{\text{каск}}\right)B+\left(-m_{\text{каск}}-\right.$$
$$\left.-m_{\text{каск}}^2\right)C+\left(-m_{\text{каск}}^2\right)D+(-1{,}375m_{\text{каск}})E+$$
$$+(1{,}375-4{,}125m_{\text{каск}})F=0, \quad \text{(П-86)}$$

где $A$, $B$, $C$, $D$, $E$ и $F$ — коэффициенты, зависящие от параметров сети, большие нуля.

При исследовании всех членов уравнения (П-86), заключенных в скобки, можно установить, что при $m_{\text{каск}}>0{,}33$ указанное равенство (П-86) никогда не соблюдается. Таким образом, если при коротком замыкании в середине линии в режиме с включенными выключателями с обеих сторон этой линии обеспечивается требуемый коэффициент чувствительности комплекта от замыканий на землю $k_{\text{ч.т}}\geqslant 2$, зона каскадного действия этого комплекта не превышает 33% (независимо от параметров сети).





## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ОТСТРОЙКИ РЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПУСКОВОГО ОРГАНА КОМПЛЕКТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Исходная схема сети для рассматриваемого случая повреждения приведена на рис. П-12,*а*; преобразованная схема замещения прямой последовательности — на рис. П-12,*б*.

К рассматриваемой защите, установленной на опорной подстанции I, при расчетном металлическом трехфазном коротком замыкании за трансформатором промежуточной подстанции подводятся:

ток

$$I_{\text{защ}}=I_1+I_2-I_{\text{л}}=I_2-(I_{\text{л}}-I_1) \quad \text{(П-87)}$$

и напряжение

$$U_{\text{защ}}=I_2z_2. \quad \text{(П-88)}$$

Очевидно, что расчетным, т. е. обусловливающим наименьшее напряжение в месте установки защиты, является режим, когда при

$$I_{\text{защ}}=I_{\text{с.з}}, \quad \text{(П-89)}$$

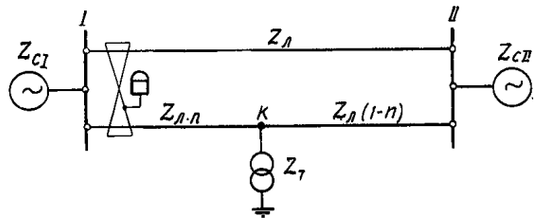
ток $I_2$ будет наименьшим.

Поскольку сопротивление $z_1$ преобразованной схемы замещения по рис. П-12,*б* всегда больше $z_{\text{л}}$

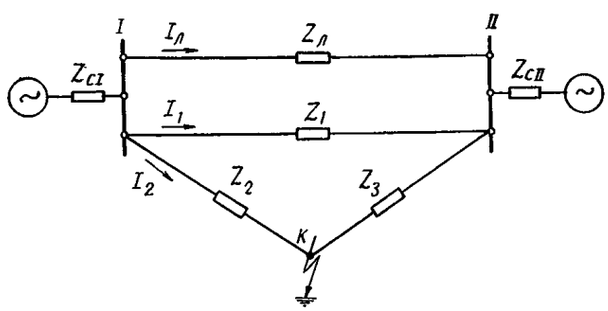
$$z_1=z_{\text{л}}n+z_{\text{л}}(1-n)+\frac{z_{\text{л}}nz_{\text{л}}(1-n)}{z_{\text{т}}}=z_{\text{л}}+\frac{z_{\text{л}}^2}{z_{\text{т}}}n(1-n), \quad \text{(П-90}$$

то ток $I_1$ всегда меньше $I_{\text{л}}$, т. е. разность токов $(I_{\text{л}}-I_1)$, входящая в выражение (П-87), всегда имеет знак тока $I_{\text{л}}$.

Из указанного следует, что при соблюдении условия (П-89) ток $I_2$ будет наименьшим, когда разность $(I_{\text{л}}-I_1)$ имеет наименьшее относительное значение. Этому условию соответствует токораспределение в минимальном режиме работы системы I (со стороны установки рассматриваемой защиты) и максимальном режиме работы системы *II* (с противоположной стороны).




*а) Исходная схема сети*




*б) Преобразованная схема замещения нулевой последовательности*

**Рис. П-12. Схемы сети для определения расчетного режима при отстройке реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий между фазами от повреждений за трансформатором промежуточной подстанции.**

*ПРИЛОЖЕНИЕ IX*

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

В данном приложении рассматривается вопрос составления специальных схем замещения параллельных линий с ответвлениями для анализа поведения поперечных дифференциальных защит параллельных линий как при повреждении на защищаемых линиях, так и вне этих линий.

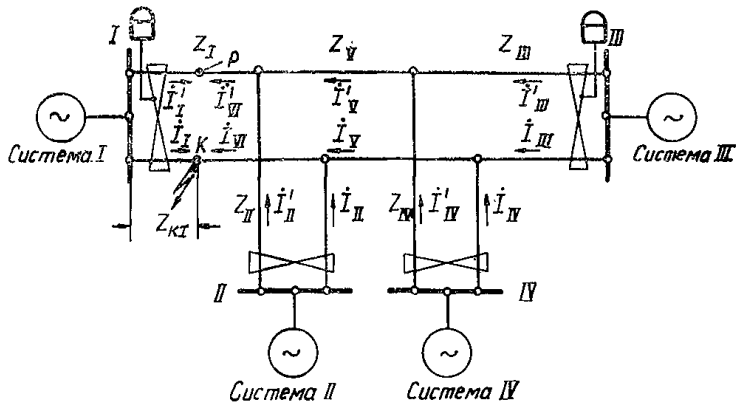
### А. Схемы замещения

1. На рис. П-13,*б* приведена специальная схема замещения прямой (обратной) последовательности для короткого замыкания в точке $K$ на параллельных линиях по рис. П-13,*а*.

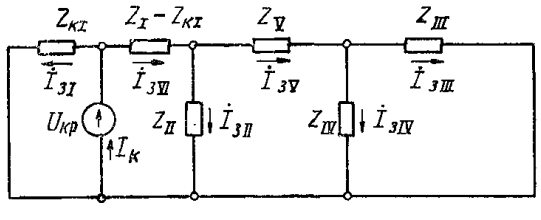
В нормальном режиме, а также при внешнем повреждении напряжение $U_{кр}$ между точками $K$ и $P$ равно нулю.

При повреждении в точке $K$ указанное напряжение отлично от нуля. Для этого случая при условии, что сопротивления параллельных линий одинаковы, могут быть составлены следующие уравнения:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot U_{кр} = Z_{кI}\,\dot I_{I} - Z_{кI}\,\dot I'_{I} = Z_{кI}\,(\dot I_{I} - \dot I'_{I});\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{VI} + Z_{II}\,\dot I_{II} -\\
&\quad - Z_{II}\,\dot I'_{II} - (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I'_{VI} =\\
&= (Z_{I} - Z_{кI})\,(\dot I_{VI} - \dot I'_{VI}) + Z_{II}\,(\dot I_{II} - \dot I'_{II});\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{VI} + Z_{V}\,\dot I_{V} + Z_{IV}\,\dot I_{IV} -\\
&\quad - Z_{IV}\,\dot I'_{IV} - Z_{V}\,\dot I'_{V} - (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I'_{VI} =\\
&= (Z_{I} - Z_{кI})(\dot I_{VI} - \dot I'_{VI}) + Z_{V}\,(\dot I_{V} - \dot I'_{V}) +\\
&\quad + \dot Z_{IV}\,(\dot I_{IV} - \dot I'_{IV});\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{VI} + Z_{V}\dot I_{V} + Z_{III}\dot I_{III} -\\
&\quad - Z_{III}\dot I'_{III} - Z_{V}\dot I'_{V} - (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I'_{VI} =\\
&= (Z_{I} - Z_{кI})\,(\dot I_{VI} - \dot I'_{VI}) + Z_{V}\,(\dot I_{V} - \dot I'_{V}) +\\
&\quad + Z_{III}\,(\dot I_{III} - \dot I'_{III}),
\end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}91)$$




*а) Исходная схема*




*б) Специальная схема замещения*

Рис. П-13. Исходная схема и специальная схема замещения прямой последовательности для непосредственного определения токов в защите при повреждении на параллельных линиях с ответвлениями.

где $Z_{кI}$ — сопротивление участка линии от подстанции I до места повреждения (точка $K$);

$Z_{I}$, $Z_{II}$, $Z_{III}$, $Z_{IV}$ и $Z_{V}$ — сопротивления участков линий по рис. П-13,*а*;

$\dot I_{I}$, $\dot I_{II}$, $\dot I_{III}$, $\dot I_{IV}$, $\dot I_{V}$ и $\dot I_{VI}$ — токи на участках поврежденной линии;

$\dot I'_{I}$, $\dot I'_{II}$, $\dot I'_{III}$, $\dot I'_{IV}$, $\dot I'_{V}$ и $\dot I'_{VI}$ — токи на участках неповрежденной линии.

