РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110–220 кв

2

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

gost.e-ecolog.ru

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

ВЫПУСК 2

СТУПЕНЧАТАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЛИНИЙ 110—220 *кв*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В данном выпуске Руководящих указаний рассмотрены токовые направленные и ненаправленные защиты нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой выдержки времени, устанавливаемые на линиях 110—220 *кв* с двусторонним питанием в сетях с большим током замыкания на землю.

В работе даны типовые схемы защит нулевой последовательности и указания по расчету этих защит. Для иллюстрации способов расчета защит приведен ряд примеров выбора параметров этих защит и оценки их действия для сетей 110—220 *кв*.

В окончательной редакции учтены отзывы энергосистем и проектных организаций, а также решения, принятые на совещании представителей ряда энергосистем и других организаций, созванном в мае 1959 г. при ТУ МСЭС (главный специалист-электрик П. И. Устинов) по вопросам защиты линий 110—220 *кв* от замыканий на землю.

Данный выпуск Руководящих указаний разработан институтом Теплоэлектропроект (гл. электрик — А. Б. Крикунчик), группой типовых работ Отдела релейной защиты, автоматики, телемеханики и устойчивости (ОРЗАТУ): гл. инженер проекта А. Б. Чернин, руководитель группы А. К. Мержанов, инженер Н. В. Мурашко, под общим руководством А. М. Федосеева.

В процессе разработки данного выпуска Руководящих указаний в обсуждении и принятии решений принимали участие работники сектора релейной защиты и автоматики отдела (начальник сектора В. М. Ермоленко, гл. инженер проекта С. Я. Петров гл. инженер проекта Н. Е. Рибель и руководитель группы М. М. Богина).

В работе использованы материалы Ленинградского отделения института Гидроэнергопроект (сектор релейной защиты и автоматики, зам. нач. сектора П. А. Фомин).

Много ценных соображений и рекомендаций по Руководящим указаниям было получено от отдельных работников ряда организаций (Е. Д. Зейлидзон — Союзглавэнерго, Н. В. Виноградов — Мосэнерго, О. Л. Ривкин — Ленэнерго, М. И. Царев — ВНИИЭ, Б. А. Хомутов—Новосибирскэнерго, В. А. Сатаров и Н. С. Кобякова — Мосэнергопроект, В. И. Дорофеев — Днепроэнерго, Е. С. Габа — Донбассэнерго, В. Н. Блинова — ОДУ Урала и другие).

6П2.13
Р84

Руководящие указания по релейной защите. Вып. 2. Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—220 *кв*. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
64 с. с черт.

6П2.13

Редактор *А. К. Мержанов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 20/XII 1960 г. Бумага 84×108¹/₁₆ Подписано к печати 3/V 1961 г.
Т-05907 Тираж 25 000 экз. Цена 44 коп. 6,56 печ. л. Уч. изд. л. 8,8 Зак. 2633

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последнее издание Руководящих указаний по релейной защите (части II и III — типовые примеры схем и расчетов), выпущенное в 1948 г. в качестве дополнения к директивной части Руководящих указаний 1945 г., в настоящее время устарело и не соответствует действующим директивным материалам по релейной защите (раздел III «Защита и автоматика» Правил устройства электроустановок 1957 г., решения, эксплуатационные и противоаварийные циркуляры).

Практика проектирования и эксплуатации релейной защиты в последние годы показала, что содержащиеся в Правилах устройства электроустановок общие указания недостаточны для унификации и распространения наиболее передовых решений. В частности, отсутствие конкретных примеров рекомендуемых схем приводило к чрезмерному и необоснованному разнообразию исполнения устройств релейной защиты, в том числе и неоправданно сложных.

Руководящие указания по релейной защите подготовлены Институтом Теплоэлектропроект и утверждены Главэнергопроектом Министерства строительства электростанций и Главным энергетическим управлением при Госплане СССР (Союзглавэнерго). Они будут издаваться отдельными выпусками по мере их подготовки к печати.

Настоящие Руководящие указания в основном соответствуют разделу III «Защита и автоматика» Правил устройства электроустановок 1957 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 Правила и директивные материалы.

Руководящие указания являются рекомендуемыми материалами, которым должны следовать как проектные, так и эксплуатирующие 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 тех случаях, когда это обосновано конкретными местными условиями, а также для ранее запроектированных, уже монтируемых или действующих устройств, если эти отступления не ведут к серьезным эксплуатационным недостаткам и не противоречат принципиальному направлению Руководящих указаний.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СХЕМЫ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЛИНИЙ 110—220 *кв*

А. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1. В настоящем разделе рассмотрены типовые схемы ступенчатых токовых защит нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—220 *кв* в сетях с большим током замыкания на землю (рис. 1—4).

2. Схема защиты, приведенная на рис. 1, дана для случая выполнения защиты с трехступенчатой, на рис. 2 — с двухступенчатой и на рис. 3 — с четырехступенчатой характеристиками выдержки времени (последняя схема—для параллельных линий с включением четвертой ступени защиты на сумму токов этих линий).

На рис. 4 приведена предварительная схема комплектного реле защиты нулевой последовательности, намеченного к выпуску Чебоксарским электроаппаратным заводом, которое может быть использовано для выполнения защит с трех- и двухступенчатыми характеристиками выдержки времени (рис. 1 и 2).

Б. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СХЕМ ЗАЩИТЫ

1. В схемах, приведенных на рис. 1—4, все ступени защит, кроме последней, являются токовыми отсечками, ток срабатывания которых отстроен от тока замыкания на землю в фиксированной точке, а последняя ступень, выполняющая также функцию резервирования защиты предыдущего участка, — токовой защитой с током срабатывания, отстроенным, как правило, от токов небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних замыканиях между фазами.

2. Схемы предусмотрены для выполнения защит от замыканий на землю, используемых в качестве как основных, так и резервных для линий с двусторонним питанием. При использовании защиты в качестве основной требования к быстродействию и чувствительности ее при повреждении на защищаемой линии в ряде случаев должны быть более высокими, чем при использовании защиты в качестве резервной.

Вопросы защиты линий с односторонним питанием, учитывающие неполнофазный режим работы этих линий, в данной работе не рассматриваются.

3. В схемах все ступени защиты приняты направленными в предположении, что это необходимо для всех ступеней по условию согласования характеристик защит. Для отдельных ступеней защиты орган направления мощности может быть исключен, если по условию селективности необходимость в нем отсутствует или он не может быть использован по условию чувствительности.

В качестве органа направления мощности приняты реле типов РБМ-178 и ИМБ-178 (возможно также применение реле типа РБМ-177, намечаемого к выпуску Чебоксарским электроаппаратным заводом), реагирующие на мощность $S_р = U_р I_р \sin(\varphi_р + 20°)$.

В схеме на рис. 2 в качестве варианта показано применение реле направления мощности с токовой поляризацией.

Учитывая относительно большое потребление цепей напряжения реле типа РБМ-178 и большую сложность его регулировки по сравнению с реле типа ИМБ-178, в качестве органа направления мощности целесообразно применять реле типа ИМБ-178, если оно удовлетворяет требованию чувствительности (п. IIА-20)[1].

Принципиальная схема присоединения обмоток реле направления мощности к трансформаторам тока и напряжения приведена на рис. 5. Пояснения о контроле цепей напряжения $3U_0$, показанном в этой схеме, даны в п. IБ-17.

4. Предотвращение неправильного действия ступени защиты без выдержки времени при работе разрядников достигается наличием выходных промежуточных реле, имеющих время срабатывания не менее 70 *мсек* (РП-251).

5. Предполагается, что токи срабатывания ступеней защит без выдержки времени отстроены от токов нулевой последовательности, возникающих при неодновременном включении фаз выключателей (п. IIА-8).

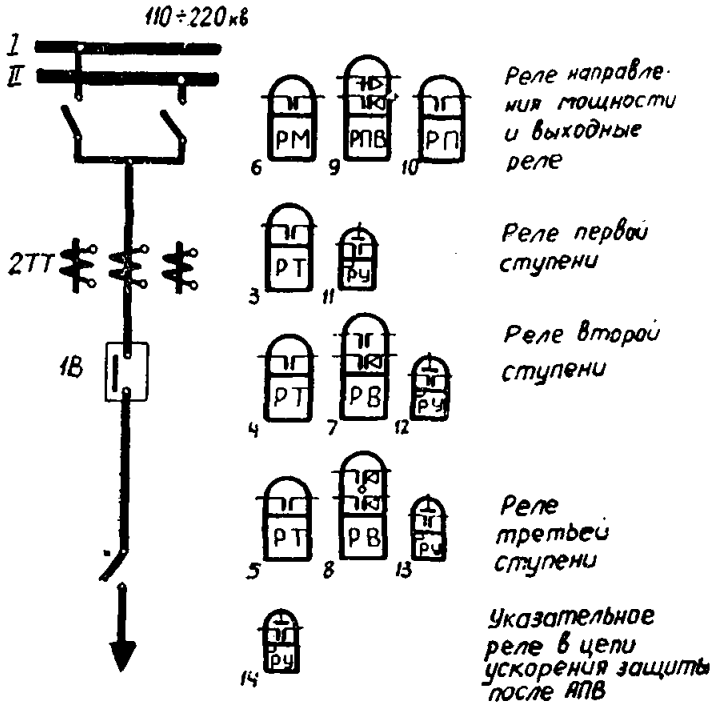
6. Защиту от замыканий на землю, как правило, следует выполнять трехступенчатой (рис. 1 и 4). В отдельных случаях может оказаться целесообразным применение четырехступенчатой защиты с третьей ступенью, ток срабатывания и выдержка времени которой определяются условием согласования со второй ступенью защиты предыдущего участка. Применение такой защиты может потребоваться для обеспечения отключения повреждения на защищаемой линии с минимально возможной выдержкой времени (например, при использовании рассматриваемой защиты в качестве основной, по требованию устойчивости параллельной работы и пр.), в связи с чем предполагается, что вторая ступень защиты должна быть выполнена с наименьшей выдержкой времени $t \approx 0{,}5$ *сек*. При этом вопрос о целесообразности применения четырехступенчатой защиты возникает при следующих условиях:

а) когда вторая ступень защиты с выдержкой времени $t \approx 0{,}5$ *сек* не удовлетворяет требованию чувствительности даже в режиме каскадного отключения повреждения на защищаемой линии, а время отключения такого повреждения с выдержкой времени третьей ступени при выполнении защиты трехступенчатой чрезмерно велико;

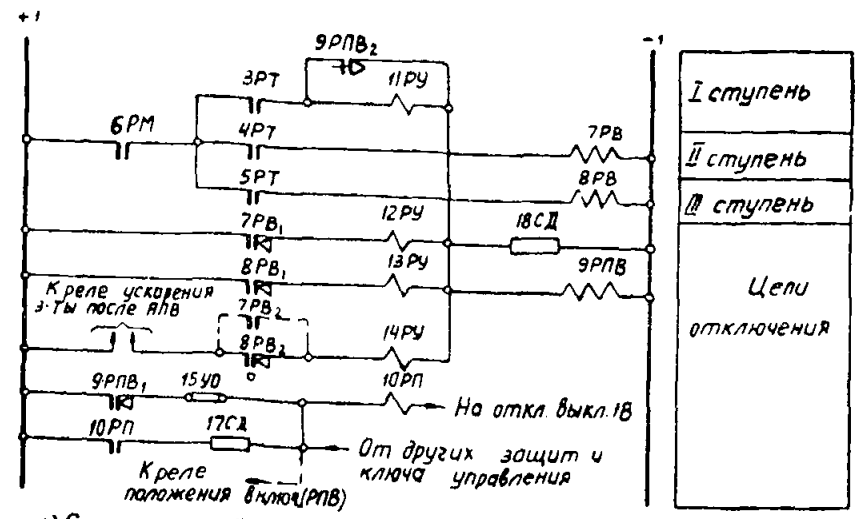
б) когда на подстанции противоположного конца линии отсутствует надежно действующая специальная защита шин и вторая ступень защиты линии с $t \approx 0{,}5$ *сек* не удовлетворяет требованию чувствительности при повреждении на этих шинах, а время отключения повреждения с выдержкой времени третьей ступени при выполнении защиты трехступенчатой чрезмерно велико;

в) на параллельных линиях, когда для обеспечения чувствительности защиты к замыканиям в зоне резервирования необходимо включить последнюю ступень токовой защиты нулевой последовательности на сумму токов этих линий, а вторая ступень защиты с выдержкой времени $t \approx 0{,}5$ *сек* не удовлетворяет тре-

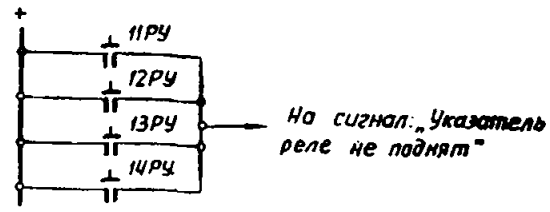
[1] Необходимо отметить, что в эксплуатации в некоторых случаях выявлена вибрация контактов реле типа РБМ-178 при токах, превышающих $3I_{ном}$.



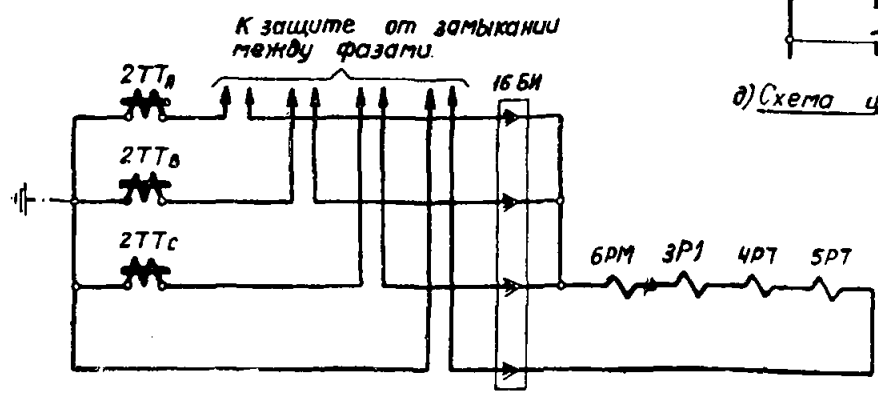
а) Пояснящая схема.



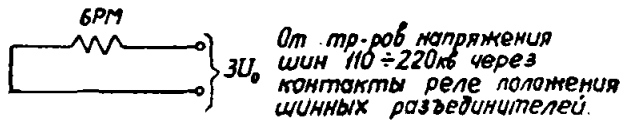
г) Схема цепей оперативного тока



д) Схема цепеи сигнализации



б) Схема цепей переменного тока



в) Схема цепей напряжения.

Рис. 1. Трехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности.

бованию чувствительности в режиме каскадного отключения повреждения на защищаемой линии (см. раздел I В, описание схемы рис. 3).

г) когда это облегчает согласование характеристик защит; так, например, на рис. 6 четырехступенчатая характеристика защиты *3* позволяет снизить выдержку времени третьей ступени защиты *1*.

В дальнейшем там, где это не оговорено особо, предполагается, что защита выполнена трехступенчатой.

7. Схемы трехступенчатой и четырехступенчатой защит (рис. 1, 3 и 4) предусматривают использование отдельных реле времени для второй и третьей ступеней.

Схемы с одним общим для этих обеих ступеней защиты реле времени (с временно замыкающим контактом), запускаемым токовым реле третьей ступени, могут иметь ограниченное применение вследствие того, что при этом в ряде случаев возможно неправильное действие защит. Последнее обусловлено тем, что в схе-

Обозначение	Наименование	Тип
1В	Выключатель	—
2ТТ	Трансформатор тока	—
3РТ—5РТ	Реле тока	ЭТ-521
6РМ	Реле направления мощности . .	РБМ-178 (или ИМБ-178)
7РВ	Реле времени	ЭВ-124
8РВ	Реле времени	ЭВ-132
9РПВ	Реле промежуточное	РП-251
10РП	Реле промежуточное	РП-232
11РУ—14РУ	Реле указательное сериеное .	ЭС-21/0,025
15УО	Устройство отключающее . . .	НКР-2
16БИ	Блок испытательный	БИ-4
17СД	Сопротивление добавочное 1 *ом*	ПЭ-50
18СД	Сопротивление добавочное 4 000 *ом*	ПЭ-25

Примечания: 1. В качестве реле *10РП* используется реле блокировки от многократных включений.

2. В цепи ускорения защиты после АПВ предусмотрено использование временно замыкающего контакта реле *8РВ* в связи с предположением наличия пофазного управления приводами выключателя.

3. В качестве варианта в схеме предусмотрена возможность выполнения ускорения защиты после АПВ с использованием контакта без замедления реле времени второй ступени. При этом вместо контакта *2* реле *8РВ* используется контакт *2* реле *7РВ*.

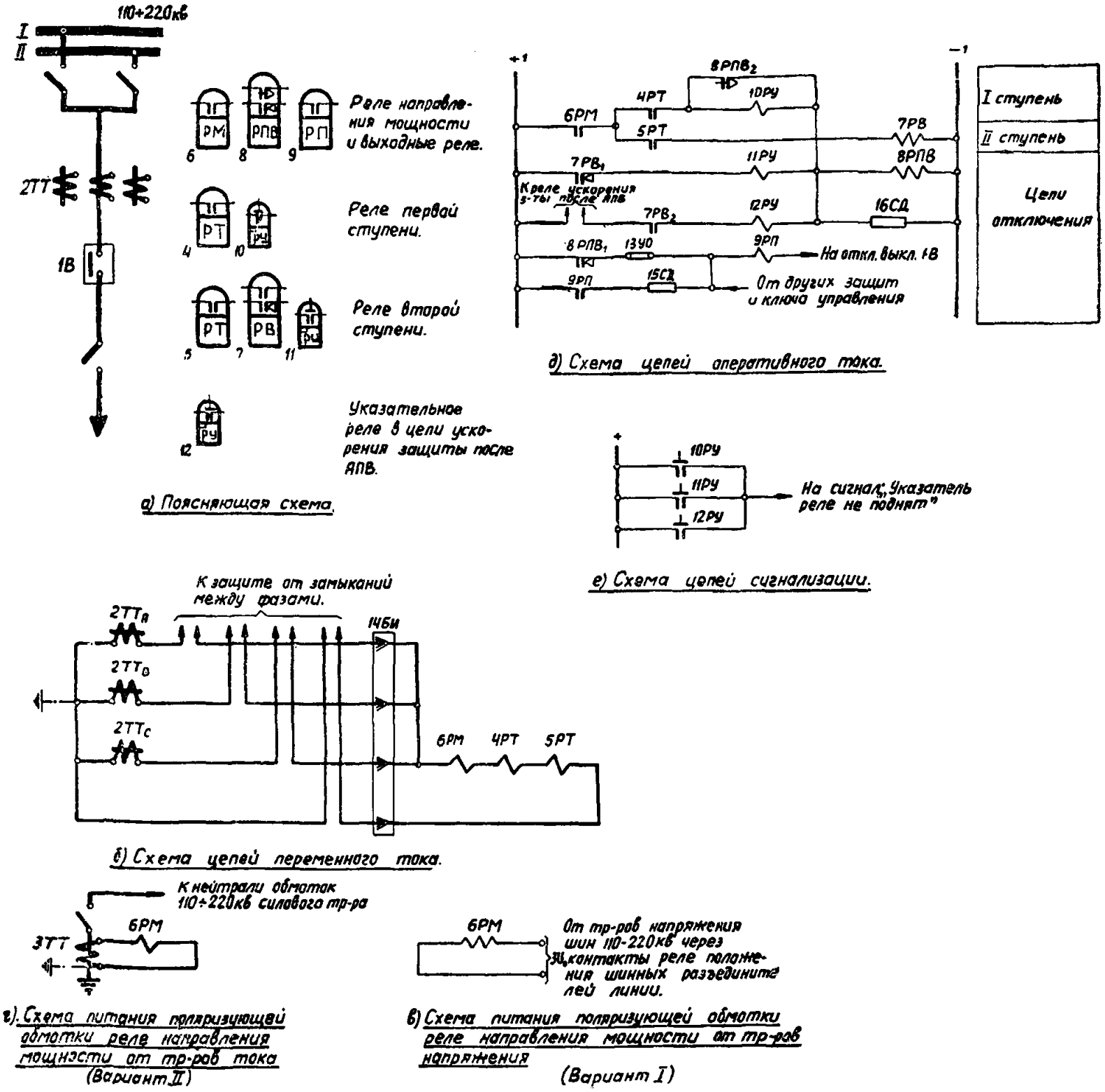


Рис. 2. Двухступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности.

1В	Выключатель	—	*10РУ—12РУ*	Реле указательное сериесное . .	ЭС-21/0,025
2ТТ, 3ТТ	Трансформатор тока	—	*13УО*	Устройство отключающее . . .	НКР 2
4РТ, 5РТ	Реле тока	ЭТ-521	*14БИ*	Блок испытательный	БИ-4
6РМ	Реле направления мощности . .	—	*15СД*	Сопротивление добавочное 1 *ом*	ПЭ-50
7РВ	Реле времени	ЭВ-124	*16СД*	Сопротивление добавочное 4 000 *ом*	ПЭ-25
8РПВ	Реле промежуточное	РП-251			
9РП	Реле промежуточное	РП-232			

Примечания: 1. В качестве реле *9РП* используется реле блокировки от многократных включений.

2. Спецификация дана для случая использования реле направления мощности с поляризующей обмоткой тока (по варианту II). При применении реле направления мощности с поляризующей обмоткой напряжения по варианту I трансформатор тока *3ТТ* должен быть исключен из спецификации, а реле *6РМ* принято типа РБМ-178 (или ИМБ-178).

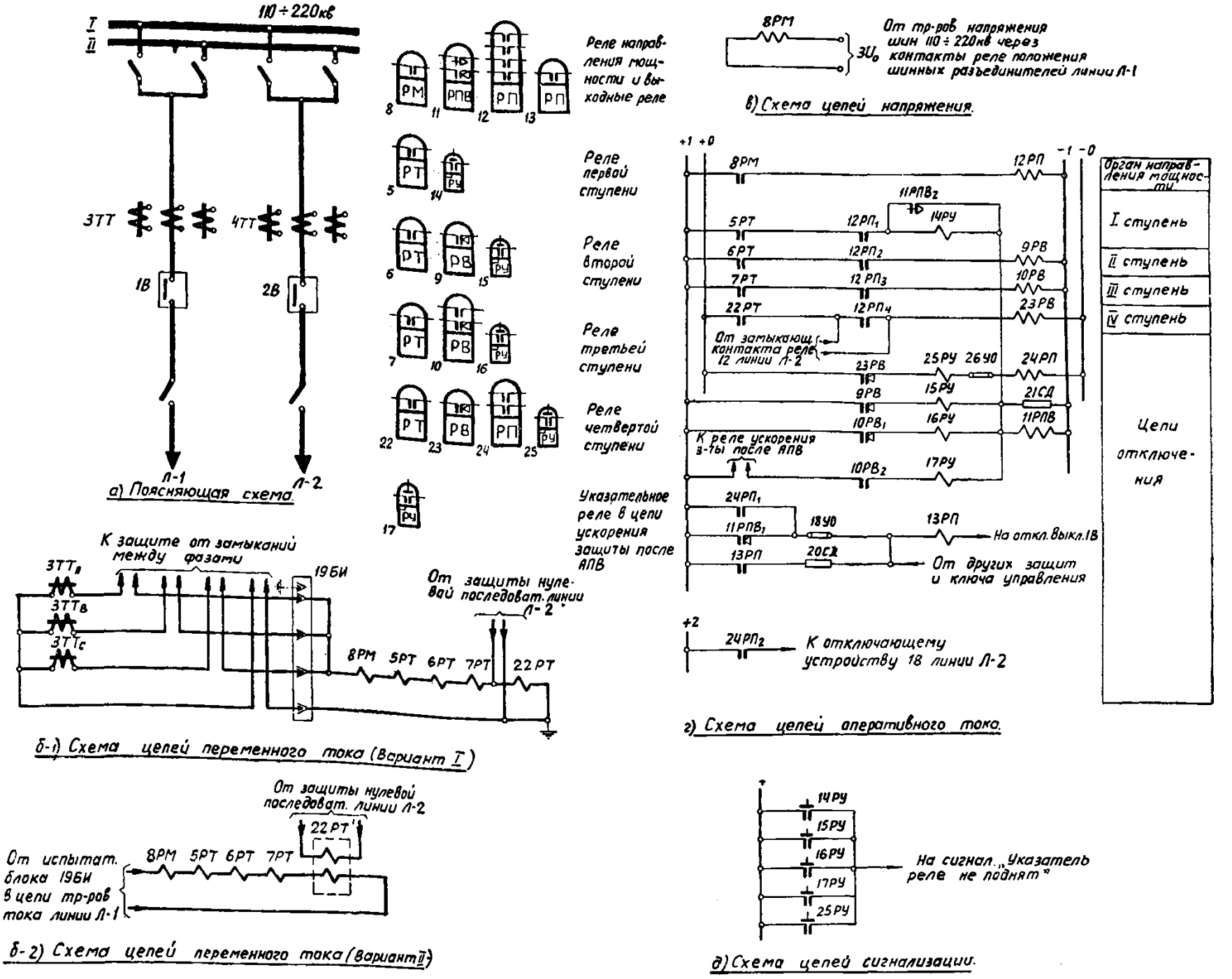


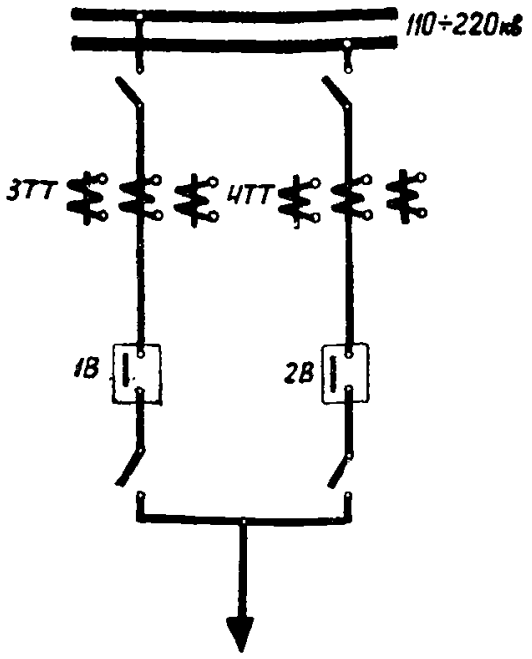
Рис. 3. Четырехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности параллельных линий с включением четвертой ступени защиты на сумму токов обеих линий.

1В, 2В	Выключатель	—	*18УО*	Устройство отключающее	НКР-2
3ТТ, 4ТТ	Трансформатор тока	—	*19БИ*	Блок испытательный	БИ-6
5РТ—7РТ	Реле тока	ЭТ-521	*20СД*	Сопротивление добавочное 1 *ом*	ПЭ-59
8РМ	Реле направления мощности . .	РБМ-178 (или ИМБ-178)	*21СД*	Сопротивление добавочное 4 000 *ом*	ПЭ-25
9РВ	Реле времени	ЭВ-114	*22РТ*	Реле тока	ЭТ-521
10РВ	Реле времени	ЭВ-124	*23РВ*	Реле времени	ЭВ-134
11РПВ	Реле промежуточное	РП-251	*24РП*	Реле промежуточное	РП-23
12РП	Реле промежуточное	РП-23	*25РУ*	Реле указательное сериесное . .	ЭС-21/0,015
13РП	Реле промежуточное	РП-232	*26УО*	Устройство отключающее	НКР-2
14РУ—17РУ	Реле указательное сериесное . .	ЭС-21/0,025			

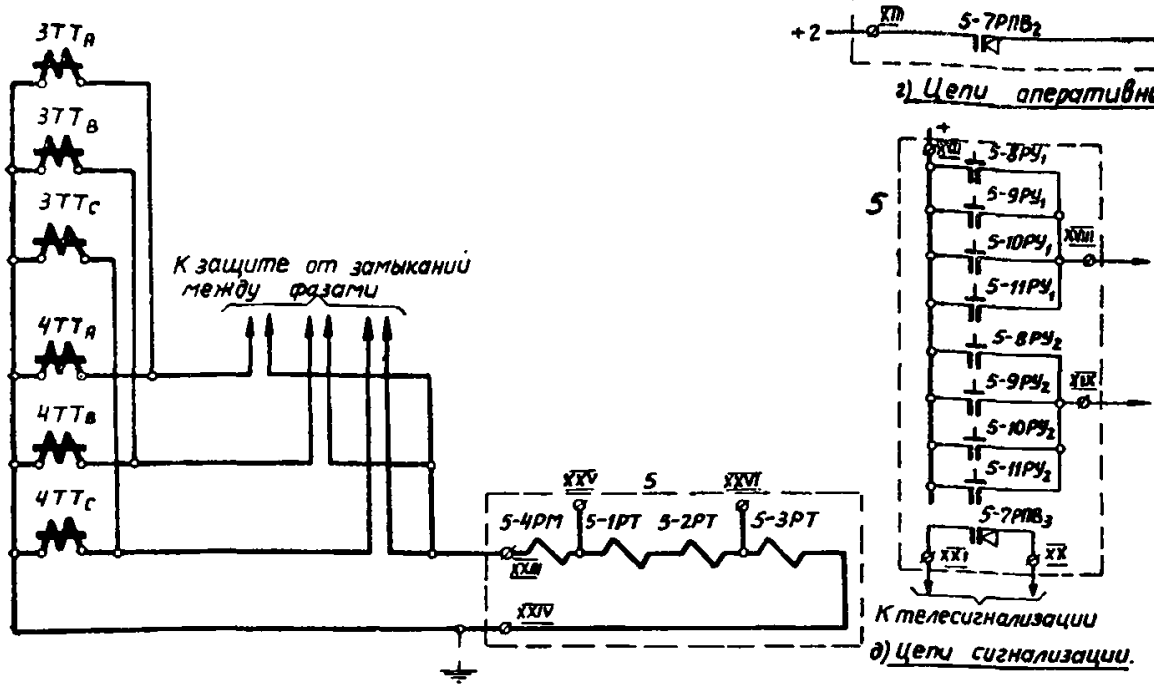
Примечания: 1. В качестве реле *13РП* используется реле блокировки от многократных включений.

2. На чертеже даны схема и спецификация индивидуальной защиты линии *Л-1* (№ 5—21) и суммарной защиты линий *Л-1* и *Л-2* по вар. I (№ 22—26). Выполнение индивидуальной защиты линии *Л-2* аналогично приведенной защите линии *Л-1*.