Первичные токи соответственно в защитах I, II, III и IV определяются выражениями

$$\left.\begin{aligned}
&\dot I_{з1} = \dot I_{I} - \dot I'_{I};\quad \dot I_{зII} = \dot I_{II} - \dot I'_{II};\\
&\dot I_{зIII} = \dot I_{III} - \dot I'_{III};\ \dot I_{зIV} = \dot I_{IV} - \dot I'_{IV}.
\end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}92)$$

По аналогии обозначим:

$$\dot I_{зV} = \dot I_{V} - \dot I'_{V};\ \dot I_{зVI} = \dot I_{VI} - \dot I'_{VI}. \qquad (П\text{-}93)$$

С учетом (П-92) и (П-93) выражения (П-91) примут вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot U_{кр} = Z_{кI}\dot I_{з1};\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{зVI} + Z_{II}\dot I_{зII};\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{зVI} + Z_{V}\dot I_{зV} + Z_{IV}\dot I_{зIV};\\
&\dot U_{кр} = (Z_{I} - Z_{кI})\,\dot I_{зVI} + Z_{V}\dot I_{зV} + Z_{III}\,\dot I_{зIII}.
\end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}49)$$

Выражениям (П-94) соответствует специальная схема замещения, приведенная на рис. П-13,*б*. На основании этой схемы замещения могут быть получены расчетные выражения для определения токов в защитах.

2. Как следует из схемы замещения по рис. П-13,*б*, ток в $n$-й защите может быть определен по выражению

$$\dot I_{зn} = k_{тn}\dot I_{к.з}, \qquad (П\text{-}95)$$

где $k_{тn}$ — коэффициент токораспределения для $n$-й защиты (равный отношению тока в защите к току в месте короткого замыкания);

$\dot I_{к.з}$ — ток в месте короткого замыкания.

Значение коэффициента $k_{тn}$ для заданной точки повреждения определяется значениями сопротивлений участков линии.

Из выражений (П-92) вытекает, что сумма токов в защитах равна току повреждения

$$\sum_{n=1}^{m} \dot I_{зn} = \sum_{n=1}^{m} k_{тn}\dot I_{к.з} = \dot I_{к.з}, \qquad (П\text{-}96)$$

где $n$ — порядковый номер защиты;

$m$ — число защит (предполагается, что на всех концах линий установлены защиты).

Следовательно, коэффициенты токораспределения меньше единицы $k_{тn} < 1$, а их сумма равна:

$$\sum_{n=1}^{m} k_{тn} = 1. \qquad (П\text{-}97)$$

Выражения (П-96) и (П-97) могут быть использованы для определения токов в защитах.

В табл. П-1 приведены расчетные выражения для определения значений коэффициента $k_{тn}$ для линий без ответвлений, с одним и двумя ответвлениями. Расчетные выражения получены на основании схем замещения, составленных по вышеизложенному способу. Как следует из табл. П-1, ток в $n$-й защите при повреждении у шин противоположной подстанции определяется по выражению

$$\dot I_{зn} = \frac{Z_{к}}{Z_{n}}\,\frac{1}{k_{каск}}\,\dot I_{к.з}, \qquad (П\text{-}98)$$

где $Z_{к}$ — сопротивление части поврежденного участка от шин противоположной подстанции до точки повреждения;

$Z_{n}$ — сопротивление поврежденного участка;

$k_{каск}$ — коэффициент для определения зоны каскадного действия;

$I_{к.з}$ — ток короткого замыкания.

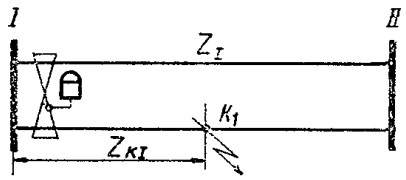
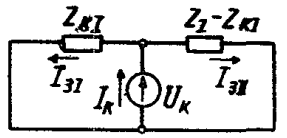
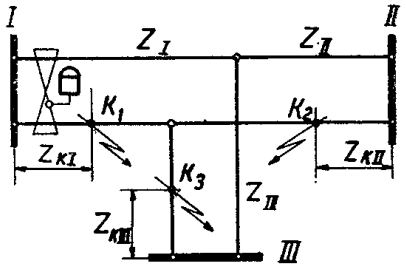
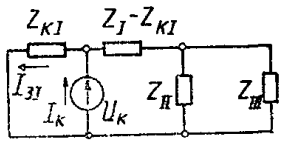
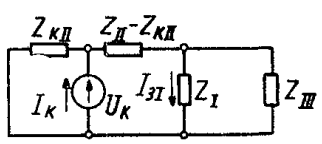
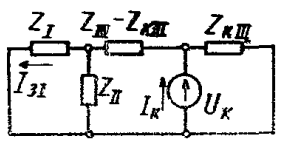
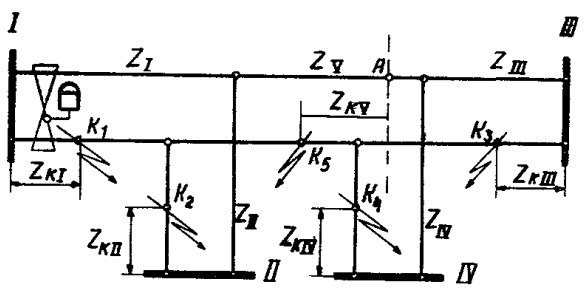
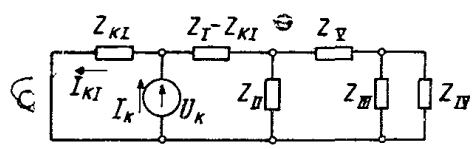
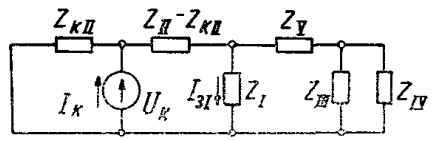
На рис. П-14 приведены графики значений коэффициентов токораспределения в зависимости от места повреждения на параллельных линиях с ответвлением.

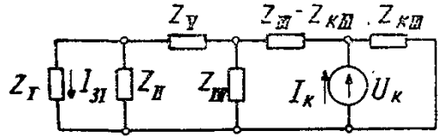
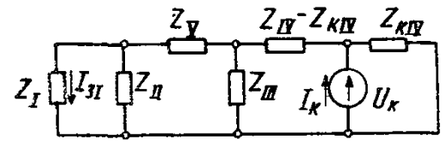
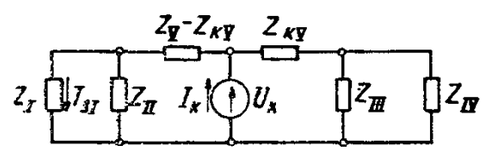
3. Для случая замыкания на землю может быть составлена специальная схема замещения с целью непосредственного определения токов нулевой последовательности в защите.

На рис. П-15,*б* приведена схема замещения нулевой последовательности для замыкания на землю в точке $K$ на парал-

Таблица П-1

**Коэффициенты токораспределения $k_{тп}$ и коэффициенты для определения зоны каскадного действия защит, $k_{каск}$**

| | Исходная схема | Точка короткого замыкания | Специальная схема замещения | Значения коэффициента токораспределения $k_{тп}$ для защиты I | Значения коэффициента для определения зоны каскадного действия $k_{каск}$ для защиты $I$ |
|---|---|---|---|---|---|
| а |  | $K_1$ |  | $1-\frac{z_{кI}}{z_I}$ | 1 |
| б |  | $K_1$ |  | $1-\frac{z_{кI}(z_{II}+z_{III})}{z_Iz_{II}+z_{II}z_{III}+z_Iz_{III}}$ | — |
| | | $K_2$ |  | $\frac{z_{кII}z_{III}}{z_Iz_{II}+z_{II}z_{III}+z_Iz_{III}}=\frac{z_{кII}}{z_{II}}\frac{1}{k_{каск}}$ | $\frac{z_Iz_{II}+z_Iz_{III}+z_{II}z_{III}}{z_{II}z_{III}}$ |
| | | $K_3$ |  | $\frac{z_{кIII}z_{II}}{z_Iz_{II}+z_{II}z_{III}+z_Iz_{III}}=\frac{z_{кIII}}{z_{III}}\frac{1}{k_{каск}}$ | |
| в | <br>$Z_{VI}=\frac{Z_{III}Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}+Z_V$ ; $Z_{VII}=\frac{Z_IZ_{II}}{Z_I+Z_{II}}+Z_V$ | $K_1$ |  | $1-\frac{z_{кI}(z_{II}+z_{VI})}{z_Iz_{II}+z_Iz_{VI}+z_{II}z_{VI}}$ | — |
| | | $K_2$ |  | $\frac{z_{кII}z_{VI}}{z_Iz_{II}+z_Iz_{VI}+z_{II}z_{VI}}=\frac{z_{кII}}{z_{II}}\frac{1}{k_{каск}}$ | $\frac{z_Iz_{II}+z_Iz_{VI}+z_{II}z_{VI}}{z_{II}z_{VI}}$ |

| Исходная схема | Точка короткого замыкания | Специальная схема замещения | Значения коэффициента токораспределения $k_{тп}$ для защиты I | Значения коэффициента для определения зоны каскадного действия $k_{каск}$ для защиты I |
|---|---|---|---|---|
| | $K_3$ |  | $\frac{z_{кIII}z_{II}z_{IV}}{(z_I+z_{II})(z_{III}z_{IV}+z_{III}z_{VII}+z_{IV}z_{VII})}=\frac{z_{кIII}}{z_{III}}\frac{1}{k_{каск}}$ | $\frac{(z_{III}z_{IV}+z_{III}z_{VII}+z_{IV}z_{VII})(z_I+z_{II})}{z_{III}z_{II}z_{IV}}$ |
| | $K_4$ |  | $\frac{z_{кIV}z_{II}z_{III}}{(z_I+z_{II})(z_{III}z_{IV}+z_{III}z_{VII}+z_{IV}z_{VII})}=\frac{z_{кIV}}{z_{IV}}\frac{1}{k_{каск}}$ | |
| | $K_5$ |  | $\frac{z_{кV}+\frac{z_{III}z_{IV}}{z_{III}+z_{IV}}}{z_V+\frac{z_Iz_{II}}{z_I+z_{II}}+\frac{z_{III}z_{IV}}{z_{III}+z_{IV}}}\frac{z_{II}}{z_I+z_{II}}$ | — |