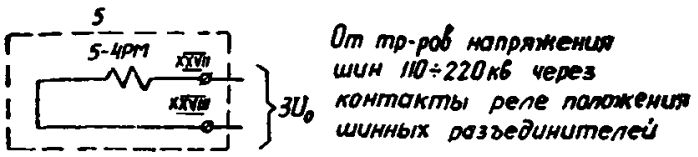
3. В схеме рис. б-2 реле тока *22РТ'* предполагается выполненным с двумя обмотками, каждая из которых состоит из двух секций, расположенных на обоих полюсах реле.



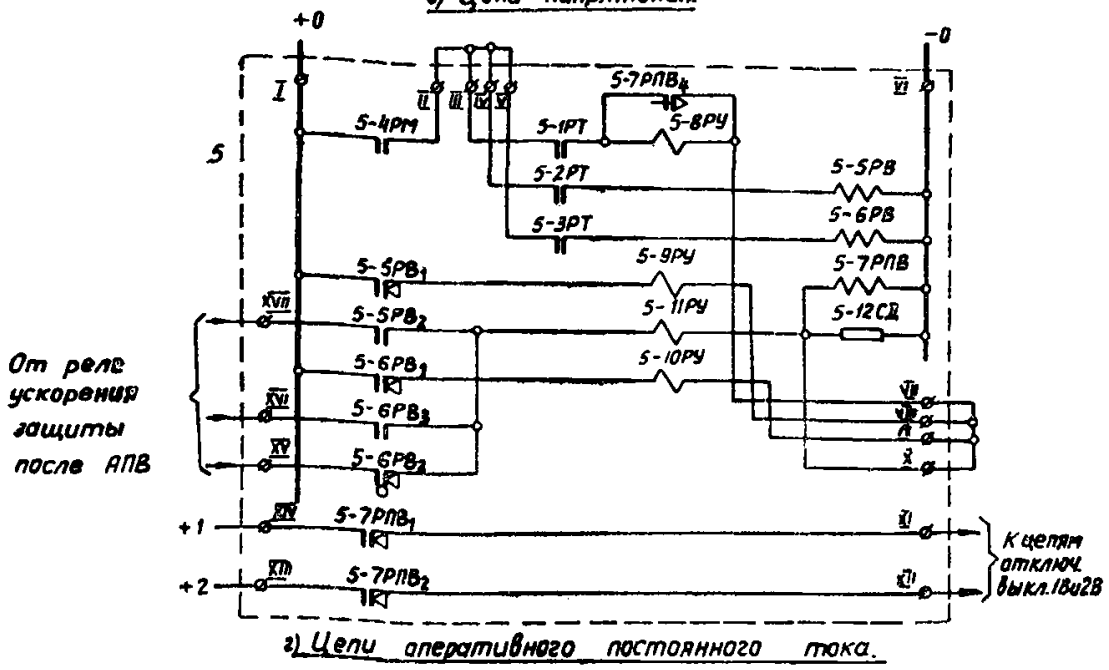
а) Поясняющая схема



б) Цепи переменного тока.



в) Цепи напряжения.



г) Цепи оперативного постоянного тока.

д) Цепи сигнализации.

Рис. 4. Трехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности при использовании комплектного реле (предварительная схема)

1В, 2В	Выключатель	—
3ТТ, 4ТТ	Трансформатор тока	—
5-1РТ—5-3РТ	Реле тока	ЭТ-521
5-4РМ	Реле направления мощности . .	РБМ-178 (или ИМБ-178)
5-5РВ	Реле времени	ЭВ-124
5-6РВ	Реле времени	ЭВ-132
5-7РПВ	Реле промежуточное	РП-251
5-8РУ— 5-11РУ	Реле указательное сериесное . .	ЭС-21/0,025 (или ЭС-21/0,05)
5-12СД	Сопротивление добавочное 4 000 *ом* (*или* 1 000 *ом*)	ПЭ-25

Примечания: 1. Знаком ⌀ обозначены зажимы комплектного реле. Номера зажимов даны условно.

2. Предполагается, что в реле времени *5-5РВ* и *5-6РВ* предусмотрены искрогасительные контуры, включенные параллельно обмоткам.

3. Испытательные блоки в схеме не показаны.

4. Параметры указательных реле *5-8РУ—5-11РУ* и добавочного сопротивления *5-12СД* даны в спецификации для напряжения оперативного постоянного тока 220 *в*; для напряжения оперативного постоянного тока 110 *в* соответствующие данные приведены в скобках.

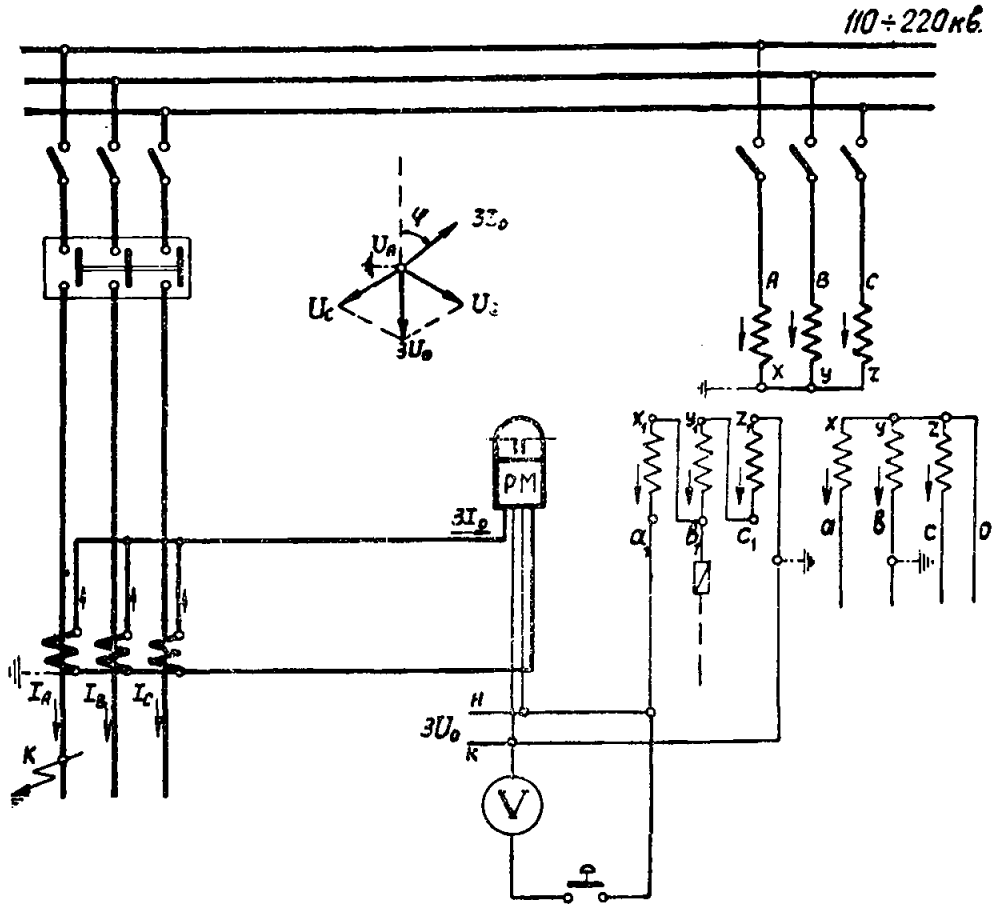


Рис. 5. Принципиальная схема присоединения реле направления мощности нулевой последовательности к трансформаторам тока и напряжения и схема периодического контроля цепей напряжения.

Примечания: 1. Штриховой линией показан испытательный провод фазы b_1, на который переключается шинка *н* для снятия векторной диаграммы при проверке реле направления мощности.

2. Однополярные зажимы первичной и вторичной обмоток трансформаторов тока показаны с одной стороны.

3. Однополярные концы обмоток тока и напряжения реле направления мощности расположены рядом.

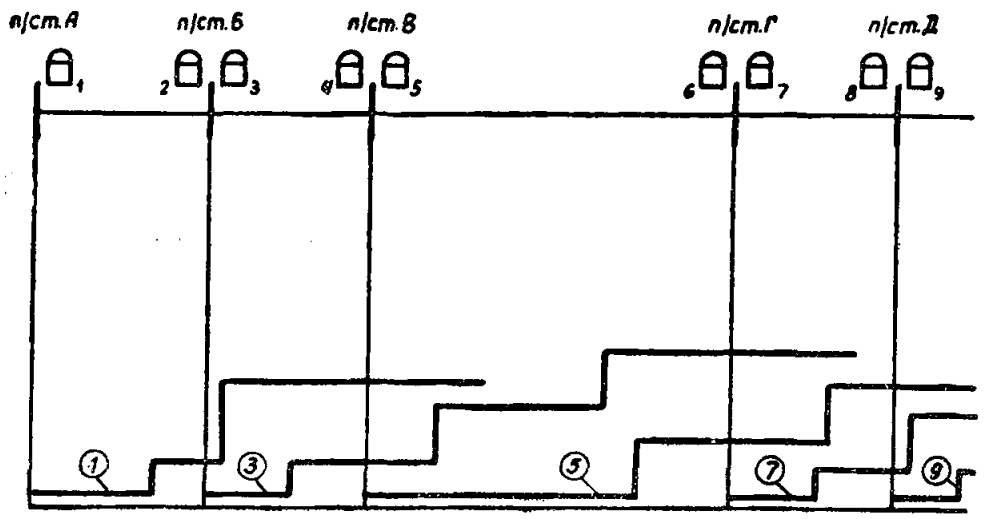


Рис. 6. Пример согласования характеристик токовых защит.

ме с общим реле времени отсчет выдержки времени второй ступени начинается с момента срабатывания токового реле третьей ступени защиты.

Указанное неправильное действие защит может иметь место в сложных сетях (кольцевые сети, сети с параллельными линиями) при каскадных отключениях замыканий на землю. Например, в схеме рис. 7,*а* при каскадном отключении повреждения на линии *п/ст. Б — п/ст. В*, когда после отключения выключателя *4* ток повреждения в месте включения защит *1* и *3* возрастает, возможно неселективное отключение линии *п/ст. А—п/ст. Б* от действия второй ступени защиты *1* в следующих случаях:

а) при выборе тока срабатывания и выдержки времени второй ступени защиты *1* по условию согласования с первой ступенью защиты *3* — если в момент возникновения замыкания в точке K_1 (рис. 7,*б*) сработают токовые реле второй ступени защиты *3* и третьей ступени защиты *1*, а после отключения выключателя *4* сработают токовые реле первой ступени защиты *3* и второй ступени защиты *1*; при этом время, оставшееся до замыкания временно замыкающего контакта реле времени защиты *1*, будет меньше ступени выдержки времени Δt;

б) при выборе тока срабатывания и выдержки времени второй ступени защиты *1* по условию согласования со второй ступенью защиты *3*—если в момент возникновения замыкания в точке K_2 через переходное сопротивление (рис. 7,*в*) сработали токовые реле третьей ступени защит *1* и *3*, а после отключения выключателя *4* сработают токовые реле вторых ступеней защит *3* и *1*, причем это произойдет после размыкания временно замыкающего контакта реле времени защиты *3*, но до замыкания такого же контакта реле времени защиты *1*.

Указанные случаи неправильной работы защиты могут иногда иметь место и в сетях радиальной конфигурации при увеличении тока повреждения в месте установки защиты, например при переходе одного вида повреждения в другой или в результате уменьшения величины переходного сопротивления (в месте повреждения) в процессе короткого замыкания.

8. В схемах предусматривается ускорение действия защиты после АПВ. Это ускорение может быть предусмотрено во второй (рис. 2 и вариант рис. 1) или в третьей (рис. 1 и 3) ступенях защиты. Ступень защиты, имеющая ускорение после АПВ, должна удовлетворять требованию чувствительности в режиме одностороннего включения поврежденной линии и быть отстроенной по току срабатывания или выдержке времени от режима неодновременного включения фаз выключателя (п. IIА-5).

При выключателе с трехфазным приводом необходимая отстройка ускоряемой ступени защиты практически обеспечивается по времени имеющимся в защите выходным промежуточным реле с временем срабатывания 70—100 *мсек* (рис. 1—4). В этом случае ускорение защиты принципиально может быть выполнено в третьей ступени, однако в целях обеспечения большей селективности следует предусматривать ускорение во второй ступени защиты, если эта ступень удовлетворяет указанному выше требованию чувствительности. Применение ускорения во второй ступени защиты, а не в третьей, желательно также и для предупрежде-

ния неправильного действия указательного реле в цепи ускорения защиты при включении линии на междуфазное короткое замыкание. Это обусловлено тем, что ток срабатывания третьей ступени защиты, как правило, не отстроен от токов небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при междуфазных замыканиях на защищаемой линии (п. IIА-4) вблизи места установки защиты.

При выключателе с пофазным приводом, когда разновременность включения его отдельных фаз может превысить время срабатывания выходного промежуточного реле, требуемая отстройка ускоряемой ступени защиты от упомянутого неполнофазного режима выполняется либо по току, либо по времени (0,2—0,3 *сек*, например с помощью временно замыкающего контакта реле времени, как это показано на рис. 1). При этом возможны следующие случаи:

а) требованию чувствительности удовлетворяет только третья ступень защиты — ускорение выполняется в третьей ступени защиты с отстройкой ее по времени от неполнофазного режима;

б) требованию чувствительности удовлетворяет вторая ступень защиты при одновременном соблюдении условия отстройки ее по току срабатывания от неполнофазного режима — ускорение выполняется во второй ступени защиты;

в) требованию чувствительности удовлетворяет вторая ступень защиты только при условии, что она не отстраивается по току срабатывания от неполнофазного режима — ускорение выполняется во второй ступени защиты с отстройкой ее по времени от неполнофазного режима; следует отметить, что при выдержке времени этой ступени защиты не больше 0,5 *сек* применение ускорения в данной защите нецелесообразно, поскольку различие времен действия защиты с ускорением и без ускорения будет незначительно.

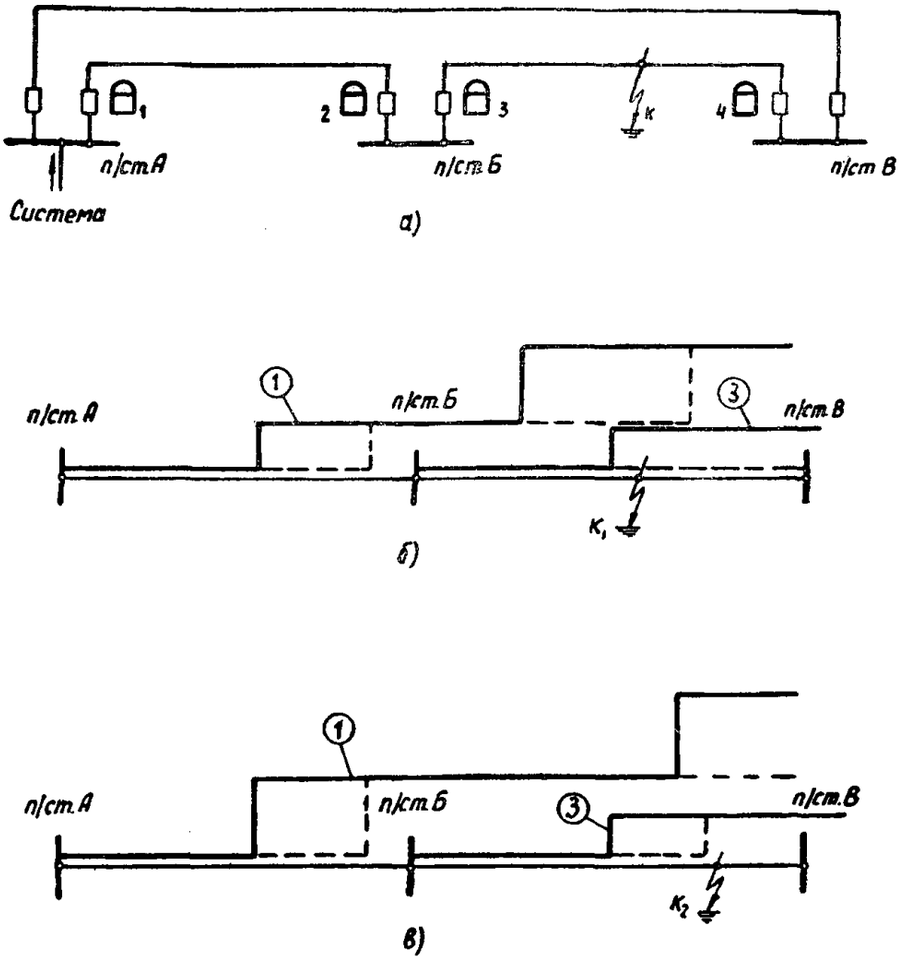


Рис. 7. Пример сети, в которой возможна неправильная работа защиты нулевой последовательности с использованием реле времени с временно замыкающим контактом.

Примечание. Штриховыми линиями показано увеличение защищаемых зон ступеней защит после отключения выключателя *4*.

В тех случаях, когда для защищаемой линии реально возможен режим одностороннего питания, ступень защиты, имеющая ускорение после АПВ, должна быть по току отстроена от бросков токов намагничивания трансформаторов на приемной стороне, имеющих заземленные нейтрали. При наличии на защищаемой линии ответвлений с трансформаторами с заземленными нейтралями аналогично может возникнуть необходимость отстройки ускоряемой ступени защиты от бросков токов намагничивания трансформаторов этих ответвлений (п. IIА-5 и IIА-16).

Для отстройки защиты от указанных бросков тока целесообразно в ступени защиты, имеющей ускорение после АПВ, использовать реле с насыщающимся промежуточным трансформатором (например, типа РНТ), если применение реле типа ЭТ не обеспечивает необходимой чувствительности защиты.

9. В схемах предусматривается действие всех ступеней защиты (кроме последней ступени защиты на рис. 3, включенной на сумму токов параллельных линий) на общее выходное промежуточное реле. Это расширяет область применения схем, позволяя использовать их для линий, присоединяемых к шинам подстанций как через один, так и через два выключателя. В случае телемеханизированных подстанций данные схемы при наличии необходимости дают возможность использовать контакты выходного промежуточного реле для целей телесигнализации.

10. В схемах предполагается использование встроенных в масляные выключатели трансформаторов тока. В случае выносных трансформаторов тока последние должны быть предусмотрены со стороны линии.

11. В схемах даны указательные реле в каждой ступени защиты и в цепи ускорения защиты после АПВ. Для исключения неправильного действия указательных реле первой ступени защит при работе разрядников обмотки этих реле зашунтированы размыкающими контактами выходных промежуточных реле защиты. Указательное реле в цепи ускорения защиты после АПВ может в некоторых случаях подействовать неправильно, в связи с чем для обеспечения надежного действия этого реле иногда требуются специальные мероприятия (*IB*, п. 4 описания схемы рис. 1).

12. В схемах предусмотрены добавочные сопротивления, включенные параллельно обмоткам выходных промежуточных реле. Это необходимо для обеспечения действия указательных реле в первой ступени защиты и в цепи ускорения защиты, ввиду одновременного прохождения тока в цепях обоих указательных реле, при включении линии на короткое замыкание в защищаемой зоне первой ступени защиты.

13. В схемах, приведенных на рис. 1—3, предусмотрены отключающие устройства для вывода из дей-

ствия защиты в целом эксплуатационным персоналом при неисправностях в цепях тока и напряжения.

Для возможности вывода из действия отдельных ступеней защит должны быть предусмотрены разъемные зажимы.

14. В токовых цепях защиты (рис. 1—3) установлены испытательные блоки, предназначенные для ее проверки. Применение для этой цели блоков на четыре цепи облегчает снятие векторных диаграмм реле направления мощности под током нагрузки линии.

15. В схемах на рис. 1—4 предусмотрено присоединение цепей напряжения защиты к шинным трансформаторам напряжения с помощью реле положения шинных разъединителей. При этом предполагается, что:

а) реле положения действует от тех же блок-контактов (КСА), что и сигнальный прибор (ПС) этого разъединителя;

б) обрыв цепи обмотки реле положения сопровождается предупредительной сигнализацией (сигнализация действует, когда цепи обмоток реле положения обоих разъединителей линии обесточиваются).

16. При отсутствии трансформаторов напряжения 110—220 *кв* для питания поляризующих обмоток реле направления мощности целесообразно использовать фильтры тока нулевой последовательности в цепях силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Такое включение поляризующей обмотки реле показано в виде варианта на рис. 2. Принципы включения токовой поляризующей обмотки реле направления мощности рассмотрены в приложении I.

17. На рис. 5 дана принципиальная схема включения реле направления мощности на фильтры тока и напряжения нулевой последовательности. На рис. 5 также приведена схема контроля цепей напряжения разомкнутого треугольника трансформаторов напряжения. Контроль осуществляется с помощью вольтметра со шкалой 3—5 *в*, периодически подключаемого к шинкам $3U_0$ и замеряющего напряжение небаланса.

Испытательный провод, проложенный от точки b_1 разомкнутого треугольника трансформаторов напряжений, предусмотрен для проверки органа направления мощности.

В некоторых случаях взамен указанного на рис. 5 включения разомкнутого треугольника применяется включение с выводами ($3U_0$) от точек y_1 и c_1.

18. Для повышения надежности цепей отключения при действии защиты во всех схемах принято удерживание отключающего импульса до момента размыкания блок-контакта выключателя в цепи отключения. Для этого используется свободный контакт реле (РБМ) блокировки от многократных включений выключателя.

При применении на линиях воздушных выключателей, в схеме управления которых предусмотрено реле удерживания отключающего импульса, удерживание этого импульса с помощью реле РБМ, указанное на рис. 1—4, исключается.

19. Схемы даны для выполнения на постоянном оперативном токе (220 *в*).

В. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ЗАЩИТ, ПРИВЕДЕННЫХ НА РИС. 1-4[1]

Трехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности (рис. 1)

1. Защита предназначена для линий, оборудованных выключателями с пофазными приводами.

2. В схеме предусмотрено ускорение третьей ступени защиты, выполненное с помощью временно замыкающего контакта реле времени *8РВ*. Указанное сделано в предположении, что вторая ступень защиты не удовлетворяет требованию чувствительности при включении линий от устройства АПВ и что для перекрытия разновременности включения фаз выключателя в случае действия третьей ступени защиты с ускорением необходима выдержка времени порядка 0,2 *сек*.

Время, в течение которого проскальзывающий контакт реле времени типа ЭВ-132 замкнут, превышает 0,4 *сек*, что является достаточным для срабатывания выходного промежуточного реле *9РПВ* и подхвата отключающего импульса с помощью реле *10РП*.

3. В качестве варианта на схеме штриховой линией показано выполнение ускорения второй ступени защиты с помощью контакта без замедления реле времени *7РВ*. Этот вариант применим для случаев, когда в отличие от указанного в п. 2 вторая ступень защиты, отстроенная по току срабатывания от неполнофазного режима при неодновременном включении фаз выключателя, удовлетворяет требованию чувствительности при включении линии от устройства АПВ.

4. Необходимо учитывать, что при использовании в схеме, приведенной на рис. 1, варианта ускорения второй ступени защиты с помощью контакта *2* без замедления реле времени *7РВ* и действии реле ускорения от контактов реле положения *РПВ*, включенного в цепь катушки отключения, в некоторых случаях возможно ложное действие указательного реле *14РУ* в цепи ускорения. Это вызывается следующим.

При срабатывании любой ступени рассматриваемой защиты в момент подачи импульса на отключение выключателя реле положения *РПВ* шунтируется контактом *1* выходного промежуточного реле *9РПВ*. Следствием указанного реле ускорения защиты после АПВ, действующее от реле положения *РПВ*, может замкнуть контакты в цепи ускорения прежде, чем в этой же цепи после отключения выключателя и возврата токового пускового органа разомкнется контакт *2* реле времени *7РВ*. Время, в течение которого цепь ускорения будет при этом замкнута, может оказаться достаточным для срабатывания указательного реле *14РУ*.

Практически неправильное действие реле *14РУ* оказывается возможным при временах отключения выключателей порядка 0,08 *сек* и выше. Для предотвращения неправильного действия этого реле должно соблюдаться следующее соотношение:

$$t_{\text{д.РПВ}} + t_{\text{с.р.уск}} + t_{\text{и.РУ}} > t_{\text{о.В}} + t_{\text{р.РТ}} + t_{\text{р.РВ}},$$

где $t_{\text{д.РПВ}}$ — время действия замыкающего или размыкающего контакта (в зависимости от схемы включения реле ускорения) реле положения *РПВ* при шунтировании обмотки последнего;

$t_{\text{с.р.уск}}$ — время срабатывания реле ускорения;

$t_{\text{и.РУ}}$ — длительность импульса, необходимая для срабатывания указательного реле *РУ*;

$t_{\text{о.В}}$ — время отключения выключателя (от момента подачи команды на отключение до момента гашения дуги);

$t_{\text{р.РТ}}$ — время размыкания замыкающего контакта реле тока *4РТ*;

$t_{\text{р.РВ}}$ — время размыкания контакта *2* реле времени *7РВ*.

Если данное соотношение не удовлетворяется, то возникает необходимость применения специальных мер для предотвращения неправильного срабатывания указательного реле в цепи ускорения защиты, например:

а) размыкание цепи обмотки реле ускорения контактом выходного промежуточного реле при срабатывании последнего;

[1] В связи с возможностью отказа защиты в действии при возникновении вибрации контактов реле типа ЭТ-521 при больших токах [Л. 7] целесообразно, в особенности для первой ступени защиты, применение намеченных к выпуску реле типа РТ-51, не имеющих отмеченного недостатка.

б) пуск реле ускорения не от реле положения (*РПВ*) в цепи катушки отключения, а от реле положения (*РПО*) в цепи катушки контактора включения (поскольку срабатывание реле *РПО* происходит в процессе отключения выключателя, в то время как реле *РПВ* начинает действовать с момента подачи импульса на отключение);

в) пуск реле ускорения от выходного реле устройства АПВ в момент подачи импульса на включение.

Двухступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности (рис. 2)

1. Защита предназначена для линий, оборудованных выключателями с трехфазным приводом.

2. В схеме предусмотрено ускорение защиты после АПВ, осуществляемое с помощью контакта без замедления реле времени *7РВ* второй ступени защиты. Указанное выполнено в связи с наличием в защите выходного промежуточного реле *8РПВ* (*РП-251*) с временем срабатывания, обеспечивающим отстройку защиты от неполнофазного режима при неодновременном включении фаз выключателя с трехфазным приводом.

3. В качестве органа направления мощности предусмотрено реле с поляризующей обмоткой напряжения — вариант I или с поляризующей обмоткой тока (разрабатываемого на Чебоксарском электроаппаратном заводе и намеченного к выпуску в ближайшее время) — вариант II.

В варианте II предполагается, что поляризующая обмотка тока включена на трансформатор тока в нейтрали силового двухобмоточного трансформатора. Принципы осуществления токовой поляризации в реле направления мощности при трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах, связывающих сети 110 — 220 *кв* (и выше), рассмотрены в приложении *I*.

Четырехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности параллельных линий с включением четвертой ступени защиты на сумму токов обеих линий (рис. 3)

1. Защита предназначена для параллельных линий, оборудованных выключателями с трехфазным приводом, и выполнена исходя из следующих условий:

а) обеспечение требования чувствительности защиты к замыканиям в зоне резервирования обусловливает необходимость включения пускового органа ее последней ступени на сумму токов обеих линий;

б) вторая ступень защиты с выдержкой времени $t \approx 0{,}5$ *сек* не удовлетворяет требованию чувствительности даже в режиме каскадного отключения повреждения на защищаемой линии, а увеличение выдержки времени данной ступени для повышения ее чувствительности нежелательно в целях максимально возможного сокращения времени отключения повреждения на линии;

в) третья ступень защиты удовлетворяет требованию чувствительности в режиме каскадного отключения повреждения на защищаемой линии.

2. Применение суммарного включения четвертой ступени защиты, помимо указанного выше повышения ее чувствительности, облегчает согласование характеристик защит (повышая их стабильность) и сокращает количество реле, необходимых для защиты линий.

Основными недостатками суммарного включения ступени защиты по сравнению с включением ее на ток одной линии являются:

а) объединение токовых цепей двух линий;

б) необходимость вывода суммарной ступени защиты из действия в случае раздельной работы линий;

в) меньшая чувствительность суммарной защиты к замыканиям на своем участке линии, когда токи на конце параллельных линий, где установлена рассматриваемая защита, направлены в противоположные стороны (например, в режиме каскадного отключения поврежденной линии);

г) отключение обеих линий при повреждении на одной из них и отказе в действии третьей ступени защиты линии.

Недостатки, связанные с объединением токовых цепей двух линий, можно избежать при использовании реле тока с двумя обмотками, как показано на рис. 3,*б*-2 (каждая обмотка состоит из двух секций, расположенных на обоих полюсах реле). Однако в настоящее время такое реле заводом не изготовляется.

3. В схеме предусмотрено использование для суммарной ступени защиты двух реле направления мощности, каждое из которых включено на токи нулевой последовательности одной линии. В связи с указанным при расчете чувствительности реле направления мощности к замыканиям в зоне резервирования при параллельной работе обеих линий необходимо учитывать, что значения тока в реле направления мощности вдвое меньше, чем значение тока в токовом пусковом органе суммарной ступени защиты.

4. В схеме предусмотрено ускорение третьей ступени защиты после АПВ, осуществляемое с помощью контакта без замедления реле времени *10РВ* третьей ступени. Указанное принято в связи с тем, что эта ступень защиты, как отмечено выше, удовлетворяет требованию чувствительности при каскадном отключении повреждения на линии и что при применении трехфазного привода выключателя ускоряемая ступень защиты отстроена от неполнофазного режима временем срабатывания выходного промежуточного реле.

Трехступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности при использовании комплектного реле (предварительная схема) (рис. 4)

1. Схема комплектного реле, намеченного к выпуску Чебоксарским электроаппаратным заводом, выполнена в соответствии с принципами, принятыми при разработке схемы, приведенной на рис. 1.

2. В схеме предусмотрена возможность выполнения любой ступени защиты направленной. Это достигается путем соответствующей перестановки перемычек между зажимами *I—V*.

3. Схема дает возможность вывода из работы любой ступени защиты. С этой целью в цепи каждой ступени предусмотрены соответствующие зажимы (*VII—X*).