Обозначения:

$z_I$, $z_{II}$, $z_{III}$, $z_{IV}$ и $z_V$ — сопротивления участков линии;

$z_{кI}$ — сопротивление от шин подстанции *I* до места короткого замыкания в точке $K_1$;

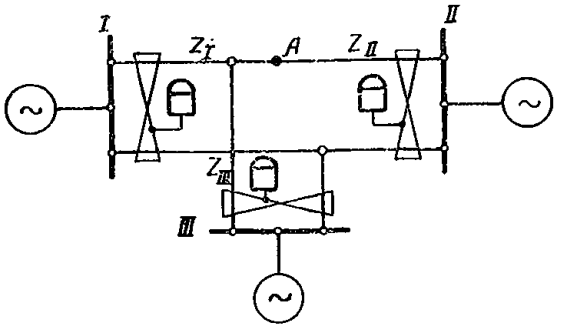
$z_{кII}$ — то же, но для подстанции *II* и точки $K_2$;

$z_{кIII}$ — то же, но для подстанции *III* и точки $K_3$;

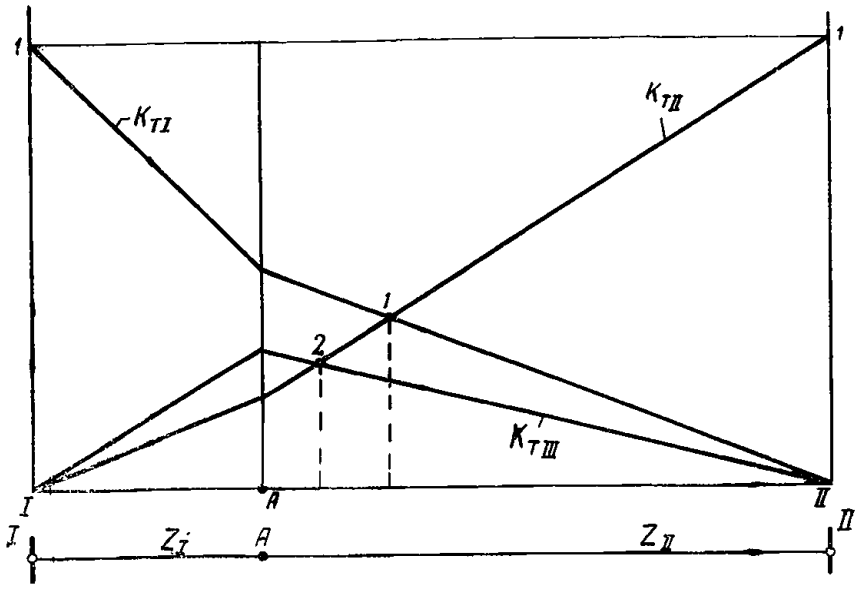
$z_{кIV}$ — то же, но для подстанции *IV* и точки $K_4$;

$z_{кV}$ — сопротивление поврежденного участка от точки $K_5$ до точки разветвления *A*;

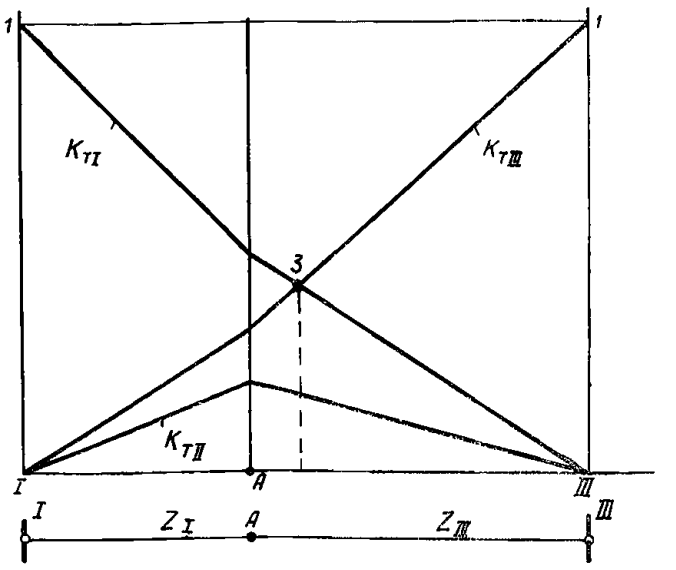
$$z_{VI}=\frac{z_{III}z_{IV}}{z_{III}+z_{IV}}+z_V;\quad z_{VII}=\frac{z_Iz_{II}}{z_I+z_{II}}+z_V.$$




*а) Исходная схема*




*б) Значения коэффициентов $K_{тI}$, $K_{тII}$ и $K_{тIII}$ при повреждении на участках I-A и II-A*




*в) Значения коэффициентов $K_{тI}$, $K_{тII}$ и $K_{тIII}$ при повреждении на участках I-A и III-A*

Рис. П-14. Зависимость коэффициентов токораспределения $k_{тI}$, $k_{тII}$ и $k_{тIII}$ от места короткого замыкания на линиях с ответвлением.

Примечания: 1. Диаграммы на рис. П-14,*б* и *в* построены для следующих значений участков линии: $Z_I=10$ *ом*, $Z_{II}=25$ *ом* и $Z_{III}=15$ *ом*.

2. *A* — точка разветвления (точка присоединения ответвления).

лельных линиях по рис. П-15,*а* при наличии взаимоиндукции между параллельными линиями на всех участках.

Для составления схемы замещения, с помощью которой определяются токи в защитах, практически достаточно использовать часть схемы замещения по рис. П-15,*б* между точками *I'*, *II'*, *VI* и *III'*, которая приведена на рис. П-15,*в*.

На основании схемы замещения по рис. П-15,*в* могут быть составлены следующие выражения:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\dot U_{0кр} = (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,\dot I_{0VI} + \\
&+ (Z_{0I} - Z_{Im})\,\dot I_{0I} - (Z_{0I} - Z_{Im})\dot I'_{0I} - \\
&- (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,\dot I'_{0VI} = (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,(\dot I_{0VI} - \dot I'_{0VI}) + \\
&+ (Z_{0I} - Z_{Im})\,(\dot I_{0I} - \dot I'_{0I}) = (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,\dot I_{0зVI} + \\
&+ (Z_{0I} - Z_{Im})\,\dot I_{0зI};\\
&\dot U_{0кр} = (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,(\dot I_{0VI} - \dot I'_{0VI}) + \\
&+ (Z_{0II} - Z_{IIm})\,\dot I_{0II} - (Z_{0II} - Z_{IIm})\,\dot I'_{0II} = \\
&= (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,(\dot I_{0VI} - \dot I'_{0VI}) + (Z_{0II} - Z_{IIm}) \times \\
&\times (\dot I_{0II} - \dot I'_{0II}) = (Z_{0VI} - Z_{VIm})\,\dot I_{0зVI} + (Z_{0II} - Z_{IIm})\,\dot I_{0зII};\\
&\dot U_{0кр} = (Z_{0V} - Z_{Vm})\,\dot I_{0V} + (Z_{0III} - Z_{IIIm})\,\dot I_{0III} - \\
&- (Z_{0III} - Z_{IIIm})\,\dot I'_{0III} - (Z_{0V} - Z_{Vm})\,\dot I'_{0V} = \\
&= (Z_{0V} - Z_{Vm})\,(\dot I_{0V} - \dot I'_{0V}) + (Z_{0III} - Z_{IIIm})\,(\dot I_{0III} - \\
&- \dot I'_{0III}) = (Z_{0V} - Z_{Vm})\,\dot I_{0зV} + (Z_{0III} - Z_{IIIm})\,\dot I_{0зIII};\\
&\dot U_{0кр} = (Z_{0V} - Z_{Vm})\,(\dot I_{0V} - \dot I'_{0V}) + Z_{от}\dot I_{0IV} - \\
&- Z_{от}\dot I'_{0IV} = (Z_{0V} - Z_{Vm})\,(\dot I_{0V} - \dot I'_{0V}) + \\
&+ Z_{от}\,(\dot I_{0IV} - \dot I'_{0IV}) = (Z_{0V} - Z_{Vm})\,I_{0зV} + Z_{от}I_{0зIV},
\end{aligned}
\right\} \quad (П\text{-}99)
$$

где $Z_{0I}$, $Z_{0II}$, $Z_{0III}$ — сопротивления нулевой последовательности участков линий по рис. П-15, *а*;

$Z_{Im}$, $Z_{IIm}$, $Z_{IIIm}$ — сопротивления взаимоиндукции участков линий по рис. П-15, *а*;

$Z_{от}$ — сопротивление нулевой последовательности трансформатора промежуточной подстанции;

$Z_{0V}$, $Z_{0VI}$ — сопротивления нулевой последовательности частей поврежденного участка от точки *K* до точек разветвления *A* и *B*;

$Z_{Vm}$, $Z_{VIm}$ — сопротивления взаимоиндукции частей поврежденного участка от точки *K* до точек разветвления *A* и *B*;

$\dot I_{0I}$, $\dot I_{0II}$, $\dot I_{0III}$, $\dot I_{0V}$, $\dot I_{0VI}$ — токи нулевой последовательности на участках поврежденной линии;

$\dot I'_{0I}$, $\dot I'_{0II}$, $\dot I'_{0III}$, $\dot I'_{0V}$, $\dot I'_{0VI}$ — токи нулевой последовательности на участках неповрежденной линии;

$\dot I_{0IV}$ и $\dot I'_{0IV}$ — токи нулевой последовательности в нейтралях трансформаторов промежуточной подстанции.