4. Схема позволяет выполнить ускорение защиты после АПВ как во второй, так и в третьей ступени.

5. Для облегчения проверки реле защиты в цепи переменного тока предусмотрены зажимы *XXV* и *XXVI*.

Зажим *XXV* предназначен для проверки реле направления мощности фазным током, при этом защита может быть оставлена в работе как ненаправленная при условии шунтирования контакта реле направления мощности.

Зажим *XXVI* предназначен для исключения из схемы реле тока третьей ступени защиты в целях предотвращения прохождения через него недопустимо большого тока при проверке реле тока первой и второй ступеней защиты.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАСЧЕТ СТУПЕНЧАТЫХ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ И НЕНАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЛИНИЙ 110—220 *кв*

А. ОСНОВНЫЕ УКАЗАНИЯ ПО РАСЧЕТУ

1. Целью расчета защиты является определение:

а) тока срабатывания и выдержки времени;

б) чувствительности, а также выявления необходимости установки в защите органа направления мощности.

2. Ток срабатывания первой ступени защиты (отсечки без выдержки времени) должен быть отстроен:

а) от тока в линии при замыкании на землю на шинах ее противоположного конца при выполнении защиты направленной, а также и при замыкании на землю на шинах данного конца линии при выполнении защиты ненаправленной;

б) от токов нулевой последовательности в линии, возникающих при неодновременном включении фаз выключателя (п. IIА-8).

Отстройка защиты по п. «б» необходима в случаях, когда время срабатывания защиты может оказаться меньше разброса времен включения отдельных фаз выключателя (например, при пофазном управлении приводами выключателя или при отсутствии на линии разрядников и применении в защите в связи с этим быстродействующего выходного промежуточного реле).

При выборе тока срабатывания первой ступени защиты необходимо также учитывать случаи замыкания на предыдущей линии в режиме, когда эта линия включена только со стороны подстанции, ближайшей к месту установки рассматриваемой защиты. Такие случаи возможны при каскадном отключении повреждения или при включении линии от устройства АПВ на неустранившееся замыкание.

Так, например, ток срабатывания первой ступени защиты, установленной на линии *п/ст. А — п/ст. Б* со стороны *п/ст. А* (рис. 8), должен быть отстроен от тока в месте установки защиты в режиме, когда на линии *п/ст. Б — п/ст. В*, отключенной со стороны *п/ст. В*, имеется замыкание на землю.

3. Ток срабатывания второй ступени защиты (отсечки с выдержкой времени) при выполнении ее направленной должен быть отстроен от тока в линии при замыкании в конце защищаемой зоны первой ступени предыдущей защиты, при этом выдержка времени второй ступени должна быть согласована с выдержкой времени первой ступени предыдущей защиты (рис. 6, характеристики защит *1*, *3* и *7*).

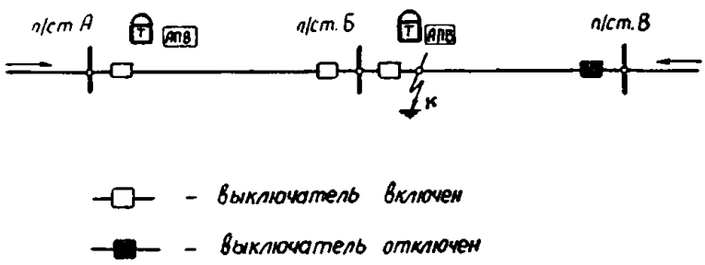


Рис. 8. Возможный расчетный режим для определения тока срабатывания отсечки без выдержки времени.

В случае если выбранная таким образом вторая ступень защиты не удовлетворяет требованию чувствительности (п. IIА-17), то для увеличения чувствительности этой ступени может оказаться целесообразным ток срабатывания ее отстроить от тока в данной линии при повреждении в конце защищаемой зоны второй ступени предыдущей защиты; при этом выдержка времени рассматриваемой второй ступени должна быть согласована с выдержкой времени второй ступени предыдущей защиты (рис. 6, характеристика защиты *5*).

Ток срабатывания второй ступени защиты при выполнении ее ненаправленной должен быть дополнительно отстроен также от тока в линии при замыканиях в конце защищаемых зон первых ступеней (для защит с характеристиками *1*, *3* и *7*, рис. 6) или соответственно вторых ступеней (для защиты с характеристикой *5*, рис. 6) защит других линий, приключенных к шинам данной подстанции.

4. Ток срабатывания третьей ступени защиты должен быть отстроен от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних замыканиях между фазами (п. IIА-15), если рассматриваемая ступень защиты нулевой последовательности имеет выдержку времени, равную или меньшую, чем защита от замыканий между фазами на поврежденном элементе; как правило, указанное соответствует условию отстройки от токов небаланса при замыканиях за трансформаторами подстанций, примыкающих к обоим концам линии.

При таком выборе тока срабатывания третьей ступени защиты линии данная ступень защиты может оказаться не согласованной по чувствительности с дифференциальной защитой силовых трансформаторов. Однако возможность отключения линий при замыканиях на землю в трансформаторах мала, так как для этого необходимо маловероятное совпадение условий повреждения в зоне нечувствительности дифференциальной защиты трансформатора и отказа в действии его газовой защиты.

Время действия резервной ступени защиты определяется по возможности по ступенчатому принципу.

В некоторых случаях (например, в целях уменьшения времени отключения повреждения на защищаемой линии, для облегчения согласования характеристик защит) может оказаться целесообразным ограничить чувствительность третьей ступени защиты и согласовать ее со второй ступенью предыдущей защиты (или с третьей ступенью четырехступенчатой защиты, как показано на рис. 6 для характеристики защиты *1*).

Для повышения селективности действия защиты при замыканиях в конце зоны резервирования, токи срабатывания третьих ступеней защит смежных участков сети желательно согласовывать по чувствительности; в большинстве случаев указанное условие согласования не приводит к загрублению защиты в связи с наличием подпитки (например, от трансформаторов с заземленными нейтралями) на промежуточной подстанции.

5. Ступень защиты, имеющая ускорение после АПВ, должна быть отстроена от:

а) режима неодновременного включения фаз выключателя, поскольку этот режим сопровождается то-

ками нулевой последовательности в месте включения защиты;

б) бросков токов намагничивания питаемых по данной линии трансформаторов, имеющих заземленные нейтрали, в случаях, указанных в п. IБ-8;

в) тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, соответствующего наибольшему току качаний, если на линии предусмотрено несинхронное АПВ.

Отстройка защиты по п. «а» выполняется в соответствии с п. IБ-8, по п. «б» — в соответствии с п. IБ-8 и п. IIА-16 и по п. «в» — в соответствии с п. IIА-14.

Ступень защиты, имеющая ускорение после АПВ, должна удовлетворять требованию чувствительности в режиме одностороннего включения поврежденной линии (п. IIА-17).

6. При наличии на одиночной линии ответвлений к подстанциям с трансформаторами (рис. 9) токи срабатывания отдельных ступеней защиты линии выбираются аналогично случаю отсутствия ответвлений на линии (п. IIА-2, 3 и 4). При этом предполагается, что для предотвращения потери линии при замыкании на землю в трансформаторе на ответвлении, на линии предусмотрено устройство АПВ, а защита трансформаторов на ответвлениях выполнена с самоудерживанием отключающего импульса в выходных цепях.

В случае, когда нейтрали трансформаторов на ответвлении заземлены, выбор токов срабатывания первой и второй ступеней защиты производится в реально возможном режиме отключения наибольшего числа трансформаторов на ответвлениях.

Чувствительность защиты линии при этом должна быть проверена для случая включения реально возможного наибольшего числа трансформаторов на ответвлениях, имеющих заземленные нейтрали.

При наличии на линии ответвлений, трансформаторы которых имеют заземленные нейтрали, вследствие влияний последних защищаемая зона первой ступени защиты нулевой последовательности, как правило, охватывает только небольшую часть линии. В связи с этим для повышения чувствительности может возникнуть вопрос о целесообразности применения на линии токовой защиты обратной последовательности с блокировкой от тока или напряжения нулевой последовательности. При применении такой блокировки чувствительность защиты обратной последовательности повышается в связи с тем, что не требуется отстройка последней от замыканий за трансформатором ответвления.

7. Защита нулевой последовательности линий с двусторонним питанием должна быть согласована с аналогичными защитами смежных линий с односторонним питанием в условиях, когда последние переводятся в неполнофазный режим, при этом:

а) вторая ступень рассматриваемой защиты должна быть согласована с первой ступенью защиты линии с односторонним питанием при переводе последней в неполнофазный режим;

б) ток срабатывания третьей ступени рассматриваемой защиты должен быть отстроен от токов нулевой последовательности нагрузки в неполнофазном режиме работы линии с односторонним питанием; определение токов нулевой последовательности для этого режима производится в соответствии с указаниями п. IIА-8.

В тех случаях, когда согласование защиты по п. «а» приводит к недопустимому ее загрублению, может оказаться необходимым снизить ток срабатывания первой ступени защиты линии, работающей в неполнофазном режиме, допуская неселективное действие этой защиты (учитывая, что такой неполнофазный режим обычно бывает кратковременным).

8. Определение токов нулевой последовательности при неодновременном включении фаз выключателя производится в соответствии с рис. 10, на котором даны схемы замещения и расчетные выражения для случаев разрывов одной и двух фаз.

В выражениях (1) и (2) рис. 10 должен быть учтен угол расхождения э. д. с., имеющийся в рассматриваемом режиме. При несинхронном АПВ этот угол должен быть принят равным 180°.

9. Первичный ток срабатывания ступеней защиты, выполняемых в виде токовых отсечек без выдержки и с выдержкой времени, определяется из выражения

$$I_{с.з} = k_н I_{расч}, \qquad (II\text{-}1)$$

где $I_{расч}$ — расчетный ток (утроенный ток нулевой последовательности), от которого защита должна быть отстроена;

$k_н$ — коэффициент надежности, учитывающий ошибки реле, влияние апериодической слагающей и необходимый запас; принимается для токовой отсечки без выдержки времени $k_н = 1{,}2 - 1{,}3$ и с выдержкой времени порядка $k_н = 1{,}1$.

10. Расчетный ток в выражении (II-1), как правило, следует принимать равным максимальному действующему значению периодической слагающей начального тока замыкания на землю, независимо от выполнения защиты с выдержкой времени или без таковой.

Допустимость расчета защиты с выдержкой времени по начальному значению тока замыкания обусловлена следующим. Ток срабатывания указанной защиты, выбираемой по условию согласования с предыдущей защитой, определяется только током срабатывания последней и максимальным коэффициентом токораспределения $k_т$ (п. IIА-13) в схеме замещения нулевой последовательности при замыкании в конце защищаемой зоны предыдущей защиты. С изменением во времени тока в месте замыкания на землю величина указанной зоны меняется, при этом коэффициент токораспределения $k_т$ остается постоянным для линий в сетях радиальной конфигурации и несколько изменяется в случаях, когда предыдущая защита установлена на параллельных или кольцевых линиях.

Однако неучет в этих случаях изменения коэффициента токораспределения ($k_т$) при расчете вторых ступеней защит допустим в связи с тем, что изменение тока в сторону увеличения из-за влияния регуляторов напряжения незначительно и им можно пренебречь, а уменьшение тока приводит к сокращению зон действия рассматриваемых защит и как следствие этого к уменьшению коэффициента токораспределения $k_т$; таким образом, согласование пусковых токовых органов защит по начальным значениям токов короткого замыкания обеспечивает селективность этих защит при изменении во времени тока повреждения.

Для определения расчетного тока в большинстве случаев допустимо пользоваться простейшим способом вычисления тока короткого замыкания, исходя из

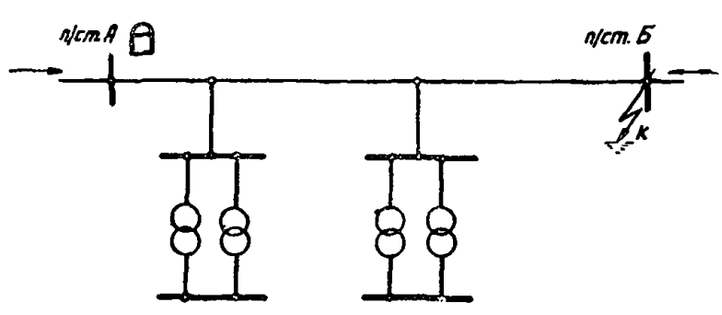


Рис. 9. Одиночная линия с ответвлениями.

э. д. с. генераторов, равной номинальному напряжению, приравнивая сопротивления обратной последовательности генераторов их сопротивлениям прямой последовательности и учитывая только реактивные составляющие сопротивлений элементов системы, при этом нагрузочные сопротивления допустимо не учитывать.

11. При вычислении тока короткого замыкания $I_{расч}$ в выражении (II-1) в качестве расчетного повреждения принимается однофазное или двухфазное замыкание на землю в зависимости от того, при каком виде замыкания величина тока нулевой последовательности в месте повреждения (а значит, и в месте установки защиты) имеет большее значение.

Отношение токов нулевой последовательности в месте повреждения при двухфазном ($I_0^{(1,1)}$) и при однофазном $I_0^{(1)}$ замыканиях на землю равно:

$$\frac{I_0^{(1,1)}}{I_0^{(1)}} = \frac{2+\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}}{1+\frac{2Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}}, \qquad \text{(II-2)}$$

где $Z_{0\Sigma}$ и $Z_{1\Sigma}$ — результирующие реактивные сопротивления нулевой и прямой (обратной) последовательностей.

При $Z_{0\Sigma} < Z_{1\Sigma}$ $I_0^{(1,1)} > I_0^{(1)}$.

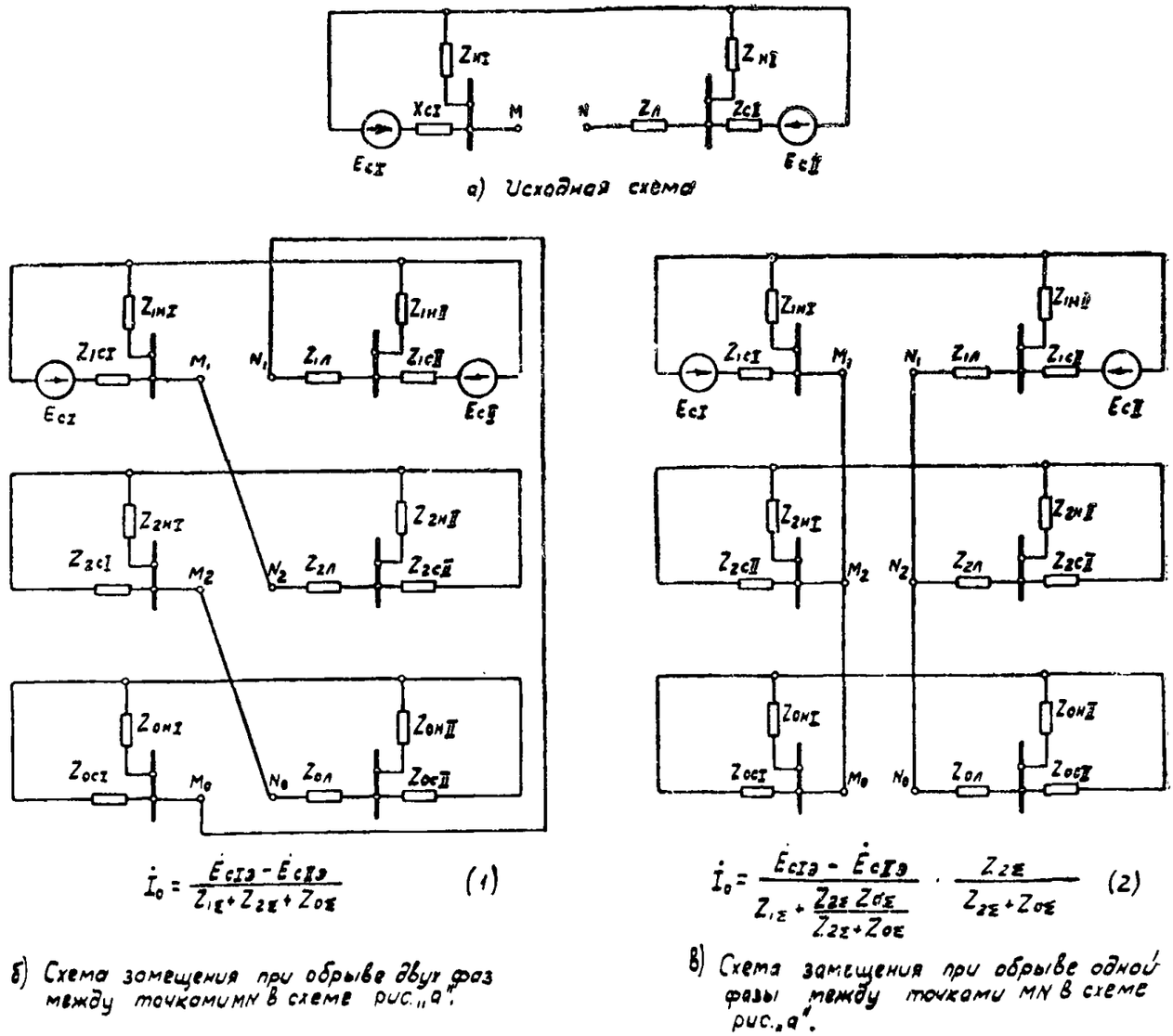


Рис. 10. Схема замещения и расчетные выражения для определения тока нулевой последовательности в линии при неполнофазных нагрузочных режимах.

Примечания: 1. В выражениях (1) и (2) $E_{cI\text{э}}$ и $E_{cII\text{э}}$ — эквивалентные э. д. с. систем должны быть определены по выражению

$$\dot{E}_{c\text{э}} = \frac{\dot{E}_c Z_н}{Z_c + Z_н}.$$

2. Для случая одностороннего питания со стороны системы I:

$$z_{1cII} = z_{2cII} = z_{0cII} = \infty.$$

12. При выборе расчетного режима для определения расчетного тока $I_{расч}$ в выражении (II-1) следует учитывать, что при внешнем для данной линии замыкании на землю ток нулевой последовательности в линии увеличивается:

а) с увеличением тока нулевой последовательности в месте замыкания на землю вследствие уменьшения эквивалентного сопротивления в схеме замещения прямой (обратной) последовательности;

б) с уменьшением отношения сопротивления нулевой последовательности системы со стороны, где установлена рассматриваемая защита, к сопротивлению нулевой последовательности системы с противоположной стороны.

При выборе расчетного режима маловероятные режимы учитывать не следует.

13. Расчетный ток в выражении (II-1) для выбора тока срабатывания второй ступени защиты по условию согласования ее по чувствительности с первой ступенью предыдущей защиты может быть определен графическим или аналитическим способом.

Принцип применения графического способа для определения расчетного тока иллюстрирован на рис. 11.

Ток срабатывания второй ступени защиты *1* $I^{II}_{с.з1}$ отстраивается от тока в линии $I_{расч}$ при замыкании на землю на смежном участке в конце защищаемой зоны первой ступени защиты *2* в расчетном режиме.

При аналитическом способе расчетный ток определяется по выражению

$$I_{расч} = k_т I^{(I)}_{с.з}, \qquad (II\text{-}3)$$

где $I^{(I)}_{с.з}$ — ток срабатывания первой ступени предыдущей защиты, с которой производится согласование;

$k_т$ — максимальный коэффициент токораспределения (в схеме замещения нулевой последовательности) для данной линии при замыкании в конце защищаемой зоны первой ступени предыдущей защиты, представляющий отношение тока в данной линии к току в смежной линии, с защитой которой производится согласование.

Если в расчетном режиме при перемещении места замыкания на предыдущей линии (с защитой которой производится согласование) коэффициент токораспределения $k_т$ для данной линии остается постоянным, то его величина может быть подсчитана исходя из схемы замещения нулевой последовательности сети для случая замыкания в любой точке предыдущей линии (или для замыкания на шинах). Указанное определение коэффициента $k_т$ полностью применимо для сетей радиальной конфигурации и кольцевых сетей с одиночными линиями без диагональных связей (рис. П-7). Как показано в приложении II, в таких кольцевых сетях расчетным режимом является режим каскадного отключения поврежденной линии (или одностороннее включение линии от устройства АПВ на неустранившееся повреждение), поскольку при этом для линии, смежной с поврежденной, коэффициент токораспределения имеет наибольшую величину, причем значение его не меняется при перемещении места замыкания на поврежденной линии.

В тех случаях, когда в расчетном режиме при перемещении места повреждения на предыдущей линии, с первой ступенью защиты которой производится согласование, коэффициент токораспределения $k_т$ меняется (например, в случае параллельных линий на предыдущем участке или при наличии в схеме замещения нулевой последовательности обходной связи для предыдущего участка) применение аналитического способа не может быть рекомендовано ввиду затруднительности определения расчетной величины коэффициента $k_т$. Использование в этих случаях коэффициентов $k_т$, найденных аналитическим способом по условию замыкания на шинах, может привести к большим погрешностям при определении $I_{расч}$.

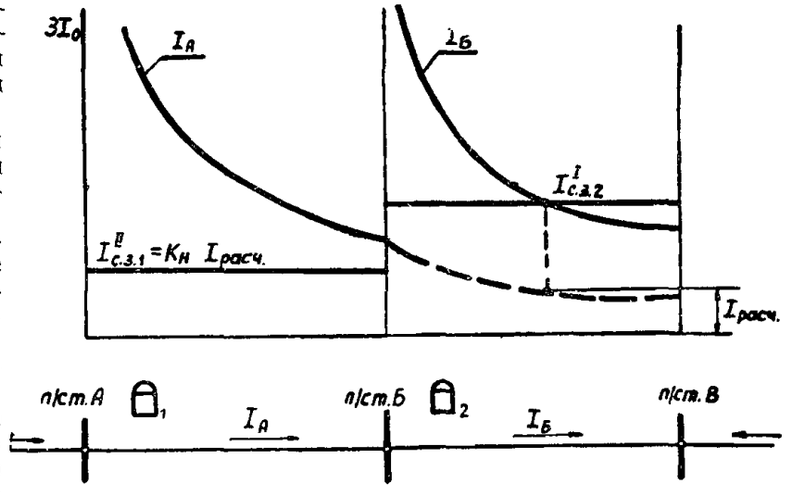


Рис. 11. Определение тока срабатывания второй ступени защиты графическим способом.

$I^{I}_{с.з2}$ — ток срабатывания первой ступени защиты *2*; $I^{II}_{с.з1}$ — ток срабатывания второй ступени защиты *1*; $I_{расч}$ — расчетный ток для определения $I^{II}_{с.з1}$; $k_н$ — коэффициент надежности.

Например, для схемы рис. 12,*а* при выборе тока срабатывания второй ступени защиты *1* по условию согласования с первой ступенью защиты *2* пользование аналитическим способом затруднительно, если расчетным режимом является работа обеих параллельных линий *п/ст. Б — п/ст. В* (п. II Б-9), так как в этом случае коэффициент токораспределения $k_т$ для линии *п/ст. А — п/ст. Б* меняется при перемещении места повреждения вдоль линии *п/ст. Б — п/ст. В*.

В случае выбора тока срабатывания второй ступени защиты *1* по условию согласования со второй ступенью *2* (рис. 12,*а* и 12,*б*) определение расчетного тока $I_{расч}$, как правило, может быть произведено аналитическим способом по коэффициенту токораспределения $k_т$, найденному для случая замыкания на шинах *п/ст. В*. Подсчитанный таким образом расчетный ток $I_{расч}$ будет иметь преувеличенное значение, если при замыкании (в расчетном режиме) на шинах *п/ст. В* ток в линии *п/ст. Б — п/ст. В* будет меньше тока срабатывания второй ступени защиты *2*. Указанное обусловлено тем, что при работе обеих линий *п/ст. Б — п/ст. В* и замыкании на одной из них коэффициент $k_т$ для линии *п/ст. А — п/ст. Б* растет с перемещением места замыкания к шинам *п/ст. В*. Поэтому в этих случаях такой способ расчета тока срабатывания защиты допустим, если и при его использовании рассматриваемая ступень защиты с запасом удовлетворяет требованию чувствительности.

14. Отстройка тока срабатывания третьей ступени защиты от тока небаланса трансформаторов тока производится по выражению

$$I_{с.з} = k_н I_{нб.расч} = k_н k_{апер} I_{нб.уст}, \qquad (II\text{-}4)$$

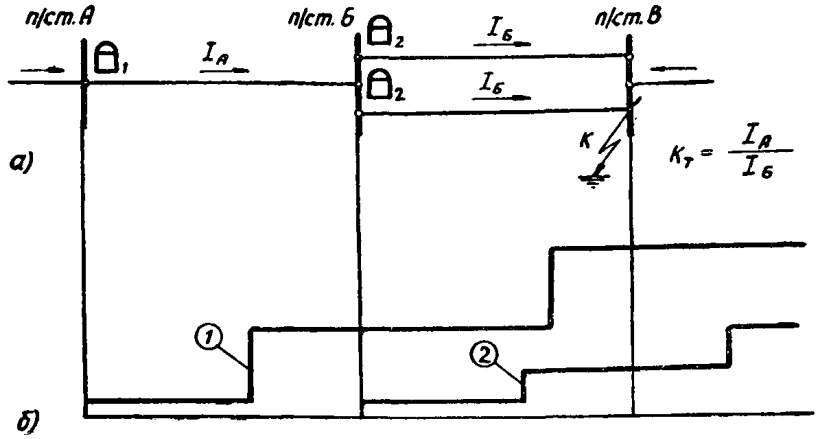


Рис. 12. Определение коэффициента токораспределения $k_т$ для случаев выбора вторых ступеней защит и характеристики защит.

где $I_{нб.уст}$ — ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в установившемся режиме при внешних замыканиях между тремя фазами (п. IIА-15);

$k_н = 1{,}25$ — коэффициент надежности, учитывающий ошибку реле и необходимый запас;

$k_{апер}$ — коэффициент, учитывающий переходный режим (наличие апериодической составляющей тока); при отсутствии в данной ступени защиты ускорения после АПВ $k_{апер} = 1$, при выполнении третьей ступени защиты с ускорением после АПВ $k_{апер}$ может быть принят равным: 2,0 — при времени действия защиты до 0,1 *сек*; 1,5 — при времени действия защиты до 0,3 *сек*.

15. Ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в установившемся режиме трехфазного короткого замыкания $I_{нб.уст}$ для трансформаторов тока, выбранных по кривым кратности при 10% погрешности, может быть с достаточной для практических расчетов точностью определен по выражению [Л.1]

$$I_{нб.уст} = k' \sqrt{I^2_{нб1} + I^2_{нб3}}, \qquad (II\text{-}5)$$

где $I_{нб1}$ — геометрическая сумма основных гармоник токов намагничивания трех трансформаторов тока;

$I_{нб3}$ — арифметическая сумма третьих гармоник токов намагничивания ($I_з$) трех трансформаторов тока ($I_{нб3} = \Sigma I_з$);

k' — коэффициент, отражающий возможность наличия ряда неучтенных факторов, влияющих на увеличение $I_{нб}$ (конструктивные различия трансформаторов тока, возможность неодинакового числа витков их вторичных обмоток и пр.); принимается $k' = 2$.

Первая слагающая ($I_{нб1}$) выражения (II-5) обусловлена различием токов намагничивания трансформаторов тока в отдельных фазах и принципиально может быть определена в соответствии с рис. 13,*а*.

В условиях эксплуатации слагающая $I_{нб1}$ для конкретного комплекта трансформаторов тока приближенно может быть определена экспериментально по кривым намагничивания трансформаторов тока отдельных фаз, входящих в комплект. Эта слагающая примерно равна разности $\Delta I_{нам}$ наибольшего и наименьшего из полных токов намагничивания трансформаторов тока рассматриваемого комплекта (рис. 13,*б*) при расчетном значении индукции $B_{m\,расч}$ в их сердечниках. Индукция $B_{m\,расч}$ находится по вторичной э. д. с. трансформаторов тока в расчетном режиме и их конструктивным данным.

Вторая слагающая ($I_{нб3}$) выражения (II-5) для конкретного комплекта трансформаторов тока также может быть приближенно определена экспериментально при снятии кривых намагничивания; ориентировочно полагая, что ток намагничивания состоит только из основной и третьей гармоник (I_1 и I_3), эти гармоники могут быть определены на основании показаний амперметра и ваттметра, обмотка напряжения которого включена на синусоидальное напряжение 50 *гц*.

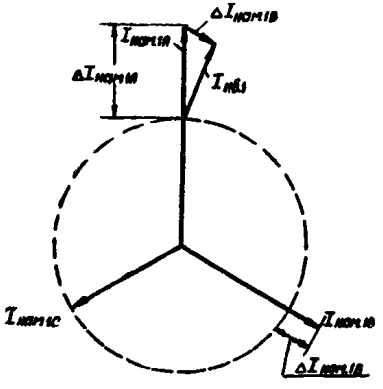
В общем случае в проектных условиях составляющая тока небаланса $I_{нб1}$ для расчетных значений индукции может быть приближенно подсчитана, аналогично тому, как это показано на рис. 13,*б*, по заводским данным, отображающим предельные (диапазонные) положения кривых намагничивания для рассматриваемой марки стали [Л. 2 и 3]. На рис. 13,*в* приведены такие кривые для стали марки Э310 (ХВП). В соответствии с рис. 13,*в*: $I_{нб1} \equiv \Delta H$.

Вторая слагающая ($I_{нб3}$) выражения (II-5) также может быть приближенно определена на основании заводских кривых, дающих для рассматриваемой марки стали отношение третьей гармоники к первой в токе намагничивания $\left(\frac{I_з}{I_1}\right)$ в зависимости от индукции (например, кривые рис. 13,*г*), причем первая гармоника I_1 принимается приближенно равной наибольшему полному току намагничивания $I_{нам}$, соответствующему по диапазонной кривой намагничивания $B_{m\,расч}$ и $H_{макс}$ (рис. 13,*в*). В этом случае слагающая $I_{нб3}$ может быть ориентировочно принята равной утроенному значению третьей гармоники тока намагничивания для данного значения индукции.

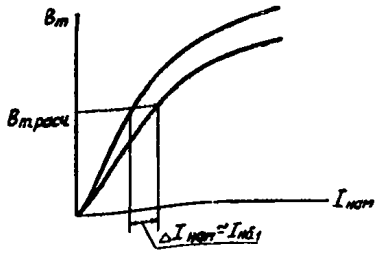
Расчет тока небаланса $I_{нб.уст}$ на основании кривых рис 13,*в* и *г* может быть упрощен при наличии предварительно построенной кривой вспомогательного коэффициента C, устанавливающего связь между $I_{нб.уст}$ и током намагничивания $I_{нам}$ трансформаторов тока, в соответствии с выражением

$$I_{нб.уст} = C I_{нам}. \qquad (II\text{-}6)$$

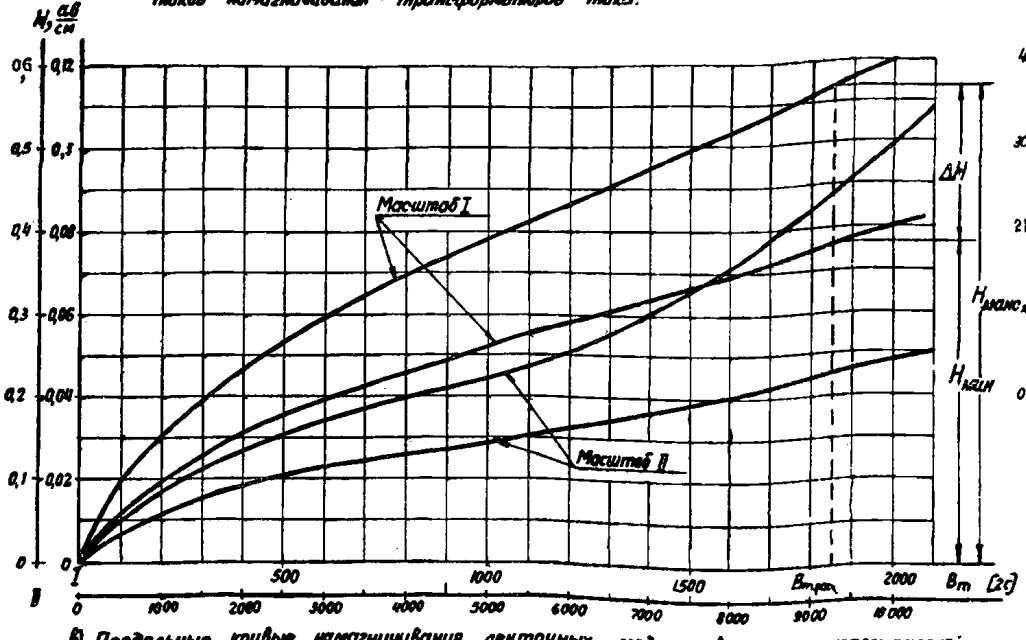
На рис. 14 приведены кривые вспомогательного коэффициента C для определения токов небаланса



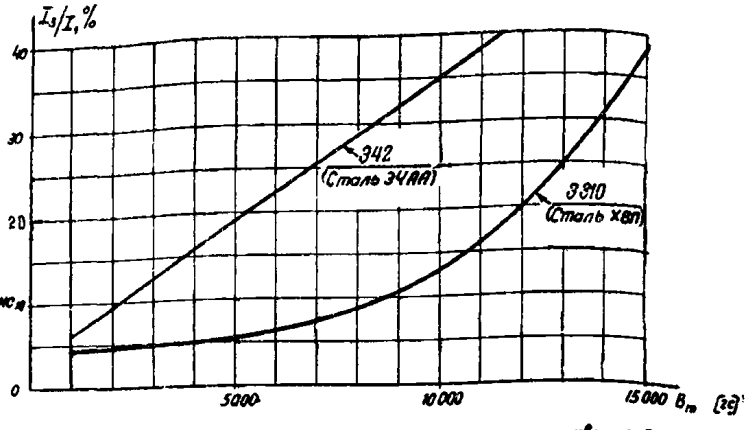
а). Определение $I_{нб.1}$ по значениям основных гармоник токов намагничивания трансформаторов тока.



б) Определение $I_{нб.1}$ по предельным кривым намагничивания



в). Предельные кривые намагничивания ленточных сердечников из трансформаторной стали марки (3310) ХВП



г). Соотношения третьей и первой гармоник в токе намагничивания для ленточных сердечников.

Рис. 13. Поясняющие чертежи и расчетные кривые для определения слагающих $I_{нб}$ в нулевом проводе трансформаторов тока.

Примечание: Рис. 13,*а* дан для случая $I_{нам.1A} > I_{нам.1B} > I_{нам.1C}$, где $I_{нам.1A}$, $I_{нам.1B}$, $I_{нам.1C}$ — основные гармоники токов намагничивания трансформаторов тока, при этом $I_{нб\ 1} = \left(1 \div \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \Delta I_{нам.1A}$.

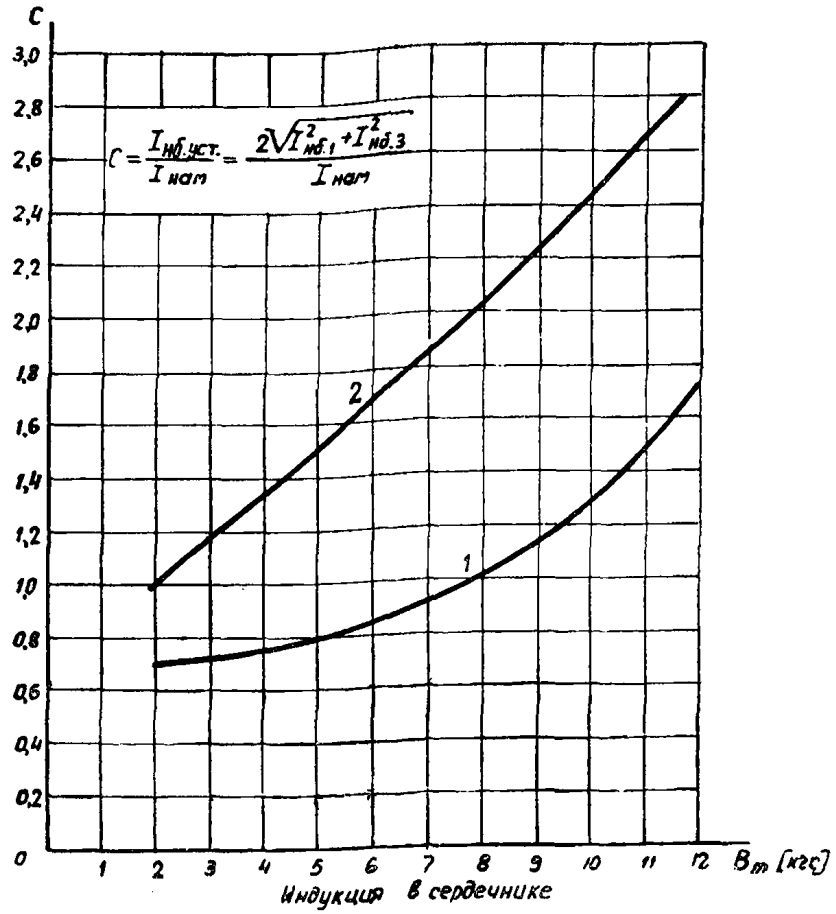


Рис. 14. Вспомогательный коэффициент C для определения $I_{нб.расч}$ в нулевом проводе трансформаторов тока.

№ кривой	Материал сердечников	Типы трансформаторов тока
1	Э310	ТФН110, ТФН220, ТФКН220, ТФКН330, все исполнения ТВТ (встроенные в силовые трансформаторы), ТВМ110, ТВДМ110
2	Э42	ТНМ110, ТНДМ110, ТВД220

в нулевом проводе для ряда типов трансформаторов тока 110—220 *кв* в соответствии с выражением (II-6).

Для нахождения значения C следует по вторичной э. д. с. трансформаторов тока в расчетном режиме подсчитать индукцию в сердечниках трансформаторов тока. Ток намагничивания $I_{нам}$ в выражении (II-6) определяется для расчетного значения индукции по конструктивным данным трансформаторов тока и соответствующей кривой намагничивания.

На рис. 15 [Л. 2] приведены конструктивные данные ряда типов трансформаторов тока 110—220 *кв*, а также кривые намагничивания для сталей марок Э42 и Э330, необходимые для пользования кривыми рис. 14.

Для трансформаторов тока, выполненных на марках стали, отличных от марок, приведенных на рис. 13 и 15, должны быть использованы соответствующие заводские характеристики или получены экспериментальные данные для построения кривых, аналогичных таковым на рис. 13—15.

Следует отметить, что определение тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока по выражениям (II-5) и (II-6) производится в режиме трехфазного короткого замыкания (как было отмечено выше), а не замыкания между двумя фазами. Указанное обусловлено тем, что в последнем случае расчетное значение тока небаланса меньше (при неизменном первичном токе), поскольку при этом вторая слагающая тока небаланса в выражении (II-5) равна разности значений третьих гармоник токов намагничивания трансформаторов тока.

Для грубо ориентировочных расчетов, при отсутствии данных для производства расчета по выражению (II-5) или (II-6), ток небаланса $I_{нб.\,уст}$ может быть определен по следующему выражению, составленному в предположении, что трансформаторы тока удовлетворяют кривым кратности тока при 10% погрешности:

$$I_{нб.уст} = k_{одн} f_т I_{расч}, \qquad (II\text{-}7)$$

где $k_{одн} \approx 0{,}5 - 1{,}0$ — коэффициент однотипности трансформаторов тока (в зависимости от кратности токов короткого замыкания и значения сопротивлений во вторичных цепях трансформаторов тока);

$f_т = 0{,}1$ — относительная максимально возможная погрешность трансформаторов тока при внешнем замыкании;

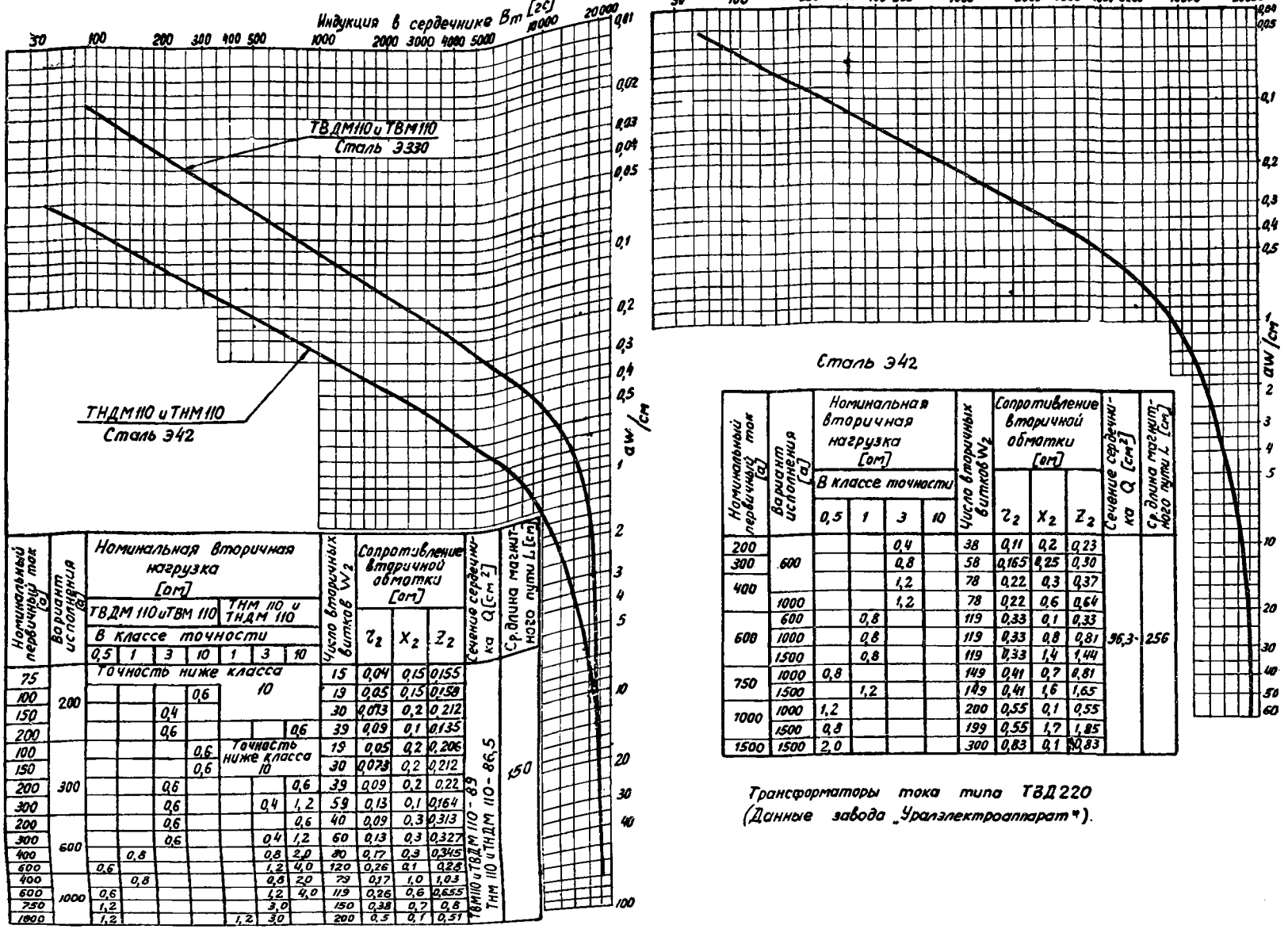
$I_{расч}$ — расчетный ток внешнего замыкания между тремя фазами.

16. Выбор тока срабатывания защиты по условию отстройки его от броска токов намагничивания трансформаторов, имеющих заземленные нейтрали и включаемых под напряжение при включении линии, следует производить с учетом следующего.

Наибольший бросок тока в нулевом проводе трансформаторов тока имеет место при включении трансформатора в момент прохождения вынужденной слагающей тока намагничивания в одной из его фаз через максимум, так как это сопровождается появлением в данной фазе апериодической составляющей наибольшей величины; при этом влиянием токов намагничивания двух других фаз можно пренебречь ввиду их малости.

При наличии линии большой протяженности бросок тока намагничивания уменьшается в зависимости от соотношения сопротивлений рассеяния трансформатора и суммарного сопротивления линии и системы, к которой она приключена; при этом затухание апериодической слагающей тока, как правило, ускоряется ввиду наличия активного сопротивления линии и системы.

Ввиду отсутствия проверенных расчетных данных о бросках тока намагничивания в нулевом проводе трансформаторов тока, впредь до уточнения указанного вопроса, ток срабатывания защиты нулевой последовательности грубо ориентировочно можно принимать:



Номинальный первичный ток [а]	Вариант исполнения	Номинальная вторичная нагрузка [ом]							Число вторичных витков W_2	Сопротивление вторичной обмотки [ом]			Сечение сердечника Q [см²]	Ср. длина магнитного пути l [см]
		ТВДМ 110 и ТВМ 110				ТНМ 110 и ТНДМ 110								
		В классе точности												
		0,5	1	3	10	1	3	10		r_2	x_2	z_2		
75	200	Точность ниже класса 10			0,6				15	0,04	0,15	0,155	ТВМ110 и ТВДМ 110 - 83 ТНМ 110 и ТНДМ 110 - 86,5	150
100				0,4					13	0,05	0,15	0,159		
150				0,6				0,6	30	0,013	0,2	0,212		
200	300				0,6	Точность ниже класса 10			39	0,09	0,1	0,135		
100					0,6				13	0,05	0,2	0,206		
150					0,6				30	0,079	0,2	0,212		
200				0,6				0,6	39	0,09	0,2	0,22		
300	600			0,6			0,4	1,2	59	0,13	0,1	0,164		
200				0,6				0,6	40	0,09	0,3	0,313		
300				0,6			0,4	1,2	60	0,13	0,3	0,327		
400			0,8				0,8	2,0	80	0,17	0,3	0,345		
600		0,6					1,2	4,0	120	0,26	0,1	0,28		
400	1000		0,8				0,8	2,0	79	0,17	1,0	1,03		
600		0,6					1,2	4,0	119	0,26	0,6	0,655		
750		1,2					3,0		150	0,38	0,7	0,8		
1800		1,2				1,2	3,0		200	0,5	0,1	0,51		

Трансформаторы тока типа ТВДМ110, ТВМ110, ТНДМ110, ТНМ110

Номинальный первичный ток [а]	Вариант исполнения [а]	Номинальная вторичная нагрузка [ом]				Число вторичных витков W_2	Сопротивление вторичной обмотки [ом]			Сечение сердечника Q [см²]	Ср. длина магнитного пути l [см]
		В классе точности									
		0,5	1	3	10		r_2	x_2	z_2		
200	600			0,4		38	0,11	0,2	0,23	96,3	256
300				0,8		58	0,165	0,25	0,30		
400				1,2		78	0,22	0,3	0,37		
	1000			1,2		78	0,22	0,6	0,64		
600	600		0,8			119	0,33	0,1	0,33		
	1000		0,8			119	0,33	0,8	0,81		
	1500		0,8			119	0,33	1,4	1,44		
750	1000	0,8				149	0,41	0,7	0,81		
	1500		1,2			149	0,41	1,6	1,65		
1000	1000	1,2				200	0,55	0,1	0,55		
	1500	0,8				199	0,55	1,7	1,85		
1500	1500	2,0				300	0,83	0,1	0,83		

Трансформаторы тока типа ТВД220
(Данные завода „Уралэлектроаппарат").

Рис. 15. Кривые намагничивания сталей марок Э42 и Э330 и расчетные параметры некоторых типов трансформаторов тока 110 и 220 кв.

а) при сопротивлениях линии и системы значительно меньших, чем сопротивление включаемого трансформатора — как для включаемых на фазные токи дифференциальных защит трансформаторов при включении последних на шины бесконечной мощности

$I_{с.з} = (3 — 4) I_{т.ном}$ — при применении реле типа ЭТ,

$I_{с.з} = (1 — 1{,}3) I_{т.ном}$ — при применении реле типа РНТ,

где $I_{т.ном}$ — номинальный ток трансформатора;

б) при сопротивлениях линии и системы, соизмеримых с сопротивлением трансформатора — как и в п. «а» с учетом понижающего коэффициента α, отражающего снижение напряжения на втулках трансформатора при броске тока намагничивания; ориентировочно

$$\alpha = \frac{x_т}{x_с + x_л + x_т},$$

где $x_т$ — сопротивление рассеяния трансформатора;

$x_с$ и $x_л$ — сопротивления прямой последовательности системы и линии.

Необходимо отметить, что при относительно большой мощности трансформаторов, от бросков тока намагничивания которых следует отстроить ускоряемую ступень защиты, чувствительность последней может оказаться значительно сниженной. В этом случае следует рассмотреть вопрос о целесообразности применения ускорения защиты.

17. Выбранная защита должна иметь коэффициент чувствительности $k_ч$, удовлетворяющий требованиям ПУЭ, а именно:

а) в режиме каскадного отключения повреждения в конце линии защита должна иметь $k_ч \geqslant 1{,}5$; при этом в случае применения данной защиты в качестве основной выдержку времени ее при повреждениях в нормальных режимах, как правило, следует иметь не более 1—1,2 *сек*;

б) при повреждении на шинах противоположного конца линии защита должна иметь $k_ч \geqslant 1{,}5$, при этом выдержку времени ее при повреждениях в нормальных режимах, как правило, следует иметь не более 1—1,2 *сек*, если специальная защита шин отсутствует;

в) при повреждении в конце зоны резервирования желательно иметь для последней ступени защиты в режиме каскадного отключения повреждения $k_ч \geqslant 1{,}2$.

Рассматриваемая защита нулевой последовательности должна удовлетворять требованию чувствительности только для случаев однофазных замыканий на землю, если при двухфазных замыканиях на землю этому требованию удовлетворяет защита от междуфазных повреждений.

18. Для облегчения согласования характеристик защит и повышения чувствительности защиты следует по возможности стабилизировать количество заземленных нейтралей трансформаторов и их размещение при различных режимах работы системы.

19. Вопрос о выполнении защит направленными решается с учетом того, что согласование по чувствительности и выдержке времени производится для группы защит, установленных с одной стороны каждой линии, для которых при замыканиях на землю мощность короткого замыкания направлена от шин (так, например, на рис. 6 должны быть согласованы между собой защиты *9, 7, 5, 3* и *1*, а также защиты *2, 4, 6* и *8*).

В соответствии с указанным каждая из защит на концах линий, где при внешнем замыкании мощность направлена к шинам, для предотвращения неселективного действия должна быть выполнена направленной, если она может сработать раньше, чем защита на противоположном конце линии, где мощность направлена от шин.

Исходя из этих общих положений при решении вопроса о выполнении отдельных ступеней токовых защит направленными, следует сравнивать выдержки времени и токи срабатывания защит, установленных на противоположных концах рассматриваемой линии. При этом:

а) для ступеней защит, имеющих равные выдержки времени, направленной выполняется ступень защиты, ток срабатывания которой меньше;

б) для ступеней защит, имеющих неравные выдержки времени, причем защита с меньшей выдержкой времени имеет ток срабатывания, равный или меньший тока срабатывания защиты с большей выдержкой времени, направленной выполняется ступень защиты с меньшей выдержкой времени;

в) для ступеней защит, имеющих неравные выдержки времени, причем защита с меньшей выдержкой времени имеет больший ток срабатывания, необходимость выполнения защиты направленной может быть выяснена в конкретном случае для каждой защиты путем сопоставления токов срабатывания и выдержек времени рассматриваемой защиты и защит от замыканий на землю остальных элементов, присоединенных к шинам данной подстанции (с учетом токораспределения).

Учитывая, что в случаях, указанных в п. «в», имеет место большое влияние режимов работы сети на необходимость выполнения защиты направленной, а также что выяснение необходимости в органе направления мощности при этом относительно сложно, как правило, обе защиты следует выполнять направленными.

В отдельных случаях возможно отказаться от установки органа направления мощности путем некоторого увеличения тока срабатывания защиты. Указанное может оказаться целесообразным, если чувствительность защиты остается при этом в пределах допустимой.

20. Орган направления мощности должен удовлетворять требованию чувствительности при металлических коротких замыканиях в расчетных режимах. В связи с этим чувствительность указанного органа подлежит проверке в соответствии с приложением III.

21. При сближении трасс двух электрически не связанных линий защита нулевой последовательности каждой из этих линий должна быть проверена на возможность неселективного действия от э. д. с. взаимоиндукции, наведенной при замыкании на землю в другой линии. В тех случаях, когда отстройка защиты от указанного режима путем увеличения тока срабатывания защиты недопустимо снижает ее чувствительность, предотвращение неправильного действия защиты может быть достигнуто с помощью блокирующего органа напряжения или тока обратной последовательности (гл. III, пример III).

22. Трансформаторы тока, используемые для защиты, должны удовлетворять кривым кратностей тока при 10%-ной погрешности при токах, равных току срабатывания первой ступени защиты.

Б. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ (ПРИ ОТСУТСТВИИ ОТВЕТВЛЕНИЙ)

1. Особенности расчета ступенчатой токовой (направленной) защиты нулевой последовательности, предусматриваемой на параллельных линиях, возникают как вследствие конфигурации сети (наличие параллельных линий), так и в результате взаимоиндукции между линиями.

Вопросы составления схем замещения нулевой последовательности для расчета токов коротких замыканий с учетом взаимоиндукции между линиями рассмотрены в приложении IV.

2. При выборе токов срабатывания защит парал-

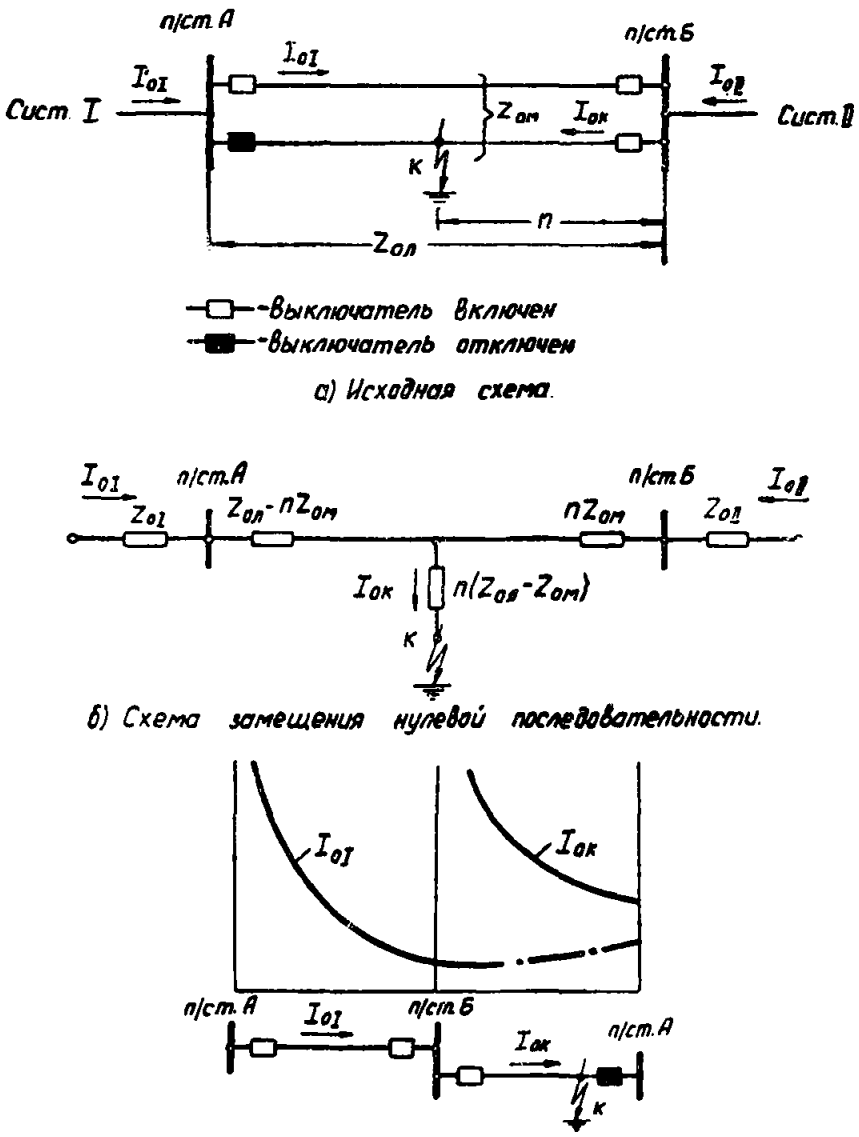
лельных линий следует учитывать особенности токораспределения при каскадном отключении одной из них, обусловленные наличием взаимоиндукции между линиями.

При каскадном отключении замыкания на землю на одной из параллельных линий (рис. 16,*а*) в случае наличия между ними значительной взаимоиндукции ток в неповрежденной линии может возрастать по мере перемещения места замыкания на землю к отключенному концу линии.

Возможность такого изменения тока в неповрежденной линии вытекает из следующего выражения для тока нулевой последовательности в неповрежденной линии, составленного на основании рис. 16,*б*:

$$I_{0I} = k_т I_{0к} = \frac{nZ_{0M} + Z_{0II}}{Z_{0I} + Z_{0л} + Z_{0II}} \cdot I_{0к} \qquad (II\text{-}8)$$

По мере удаления места замыкания на землю ток $I_{0к}$ убывает, а коэффициент токораспределения $k_т$, как видно из выражения (II-8), растет (величина n возрастает). При малой величине сопротивления нулевой последовательности системы со стороны, противоположной месту установки защиты (Z_{0II}) и сильной взаимоиндукции между линиями, рост коэффициента токораспределения $k_т$ может превалировать над уменьшением тока $I_{0к}$, вследствие чего с удалением места короткого замыкания ток в неповрежденной линии может возрастать (рис. 16,*в*).



а) Исходная схема.

б) Схема замещения нулевой последовательности.

в) Пример изменения токов в поврежденной и неповрежденной линиях.

Рис. 16. Каскадное отключение замыкания на землю на одной из параллельных линий.

n — относительная длина участка линии до места повреждения;
$Z_{0л}$ — сопротивление нулевой последовательности одной линии;
$Z_{0м}$ — сопротивление взаимоиндукции между линиями;
Z_{0I}, Z_{0II} — суммарные сопротивления нулевой последовательности системы I и системы II.

3. Ток срабатывания первой ступени защиты параллельных линий должен быть отстроен от тока в месте установки защиты при внешних замыканиях на землю в следующих режимах:

а) при работе одной линии и заземлении второй линии на обоих ее концах в целях учета взаимоиндукции (рис. 17,*а*), если предусматривается такой режим работы линий;

б) в режиме каскадного отключения параллельной линии при повреждении последней на конце, ближайшем к месту установки рассматриваемой защиты (защиты *1* на рис. 17,*б*), так как при наличии взаимоиндукции ток замыкания на землю в этом случае может быть больше, чем в предыдущем случае (п. IIБ-2);

в) при работе одной линии (рис. 17,*в*), если взаимоиндукцией можно пренебречь за ее малостью, а также если заземление отключенной линии предусматривается не более, чем в одной точке.

4. Ток срабатывания второй ступени защиты параллельных линий должен быть отстроен от тока в месте установки защиты при замыкании на землю:

а) в конце защищаемой зоны первой ступени защиты предыдущего участка сети, при работе одной из параллельных линий рассматриваемого участка и за-

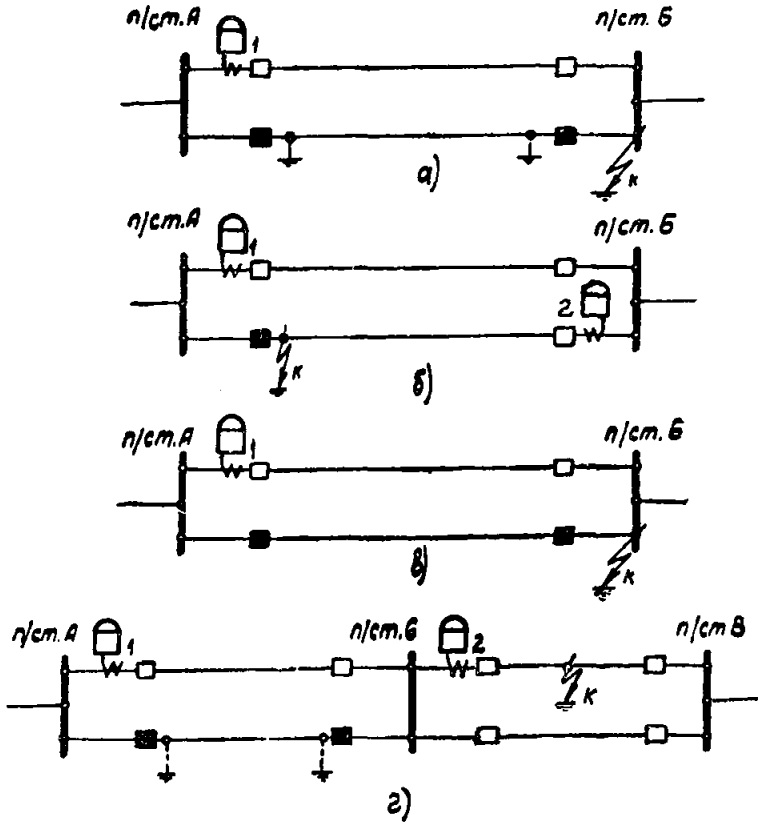


Рис. 17. Расчетные режимы для выбора токов срабатывания защиты параллельных линий с двусторонним питанием.