По аналогии с выражениями (П-92) и (П-93) в выражениях (П-99) обозначены:

$\dot I_{0зI} = \dot I_{0I} - \dot I'_{0I}$ — ток в защите I;

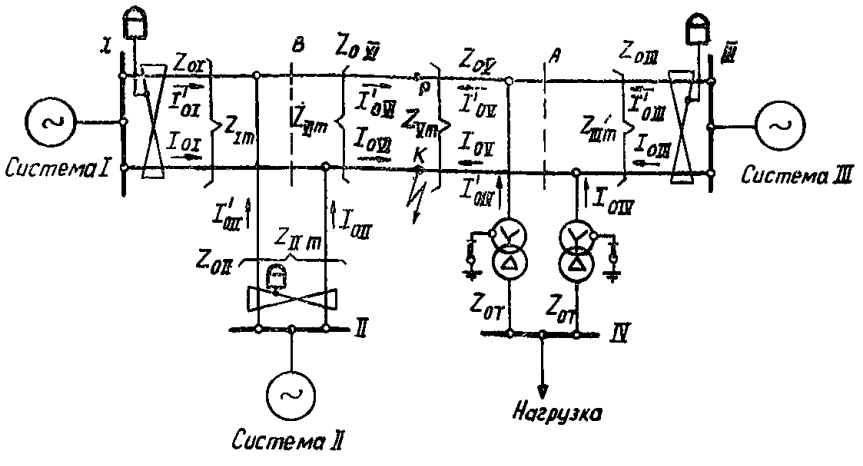
$\dot I_{0зII} = \dot I_{0II} - \dot I'_{0II}$ — ток в защите II;

$\dot I_{0зIII} = \dot I_{0III} - \dot I'_{0III}$ — ток в защите III;

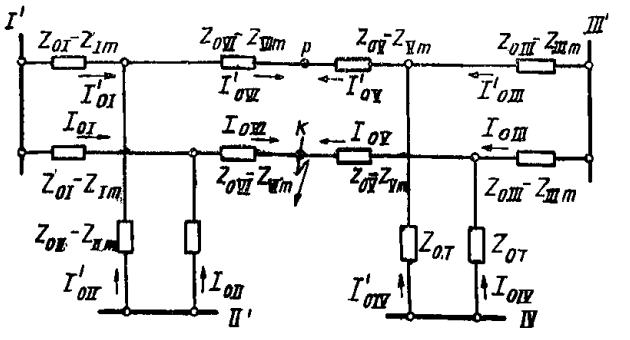
$\dot I_{0зIV} = \dot I_{0IV} - \dot I'_{0IV}$ — ток в защите IV;

$\dot I_{0зV} = \dot I_{0V} - \dot I'_{0V}$ — разность токов параллельных линий на участке с сопротивлением $Z_{0V}$;

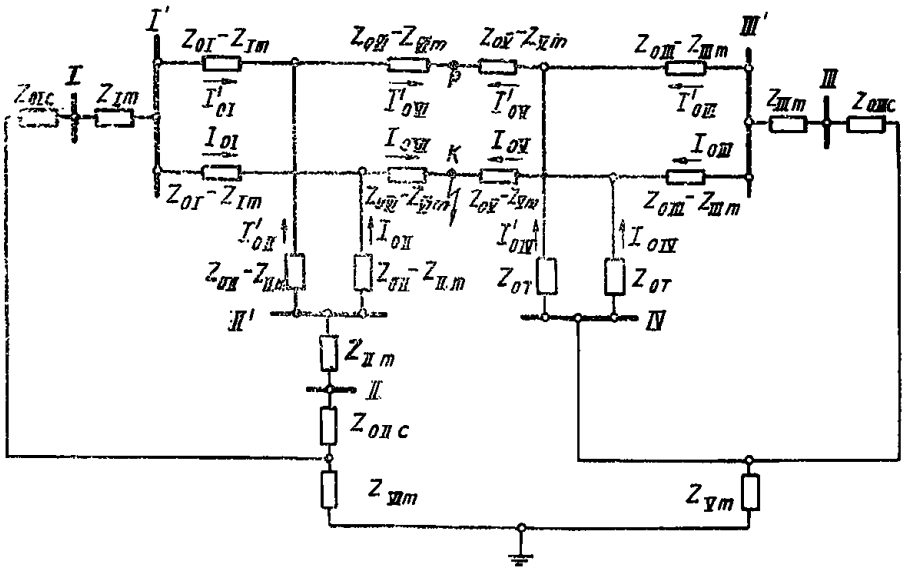
$\dot I_{0зVI} = \dot I_{0VI} - \dot I'_{0VI}$ — разность токов параллельных линий на участке с сопротивлением $Z_{0VI}$.



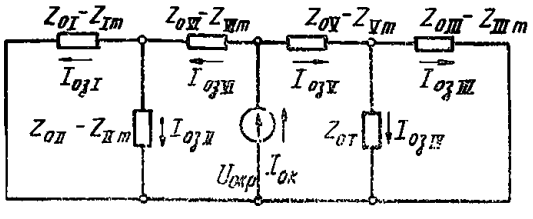

а) Исходная схема



б) Схема замещения нулевой последовательности: между точками I', II', III' и IV'.



б) Схема замещения нулевой последовательности



г) Специальная схема замещения для непосредственного определения токов нулевой последовательности в защитах.

Рис. П-15. Исходная схема и схемы замещения нулевой последовательности для непосредственного определения токов в защите при замыкании на землю на параллельных линиях с ответвлениями.

Выражениям (П-99) соответствует схема замещения, приведенная на рис. П-15,*г*, аналогичная схеме замещения по рис. П-13,*б*.

### Б. Определение точки одинаковой чувствительности

1. Как известно, под точкой одинаковой чувствительности двух защит понимается точка на защищаемой линии, при повреждении в которой рассматриваемые защиты имеют одинаковые коэффициенты чувствительности.

Коэффициент чувствительности $k_{чn}$ $n$-й защиты определяется по выражению

$$k_{чn} = \frac{k_{тn} I_{к.з}}{I_{с.з.n}}, \qquad (П\text{-}100)$$

где $I_{с.з.n}$ — первичный ток срабатывания $n$-й защиты;

$k_{тn}$ — коэффициент токораспределения для $n$-й защиты.

Точка одинаковой чувствительности $n$-й и $m$-й защит, установленных на разных концах параллельных линий, определяется из соотношения

$$k_{чn} = k_{чm}, \qquad (П\text{-}101)$$

где $k_{чn}$ и $k_{чm}$ — коэффициенты чувствительности защит.

На основании выражений (П-100) и (П-101) могут быть получены расчетные выражения для определения точки одинаковой чувствительности защит.

Следует отметить, что при равенстве токов срабатывания двух защит точка их одинаковой чувствительности определяется исходя из равенства коэффициентов токораспределения для рассматриваемых защит

$$k_{т.n} = k_{т.m}. \qquad (П\text{-}102)$$

2. При определении точки одинаковой чувствительности на параллельных линиях с одним ответвлением необходимо учитывать следующее. В случае равенства сопротивлений участков линии $Z_I = Z_{II} = Z_{III}$ (рис. П-14) при коротком замыкании в точке разветвления токи в защитах имеют одинаковые значения

$$I_{зI} = I_{зII} = I_{зIII}.$$

При равенстве токов срабатывания защит точка одинаковой чувствительности защит, установленных на подстанциях *I, II* и *III* находится в точке разветвления.

В том случае, если сопротивления участков не равны между собой, а токи срабатывания защит равны, точка одинаковой чувствительности двух защит расположена на участках, соединяющих подстанции, на которых установлены рассматриваемые защиты. При этом искомая точка расположена на участке с бо́льшим сопротивлением. Так, например, при $Z_{II} > Z_I$ (рис. П-14,*а*) точка одинаковой чувствительности защит *I* и II находится на участке с сопротивлением $Z_{II}$. При этом ее место расположения определяется из выражения

$$m_ч = \frac{Z_I Z_{II} + Z_{II} Z_{III} + Z_I Z_{III}}{Z_I Z_{II} + 2 Z_{II} Z_{III}}, \qquad (П\text{-}103)$$

где $m_ч$ — отношение сопротивления участка от подстанции *II* до точки одинаковой чувствительности к сопротивлению $Z_{II}$.