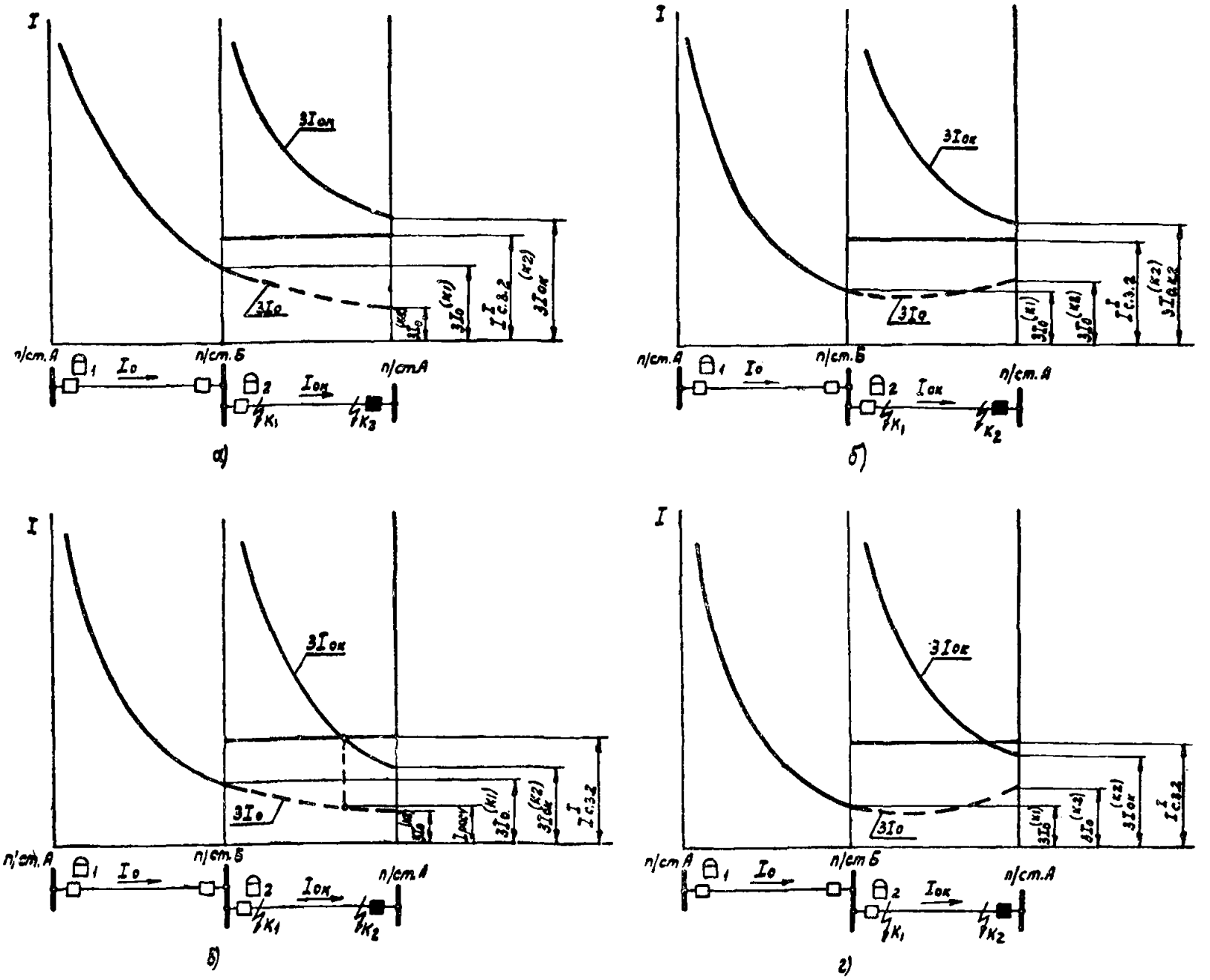


Рис. 18. Токи нулевой последовательности в параллельных линиях при каскадном отключении замыкания на землю на одной из них.

Примечания: 1. Исходная схема дана на рис. 17,*б*. 2. Штриховой линией дан ток в неповрежденной линии.

землении второй линии на обоих ее концах, если такой режим предусматривается и взаимоиндукцией между линиями пренебречь нельзя;

б) на параллельной линии и каскадном отключении повреждения на ней (рис. 17,*б*) в условиях, когда ток в поврежденной линии меньше тока срабатывания первой ступени ее защиты (п. II Б-6).

5. Для цепочки параллельных линий согласование по чувствительности защит смежных участков в соответствии с п. II Б-4,*а* следует производить при работе на данном участке одной линии и обеих параллельных линий на предыдущем участке сети (рис. 17,*г*) [1]. Это согласование целесообразно выполнять графическим способом, так как коэффициент токораспределения для линии *п/ст. А — п/ст. Б* обычно существенно меняется при перемещении точки замыкания вдоль линии *п/ст. Б — п/ст. В* и, следовательно, применение аналитического способа расчета затруднительно (п. IIА-13).

6. На рис. 18 даны кривые токов в параллельных линиях при каскадном отключении замыкания на одной из них и разных значениях взаимоиндукции между этими линиями.

В соответствии с различным характером изменения кривых тока в неповрежденной линии при каскадном отключении замыкания на землю на параллельной линии выбор тока срабатывания второй ступени защиты по условию п. II Б-4,*б* должен производиться с учетом следующего:

а) для случаев, указанных на рис. 18,*а* и *б*, когда в режиме каскадного отключения первая ступень защиты *2* охватывает всю линию, расчет производится (независимо от значения взаимоиндукции между линиями) в предположении замыкания на землю в конце линии по выражению:

$$I^{II}_{с.з1} = k_н k_т I^{I}_{с.з2}, \qquad (II\text{-}9)$$

где $I^{II}_{с.з1}$ и $I^{I}_{с.з2}$ — ток срабатывания второй ступени защиты *1* и соответственно первой ступени защиты *2*;

[1] Режим одновременного отключения на двух смежных участках сети по одной из параллельных линий не учитывается ввиду малой его вероятности.

$k_т$ — коэффициент токораспределения при замыкании на землю в конце линии в режиме каскадного ее отключения.

Выражение (II-9) составлено на основании выражений (II-1), (II-3) и дано применительно к схемам рис. 18,*а* и *б* в предположении замыкания на землю через переходное сопротивление;

б) для случаев, указанных на рис. 18,*в* и *г*, когда в режиме каскадного отключения первая ступень защиты *2* охватывает только часть линии, выбор способа расчета тока срабатывания второй ступени защиты *1* зависит от характера изменения тока в неповрежденной линии:

— при изменении тока в неповрежденной линии, характеризуемом условием $I_0^{(K1)} > I_0^{(K2)}$ (рис. 18, *в*), аналитическое определение тока срабатывания защиты *1* по выражению (II-9) применимо только при отсутствии взаимоиндукции между линиями; при наличии взаимоиндукции аналитический способ расчета по выражению (II-9) дает преувеличенное значение расчетного тока, если коэффициент $k_т$ найден по замыканию в точке K_2 (см. выражение II-8); в этом случае точное значение расчетного тока ($I_{расч}$), входящего в выражение (II-1), может быть определено графически, как это показано вертикальным пунктиром на рис. 18,*в*,

— при изменении тока в неповрежденной линии, характеризуемом условием $I_0^{(K1)} < I_0^{(K2)}$ (рис. 18,*г*), ток срабатывания второй ступени защиты *1* должен быть отстроен от тока в линии при замыкании в точке K_2 и определяется по выражению, соответствующему выражению (II-1):

$$I_{с.з1}^{II} = k_н 3I_0^{(K2)}. \qquad (II\text{-}10)$$

Следует отметить, что для выяснения возможности расчета в указанных случаях по выражениям (II-9) и (II-10) не требуется построения кривых рис. 18. Для этого достаточно лишь выяснить, что $3I_{0к}^{(K2)} \geqslant I_{с.з2}^{I}$ [рис. 18,*а* и *б*, расчет по выражению (II-9)], а при условии $3I_{0к}^{(K2)} < I_{с.з2}^{I}$, что $I_0^{(K1)} < I_0^{(K2)}$ [рис. 18,*г*, расчет по выражению (II-10)]. Если же при условии $3I_{0к}^{(K2)} < I_{с.з2}^{I}$ имеет место $I_0^{(K1)} > I_0^{(K2)}$ (рис. 18,*в*), то расчет может быть произведен по выражению (II-9) только при допустимости неучета взаимоиндукции.

7. В тех случаях, когда вторая ступень защиты параллельных линий не удовлетворяет требованию чувствительности (п. II А-17) (например, при выборе ее тока срабатывания по условию, приведенному на рис. 18,*г*), чувствительность данной ступени может быть повышена:

а) путем увеличения ее выдержки времени и выбора тока срабатывания по условию согласования со вторыми ступенями защит предыдущих участков сети (п. IIА-3) и защиты на противоположном конце параллельной линии;

б) при недопустимости увеличения выдержки времени второй ступени защиты согласно п. «а», из-за применения защиты в качестве основной при работе одной линии, путем использования поперечной дифференциальной направленной защиты нулевой последовательности и согласования с ней по времени второй ступени защиты, с учетом режима каскадного отключения одной из параллельных линий.

8. В тех случаях, когда вторая ступень защиты параллельных линий в режиме каскадного отключения замыкания на землю в конце линии (рис. 17,*б*, защита *2*) не удовлетворяет требованию чувствительности, третья ступень защиты *1*, установленная на противоположном конце линий, при выдержке времени ее равной или меньше выдержки времени третьей ступени защиты *2*, должна быть согласована по чувствительности с указанной второй ступенью защиты (аналогично изложенному в п. II Б-6). При этом защиту *1* следует выполнять четырехступенчатой, если это требуется для обеспечения необходимой чувствительности при повреждении в зоне резервирования. Указанное выше загрубление третьей ступени защиты *1* в ряде случаев можно избежать путем снижения выдержки времени третьей ступени защиты *2* при направлении мощности в параллельной линии к шинам, а в данной линии от шин *п/ст. Б*. Такое снижение выдержки времени третьей ступени защиты может быть достигнуто использованием в схеме дополнительно реле направления мощности параллельной линии. При этом реле направления мощности должны быть приняты двустороннего действия. Следует отметить, что при выполнении защиты четырехступенчатой ее третья ступень должна быть также согласована со вторыми ступенями защит предыдущих участков сети (п. I Б-6).

9. Для выбора тока срабатывания второй ступени защиты, установленной на одиночной линии, при наличии параллельных линий на предыдущем участке сети (рис. 12,*а*) расчетным может явиться режим как обеих параллельных линий, так и одной из них. Режим работы обеих параллельных линий является расчетным, если в этом режиме при замыкании в конце защищаемой зоны первой ступени защиты *2* ток $3I_0$ в неповрежденной линии направлен от шин *п/ст. Б* в линию; при противоположном направлении указанного тока расчетным является режим работы одной линии.

10. Ступень защиты с наибольшей выдержкой времени целесообразно включить на сумму токов параллельных линий, если это требуется по условиям чувствительности защиты к повреждениям в зоне резервирования (п. IIА-17,*в*). При этом индивидуальные ступени защиты с учетом каскадного их действия должны надежно обеспечивать отключение повреждения на защищаемой линии.

11. В случае включения ступени защиты с наибольшей выдержкой времени на сумму токов обеих линий:

а) выдержка времени этой ступени, помимо указанного в п. IIА-4, должна быть отстроена от времени каскадного отключения повреждения на своем участке линии индивидуальными ступенями защиты линии;

б) при определении тока небаланса $I_{нб.уст}$ по выражению (II-7) в качестве $I_{расч}$ следует принимать суммарный ток линий, при этом малая вероятность совпадения по фазе основных гармоник токов небаланса двух групп трансформаторов тока может быть учтена в выражении (II-7) коэффициентом $k_{одн}$ несколько меньшим, чем для одиночной линии (п. IIА-15).

12. Проверка чувствительности ступени с наибольшей выдержкой времени защиты параллельных линий к повреждениям на предыдущем участке в конце зоны резервирования должна производиться:

а) при включении защиты на ток одной линии — в режиме работы обеих параллельных линий на данном участке;

б) при включении защиты на сумму токов обеих линий и наличии на предыдущем участке:

— одной линии — в режиме работы на данном участке одной линии;

— двух параллельных линий — в режиме отключения одной из линий на данном или на предыдущем участке в зависимости от того, в котором из двух рассматриваемых режимов коэффициент чувствительности защиты будет меньше.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ЛИНИЙ В СЕТЯХ 110—220 *кв*

1. В примерах определены параметры токовых направленных и ненаправленных защит нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой выдержки времени, предусмотренных для установки:

а) на одиночных линиях — в качестве основной защиты;

б) на параллельных линиях — в качестве резервной защиты (к поперечной дифференциальной защите) при работе линии обеими цепями и в качестве основной защиты при работе линии одной цепью.

2. Нейтрали трансформаторов приняты заземленными:

а) на станциях — у всех трансформаторов;

б) на подстанциях — у одного трансформатора (предполагается, что в случае отключения заземленного трансформатора заземляется второй трансформатор подстанции).

3. Расчеты токов замыкания на землю выполнены в объеме, необходимом для расчета защиты и произведены для начального момента времени замыкания; в целях упрощения активные составляющие сопротивлений не учитывались.

4. Ступень выдержки времени защит принята $\Delta t = 0{,}6$ *сек.*

5. Токи небаланса $I_{нб.расч}$ в нулевом проводе защиты определены в первом и втором примерах приближенно с использованием выражений (II-7), а в третьем примере — уточненно с использованием выражения (II-6).

6. Первый пример рассчитан графоаналитическим способом, второй и третий — аналитическим способом.

Пример I. Расчет защиты от замыканий на землю цепочки параллельных линий 110 *кв.*

1. Исходная схема и схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей даны на рис. 19. Сопротивления турбогенераторов и трансформаторов, отнесенные к их мощности, приняты:

$$x''_d = 12{,}5\%; \quad x_т = 10{,}5\%.$$

Сопротивления линий приняты:

$$x_{1л} = 0{,}4 \ ом/км; \quad x_{0л} = 1{,}43 \ ом/км.$$

Сопротивление взаимоиндукции и соответственно сопротивление нулевой последовательности линии при отключении и заземлении по концам второй параллельной линии равны:

а) на участке *п/ст. А — п/ст. Б*:

$$x_{0M} = 0{,}777 \ ом/км; \quad x'_{0л} = 1 \ ом/км;$$

б) на участке *п/ст. Б — п/ст. В*:

$$x_{0M} = 0{,}935 \ ом/км; \quad x'_{0л} = 0{,}82 \ ом/км.$$

Взаимоиндукция между линиями на участке *п/ст. А — п/ст. Б* и *п/ст. Б — п/ст. В* учтена в предположении, что на первом участке линии расположены на разных опорах, а на втором — на общих. Для участка линии *станция — п/ст. А* принято, что взаимоиндукция $x_{0M} = 0$.

2. Выбор токов срабатывания и выдержек времени защиты, а также определение коэффициентов ее чувствительности приведены в табл. 1. Защиты *1—4* предусмотрены трехступенчатыми, защиты *5*, *6* — четырехступенчатыми; последние ступени защит включены на сумму токов параллельных линий (п. 6).

На рис. 20 и 21 приведены кривые токов повреждения, протекающих по линиям, а также токи срабатывания, необходимые для выбора вторых ступеней всех защит и третьих ступеней четырехступенчатых защит *5* и *6*.

3. Ток срабатывания первых ступеней защит выбран по выражению (II-1), исходя из условия отстройки защиты от замыканий на землю в конце линии в случае, когда параллельная линия на данном участке отключена и заземлена с обоих концов.

Расчетный ток для каждой из защит подсчитан для двух режимов:

а) максимальный режим станции и системы — для всех защит;

б) максимальный режим станции и минимальный режим системы — для защит *1*, *3* и *5*;

в) максимальный режим системы и минимальный режим станции — для защит *2*, *4* и *6*.

Для защит *4—6* (участка *п/ст. А — п/ст. Б — п/ст. В*) ток срабатывания проверен также аналитически по режиму каскадного отключения замыкания на землю на конце параллельной линии (в соответствии с рис. 17,*б*), так как из-за влияния взаимоиндукции ток в неповрежденной линии возрастает по мере удаления точки замыкания на землю к отключенному концу поврежденной линии; однако для этих защит режим каскадного отключения повреждения не явился расчетным. Для защиты *3* такое возрастание тока в неповрежденной линии не имеет места (см. штрихпунктирные кривые рис. 20 и 21).

4. Токи срабатывания вторых ступеней всех защит выбраны по условиям:

а) согласования с током срабатывания первой ступени защиты предыдущей линии;

б) согласования с током срабатывания первой ступени защиты, установленной на противоположном конце параллельной линии в режиме каскадного отключения последней (в случаях, указанных на рис. 18,*а—в*);

в) отстройки от тока в линии при замыкании на землю в начале параллельной линии и каскадном ее отключении (в случае, указанном на рис. 18,*г*).

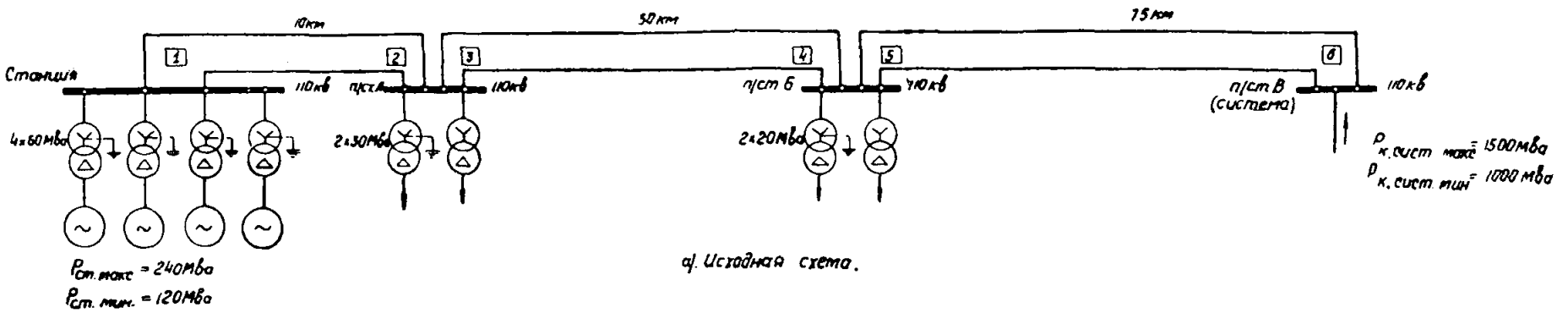
Для защиты *5* принято, что согласование ее с защитами остальных линий 110 *кв п/ст. В*, не показанных на рис. 19, не является расчетным, в связи с чем вторая ступень этой защиты выбиралась только по условиям «б» и «в». Аналогично и вторая ступень защиты *2* выбиралась только по условию «б».

Согласование вторых ступеней защит с первой ступенью защиты предыдущей линии производилось графически, как показано на рис. 20 и 21.

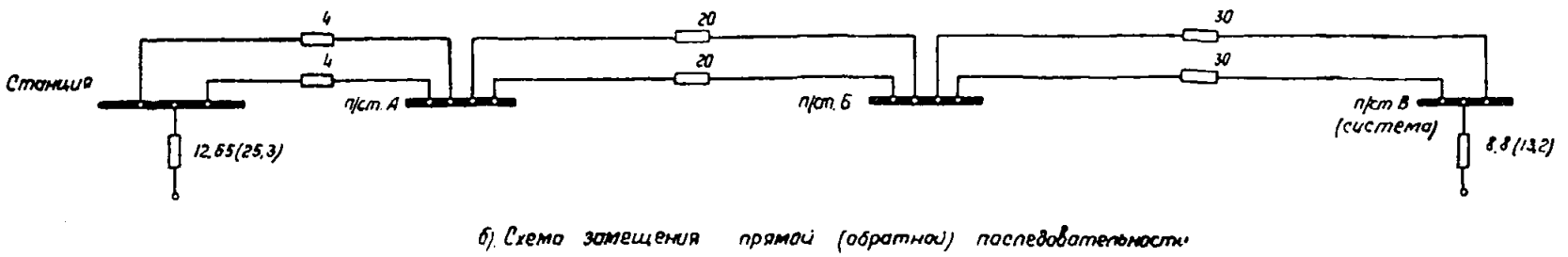
Определение тока срабатывания вторых ступеней всех защит в режиме каскадного отключения повреждения на параллельной линии в соответствии с указанным в п. IIБ-6 производилось аналитически:

— для вторых ступеней защит *1* и *3* (аналогично рис. 18,*а*) — по выражению (II-9);

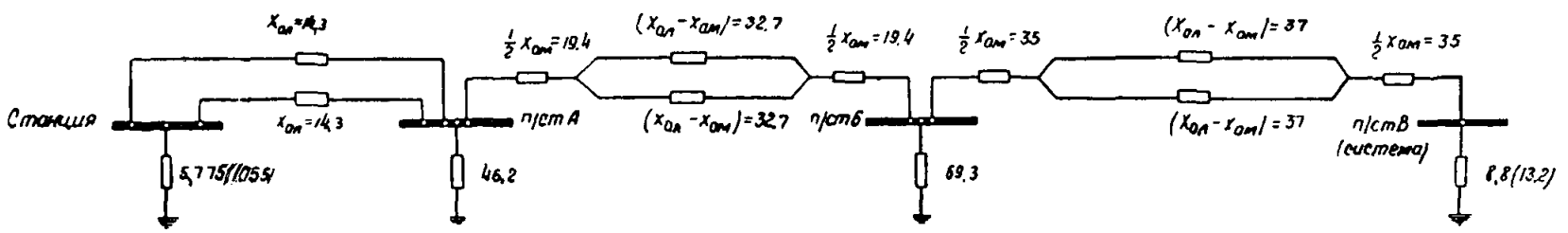
— для второй ступени защиты *2* (аналогично рис. 18,*в*) — по выражению (II-9), поскольку взаимоиндукция между параллельными линиями *станция — п/ст. А* не учитывается (возможен и графический расчет, как это показано на рис. 21);



а). Исходная схема.



б). Схема замещения прямой (обратной) последовательности.



в). Схема замещения нулевой последовательности.

Рис. 19. Исходная схема и схемы замещения (пример I).

Примечания: 1. Сопротивления даны в омах, приведенных к напряжению 115 *кв*.
2. В скобках даны сопротивления станции и системы, соответствующие минимальному режиму.

Таблица 1

Выбор параметров и проверка чувствительности защит сети, рис. 19

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты						Проверка чувствительности токового органа		
					Условия выбора токов срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания, *а*	Принятый ток срабатывания, *а*	Условия выбора выдержек времени	Выдержка времени, *сек*	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
Станция—п/ст. А	Станция	1	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст.А	I′-1	1,3×3 480 = = 4 500	4 500	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *3*	III-1	1,1×1 525 = =1 680	1 700	Согласование со ступенью I защиты *3*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. А	I	1,3
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. А	$II\text{-}2\text{-}1_А$	1,8
			III	Токовая, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.А	III-3	100	100	Согласование со ступенью III защиты *3*	2,9	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. Б	$IV\text{-}1\text{-}2_Б$	>3
	П/ст.А	2	I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах станции	IV′-1	1,3×1 210 = =1 570	1 570	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
			II	Токовая направленная	Согласование со ступенью I защиты *1*	$IV'\text{-}1_А$	1,1×0,204× ×4 500=1 020	1 020	Согласование со ступенью I защиты *1*	0,5	Замыкание на шинах станции	I	0,54
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин станции	$II\text{-}2\text{-}1_С$	2,4
			III	Токовая направленная, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.А	III-3	100	100	Согласование с каскадным действием вторых ступеней защит *1* и *2*	1,7	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.А	$III\text{-}3\text{-}1_А$	>3
П/ст.А—п/ст.Б	П/ст. А	3	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст.Б	$I\text{-}2_0$	1,3×1 540 = = 2 000	2 000	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *4*	$III\text{-}3\text{-}2_А$	1,1×0,66× ×900 = 655	690	Согласование со ступенью I защиты *4*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. Б	I	1,0
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.Б	$II\text{-}1\text{-}2_Б$	1,7

Продолжение табл. 1

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты						Проверка чувствительности токового органа		
					Условия выбора токов срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания, *а*	Принятый ток срабатывания, *а*	Условия выбора выдержек времени	Выдержка времени, *сек*	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
	П/ст. А	3	III	Токовая, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.Б	III-3	100	100	Согласование со ступенью III защиты *5*	2,3	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.В	IV-2-3$_В$	1,5
П/ст.А—п/ст.Б			I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах п/ст.А	I'-2$_0$	1,3×690=900	900	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
	П/ст. Б	4	II	Токовая	Отстройка от тока при каскадном отключении замыкания на параллельной линии	I-1-2$_Б$	1,1×630=690	690	Согласование со ступенью I защиты *2*	0,5	Замыкание на шинах п/ст.А	I	0,47
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.А	II-3-2$_А$	1,7
			III	Токовая, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.Б	III-3	100	100	Согласование со ступенью III защиты *2*	2,3	Каскадное отключение замыкания вблизи шин станции	III-3-1$_С$	>3
			I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах п/ст.В	III-3$_0$	1,3×737=960	960	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
			II	Токовая направленная	Отстройка от тока при каскадном отключении замыкания на параллельной линии	III-3$_Б$	1,1×710=780	780	Согласование со ступенью I защиты *6*	0,5	Замыкание на шинах п/ст.В	I	0,32
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.В	II-2-3$_В$	1,3
П/ст.Б—п/ст.В (система)	П/ст. Б	5	III	Токовая направленная	Согласование со ступенью II защиты *6*	III-3$_Б$	1,1×0,54× ×780=463	465	Согласование со ступенью II защиты *6*	1,1	Замыкание на шинах п/ст.В	I	0,53
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.В	II-2-3$_В$	2,2

Продолжение табл. 1

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты						Проверка чувствительности токового органа		
					Условия выбора токов срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания, *а*	Принятый ток срабатывания, *а*	Условия выбора выдержек времени	Выдержка времени, *сек*	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
	П/ст. Б	5	IV	Токовая направленная, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.Б	IV-2	100	100	Согласование с каскадным действием вторых ступеней защит *5* и *6*	1,7	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.Б	IV-2-3$_Б$	>3
			I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст.Б	I-3$_0$	1,3×1 210 = = 1 570	1 570	—	Без выдержки времени	См. рис. 22		
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *5*	IV-2-3$_В$	1,1×0,705× ×960=745	780	Согласование со ступенью I защиты *5*	0,5	Замыкание на шинах п/ст.Б	I	0,65
											Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.Б	II-2-3$_Б$	1,3
П/ст.Б—п/ст.В (система)			III	Токовая	Согласование со ступенью II защиты *5*	IV-2-3$_В$	1,1×0,705× ×780 = 605	610	Согласование со ступенью II защиты *5*	1,1	Замыкание на шинах п/ст.Б	I	0,82
	П/ст. В (система)	6									Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.Б	II-2-3$_Б$	1,6
			IV	Токовая, включенная на сумму токов	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазн. к. з. за трансформаторами п/ст.Б	IV-2	100	100	Согласование со ступенью III защиты *4*	2,9	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст.А	III-3-2$_А$	1,8

Примечания:

1. Обозначение режимов для схемы рис. 19

I — станция и система в максимальном режиме;
II — станция и система в минимальном режиме;
III — станция в максимальном режиме, система в минимальном режиме;
IV — станция в минимальном режиме, система в максимальном режиме;
1 — отключена одна из параллельных линий на участке станция — п/ст.А;
2 — отключена одна из параллельных линий на участке п/ст.А — п/ст.Б;
3 — отключена одна из параллельных линий на участке п/ст.Б — п/ст.В (система).

Режимы с односторонним отключением линии отмечены арабской цифрой с дополнительным индексом (А. Б, В, С), соответствующим обозначению подстанции или станции, со стороны которой линия отключена.

Режимы с отключением одной из параллельных линий и заземлением ее по концам обозначены индексом „0"

Штрихом (при обозначении режима) отмечены двухфазные замыкания на землю.

2. С целью отказа от установки органа направления мощности в защитах *3* и *6* принято:

$$а)\ I^{II}_{с.з.3} = I^{II}_{с.з.4};$$

$$б)\ I^{II}_{с.з.6} = I^{II}_{с.з.5}.$$

3. Схема размещения защит дана на рис. 23.

4. Токи срабатывания защит определены по выражениям:
II-1 — для первых ступеней всех защит, II-1 или II-9 — для вторых ступеней всех защит и третьих ступеней защит *5* и *6*.

— для вторых ступеней защиты *4* и *5* (аналогично рис. 18,*г*) — по выражению (II-10);

— для второй ступени защиты *6* (аналогично рис. 18,*б*) — по выражению (II-9).

Указанные расчетные условия определяются характером соответствующих кривых токов в режимах каскадного отключения повреждения (рис. 20 и 21).

Для расчета токов срабатывания аналитическим способом построение кривых изменения токов (рис. 20 и 21) не обязательно (п. IIБ-6).

Проведенные расчеты выявили следующие условия для выбора вторых ступеней защит. Согласование с током срабатывания первой ступени защиты предыдущей линии явилось расчетным для защиты *1*. Согласование с первой ступенью защиты на противоположном конце параллельной линии в режиме каскадного отключения последней явилось расчетным для защиты *2*, *3* и *6*. Для защиты *4* и *5* расчетным явилось условие отстройки защиты от тока в линии при замыкании на параллельной линии вблизи шин *п/ст. Б* и каскадном отключении повреждения со стороны этой подстанции.