Точкам одинаковой чувствительности соответствуют точки пересечения *1*, *2* и *3* прямых, характеризующих значения коэффициентов токораспределения $k_{тI}$, $k_{тII}$ и $k_{тIII}$ на рис. П-14,*б* и *в* (для защит *I* и *II* — точка *1*, для защит *II* и *III* — точка *2* и для защит *I* и *III* — точка *3*).

3. В качестве примера определим точку одинаковой чувствительности для защит *I* и *II*, установленных на параллельных линиях по рис. П-16.

Предполагается, что защиты *I* и *II* имеют одинаковые токи срабатывания. При этом точка одинаковой чувствительности может быть найдена из соотношения

$$k_{тI} = k_{тII},$$

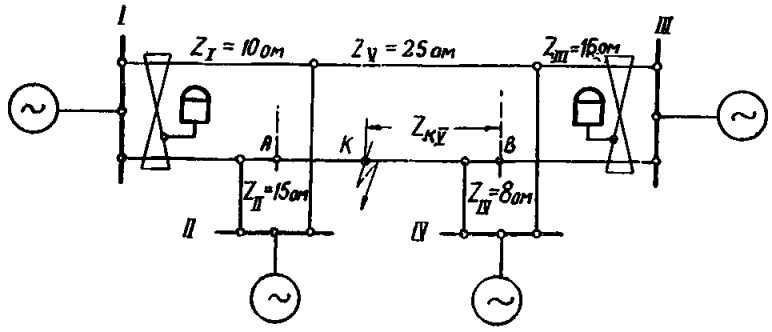



Рис. П-16. Поясняющая схема для примера определения точки одинаковой чувствительности.

где $k_{тI}$ и $k_{тII}$ — коэффициенты токораспределения соответственно для защит *I* и *II*.

Предполагается, что точка одинаковой чувствительности расположена на участке между точками разветвления *A* и *B*.

Пользуясь таблицей П-1 для рассматриваемого случая, получаем:

$$k_{тI} = \frac{Z_{kV} + \dfrac{Z_{III}Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}}{Z_V + \dfrac{Z_I Z_{II}}{Z_I+Z_{II}} + \dfrac{Z_{III}Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}} \cdot \frac{Z_{II}}{Z_I+Z_{II}}.$$

Аналогично

$$k_{тIII} = \frac{Z_V - Z_{kV} + \dfrac{Z_I Z_{II}}{Z_I+Z_{II}}}{Z_V + \dfrac{Z_I Z_{II}}{Z_I+Z_{II}} + \dfrac{Z_{III}Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}} \cdot \frac{Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}.$$

Из условия равенства коэффициентов токораспределения $k_{тI} = k_{тIII}$ для точки одинаковой чувствительности имеем:

$$Z_{kV}\frac{Z_{II}}{Z_I+Z_{II}} + \frac{Z_{II}Z_{III}Z_{IV}}{(Z_I+Z_{II})(Z_{III}+Z_{IV})} =$$

$$= \frac{Z_V Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}} - Z_{kV}\frac{Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}} + \frac{Z_I Z_{II} Z_{IV}}{(Z_I+Z_{II})(Z_{III}+Z_{IV})}.$$

Решая это уравнение относительно $Z_{kV}$, получим:

$$Z_{kV} = \frac{\dfrac{Z_V Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}} + \dfrac{Z_{II}Z_{IV}(Z_I - Z_{III})}{(Z_I+Z_{II})(Z_{III}+Z_{IV})}}{\dfrac{Z_{II}}{Z_I+Z_{II}} + \dfrac{Z_{IV}}{Z_{III}+Z_{IV}}} =$$

$$= \frac{\dfrac{25\cdot 8}{8+15} + \dfrac{15\cdot 8(10-15)}{(10+15)(15+8)}}{\dfrac{15}{10+15} + \dfrac{8}{15+8}} = 8{,}1 \text{ ом}.$$

### В. Определение зоны каскадного действия

1. Используя выражение (П-98), можно определить зоны каскадного действия защит на линиях с ответвлениями. На границе зоны каскадного действия ток в защите равен ее току срабатывания

$$I_{с.з} = I_{з.п} = k_{тп} I_{к.з} = \frac{Z_к}{Z_п}\frac{1}{k_{каск}} I_{к.з}. \qquad (П\text{-}104)$$

Решая выражение (П-104) относительно отношения $Z_к/Z_п$, получим значение зоны каскадного действия:

$$m_{каск} = \frac{Z_к}{Z_п} = \frac{I_{с.з}}{I_{к.з}} k_{каск}, \qquad (П\text{-}105)$$

где $I_{с.з}$ — ток срабатывания рассматриваемой защиты;

$I_{к.з}$ — ток короткого замыкания в месте повреждения, в расчете принимается равным току короткого замыкания на шинах ближайшей подстанции;

$k_{каск}$ — коэффициент для определения зоны каскадного действия защиты.

В табл. П-1 даны расчетные выражения для определения коэффициентов $k_{каск}$ для линий без ответвлений и для линий с одним и двумя ответвлениями.

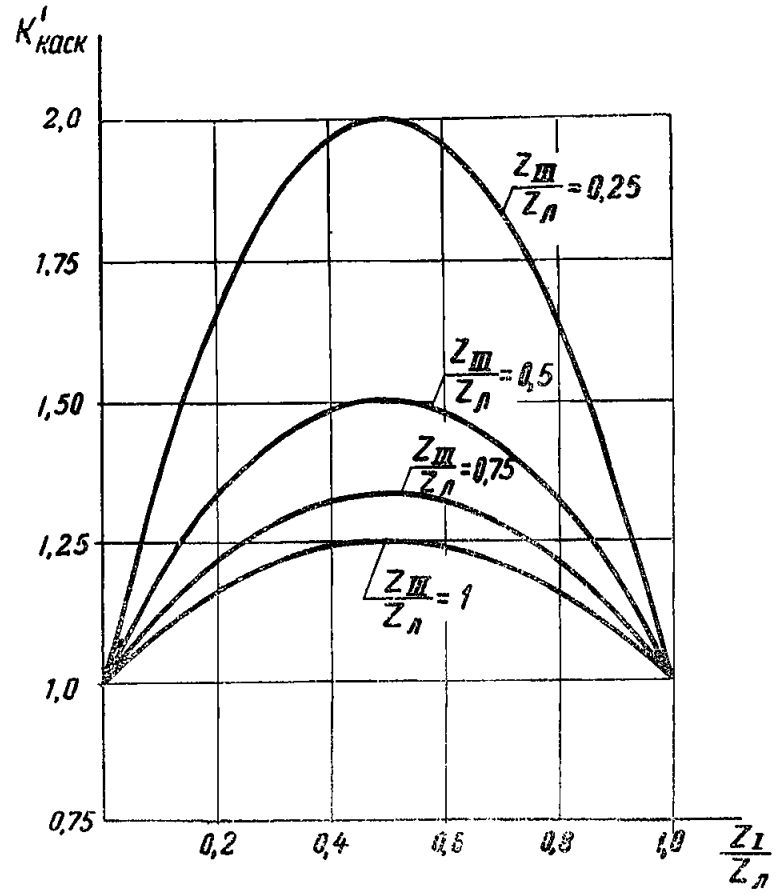



Рис. П-17. Изменение коэффициента $k'_{каск}$ в зависимости от места присоединения ответвления.

**Примечание.** Кривые построены для исходной схемы табл. П-1, п. б.

Как следует из рассмотрения выражений, приведенных в табл. П-1, при наличии ответвления зона каскадного действия увеличивается по сравнению со случаем отсутствия ответвления. При этом увеличение зоны каскадного действия определяется значением коэффициента $k_{каск}$.

Значение тока $I_{к.з}$ допустимо определять по короткому замыканию на шинах подстанций, от которых отсчитывается зона каскадного действия. Однако такой способ оценки значения зоны каскадного действия является приближенным. Наиболее точно значение зоны каскадного действия может быть определено графо-аналитическим способом по кривым изменения тока в реле в зависимости от места повреждения.

2. При неизменных значениях тока короткого замыкания в месте повреждения и тока срабатывания защиты, значение зоны каскадного действия защиты зависит от соотношения между сопротивлениями участков линий.

На рис. П-17 приведены кривые, характеризующие изменение зоны каскадного действия защиты для трехконцевой линии (табл. П-1, п. «б») в зависимости от места присоединения ответвления. При построении каждой кривой принималось постоянным отношение сопротивления участка $Z_{III}$ к сопротивлению линии $Z_л = Z_I + Z_{II}$. Значение зоны каскадного действия определялось по отношению к сопротивлению линии $Z_л$ по выражению

$$m'_{каск} = \frac{Z_{kII}}{Z_л} = \frac{I_{с.з}}{I_{к.з}}\; k'_{каск} = \frac{I_{с.з}}{I_{к.з}} \cdot k_{каск}\frac{Z_{II}}{Z_л}, \qquad (П\text{-}106)$$

где $k_{каск}$ — коэффициент, характеризующий значение зоны каскадного действия по отношению к сопротивлению поврежденного участка ($Z_{II}$);

$k'_{каск}$ — то же, но по отношению к сопротивлению линии ($Z_л$).