5. Необходимость установки третьих индивидуальных ступеней защиты *5* и *6* вызвана тем, что вторые ступени этих защит недостаточно чувствительны к замыканиям на противоположном конце линии (в расчетном минимальном режиме и каскадном отключении повреждения имеют коэффициент чувствительности $k_ч$=1,3), а для защиты *6* также целесообразностью более быстрого отключения поврежденной линии со стороны системы (т. е. со стороны *п/ст. В*).

Токи срабатывания третьих ступеней защит *5* и *6* выбраны по условию согласования со второй ступенью защиты на противоположном конце параллельной линии в режиме каскадного отключения последней. Расчет произведен аналитически по выражению (II-9) (рис. 18,*б*). Условие согласования третьей ступени защиты *6* со второй ступенью защиты *4* не явилось расчетным.

6. Включение на сумму токов параллельных линий третьих ступеней защит *1—4* и четвертых ступеней защит *5* и *6* принято в целях обеспечения достаточной чувствительности их к замыканиям на землю в конце *зоны резервирования* (*в конце смежного участка*). Такое включение защит допустимо, поскольку:

а) первые и вторые ступени защит *1—4* и первые, вторые и третьи ступени защит *5* и *6* обеспечивают с достаточными коэффициентами чувствительности отключение поврежденной линии (с учетом каскадного действия защиты, см. табл. 1);

б) принято, что на параллельных линиях установлены поперечные дифференциальные направленные защиты, являющиеся основными защитами этих линий и действующие при замыканиях на землю.

7. Токи срабатывания третьих ступеней защит *1—4* и четвертых ступеней защит *5* и *6* были определены по выражению (II-4) *из условия отстройки защиты от токов небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при трехфазных замыканиях за трансформаторами подстанций* (шины низшего напряжения которых предполагаются секционированными через реактор) как на своем, так и на противоположном концах линии и округлены до 100 *а*; при определении $I_{нб.уст}$ *по выражению (II-7) было принято, что коэффициент* $k_{одн}\approx 0{,}7$ (включение реле на шесть трансформаторов тока).

8. Выдержки времени защит *1—6* были определены следующим образом:

а) Для первых ступеней всех защит, отстроенных от замыканий в конце защищаемой линии, — без выдержки времени.

б) Для вторых ступеней всех защит и третьих ступеней защит *5* и *6* — по условию согласования с первыми ступенями предыдущих защит и соответственно со вторыми ступенями защиты *6* и *5*.

в) Для третьей ступени защиты *2* по условию отстройки от времени каскадного отключения повреждения на одной из параллельных линий *станция — п/ст. А* вторыми ступенями защит *1* и *2* (в предположении, что данное условие является расчетным, а не условие согласования с защитами других линий, которые могут отходить от шин станции); определение указанной выдержки времени произведено по выражению

$$t_2^{III} = t_1^{II} + t_{оВ} + t_2^{II} + \Delta t,$$

где t_1^{II} и t_2^{II} — выдержки времени вторых ступеней защит *1* и *2*;

$t_{оВ}$ — время отключения выключателя (от защиты *1*);

Δt — ступень выдержки времени.

г) Для четвертой ступени защиты *5* принято (аналогично защите *2*), что расчетным условием является отключение повреждения на одной из параллельных линий *п/ст. Б — п/ст. В* при каскадном действии вторых ступеней защит *5* и *6*.

д) Для третьих ступеней защит *1*, *3* и *4* и четвертой ступени защиты *6* — по условию согласования с предыдущими защитами.

9. Размещение органов направления мощности в защитах выполнено в соответствии с указанным в п. IIА-19. Реле направления мощности предусмотрены в защитах *2*, *4* и *5*.

Для исключения органов направления мощности в защитах *3* и *6*:

а) ток срабатывания второй ступени защиты *3* увеличен до тока срабатывания второй ступени защиты *4*;

б) ток срабатывания второй ступени защиты *6* увеличен до тока срабатывания второй ступени защиты *5*.

Вторая ступень защиты *5* принята направленной ввиду выполнения остальных ступеней этой защиты направленными.

10. Для оценки величин защищаемых зон первых и вторых ступеней всех защит и третьих ступеней защит *5* и *6* на рис. 22 приведены кривые токов в режиме I и в минимальных режимах, а также нанесены токи срабатывания всех ступеней защит *1—6*.

Чувствительность защит при повреждениях в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования (в конце смежного участка) оценена с помощью коэффициентов чувствительности, данных в табл. 1, которые приведены для:

а) вторых ступеней всех защит и третьих ступеней защит *5* и *6* при замыканиях в конце защищаемой линии в режиме I и при каскадных отключениях повреждений в режимах, характеризующихся наименьшими значениями коэффициентов чувствительности этих ступеней защит;

б) третьих ступеней защит *1—4* и четвертых ступеней защит *5—6* при каскадных отключениях замыканий в конце зоны резервирования (на смежном участке) в режимах, характеризующихся наименьшими значениями коэффициентов чувствительности этих ступеней защит.

11. Проверка чувствительности реле направления мощности, предусмотренных в защитах *2* и *5*, произведена для случаев коротких замыканий в конце зон резервирования указанных защит. Для реле направления мощности защиты *4* проверка чувствительности не требуется, поскольку это реле предусмотрено для действия только в первой ступени защиты.

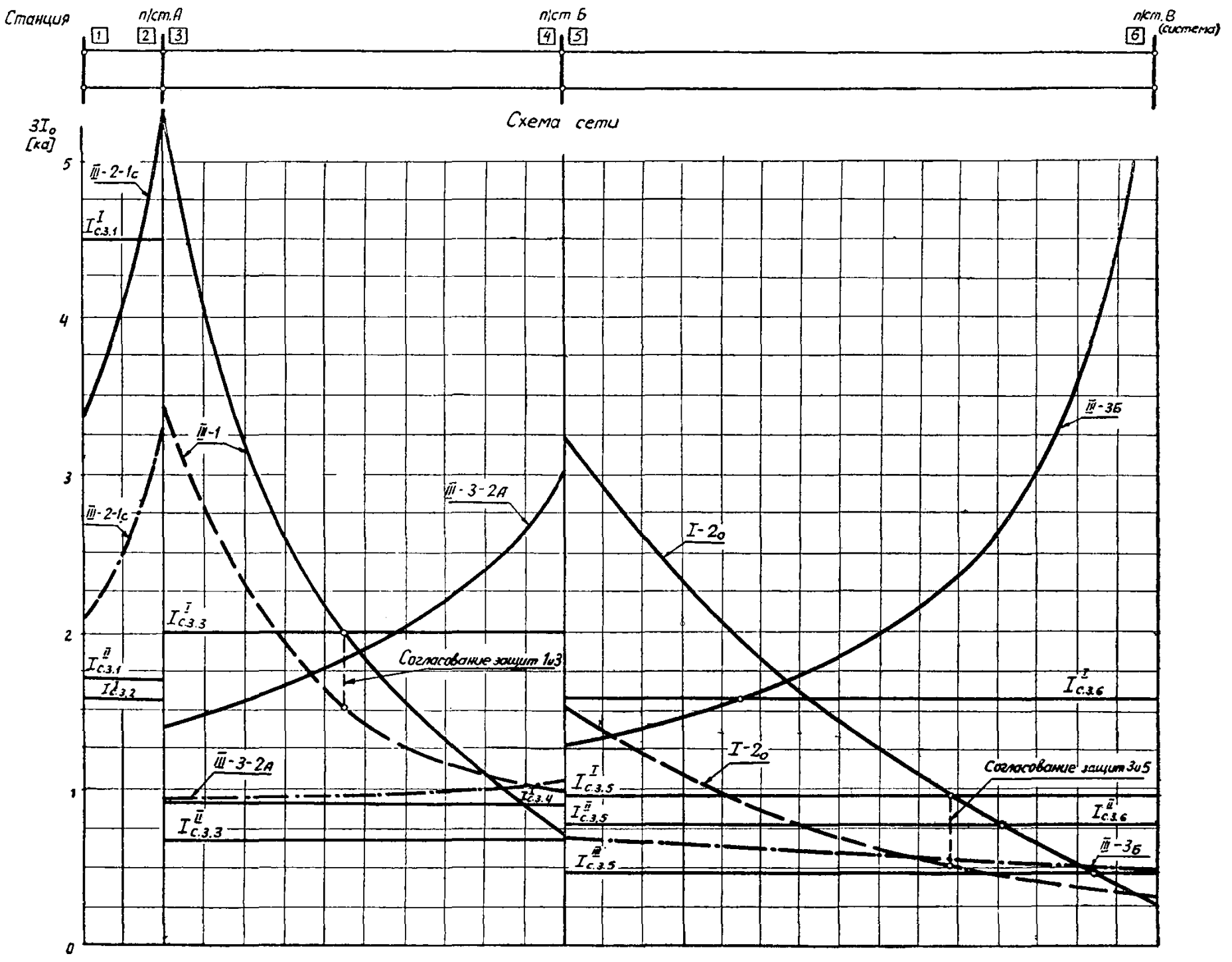


Рис. 20. Расчет токов срабатывания вторых ступеней защит *1*, *3* и *5* и третьей ступени защиты *5* в сети рис. 19.

№ защит	Ступень защиты	Рассматриваемые режимы	Расчетный режим
1	II	III-2-1$_C$; III-1	III-1
3	II	III-3-2$_A$; I-2$_0$	III-3-2$_A$
5	II	III-3$_Б$	III-3$_Б$
5	III	III-3$_Б$	III-3$_Б$

Примечания:

1. Обозначение режимов дано в табл. 1.
2. Штриховыми линиями даны кривые изменения токов в неповрежденной линии при замыкании на предыдущем участке сети.
3. Штрих-пунктиром даны кривые изменения токов в неповрежденной линии при замыкании на параллельной линии и каскадном ее отключении.

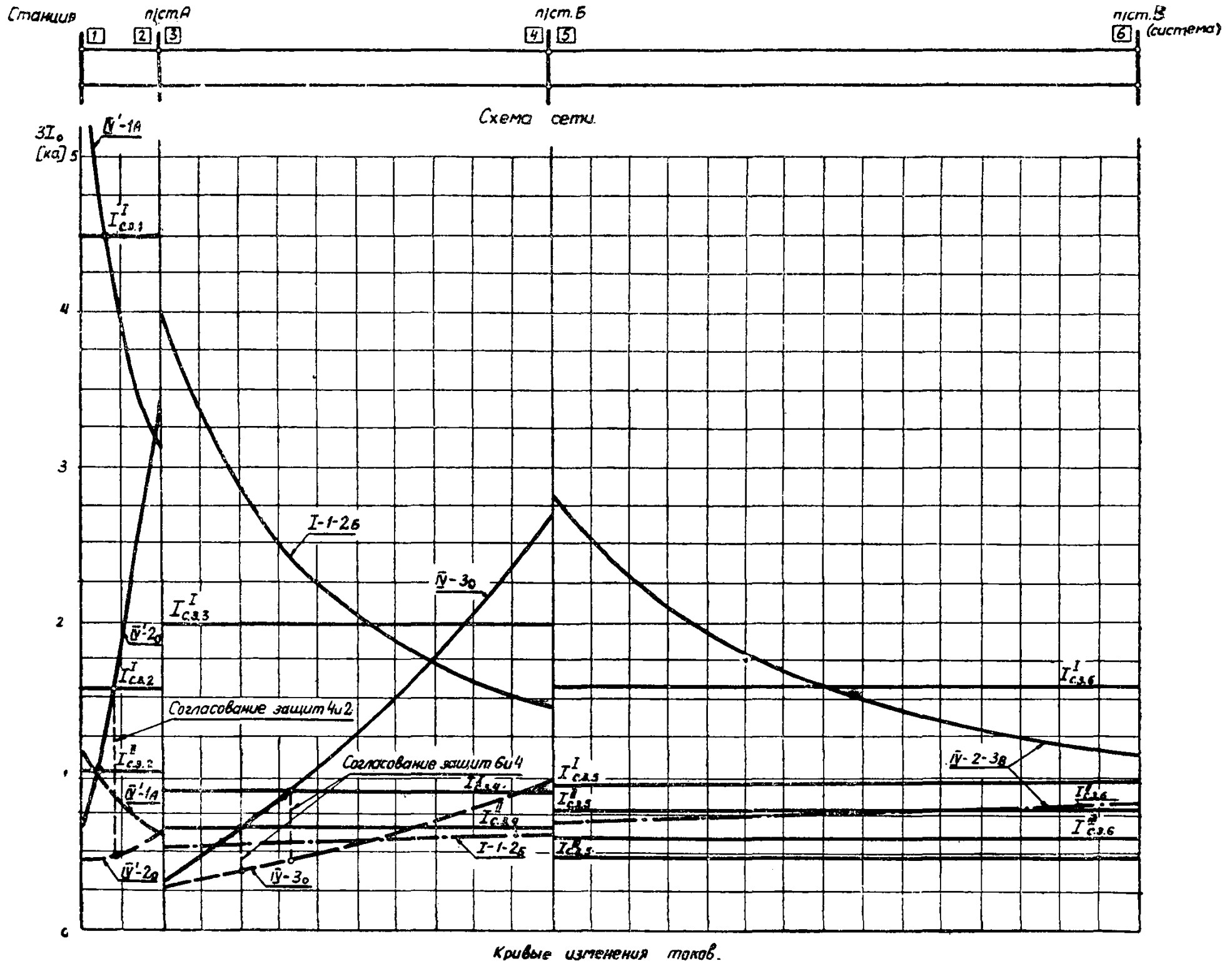


Рис. 21. Расчет токов срабатывания вторых ступеней защит *2*, *4*, *6* и третьей ступени защиты *6* в сети рис. 19.

№ защиты	Ступень защиты	Рассматриваемые режимы	Расчетный режим
2	II	$IV'\text{-}1_A$	$IV'\text{-}1_A$
4	II	$I\text{-}1\text{-}2_Б$; $IV'\text{-}2_0$	$I\text{-}1\text{-}2_Б$
6	II	$IV\text{-}2\text{-}3_B$; $IV\text{-}3_0$	$IV\text{-}2\text{-}3_B$
6	III	$IV\text{-}2\text{-}3_B$; $IV\text{-}3_0$	$IV\text{-}2\text{-}3_B$

Примечания: 1. Обозначение режимов дано в табл. 1.

2. Штриховыми линиями даны кривые изменения токов в неповрежденной линии при замыкании на предыдущем участке сети.

3. Штрих-пунктиром даны кривые изменения токов в неповрежденной линии при замыкании на параллельной линии и каскадном ее отключении.

Рис. 22. Защищаемые зоны первых и вторых ступеней защит *1* — *6* и третьих ступеней защит *5* и *6* в сети рис. 19.

Примечания: 1. Обозначения режимов даны в табл. 1. 2. Штриховыми линиями обозначены кривые изменения токов в неповрежденной линии при замыкании на смежной линии. 3. Временные характеристики защит построены для режима I.

Таблица 2

Проверка чувствительности органа направления мощности защит сети рис. 19

№ защит	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим		Величины, соответств. расчетному режиму		Величины z_{oc}, *ом* по кривым рис. П-8	Тип принятого реле
		для $3I_{oз}$	для z_{oc}	$3I_{oз}$, *а*	z_{oc}, *ом*		
2	Каскадное отключение замыкания на землю вблизи шин п/ст. А на параллельной линии	III-3-1$_А$	1	462	31,2	11,5	ИМБ-178/1
5	Каскадное отключение замыкания на землю вблизи шин п/ст. Б на параллельной линии	IV-2-3$_Б$	I	675	33,6	~7,0	ИМБ-178/1

Примечания: 1. Обозначения режимов для схемы рис. 19 см. примечание 1 к табл. 1.
2. Проверка чувствительности органов направления мощности выполнена по кривым рис. П-8 в предположении, что коэффициенты трансформации трансформаторов тока приняты $\frac{600}{5}$

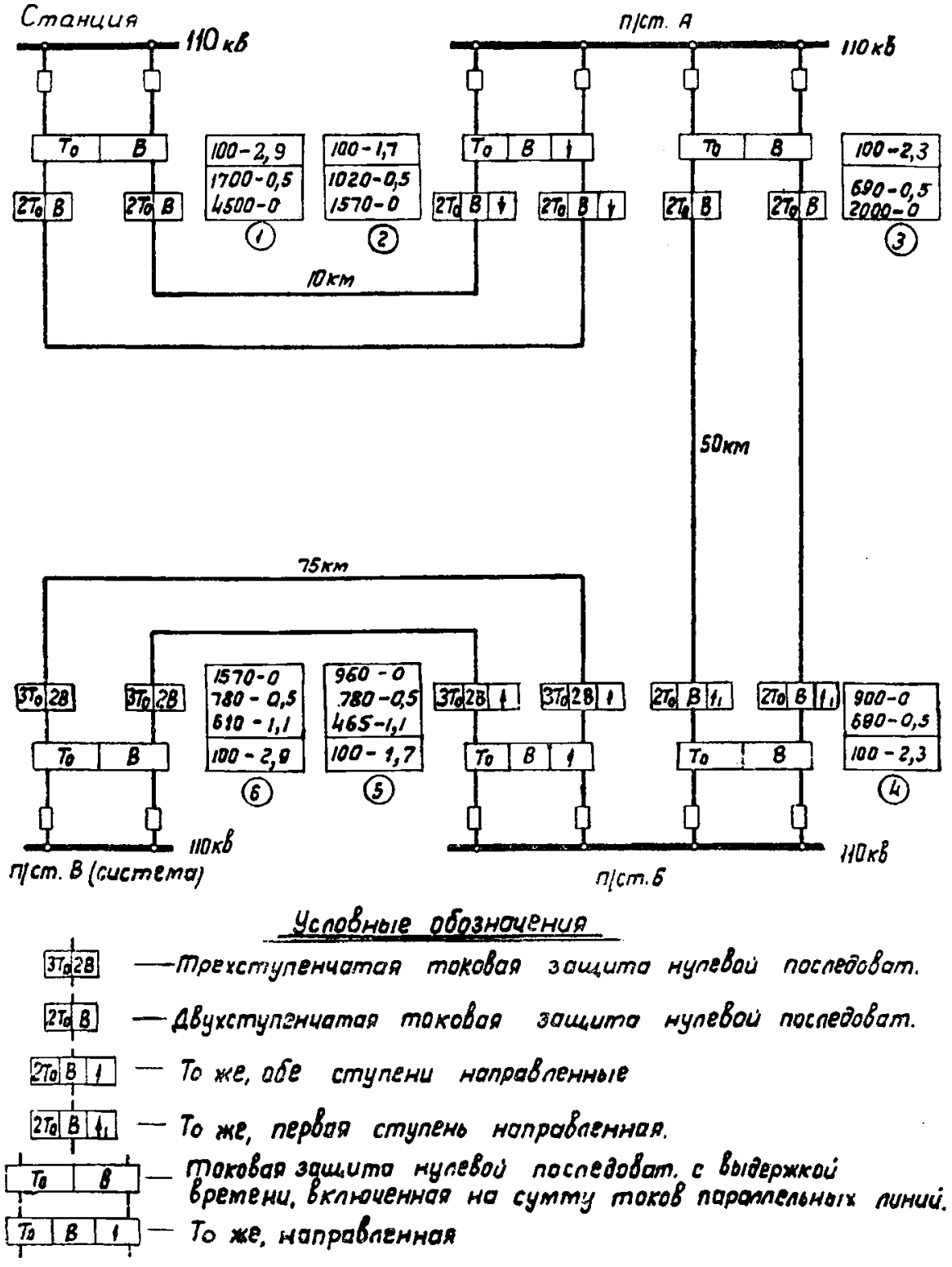


Рис. 23. Схема размещения защит в сети рис. 19.

Результаты проверки, выполненной в соответствии с приложением III, приведены в табл. 2.

При проверке реле направления мощности принималось, что токовые обмотки этих реле включены на ток одной линии (аналогично включению реле направления мощности в схеме рис. 3).

12. Схема размещения защит приведена на рис. 23.

Пример II. Расчет защиты от замыкания на землю кольцевой сети 110 *кв*.

1. Исходная схема и схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей даны на рис. 24.

Отношение суммарных сопротивлений системы прямой и нулевой последовательностей принято:

$$\frac{x_{0\ \text{сист}}}{x_{1\ \text{сист}}} = 1{,}2.$$

Сопротивления турбогенераторов и трансформаторов отнесенные к их мощности, приняты:

$$x''_d = 12{,}5\% \text{ и } x_т = 10{,}5\%.$$

Сопротивления линий приняты:

$$x_{1л} = 0{,}4\ ом/км;\ x_{0л} = 1{,}4\ ом/км.$$

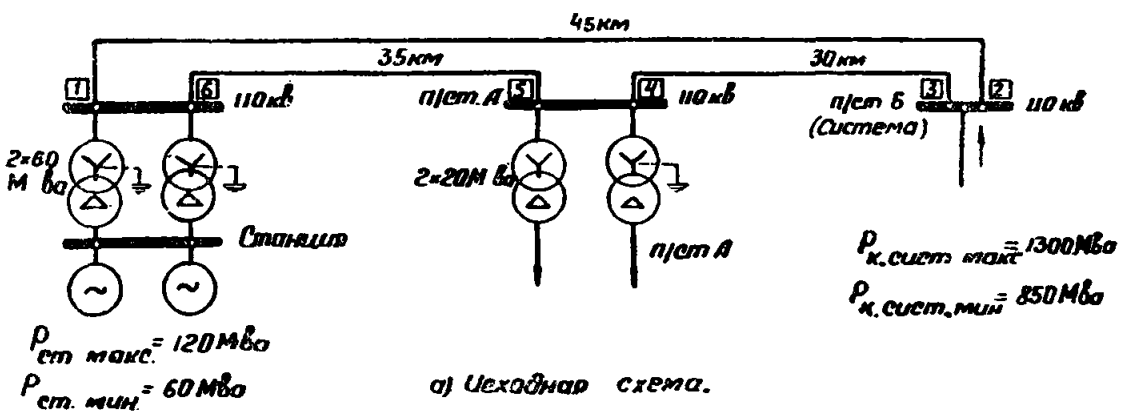


Рис. 24. Исходная схема и схемы замещения (Пример II).

Примечания: 1. Сопротивления даны в омах, приведенных к напряжению 115 *кв*.

2. В скобках даны сопротивления станции и системы, соответствующие минимальному режиму.

Таблица 3

Выбор параметров и проверка чувствительности защит сети рис. 24

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты						Проверка чувствительности токового органа		
					Условия выбора токов срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания $I_{с.з}$, *а*	Принятый ток срабатывания, *а*	Условия выбора выдержек времени	Выдержка времени, *сек*	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
Станция — —п/ст. Б (система)	Станция	1	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст. Б	III-2	1,3×1 070=1 390	1 400	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин станции	I	>3
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *3*	III-2_A	1,1×0,197×2 100= =455	465	Согласование со ступенью I защиты *3*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. Б	I	2
			III	Токовая	Отстройка от токов небаланса при 3-фазн. к. з. за трансформатором п/ст. А	IV-2	100	100	Согласование со ступенью III защиты *3*	2,3	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. А	I-2_A	3
	П/ст. Б	2	I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах станции	IV'-3	1,3×890=1 160	1 160	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин п/ст. Б	I	>3
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *6*	IV-3_A	1,1×0,235×1 780= =465	465	Согласование со ступенью I защиты *6*	0,5	Замыкание на шинах станции	I	1,5
			III	Токовая	Отстройка от токов небаланса при 3-фазн. к. з. за трансформатором п/ст. А	IV-2	100	100	Согласование со ступенью III защиты *6*	2,3	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. А	I-3_A	2,4
П/ст. Б— —п/ст. А	П/ст. Б	3	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст. А	I-3	1,3×1 620=2 100	2 100	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин п/ст. Б	I	>3
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *5*	I-3_C	1,1×0,57× ×1 030=6 5	645	Согласование со ступенью I защиты *5*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. А	I	2,4
			III	Токовая	Отстройка от токов небаланса при 3-фазн. к. з. за трансформатором п/ст. А	I-3	85	100	Согласование со ступенью III защиты *5*	1,7	Каскадное отключение замыкания вблизи шин станции	I-3_C	>3

Продолжение табл. 3

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты: Условия выбора токов срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания $I_{с.з}$, *а*	Принятый ток срабатывания, *а*	Условия выбора выдержек времени	Выдержка времени, *сек*	Проверка чувствительности токового органа: Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
П/ст. Б — — п/ст. А	П/ст. А	4	I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах п/ст. Б	III-1	1,3×1 030=1 340	1 340	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин п/ст. А	I	1,9
			II	Токовая направленная	Согласование со ступенью I защиты *2*	III-$1_С$	1,1×0,195×1 160=249	250	Согласование со ступенью I защиты *2*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. Б	I	>3
			III	Токовая направленная	Согласование со ступенью II защиты *2*	III-$1_С$	1,1×0,195×465=100	100	Согласование со ступенью II защиты *2*	1,1	Каскадное отключение замыкания вблизи шин станции	I-$1_С$	2,2
	П/ст. А	5	I	Токовая направленная	Отстройка от замыкания на шинах станции	IV′-1	1,3×790=1 030	1 030	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин п/ст. А	I	2,7
			II	Токовая направленная	Согласование со ступенью I защиты *1*	IV-$1_Б$	1,1×0,226×1 400=348	350	Согласование со ступенью I защиты *1*	0,5	Замыкание на шинах станции	I	1,9
			III	Токовая направленная	Согласование со ступенью II защиты *1*	IV-$1_Б$	1,1×0,226×465=115	115	Согласование со ступенью II защиты *1*	1,1	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. Б	I-$1_Б$	1,6
П/ст. А — — станция	Станция	6	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст. А	I-1	1,3×1 370=1 780	1 780	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин станции	I	>3
			II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты *4*	I-$2_Б$	1,1×0,54×1 340=795	800	Согласование со ступенью I защиты *4*	0,5	Замыкание на шинах п/ст. А	I	1,7
			III	Токовая	Отстройка от токов небаланса при 3-фазн. к. з. за трансформатором п/ст. А	I-2	85	115	Согласование со ступенью III защиты *4*	1,7	Каскадное отключение замыкания вблизи шин п/ст. Б	I-$2_Б$	>3

Примечания:

1. Обозначение режимов для схемы рис. 24

I — станция и система в максимальном режиме;

II — станция и система в минимальном режиме;

III — станция в максимальном режиме, система в минимальном режиме;

IV — станция в минимальном режиме, система в максимальном режиме.

1 — отключена линия *станция — п/ст. Б*;

2 — отключена линия *п./ст. Б — п/ст. А*;

3 — отключена линия *п/ст. А — станция*.

Режимы с односторонним отключением линии отмечены арабской цифрой с дополнительным индексом (А, Б, С), соответствующим обозначению подстанции или станции, со стороны которой линия отключена.

Штрихом (при обозначении режима) отмечены двухфазные замыкания на землю.

2. С целью отказа от установки органа направления мощности в защитах *1, 3, 6* принято:

а) $I^{II}_{с.з\,1} = I^{II}_{с.з\,2}$;

б) $I^{III}_{с.з\,3} = I^{III}_{с.з\,4}$;

в) $I^{III}_{с.з\,6} = I^{III}_{с.з\,5}$.

3. Схема размещения защит дана на рис. 26.

4. Токи срабатывания защит определены по выражениям:

II-1 — для первых ступеней всех защит;

II-9 — для вторых ступеней всех защит и третьих ступеней защит *4* и *5*.

Таблица 4

Распределение утроенных токов нулевой последовательности ($3I_0$) при замыканиях на землю в различных точках сети рис. 25

Место к. з.	№ режима		I	I′-1	I′-3	I-1С	I-3С	III-1С	IV′-1	IV′-3	II-1С	IV-1С
K_1	$x_{1\Sigma}$, *ом*		11,30	14,80	13,3	26,4	34,10	29,6	21	18	30,6	26,8
	$x_{0\Sigma}$, *ом*		9,03	10,1	10	73,3	78,8	77,5	17,9	17,6	77,6	73,4
	№ тока	1	—106	—	—803	—1 580	107	—1 460	—	—890	—1 440	—1 560
		2	—299	—405	78	220	—771	284	—444	86,6	272	210
		3	—654	—721	—	118	—1 350	152	—790	—	133	103
		4	4 900	4 950	5 130	118	107	152	2 710	2 840	133	103
		5	355	316	78	102	583	132	346	86,6	139	107
		6	1 000	405	726	1 360	664	1 170	444	803	1 160	1 360

Место к. з.	№ режима		I	I-1	I-2	I-1Б	I-2Б	III-1	III-2	IV-1Б	III-1Б	—
K_2	$x_{1\Sigma}$, *ом*		7,83	8,36	8,13	32,8	39,3	11,6	11,05	39	33,60	—
	$x_{0\Sigma}$, *ом*		9,23	10,3	10,30	73,1	73,8	14,5	14,5	80,9	73,1	—
	№ тока	1	932	—	1 050	1 430	—94	—	1 070	1 250	1 420	—
		2	918	1 020	—	—102	1 300	1 030	—	—159	—95	—
		3	408	544	—93,5	—182	705	550	—95,3	—283	—177	—
		4	1 340	544	956	1 250	611	550	975	970	1 240	—
		5	510	476	93,5	79,7	600	480	95,3	124	82	—
		6	6 150	6 340	6 450	102	94	4 250	4 380	159	95	—

	№ режима		I	I-1	I-2А	I-3А	III	III-1	III-2А	IV	IV-1	IV-3А	I-3	I-2
K_3	$x_{1\Sigma}$, *ом*		13,9	14,1	20,10	27,3	15,92	16,1	23,2	15,6	16,4	32	20,1	27,3
	$x_{0\Sigma}$, *ом*		20,2	20,2	52,30	59	20,9	21	56,5	21,3	21,2	66,6	29,8	31,4
	№ тока	1	30	—	301	—237	106	—	382	—90	—	—364	224	167
		2	—1 560	—1 540	—2 150	23	—1 350	—1 310	—1 940	—1 480	—1 460	35,4	—1 620	—
		3	1 370	1 370	—26,8	1 750	1 280	1 300	—34	1 150	1 090	1 520	—	1 250
		4	1 410	1 370	274	1 510	1 390	1 300	348	1 060	1 090	1 160	224	1 083
		5	1 220	1 200	26,8	23	1 140	1 130	34	1 160	1 140	35,4	1 220	1 070
		6	1 530	1 540	1 850	214	1 240	1 310	1 560	1 560	1 460	329	1 400	167

Примечания: 1. Обозначение режимов см. примечание 1 табл. 3.
2. На схеме рис. 25 стрелками указаны принятые положительные направления токов в линиях.
3. Токи (*а*) приведены к напряжению 115 *кв*.
4. При каскадном отключении линии токи даны для случая замыкания на землю на отключенном конце линии.

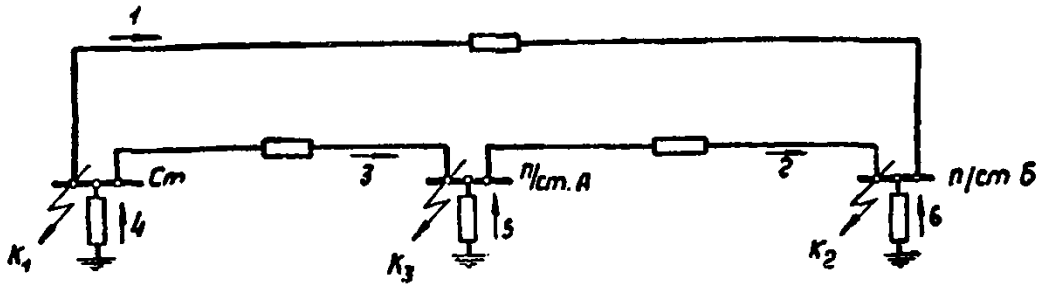


Рис. 25. Точки повреждения и нумерация токов в схеме замещения нулевой последовательности сети, приведенной на рис. 24.

Таблица 5

Проверка чувствительности органа направления мощности защит сети рис. 24

№ защиты	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим		Величины, соответствующие расчетному режиму		Величина $z_{ос}$, *ом* по кривым рис. П-8	Тип установленного реле
		для $3I_0$	для $z_{ос}$,	$3I_{оз}$, *а*	$z_{ос}$, *ом*		
4	Каскадное отключение замыкания на землю вблизи шин станции	IV-$1_С$	IV-$1_С$	210	35,3	34,5	ИМБ-178/1
5	Каскадное отключение замыкания на землю вблизи шин п/ст. Б	III-$1_Б$	III-$1_Б$	177	32,2	3,5	РБМ-178/1

Примечания: 1. Обозначения режимов для схемы рис. 24 см. примечание 1 к табл. 3.

2. Проверка чувствительности органов направления мощности выполнена по кривым рис. П-8 в предположении, что коэффициенты трансформации трансформаторов тока приняты:

а) для защит *1*, *2*, *5* и *6* — $\frac{600}{5}$;

б) для защит *3* и *4* — $\frac{400}{5}$.

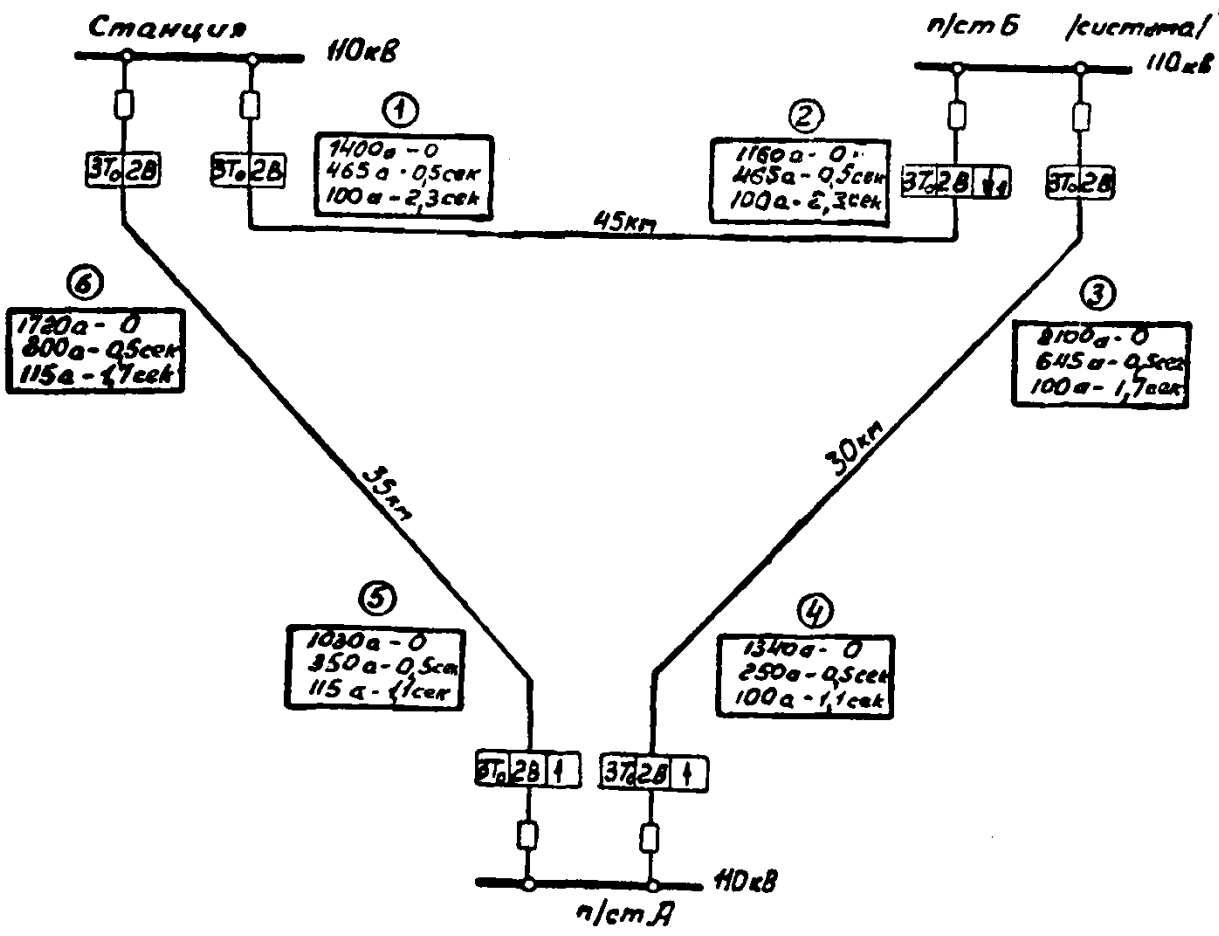


Рис. 26. Схема размещения защит в сети рис. 24.

$\boxed{3T_0 \mid 2B}$ — трехступенчатая токовая защита нулевой последовательности;

$\boxed{3T_0 \mid 2B \mid \uparrow}$ — трехступенчатая токовая защита нулевой последовательности, все три ступени направленные;

$\boxed{3T_0 \mid 2B \mid \uparrow_1}$ — трехступенчатая токовая защита нулевой последовательности, первая ступень направленная.

2. Расчет защиты произведен аналитическим способом. Выбор токов срабатывания и выдержек времени защиты, а также определение коэффициентов ее чувствительности приведены в табл. 3. Как следует из этой таблицы, на всех линиях должна быть предусмотрена токовая трехступенчатая защита.

При выборе характеристик защит предполагалось, что условие согласования защиты *1* и защиты *4* с защитами не показанных на рис. 24 линий 110 *кв п/ст. Б* не является расчетным.

3. В табл. 4 приведены необходимые для расчета защит данные по токораспределению при замыканиях на землю в различных точках сети. Точки повреждения и номера токов в таблице соответствуют схеме, приведенной на рис. 25.

4. Ток срабатывания первых ступеней защит выбран по выражению (II-1).

Для определения тока срабатывания первых ступеней защит рассмотрены следующие сочетания режимов работы станции и системы:

а) максимальный режим станции и системы для всех защит;

б) максимальный режим станции и минимальный режим системы — для защит *1*, *4*, *6*;

в) минимальный режим станции и максимальный режим системы — для защит *2*, *3*, *5*.

Для всех защит в указанных режимах произведено отключение одной из линий в соответствии со случаем, указанным в п. IIA-2 и на рис. 8, имеющее следствием увеличение тока в линии, на которой установлена рассматриваемая защита.

5. Вторые ступени защит выбраны по условию согласования с первой ступенью предыдущей защиты по выражению (II-9) (см. также п. 8а). Расчетным режимом для выбора вторых ступеней всех защит является режим каскадного отключения повреждения на соседней линии. В таком режиме коэффициент токораспределения $k_т$ для линии, на которой установлена рассматриваемая защита, имеет максимальную величину (см. приложение II) и, следовательно, при замыкании в конце защищаемой зоны первой ступени предыдущей защиты ток, текущий через рассматриваемую защиту, будет наибольшим.

Коэффициенты токораспределения в расчетных режимах определены на основании величин токов, приведенных в табл. 4.

6. Токи срабатывания третьих ступеней защиты *1*, *2*, *3* и *6* выбирались по условию отстройки их от токов небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при замыкании за трансформаторами *п/ст. А*, которые предполагаются работающими раздельно на стороне низшего напряжения. Короткие замыкания на шинах низшего напряжения станции и *п/ст. Б* не учитывались в предположении наличия на них специальной защиты шин, имеющей выдержку времени, меньшую выдержек времени третьих ступеней защит линий от замыканий на землю. Токи срабатывания третьих ступеней защит рассчитывались по выражению (II-4) (см. также п. 8б); при определении $I_{нб.\,уст}$ по выражению (II-7) было принято, что коэффициент $k_{одн} \approx$ $\approx 0{,}75$. Выдержки времени третьих ступеней этих защит определяются условием отстройки от выдержек времени третьих ступеней предыдущих защит кольцевой сети.

Токи срабатывания третьих ступеней защит *4* и *5* выбраны по условию отстройки от замыканий в конце защищаемой зоны второй ступени предыдущей защиты в режиме каскадного отключения линии. Указанным достигается селективность третьих ступеней защит от замыкания на землю. Имеющее место при этом увеличение тока срабатывания защиты по сравнению с током срабатывания, выбранным по условию отстройки защиты от токов небаланса трансформаторов тока, незначительно. Выдержки времени третьих ступеней защит *4* и *5* определены условием отстройки от выдержки времени второй ступени предыдущей защиты.

7. Приведенные в табл. 3 коэффициенты чувствительности защит даны для случая, когда станция и система работают в максимальном режиме.

Коэффициенты чувствительности первых ступеней защит, подсчитанные как отношение тока в месте установки защиты при замыканиях в начале линии к току срабатывания (первой ступени) защиты, приведены для ориентировочной оценки эффективности последней.

Как следует из данных табл. 3, в максимальном режиме вторые ступени защит надежно действуют при замыканиях на землю в конце линии, а третьи ступени обеспечивают резервирование предыдущей защиты.

8. Размещение органов направления мощности в защитах выполнено в соответствии с указанным в п. IIA-19. Реле направления мощности предусмотрены в защитах *2*, *4* и *5*.

Для исключения органов направления мощности в защитах *1*, *3* и *6*:

а) ток срабатывания второй ступени защиты *1*, выбранный по условию согласования с первой ступенью защиты *3*, увеличен до тока срабатывания второй ступени защиты *2*;

б) токи срабатывания третьих ступеней защит *3* и *6*, выбранные по условию отстройки от токов небаланса трансформаторов тока, увеличены до тока срабатывания третьих ступеней защиты *4* и соответственно защиты *5*.

9. Проверка чувствительности реле направления мощности, предусмотренных в защитах *4* и *5*, произведена для случаев короткого замыкания в конце зоны резервирования этих защит. Результаты такой проверки даны в табл. 5. Для реле направления мощности защиты *2* проверки чувствительности не требуется, поскольку это реле предусмотрено для действия только в первой ступени защиты.

Проверка произведена в соответствии с указаниями, данными в приложении III.

10. Схема размещения защит приведена на рис. 26.

Пример III. Расчет защиты от замыканий на землю двух параллельных линий 220 *кв*, работающих в блоке генератор — трансформатор — линия.

1. Пример дан для иллюстрации влияния взаимоиндукции в схеме нулевой последовательности блоков генератор — трансформатор — линия.

Исходная схема и схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей даны на рис. 27.

Сопротивление генераторов и трансформаторов, отнесенные к их мощности, приняты равными

$$x''_d = 12\% \text{ и } x_т = 13\%.$$

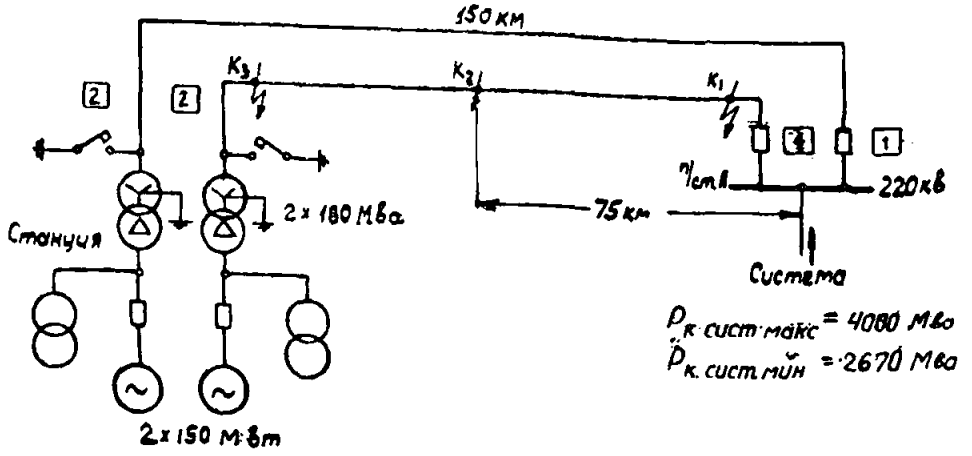
Сопротивления линий приняты:

$$x_{1л} = 0{,}41 \text{ ом/км}; \quad x_{0л} = 1{,}34 \text{ ом/км}.$$

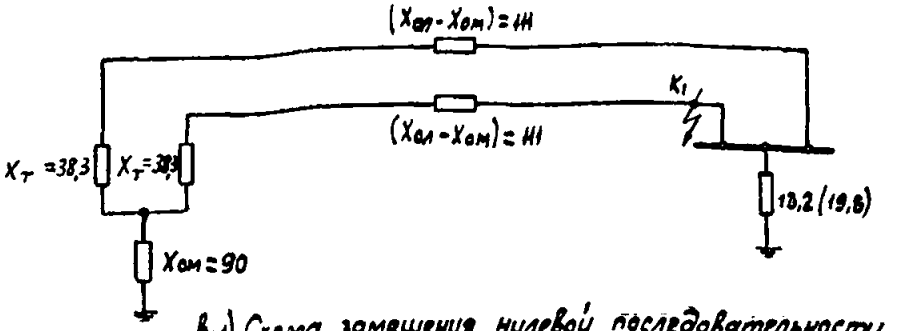
Сопротивление взаимоиндукции и соответственно сопротивление нулевой последовательности линии при отключении и заземлении по концам второй параллельной линии равны:

$$x_{0M} = 0{,}6 \text{ ом/км}; \quad x'_{0л} = 1{,}07 \text{ ом/км}$$

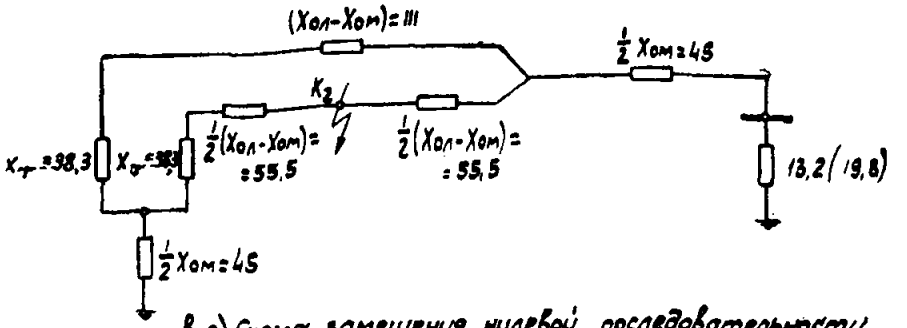
На станции выключатели на стороне высшего напряжения силовых трансформаторов отсутствуют, а потому в схеме предусмотрены короткозамыкатели, включаемые при действии защиты трансформаторов от внутренних повреждений.



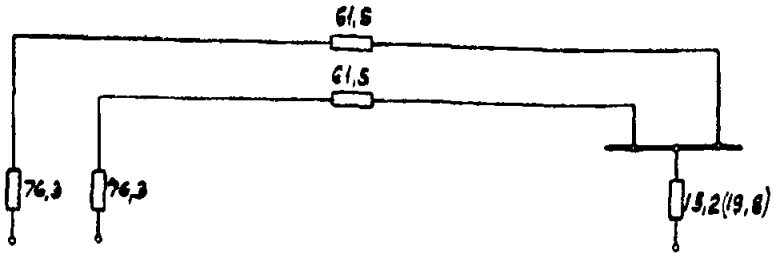
а) Исходная схема.



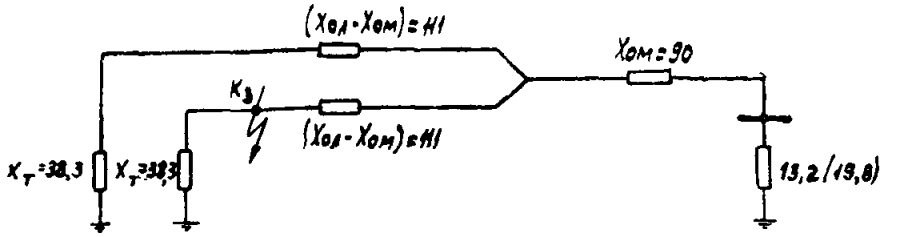
в-1) Схема замещения нулевой последовательности при к.з. на землю в точке K_1



в-2) Схема замещения нулевой последовательности при к.з. на землю в точке K_2



б) Схема замещения прямой (обратной) последовательности.



в-3) Схема замещения нулевой последовательности при к.з. на землю в точке K_3

Рис. 27. Исходная схема и схемы замещения (Пример III).

Примечания: 1. Сопротивления даны в омах, приведенных к напряжению 230 *кв*.
2. В скобках даны сопротивления системы, соответствующие минимальному режиму.

2. Выбор токов срабатывания и выдержек времени защит, а также определение их коэффициентов чувствительности приведены в табл. 6, в которой даны также и расчетные режимы.

На каждой линии предусмотрено:

а) со стороны *п/ст. А* — одноступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности без выдержки времени с токовой блокировкой обратной последовательности:

б) со стороны станции — трехступенчатая токовая защита нулевой последовательности.

3. Ток срабатывания токового реле нулевой последовательности защиты со стороны *п/ст А*, в связи с выполнением защиты без выдержки времени, должен быть выбран исходя из условий отстройки ее от:

а) броска тока намагничивания трансформатора блока при включении его со стороны *п/ст. А*;

б) токов небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних трехфазных коротких замыканиях, а именно замыканиях на зажимах генератора блока (замыкание на шинах 220 *кв п/ст А* не является расчетным, поскольку при этом ток в линии меньше, чем в первом случае).

Как следует из рассмотрения п. 4 и 5, определяющим явилось условие «а».

4. Ток срабатывания токового реле нулевой последовательности защиты *1*, выбираемый по условию п. 3,а, в соответствии с указаниями п. IIА-16, зависит от типа реле. Используя в защите в целях повышения ее чувствительности реле типа РНТ, ток срабатывания защиты может быть ориентировочно определен по выражению

$$I_{с.з} = \alpha I_{т.ном},$$

где $I_{т.ном}$ — номинальный ток трансформатора, равный 450 *а*;

α — коэффициент, учитывающий снижение напряжения на трансформаторе при броске тока намагничивания.

На основании данных рис. 27 результирующее сопротивление прямой последовательности системы и одного блока генератор—трансформатор—линия, приведенных к шинам 220 *кв* п/ст. А, $x_{с.б} = 12$ *ом* и коэффициент

$$\alpha = \frac{x_т}{x_{с.б} + x_л + x_т} = \frac{38{,}3}{12 + 61{,}5 + 38{,}3} = 0{,}342.$$

Соответственно

$$I_{с.з} = 0{,}342 \cdot 450 \approx 160\ а.$$

5. Расчетный ток небаланса $I_{нб.уст}$ в нулевом проводе трансформаторов тока защиты *1*, необходимый для выбора тока срабатывания пускового органа нулевой последовательности по условию п. 3,*б*, определяется по выражению (II-6) в предположении, что:

а) защита включена на трансформаторы тока типа ТВД-220, имеющие коэффициент трансформации

$$n_т = \frac{600}{5};$$

б) сопротивление фазных цепей защиты и вспомогательных проводов в симметричном режиме $z_{з.п} = 2$ *ом* (принято, что защита от замыканий между фазами включена на те же трансформаторы тока, что и рассматриваемая защита).

Принятые трансформаторы тока характеризуются следующими данными (рис. 15):

число витков вторичной обмотки $w_2 = 119$;

сопротивление вторичной обмотки $z_2 = 0{,}33$ *ом*;

сечение сердечника $Q = 96{,}3$ *см*^{2};

длина средней магнитной линии $L = 256$ *см*.

Вторичная э. д. с трансформаторов тока в расчетном режиме

$$E_в = \frac{I_{расч}}{n_т}(z_{з.п} + z_2) = \frac{1\,190}{120}(2 + 0{,}33) = 23{,}1\ в,$$

где $I_{расч}$ — ток в линии при трехфазном коротком замыкании на зажимах генератора блока.

Расчетное значение индукции

$$B_{m\ расч} = \frac{E_в \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot f w_2 Q} = \frac{23{,}1 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 119 \cdot 96{,}3} = 910\ гс.$$

По $B_{m\ расч}$ определяются значения C и $f_{нам}$ в выражении (II-6).

Поскольку значения коэффициента C (рис. 14) даны только для $B_{m\ расч} \geqslant 2\,000$ *гс*, то принимается его значение, соответствующее

$$B_m = 2\,000\ гс,\ т.\ е.\ C = 1.$$

Согласно кривой, приведенной на рис. 15, при $B_m = 910$ *гс* напряженность поля

$$H = 0{,}22\ а \cdot в/см$$

и, следовательно, ток намагничивания

$$I_{нам} = \frac{HL}{w_2} = \frac{0{,}22 \cdot 256}{119} = 0{,}474\ а.$$

В соответствии с выражением (II-6) установившийся первичный ток небаланса

$$I_{нб.уст.п} = I_{нб.уст.в}\, n_т = C I_{нам} n_т = 0{,}474 \cdot 120 \approx 57\ а.$$

При применении в рассматриваемом пусковом органе реле типа ЭТ, ток срабатывания защиты в соответствии с выражением (II-4) равен

$$I_{с.з} = k_н I_{расч} = k_н k_{апер} I_{нб.уст} = 1{,}25 \cdot 2 \cdot 57 = 142\ а.$$

Из приведенных расчетов следует, что даже и при использовании в данном пусковом органе реле типа ЭТ (при применении реле типа РНТ $k_{апер} \approx 1$) условие п. 3,б не является расчетным.

Расчет тока небаланса по приближенному выражению (II-7), при принятом для средних условий коэффициенте $k_{одн} = 0{,}8$, дает в этом случае $I_{нб.уст} = 95$ *а*, т. е. примерно в 1,7 раза большее значение, чем определенное выше по выражению (II-6).

6. Защита линий со стороны *п/ст. А* должна быть отстроена от режима каскадного отключения замыкания на землю на параллельной линии вблизи шин *п/ст. А*. Распределение токов I_0 при указанном виде повреждения дано на рис. 28. В данном режиме утроенный ток нулевой последовательности в неповрежденной линии ($3I_0 = 291$ *а*) превышает ток срабатывания защиты.

Орган направления мощности данной защиты также срабатывает, поскольку источник несимметрии (э. д. с. взаимоиндукции), обусловливающий наличие токов нулевой последовательности в неповрежденной линии, находится на этой же линии.

Таблица 6

Выбор параметров и проверка чувствительности защит сети рис. 27

№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания						Проверка чувствительности		
			Условия выбора токов срабатывания		Расчетный режим	Расчетные величины, *a*	Принятый ток срабатывания, *a*	Условия выбора выдержек времени	Принятые выдержки времени, *сек*	Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности $k_ч$
1	I	Токовая направленная с токовой блокировкой обратной последовательности	Орган I_0	Отстройка от броска тока намагничивания трансформатора блока при включении его со стороны п/ст. А	I	0,342× ×450=154	160	—	Без выдержки времени	Замыкание вблизи шин станции при отключенном генераторном выключателе блока	II-1_0—1_C	2,3
			Орган I_2	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока и фильтра в нагрузочном режиме	I-1	120	120		Без выдержки времени		II'-1_0—1_C	3,5
2	I	Токовая	Отстройка от замыкания на шинах п/ст. А		II-1_0	1,3×705= =917	920	—	Без выдержки времени	См. рис. 29		
	II	Токовая	Согласование со ступенью I защиты предыдущей линии системы		I-1_0	1,1×0,1× ×1 800=198	200	Согласование со ступенью I защиты предыдущей линии системы	0,5	Замыкание в конце защищаемой линии	I	2,15
	III	Токовая	Отстройка от токов небаланса трансформаторов тока при 3-фазном к. з. на шинах 220 *кв* п/ст. А		I	1,25×50= =62,5	65	Согласование с защитой предыдущей линии системы				

Примечания:

1. Обозначения режимов для схемы рис. 27.

I — система в максимальном режиме;
II — система в минимальном режиме;
1 — отключен один блок генератор — трансформатор — линия.

Режимы с односторонним отключением линии отмечены цифрой 1 с дополнительным индексом (А или С), соответствующим обозначению подстанции или станции, со стороны которой линия отключена (отключение линии со стороны станции производится выключателем генераторного напряжения).

Режимы с отключением одной из параллельных линий и заземлением ее по концам обозначены индексом 0.

Штрихом (при обозначении режима) отмечены двухфазные замыкания на землю.

2. Ток срабатывания токового органа обратной последовательности защиты *1* принят равным 1*a*, исходя из условия отстройки от токов небаланса фильтра в предположении, что защита включена на трансформаторы тока с коэффициентом трансформации $n_т = 600/5$.

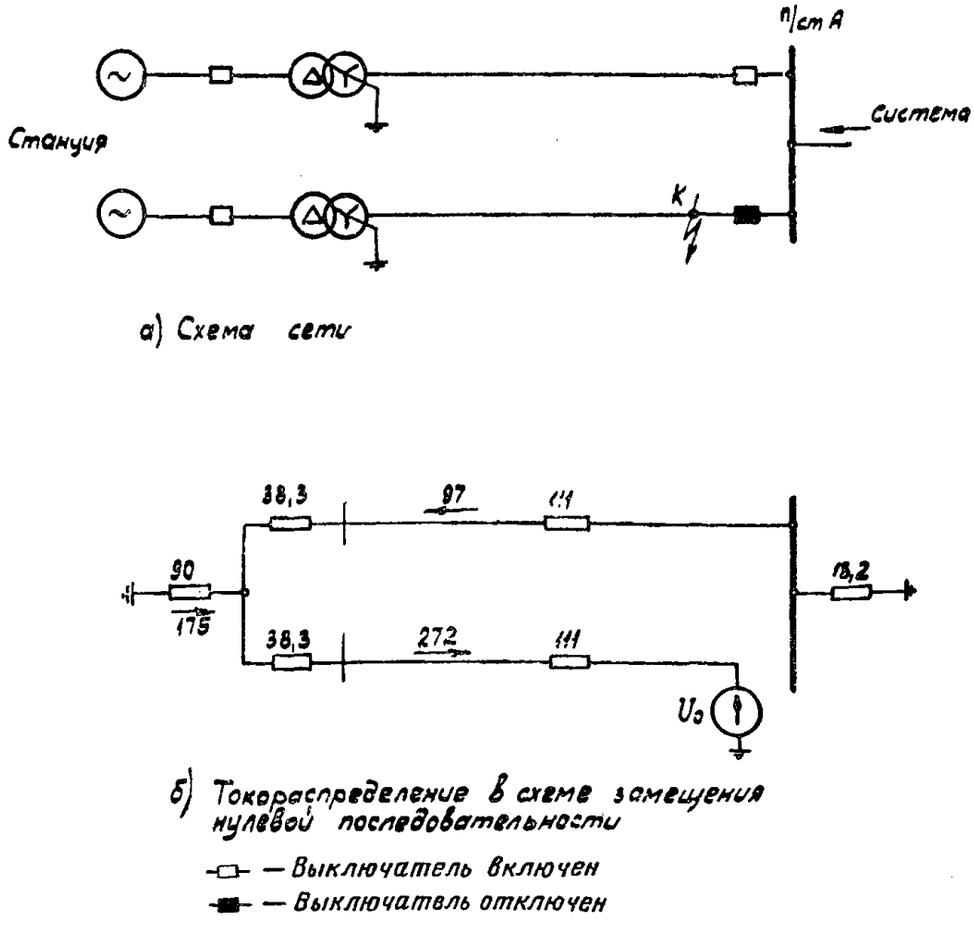


Рис. 28. Распределение токов нулевой последовательности на параллельных линиях в режиме каскадного отключения в сети рис. 27 (режим I-1А).

Примечания: 1. Обозначения режимов даны в табл. 6. 2. Токи, *а*, приведены к напряжению 230 *кв*.

В целях отстройки от указанного режима в защите установлено блокирующее токовое реле обратной последовательности. Возможность применения блокировки по току обратной последовательности обусловлена тем, что в режиме каскадного отключения повреждения на соседней линии в неповрежденной линии ток обратной последовательности отсутствует. Учитывая, что защита *1* отстроена от замыканий на землю в системе органом направления мощности, а от токов небаланса в нулевом проводе защиты при междуфазных замыканиях в системе токовым пусковым органом, ток срабатывания блокирующего реле обратной последовательности выбран по условию отстройки от тока небаланса в максимальном нагрузочном режиме с учетом возможных токов качаний.

7. Ток срабатывания первой ступени защиты *2* выбран по выражению (II-1), исходя из условия отстройки защиты от замыкания на землю одной фазы на шинах *п/ст. А* в случае, когда параллельная линия отключена и заземлена с обоих концов.

Режим каскадного отключения со стороны станции замыкания на землю на параллельной линии не является расчетным.

8. Ток срабатывания второй ступени защиты *2* выбран по условию согласования с первой ступенью:

а) защиты от замыканий на землю предыдущей линии системы;

б) защиты *1* в режиме каскадного отключения параллельной линии.

При выборе тока срабатывания по условию „а" принято, что ток срабатывания первой ступени защиты смежной линии системы равен $I^{I}_{с.з} = 1\,800\ а$ и коэффициент токораспределения $k_т = 0{,}1$. Расчетным явилось первое условие.