Исходя из выражения для $k_{каск}$ трехконцевой линии (табл. П-1) можно получить:

$$k'_{каск} = k_{каск}\frac{Z_{II}}{Z_л} = 1 + \frac{Z_I Z_{II}}{Z_л}\cdot\frac{1}{Z_{III}}. \qquad (П\text{-}107)$$

По выражению (П-107) построены кривые $k'_{каск} = f\left(\dfrac{Z_I}{Z_л}\right)$, приведенные на рис. П-17.

Как следует из рис. П-17, при заданном значении отношения $Z_{III} : Z_л$ наибольшего значения зона каскадного действия достигает при присоединении участка $Z_{III}$ в середине линии и минимального значения — при присоединении этого участка вблизи одного из концов линий. Значение зоны каскад-

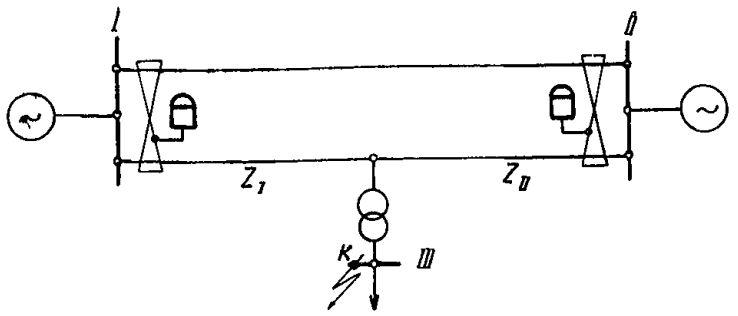



Рис. П-18. Поясняющая схема для выбора параметров срабатывания защиты.

ного действия увеличивается с уменьшением отношения $Z_{III} : Z_л$. При малых значениях сопротивления $Z_{III}$ защита практически не действует на участке от противоположной опорной подстанции до точки разветвления.

### Г. Определение параметров срабатывания защиты

Используя рассмотренный выше метод схем замещения в ряде случаев можно ориентировочно определить ток срабатывания защит по условию отстройки от короткого замыкания за трансформатором ответвления. Например, параметры срабатывания защит в схеме по рис. П-18 могут быть определены по следующим выражениям:

для защиты *I*

$$I_{с.з.I} = k_н k_{тI} I_{к.з} = k_н \frac{Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} I_{к.з}; \qquad (П\text{-}108)$$

для защиты *II*

$$I_{с.з.II} = k_н k_{тII} I_{к.з} = k_н \frac{Z_I}{Z_I + Z_{II}} I_{к.з}, \qquad (П\text{-}109)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности;

$I_{к.з}$ — максимальное значение тока короткого замыкания за трансформатором;

$Z_I$ и $Z_{II}$ — сопротивления участков линий (рис. П-18).

*ПРИЛОЖЕНИЕ X*

## ВЫВОД РАСЧЕТНОГО ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ КАСКАДНОГО ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ ПО РИС. 26,*а*

Схема замещения для параллельных линий с ответвлениями по рис. 26,*а* приведена на рис. 26,*б*.

Схему по рис. 26,*б* можно рассматривать как:

а) схему замещения прямой последовательности, когда на промежуточных подстанциях, питающихся от одной линии (рис. 11,*а*) или от двух линий (рис. 11,*б*), но при раздельной работе трансформаторов на сторонах низшего и среднего напряжений, имеются генерирующие источники, посылающие к месту короткого замыкания токи $I_{nI}$, $I_{nII}$ и $I_{nIII}$;

б) схему замещения обратной последовательности с токами обратной последовательности $I_{nI}$, $I_{nII}$ и $I_{nIII}$, приходящими к месту короткого замыкания от генерирующих источников или нагрузки промежуточных подстанций, питающихся от одной линии (рис. 11,*а*) или от двух линий (рис. 11,*б*), но при раздельной работе трансформаторов на сторонах низшего и среднего напряжений;

в) схему замещения нулевой последовательности с токами нулевой последовательности $I_{nI}$, $I_{nII}$ и $I_{nIII}$, приходящими к месту короткого замыкания от заземленных нейтралей промежуточных подстанций, питающихся от одной линии (рис. 11,*а*) или от двух линий (рис. 11,*б*), но при заземлении нейтрали одного из двух трансформаторов подстанции; в этом случае сопротивления $Z_I$, $Z_{II}$, $Z_{III}$ и $Z_л$ представляют собой разности собственных сопротивлений нулевой последовательности и сопротивлений взаимоиндукции соответствующих участков линий.

Для схемы по рис. 26,*б* можно составить уравнение падения напряжений по замкнутому контуру *KMNK*

$$\left.\begin{aligned} &(I_I + I_{nI} + I_{nIII})(Z_{III} - mZ_л) + \\ &+ (I_I + I_{nI})(Z_I - Z_{III}) + I_I(Z_л - Z_I) - \\ &- I'_I(Z_л - Z_{II}) - (I'_I + I_{nII}) Z_{II} - \\ &- (I_к - I_I - I_{nI} - I_{nIII})\, mZ_л = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}110)$$

После приведения подобных членов можно получить:

$$-I_к mZ_л + I_{nIII}Z_{III} + I_{nI}Z_I -$$

$$-I_{nII}Z_{II} + I_I Z_л - I'_I Z_л = 0. \qquad (П\text{-}111)$$

Учитывая, что при повреждении на границе зоны каскадного действия.

$$I_I - I'_I = I_{с.з} \quad и \quad m = m_{каск}. \qquad (П\text{-}112)$$

и обозначив соответствующие участки в долях от длины линии

$$\frac{Z_I}{Z_л} = m_I; \quad \frac{Z_{II}}{Z_л} = m_{II} \text{ и } \frac{Z_{III}}{Z_л} = m_{III}, \qquad (П\text{-}113)$$

из выражения (П-111) можно получить:

$$m_{каск} = \frac{I_{с.з} + I_{nI} m_I - I_{nII} m_{II} + I_{nIII} m_{III}}{I_к}. \qquad (П\text{-}114)$$

*ПРИЛОЖЕНИЕ XI*

## СХЕМА ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 110—220 *кв* С КОМПЛЕКТАМИ ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ С ПУСКОМ ПО ТОКУ И ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПЕРЕВОДА ЗАЩИТЫ НА ОБХОДНОЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

**(рис. П-19, см. вклейку).**

Схема выполнена с использованием новой типовой панели поперечной дифференциальной токовой направленной защиты, разработанной институтом «Энергосетьпроект».

Схема в основном подобна приведенной на рис. 1 и имеет ту же область применения.

В отличие от схемы по рис. 1 в данной схеме предусматривается возможность перевода рассматриваемой защиты на обходной выключатель, а также ее использование на подстанции (станции), где предусмотрена параллельная работа систем шин не только через шиносоединительный выключатель, но и через последовательно соединенные обходной и шиносоединительный выключатели [1]. В последнем случае при ремонте выключателя одной из защищаемых линий и замене его «развилкой» из обходного и шиносоединительного выключателей не предусматривается перевод рассматриваемой защиты на обходной и шиносоединительный выключатели.

Следует отметить, что перевод рассматриваемой защиты на обходной выключатель может быть выполнен лишь при одинаковых коэффициентах трансформации трансформаторов тока защищаемой линии и в цепи обходного выключателя и только в случае, когда для питания этой защиты у трансформаторов тока в цепи обходного выключателя может быть выделена отдельная вторичная обмотка.

В режиме работы подстанции (станции), когда параллельная работа систем шин осуществляется через последовательно соединенные обходной и шиносоединительный выключатели, а защищаемые параллельные линии работают на разные системы шин, в цепи подведения «плюса» оперативного постоянного тока к защите должны включаться последовательно соединенные контакты *IVРП* и $IIIРП_2$ реле положения «включено» соответственно шиносоединительного и обходного выключателей (выполняется на ряде зажимов панели).

В режиме работы подстанции (станции), когда обходной выключатель не заменяет выключателей линий *Л-1* и *Л-2*, в испытательные блоки *1БИ, 2БИ, 5БИ, 6БИ, 8БИ, 10БИ, 12БИ* и *13БИ* должны быть вставлены рабочие крышки, а в испытательные блоки *3БИ, 4БИ, 7БИ, 9БИ* и *11БИ* — холостые крышки (при вставленной холостой крышке все контакты испытательного блока разомкнуты).

При замене выключателя *1В* линии *Л-1* обходным выключателем *3В* должна быть произведена взаимная замена рабочих и холостых крышек испытательных блоков соответственно *3БИ* и *12БИ, 6БИ* и *7БИ, 8БИ* и *9БИ* и снята рабочая крышка с испытательного блока *1БИ* (см. примечание 3 к рис. П-19).

При замене выключателя *2В* линии *Л-2* обходным выключателем *3В* должна быть произведена взаимная замена рабочих и холостых крышек испытательных блоков соответственно *4БИ* и *13БИ, 10БИ* и *11БИ* и снята рабочая крышка с испытательного блока *2БИ* (см. примечание 3 к рис. П-19).

Из рассмотрения данной схемы видно, что перевод поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий на обходной выключатель потребовал значительного усложнения схемы и эксплуатации защиты.

---

[1] Однако решением № 38 Научно-технического совета Минэнерго СССР, утвержденным министром 28 мая 1969 г. указание о применении последовательного соединения обходного и шиносоединительного выключателей исключается из норм технологического проектирования.

# СОДЕРЖАНИЕ


Предисловие . . . . . 2

Глава первая. **Схемы поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 35—220 *кв*** . . . . . 3
- А. Принципы выполнения схем защиты . . . . 3
- Б. Особенности выполнения защиты на линиях с ответвлениями . . . . . 6
- В. Особенности выполнения схем защиты по рис. 1—10 . . . . . 7

Глава вторая. **Расчет поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий без ответвлений** . . . . . 18
- А. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий между фазами с пуском по току для сети с большим током замыкания на землю (схемы по рис. 1, 3, 4 и 9) . . . . . 18
- Б. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий между фазами с пуском по току и напряжению для сети с большим током замыкания на землю (схемы по рис. 2 и 3) . . . . 20
- В. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий на землю нулевой последовательности (схемы по рис. 1—4 и 9) . . . . . 20
- Г. Расчет параметров срабатывания защиты по рис. 5 . . . . . 21
- Д. Расчет параметров срабатывания защиты для сети с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8) . . . . . 21
- Е. Проверка чувствительности защиты . . . . 24
- Ж. Определение зоны каскадного действия . . . 25
- З. Особенности расчета поперечной дифференциальной токовой защиты по рис. 10 . . . . . 26
- И. Пример расчета поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий 110 *кв* для сети с большим током замыкания на землю . . . . . 29

Глава третья. **Расчет поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий с ответвлениями** . . . . . 30
- А. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий между фазами с пуском по току для сети с большим током замыкания на землю (схемы по рис. 1, 3, 4, 6 и 9) . . . . . 30
- Б. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий между фазами с пуском по току и напряжению для сети с большим током замыкания на землю (схемы по рис. 2, 3 и 6) . . . 31
- В. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий на землю нулевой последовательности (схемы по рис. 1—4, 7 и 9) . . . . . 31
- Г. Расчет параметров срабатывания защиты по рис. 5 . . . . . 32
- Д. Расчет параметров срабатывания комплекта от замыканий на землю защиты по рис. 6 . . . 32
- Е. Расчет параметров срабатывания защиты для сети с малым током замыкания на землю (схема по рис. 8) . . . . . 32
- Ж. Проверка чувствительности защиты . . . . 33
- З. Определение зоны каскадного действия . . . 35

*Приложение I.* Расчетные условия отстройки комплекта от замыканий между фазами от токов неповрежденных фаз при каскадном отключении коротких замыканий . . . . . 35
- А. Расчет тока неповрежденной фазы при каскадном отключении замыкания между двумя фазами 35
- Б. Расчет токов неповрежденных фаз при каскадном отключении замыканий на землю одной и двух фаз . . . . . 36

*Приложение II.* Определение коэффициента β, входящего в выражение (13) для тока небаланса в реле тока комплекта от замыканий на землю и в устройстве фильтр-реле тока и мощности обратной последовательности комплекта от несимметричных повреждений . . . . . 37
- А. Определение коэффициента β при расчете тока небаланса нулевой последовательности для отстройки комплекта от замыканий на землю . . 37
- Б. Определение коэффициента β при расчете тока небаланса обратной последовательности для отстройки комплекта от несимметричных повреждений . . . . . 38

*Приложение III.* Расчетные условия для определения чувствительности реле тока пусковых органов поперечной дифференциальной направленной защиты . 39
- А. Выражение для определения точки одинаковой чувствительности реле тока в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии . . . . . 39
- Б. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами в режиме каскадного отключения . . . . . 40
- В. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от замыканий на землю в режиме каскадного отключения . . . . . 40
- Г. Чувствительность реле тока пускового органа комплекта от несимметричных коротких замыканий в режиме каскадного отключения . . . 41
- Д. Сравнение условий обеспечения чувствительности реле тока пускового органа комплекта от замыканий между фазами при включенных выключателях с обеих сторон поврежденной линии и в режиме каскадного отключения . . . . 41

*Приложение IV.* Оценка чувствительности реле направления мощности комплекта от замыканий на землю 43

*Приложение V.* Область применимости поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий с минимальным пуском напряжения . . 43

*Приложение VI.* Расчетные условия для определения чувствительности реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий на землю . . . . 44

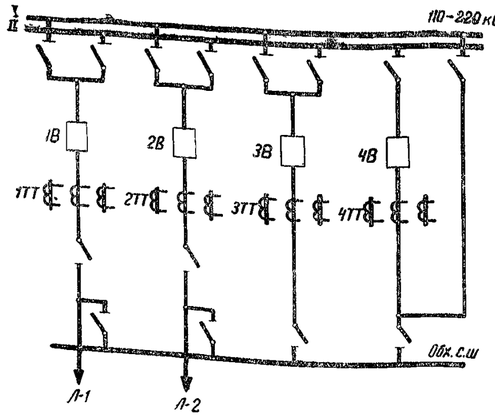
*Приложение VII.* Вывод соотношений между коэффициентом чувствительности при коротком замыкании в точке одинаковой чувствительности в режиме с включенными выключателями с обеих сторон поврежденной линии и значением зоны каскадного действия . . . . . 47

*Приложение VIII.* Определение расчетного режима для отстройки реле напряжения пускового органа комплекта от замыканий между фазами от повреждений за трансформатором промежуточной подстанции . . . . . 48

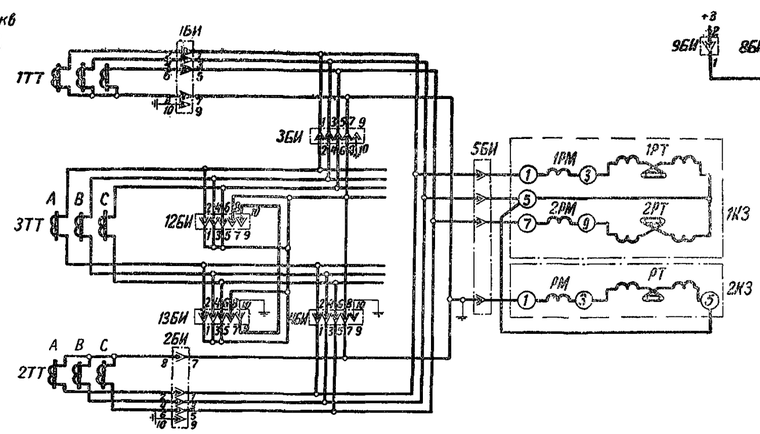
*Приложение IX.* Специальные схемы замещения параллельных линий с ответвлениями для анализа поперечных дифференциальных защит . . . . . 49
- А. Схемы замещения. Б. Определение точки одинаковой чувствительности. В. Определение зоны каскадного действия. Г. Определение параметров срабатывания защиты.

*Приложение X.* Вывод расчетного выражения для определения зоны каскадного действия поперечной дифференциальной направленной защиты на параллельных линиях с ответвлениями по рис. 26,*а* . 55

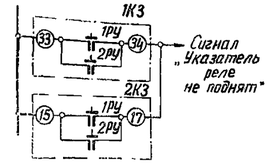
*Приложение XI.* Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности для случая перевода защиты на обходной выключатель (рис. П-19) . . . . 55



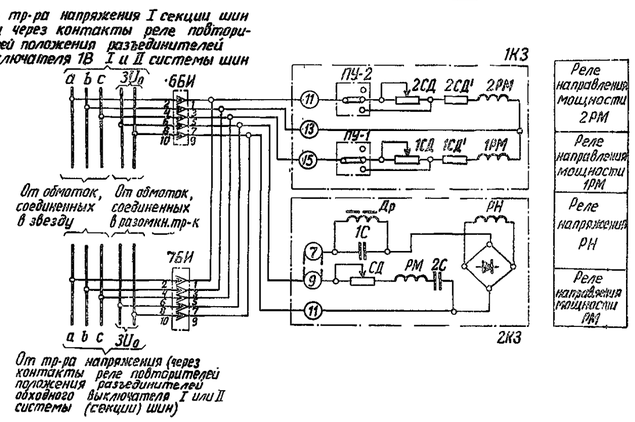

а) Поясняющая схема



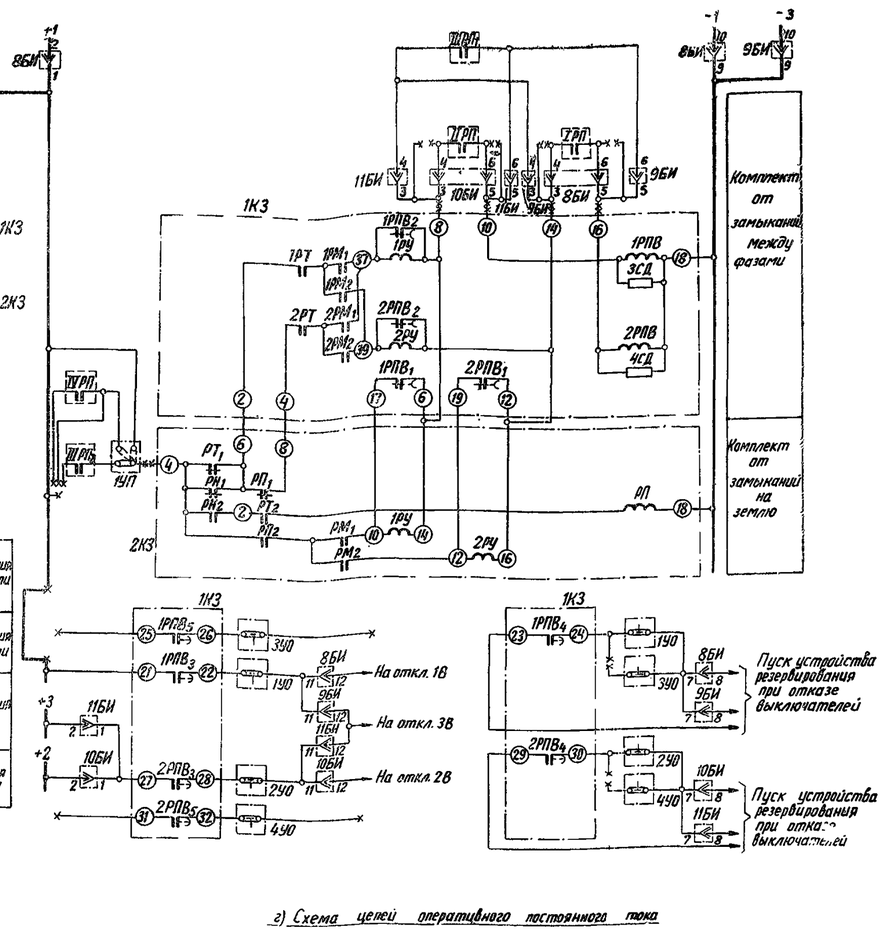

б) Схема цепей переменного тока



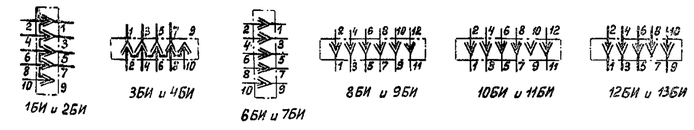

в) Схема цепей сигнализации



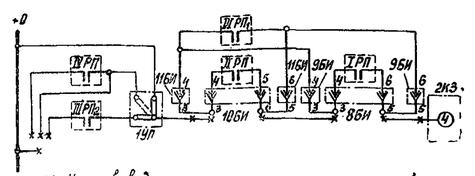

в) Схема цепей напряжения




г) Схема цепей оперативного постоянного тока




в) Положение контактов испытательных блоков при снятой крышке




ж) Цепи выведения защиты при отключении одной из линий для случая наличия УРОВ с удерживанием в его схеме сигнала от защиты на определенное время или отсутствия УРОВ.

Рис. П-19. Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности для случая перевода защиты на обходной выключатель.

*1В—4В* — выключатели; *1ТТ—4ТТ* — трансформаторы тока; *1ТН, 2ТН* — трансформаторы напряжения; *1КЗ* — комплект поперечной дифференциальной токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий типа КЗ-6 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *2КЗ* — комплект поперечной дифференциальной направленной защиты от замыканий на землю типа КЗ-7 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *1УП* — устройство переключающее; *1УО—4УО* — устройства отключающие; *1БИ—4БИ, 6БИ—13БИ* — блоки испытательные типа БИ-6; *5БИ* — блок испытательный типа БИ-4.

Примечания: 1. *1РП, 11РП, 111РП, 1VРП* — контакты реле положения «включено» выключателей соответственно *1В, 2В, 3В* и *4В*; *Х* — зажимы панели.

2. В нормальном режиме работы в испытательные блоки *1БИ, 2БИ, 5БИ, 6БИ, 8БИ, 10БИ, 12БИ* и *13БИ* должны быть вставлены рабочие крышки, а в *3БИ, 4БИ, 7БИ, 9БИ* и *11БИ* — холостые крышки (при вставленной холостой крышке все контакты испытательного блока разомкнуты).

Испытательные блоки *12БИ* и *13БИ* располагаются вне панели поперечной защиты.

Положение контактов испытательных блоков при снятой крышке показано на рис. *в*).

3. При замене выключателя *1В* (*2В*) обходным выключателем *3В* должны быть произведены следующие операции:

снята холостая крышка с испытательного блока *3БИ* (*4БИ*);

снята рабочая крышка с испытательного блока *12БИ* (*13БИ*);

вставлена холостая крышка в испытательный блок *12БИ* (*13БИ*);

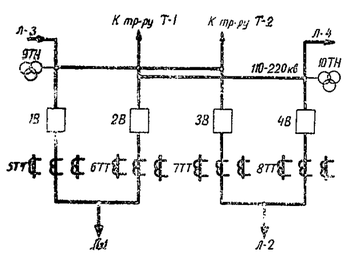
вставлена рабочая крышка в испытательный блок *3БИ* (*4БИ*);

снята рабочая крышка с испытательного блока *1БИ* (*2БИ*);

произведена взаимная замена рабочих и холостых крышек испытательных блоков соответственно *6БИ* и *7БИ*, *8БИ* и *9БИ* (при замене выключателя *1В* обходным выключателем) или *10БИ* и *11БИ* (при замене выключателя *2В* обходным выключателем).

4. Цепи выведения защиты при отключении одной из линий выполняются: при наличии устройства резервирования при отказе выключателей без удерживания в его цепях сигнала от защиты на определенное время в соответствии с приведенным на схеме рис. *г*; при наличии устройства резервирования при отказе выключателей с удерживанием в его цепях сигнала от защиты на определенное время или при отсутствии этого устройства — по рис. *ж* (при этом между зажимами *8* и *10* и *14* и *16* комплекта *1КЗ* устанавливаются перемычки).

Зак. 2249




а) Поясняющая схема

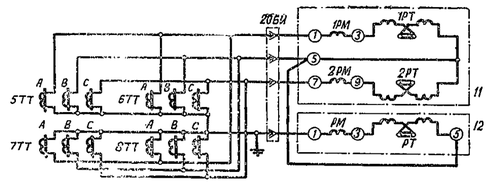
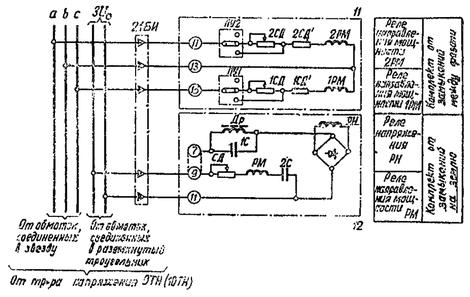
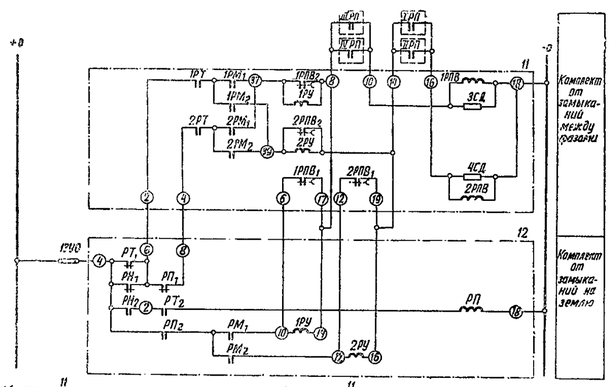



Схема цепей переменного тока



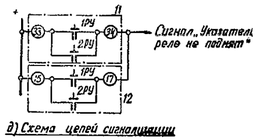

б) Схема цепей напряжения



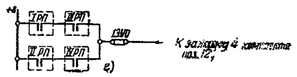




г) Схема цепей оперативного постоянного тока




д) Схема цепей сигнализации




е)

**Рис. 4.** Схема поперечной дифференциальной направленной защиты параллельных линий 110—220 *кв* с комплектами от замыканий между фазами с пуском по току и от замыканий на землю нулевой последовательности для случая соединения шин по схеме четырехугольника.

*1В—4В* — выключатели; *5ТТ—8ТТ* — трансформаторы тока; *9ТН*, *10ТН* — трансформаторы напряжения; *11* — комплект поперечной дифференциальной токовой направленной защиты от междуфазных коротких замыканий типа КЗ-6 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *12* — комплект поперечной дифференциальной направленной защиты от замыканий на землю типа КЗ-7 (см. подрисуночную надпись к рис. 1); *13УО—19УО* — устройства отключающие; *20БИ* — блок испытательный типа БИ-4; *21БИ* — блок испытательный типа БИ-6.

Примечания: 1. *1РП*, *1IРП*, *1IIРП*, *1VРП* — контакты реле положения «включено» выключателей *1В*, *2В*, *3В*, *4В*; в их цепях должны быть предусмотрены разъемные зажимы.

2. На рис. *е* приведена схема выведения защиты при отключении одной из линий в случае отсутствия устройства резервирования при отказе выключателей или при наличии этого устройства, когда в его цепях предусматривается удерживание сигнала от защиты на определенное время; при этом зажимы *8* и *10*, *14* и *16* комплекта поз. *11* должны быть соответственно закорочены перемычками.

gost.e-ecolog.ru