9. Ток срабатывания третьей ступени защиты *2*, учитывая отсутствие данных по системе, выбирается (с запасом) по условию отстройки его от тока небаланса при трехфазном коротком замыкании на шинах 220 *кв п/ст. А*.

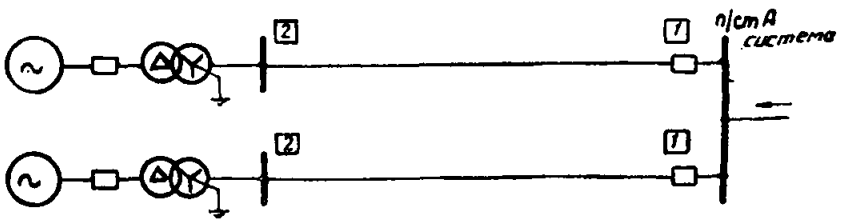
Принимая для трансформаторов тока защиты *2* те же исходные данные, что и для трансформаторов тока защиты *1* (п. 5), и учитывая, что в расчетном режиме повреждения на шинах 220 *кв п/ст. А* ток в линии $I_{расч} = 960\ а$, расчетный ток небаланса, определенный по выражению (II-6), в этом случае равен $I_{нб.расч} = I_{нб.уст} = 50\ а$.

Таблица 7

Проверка чувствительности органа направления мощности защиты *1* сети рис. 27

Условия проверки чувствительности	Расчетный режим	Напряжение и ток на реле в режиме		$S_р = \frac{3U_0 3I_0}{n_т n_н}$, ва	Тип принятого реле	$k_ч = \frac{S_р}{S_{с.р}}$
		$3U_0/n_н$, в	$3I_0/n_т$, а			
Каскадное отключение замыкания на землю вблизи шин станции	I-1$_С$	2,5	3,4	8,5	РБМ-171/1	8,5

Примечания: 1. Обозначения режимов для схемы рис. 27 см. примечание 1 к табл. 6.
2. Коэффициент трансформации трансформаторов тока принят $\frac{600}{5}$.



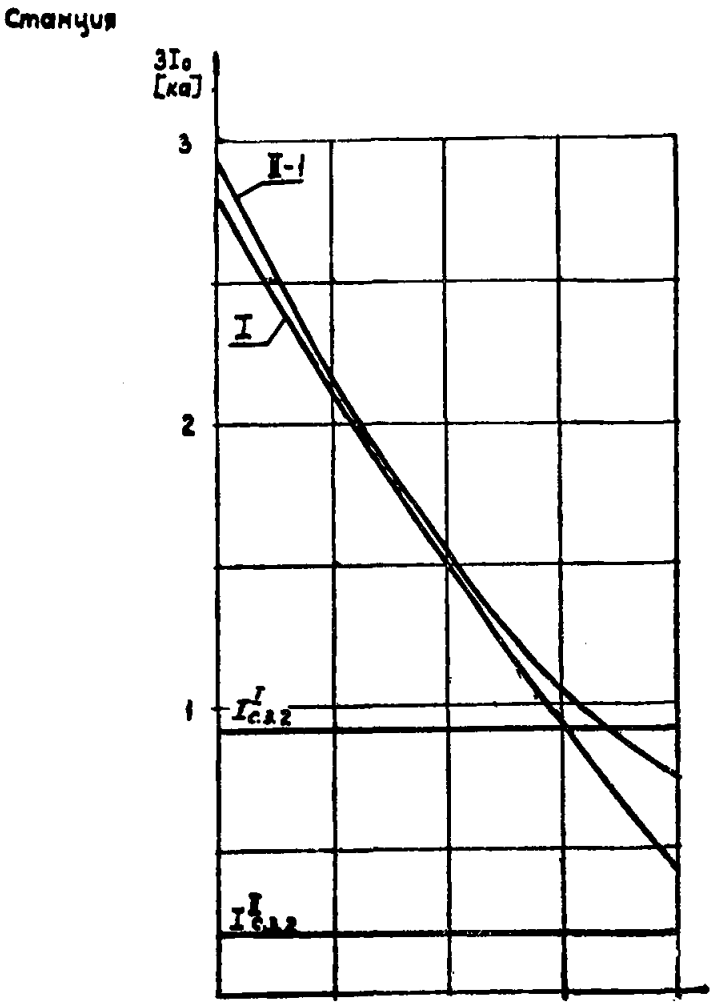


Рис. 29. Кривые токов $3I_0$ со стороны станции в поврежденной линии при замыкании ее на землю в сети рис. 27.

Примечания: 1. Обозначения режимов см. примечание 1 к табл. 6.
2. $I^{I}_{с.з2}$, $I^{II}_{с.з2}$ — токи срабатывания первой и второй ступеней защиты *2*.

10. Выдержки времени защит приняты:

а) для защиты *1* и для первой ступени защиты *2* — без выдержки времени;

б) для второй ступени защиты *2* — по условию согласования с первой ступенью защиты смежной линии системы;

в) для третьей ступени защиты *2* — по условию согласования с последней ступенью защиты предыдущей линии системы.

11. Чувствительность токовых органов нулевой и обратной последовательностей защиты *1* проверена для случаев замыканий на землю на конце линии вблизи станции при отключенном генераторном выключателе блока и отключенном втором блоке генератор — трансформатор — линия. Наличие неотключенного трансформатора блока (как следует из рассмотрения соответствующих схем замещения) уменьшает в месте включения защиты *1* значения токов:

нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю;

обратной и нулевой последовательностей при двухфазных замыканиях на землю.

Минимальные коэффициенты чувствительности токовых органов защиты *1* и токового органа второй ступени защиты *2* в расчетных режимах приведены в табл. 6.

Для оценки величины защищаемой зоны первой ступени защиты *2* на рис. 29 приведены кривые токов в различных режимах работы сети.

12. Проверка чувствительности реле направления мощности защиты *1* произведена в режиме каскадного отключения замыкания на землю в конце защищаемой линии.

Результаты проверки приведены в табл. 7.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В ЦЕПЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙ ОБМОТКИ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

При отсутствии трансформаторов напряжения 110—220 *кв* и выше (не устанавливаемых, например, в целях экономии) возникает необходимость в применении токовой поляризации в реле направления мощности защит от замыканий на землю линий и трансформаторов.

При двухобмоточных трансформаторах поляризующую обмотку реле следует включать на трансформаторы тока *1* (рис. П-1) в нейтрали силового трансформатора, поскольку при этом направление тока в поляризующей обмотке будет одно и то же при замыканиях на землю как на защищаемой или на смежной линиях, так и в трансформаторе (точки K_1, K_2, и K_3), что необходимо для правильного действия реле. Включение поляризующей обмотки реле на фильтр *2* токов нулевой последовательности нежелательно, так как в этом случае возможно ложное действие защиты при замыкании на землю в трансформаторе (точка K_3).

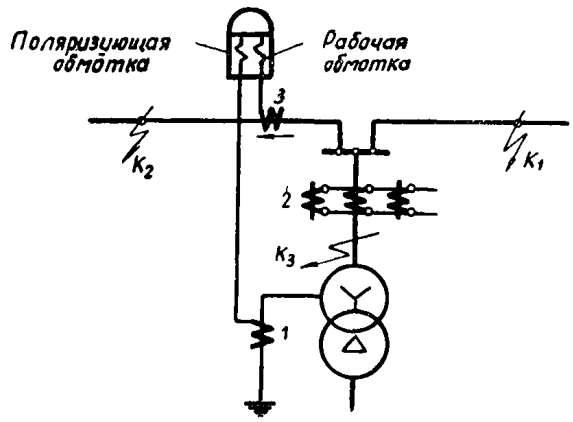
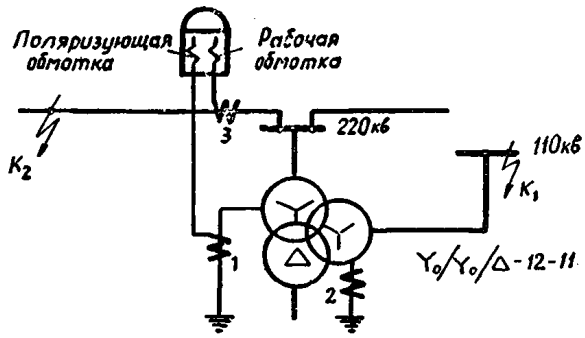
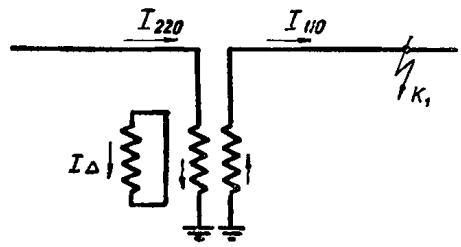


Рис. П-1. Включение поляризующей обмотки реле направления мощности на ток в нейтрали двухобмоточного трансформатора.

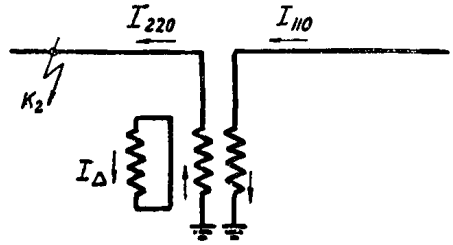
При трехобмоточных трансформаторах с соединением обмоток $Y_0/Y_0/\Delta$—12—11, а также автотрансформаторах, связывающих сети 220 и 110 *кв*, включение поляризующей обмотки реле направления мощности на трансформаторы тока *1* или *2* (рис. П-2,*а*), установленные в нейтралях обмоток 220 и 110 *кв* трехобмоточного трансформатора, или на трансформатор тока *1* (рис. П-3,*а*) в нейтрали автотрансформатора, в общем случае не обеспечивает правильного действия реле направления мощности. Это следует из рассмотрения схем токораспределения, приведенных на рис. П-2 и П-3. Так, для трехобмоточных трансформаторов анализ схем рис. П-2,*б* и П-2,*в* показывает, что при замыкании на землю в сети смежного напряжения (точка K_1) защита линии действует неправильно, так



а) Схема включения реле



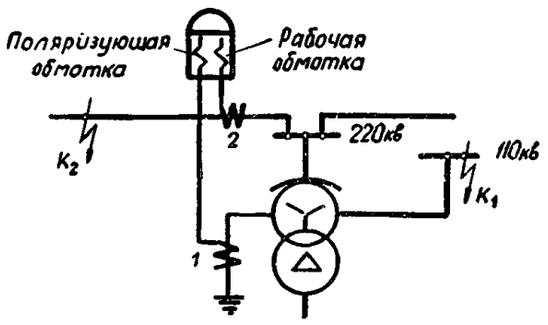
б) Замыкание в точке K_1 (схемы „а")



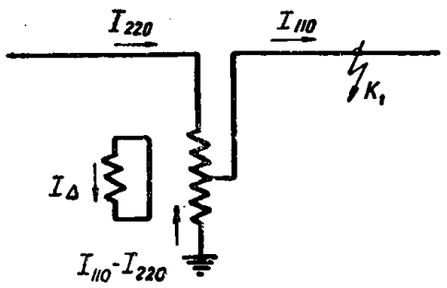
в) Замыкание в точке K_2 (схемы „а")

Рис. П-2. Токораспределение в трехобмоточном трансформаторе при замыканиях на землю на напряжении 110 и 220-*кв*.

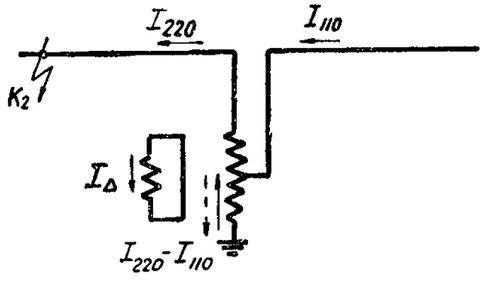
как направление тока как в рабочей, так и в поляризующей обмотках реле направления мощности, по сравнению со случаем замыкания на защищаемой линии (точка K_2), изменяется (примерно) на противоположное. Неправильного действия защиты не происходит, если сопротивление обмотки трансформатора, соединен-



а) Схема включения реле



б) Замыкание в точке K_1 (Схемы „а")



в) Замыкание в точке K_2 (схемы „а")

Рис. П-3. Токораспределение в автотрансформаторе при замыканиях на землю на напряжении 110 и 220 *кв*.

ной в треугольник $x_\Delta \approx 0$ (т. е. когда при замыкании на землю в сети смежного напряжения токи нулевой последовательности в сети данного напряжения практически отсутствуют) или когда представляется возможным согласовать защиту данной линии с защитами элементов сети смежного напряжения.

Поведение реле направления мощности при наличии автотрансформаторов пояснено схемами рис. П-3,*б* и П-3,*в*. Правильное действие реле обеспечивается при условии, если при замыкании на землю как на напряжении 110 *кв*, так и на 220 *кв* направление тока в нейтрали автотрансформатора сохраняется неизменным. В случае повреждения на напряжении 110 *кв* (рис. П-3,*б*) ток в нейтрали автотрансформатора (при любом распределении токов повреждения между обмоткой 220 *кв* и обмоткой, соединенной в треугольник) всегда имеет одно и то же направление, определяемое током стороны 110 *кв*. В предельном случае, когда $I_\Delta = 0$, ток в нейтрали

$$I_{\text{нейтр}} = I_{110} - I_{220} = I_{110}\frac{n_{\text{ат}} - 1}{n_{\text{ат}}} > 0, \qquad \text{(П-1)}$$

где $n_{\text{ат}} = \dfrac{U_{\text{х.х.высш}}}{U_{\text{х.х.ср}}}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора, а при $I_\Delta \neq 0$ ток в нейтрали (при неизменном значении I_{110}) соответственно увеличивается.

При замыканиях на землю на напряжении 220 *кв* (рис. П-3,*в*) направление тока в нейтрали автотрансформатора зависит от соотношения между значениями токов I_{220} и I_{110}. Оно сохраняется таким же, как и в случаях повреждений на напряжении 110 *кв* при условии, если

$$I_{220} > I_{110}. \qquad \text{(П-2)}$$

Условия, при которых соблюдается соотношение (П-2), выяснены ниже.

Для случая замыкания на землю на напряжении 220 *кв* автотрансформатора (рис. П-3,*в*) из схемы замещения рис. П-4 следует:

$$I'_{110} + I'_\Delta = I_{220}. \qquad \text{(П-3)}$$

Учитывая неравенство (П-2), можно написать:

$$I'_{110} + I'_\Delta > I_{110} = I'_{110} n_{\text{ат}},$$

откуда

$$\frac{I'_\Delta}{I_{110}} > n_{\text{ат}} - 1, \qquad \text{(П-4)}$$

т. е. направление тока в нейтрали автотрансформатора при замыканиях на землю как на напряжении 110 *кв*, так и 220 *кв* сохраняется неизменным, если при замыкании на напряжении 220 *кв* удовлетворяется неравенство (П-4).

То же условие может быть выражено через сопротивления схемы замещения и для рис. П-3,*а* определится соотношением (рис. П-4):

$$\frac{I'_\Delta}{I'_{110}} = \frac{Z'_{\Sigma 110}}{Z'_\Delta} > n_{\text{ат}} - 1, \qquad \text{(П-5)}$$

где $Z'_{\Sigma 110} = Z'_{\text{т}110} + Z'_{\text{сист.}110}$.

Из сказанного следует, что если условие (П-5) не удовлетворяется, то при замыканиях на землю на напряжении 220 *кв* органы направления мощности защит

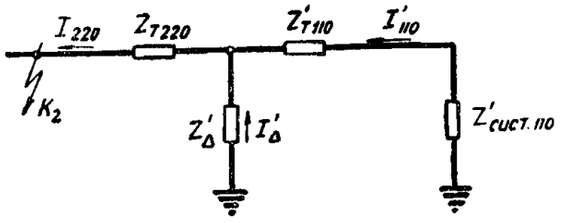


Рис. П-4. Схема замещения нулевой последовательности для случая замыкания на землю в точке K_2 схемы рис. П-3,*а*.

Примечание. Токи и сопротивления приведены к напряжению 220 *кв*.

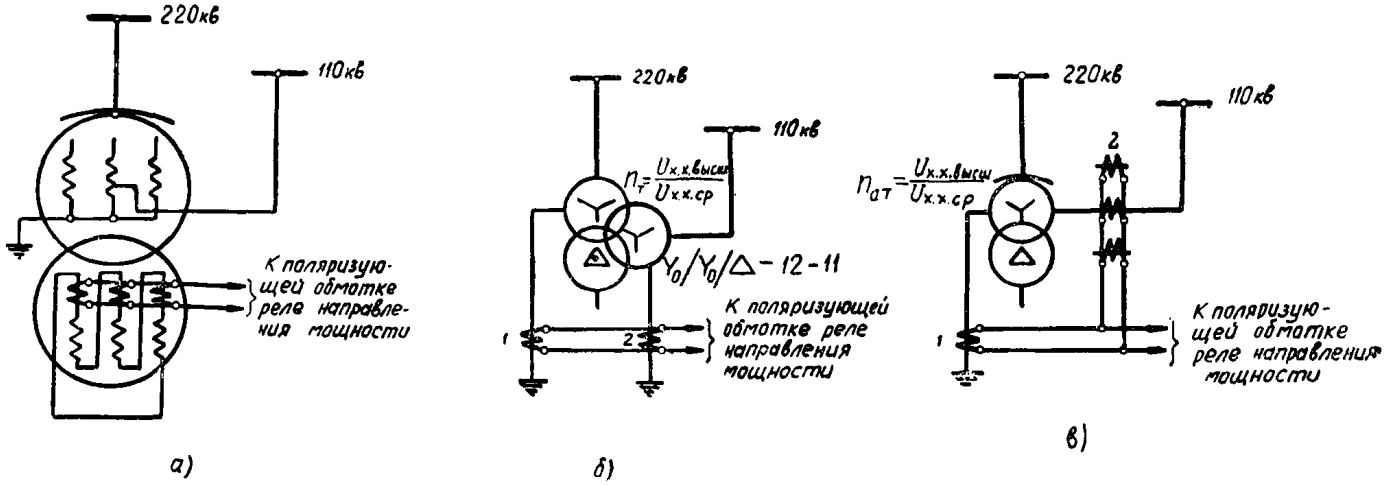


Рис. П-5. Схемы включения поляризующей обмотки реле направления мощности на ток нулевой последовательности в обмотках трансформатора и автотрансформатора, соединенных в треугольник.

элементов сетей 110 и 220 *кв* могут действовать неправильно.

Соотношения, рассмотренные выше для автотрансформатора, принципиально аналогичны и для трехобмоточного трансформатора при использовании суммарного тока его нейтралей 110 и 220 *кв*.

Как следует из рассмотрения схем токораспределения, приведенных на рис. П-2 и П-3, для случаев замыкания на землю в сетях 110 и 220 *кв*, правильное действие реле направления мощности может быть обеспечено при использовании для его поляризующей обмотки токов в обмотке трансформатора или автотрансформатора, включенной в треугольник, в которой направление тока сохраняется неизменным при замыканиях на землю как на напряжении 110, так и 220 *кв*. Принципиальная схема такого включения поляризующей обмотки реле направления мощности приведена на рис. П-5,*а*. Однако оно возможно практически только при применении однофазных трансформаторов и автотрансформаторов и, кроме того, сопровождается появлением в поляризующей обмотке реле суммы третьих (и кратных им) гармоник токов намагничивания, имеющихся в соединенных в треугольник обмотках трансформаторов и автотрансформаторов.

Ниже приведены схемы включения поляризующей обмотки реле направления мощности, пригодные как при однофазных, так и при трехфазных трансформаторах (рис. П-5,*б*) и автотрансформаторах (рис. П-5,*в*) и характеризующиеся по сравнению со схемой рис. П-5,*а* меньшими значениями третьих гармоник токов намагничивания в поляризующей обмотке реле. Для этих схем путем выбора соответствующих коэффициентов трансформации трансформаторов тока *1* и *2* принципиально может быть обеспечена пропорциональность тока в поляризующей обмотке реле току нулевой последовательности в соединенной в треугольник обмотке трансформатора или автотрансформатора при неучете изменения их коэффициентов трансформации ($n_т$ или $n_{ат}$).

Для схемы рис. П-5,*б* при замыкании на землю на напряжении 110 *кв* (точка K_1 на рис. П-2,*б*) ток в поляризующей обмотке реле равен:

$$I_{пол} = \frac{3I_{0\,110}}{n_{2т.т}} - \frac{3I_{0\,220}}{n_{1т.т}}$$

или, приведя токи к напряжению 220 *кв*,

$$I_{пол} = \frac{3n_т I'_{0\,110}}{n_{2т.т}} - \frac{3I_{0\,220}}{n_{1т.т}} = \frac{3n_т I'_{0\,110}}{n_{2т.т}} - \frac{3(I'_{0\,110} - I'_{0\Delta})}{n_{1т.т}},$$

где

$$n_т = \frac{U_{х.х.высш}}{U_{х.х.ср}},$$

можно окончательно получить:

$$I_{пол} = \frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1т.т}} + \left(\frac{n_т n_{1т.т}}{n_{2т.т}} - 1\right)\frac{3I'_{0\,110}}{n_{1т.т}}. \qquad (П\text{-}6)$$

Для схемы рис. П-5,*в* при замыкании на землю на напряжении 110 *кв* (точка K_1 на рис. П-3,*б*) ток в поляризующей обмотке реле

$$I_{пол} = \frac{3(I_{0\,110} - I_{0\,220})}{n_{1т.т}} - \frac{3I_{0\,110}}{n_{2т.т}} =$$

$$= \frac{3n_{ат}I'_{0\,110} - 3(I'_{0\,110} - I'_{0\Delta})}{n_{1т.т}} - \frac{3n_{ат}I'_{0\,110}}{n_{2т.т}},$$

где

$$n_{ат} = \frac{U_{х.х.высш}}{U_{х.х.ср}},$$

или окончательно:

$$I_{пол} = \frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1т.т}} + \left[\left(1 - \frac{n_{1т.т}}{n_{2т.т}}\right)n_{ат} - 1\right]\frac{3I'_{0\,110}}{n_{1т.т}}. \qquad (П\text{-}7)$$

В выражениях (П-6) и (П-7) $n_{1т.т}$ и $n_{2т.т}$—коэффициенты трансформации трансформаторов тока *1* и *2*.

Аналогично выведены выражения для тока в поляризующей обмотке реле в схеме рис. П-5,*б* и П-5,*в* при замыканиях на землю на напряжении 220 *кв*.

В табл. П-1 приведены в общем виде выражения для тока в поляризующих обмотках реле, включенных по схемам рис. П-5,*б* и П-5,*в*, при замыканиях на землю как на высшем, так и на среднем напряжении трансформатора или автотрансформатора.

Таблица П-1

Расчетные выражения для тока в поляризующей обмотке реле направления мощности, включенной по рис. П-5,*б* и П-5,*в*

№ по пор.	Схема включения поляризующей обмотки реле	Расчетный случай замыкания на землю	Выражения для тока $I_{пол}$ в поляризующей обмотке реле (в общем случае)	Значения отношений $\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}$, при которых $I_{пол}=\frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1\,т.т}}$
1	П-5,*б*	На стороне среднего напряжения (рис. П-2,*б*)	$I_{пол}=\frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1\,т.т}}+\left(\frac{n_т n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}-1\right)\frac{3I'_{0.\,ср}}{n_{1\,т.т}}$	$\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}=\frac{1}{n_т}$
2		На стороне высшего напряжения (рис. П-2,*в*)	$I_{пол}=\frac{n_т 3I'_{0\Delta}}{n_{2\,т.т}}-\left(\frac{n_т n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}-1\right)\frac{3I_{0\,высш}}{n_{1\,т.т}}$	
3	П-5,*в*	На стороне среднего напряжения (рис. П-3,*б*)	$I_{пол}=\frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1\,т.т}}+\left[\left(1-\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}\right)n_{ат}-1\right]\frac{3I'_{0\,ср}}{n_{1\,т.т}}$	$\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}=\frac{n_{ат}-1}{n_{ат}}$
4		На стороне высшего напряжения (рис. П-3,*в*)	$I_{пол}=\left(1-\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}\right)\frac{3n_{ат}I'_{0\Delta}}{n_{1\,т.т}}-\left[\left(1-\frac{n_{1\,т.т}}{n_{2\,т.т}}\right)n_{ат}-1\right]\frac{3I_{0\,высш}}{n_{1\,т.т}}$	

Примечания:

1. $I_{0\,высш}$, $I'_{0\,ср}$, $I'_{0\Delta}$ — абсолютные значения токов нулевой последовательности в обмотках высшего и среднего напряжений и в обмотке, включенной в треугольник трехобмоточного трансформатора и автотрансформатора, приведенные к стороне высшего напряжения.
2. $n_{1\,т.т}$ и $n_{2\,т.т}$ — коэффициенты трансформации трансформаторов тока *1* и *2* в схемах, приведенных на рис. П-5.
3. $n_т$ и $n_{ат}$ — коэффициенты трансформации силового трансформатора и автотрансформатора в схемах, приведенных на рис. П-5, равные отношению $\frac{U_{х.\,х.\,высш}}{U_{х.\,х.\,ср}}$.

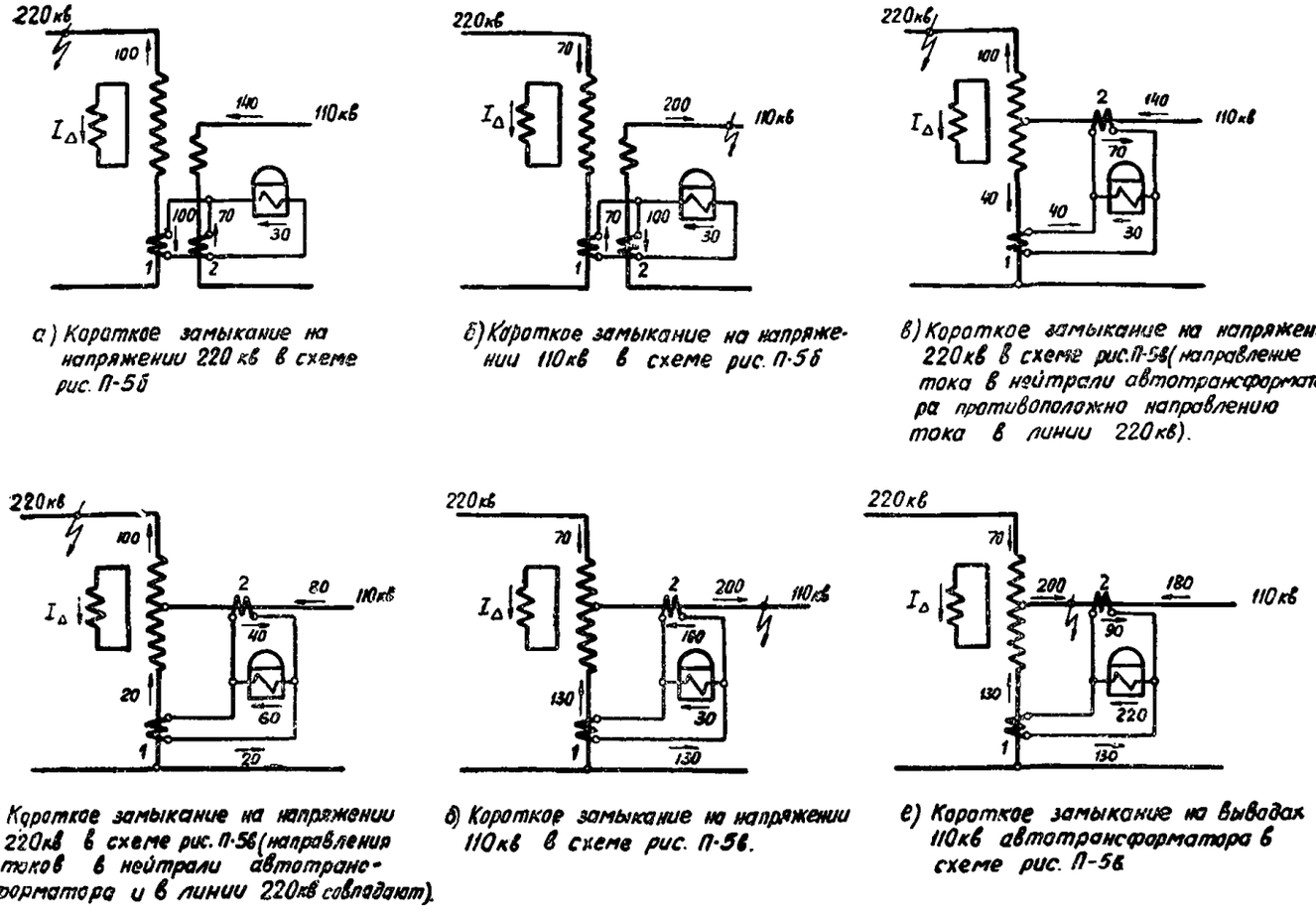
В этой же таблице даны значения отношений коэффициентов трансформации трансформаторов тока $\frac{n_{1т.т}}{n_{2т.т}}$, при которых ток в поляризующей обмотке реле при замыканиях на землю пропорционален току нулевой последовательности в обмотке трансформатора или автотрансформатора, соединенной в треугольник, и определяется выражением

$$I_{пол}=\frac{3I'_{0\Delta}}{n_{1т.т}}. \qquad (П\text{-}8)$$

На рис. П-6 в качестве примера показано условное токораспределение в обмотках трансформатора и автотрансформатора и во вторичных цепях трансформаторов тока, питающих поляризующую обмотку реле направления мощности, для случаев замыкания на землю на напряжении 220 и 110 *кв* в предположении, что в рассматриваемых схемах $n_т=n_{ат}=2$ и в соответствии с табл. П-1 $\frac{n_{1т.т}}{n_{2т.т}}=\frac{1}{2}$; при этом для упрощения пересчета токов на вторичную сторону трансформаторов тока условно принято, что $n_{1т.т}=1$.

Из рассмотрения рис. П-6 следует, что при трехобмоточных трансформаторах и автотрансформаторах использование схем рис. П-5,*б* и П-5,*в* обеспечивает постоянство направления тока в поляризующей обмотке реле при повреждениях как на напряжении 220 *кв*, так и 110 *кв* (рис. П-6,*а* — П-6,*д*); в случае автотрансформатора указанное соблюдается независимо от направления тока в его нейтрали при повреждении на напряжении 220 *кв* (рис. П-6,*в* и П-6,*г*). Следует отметить, что использование в схеме рис. П-5,*в* для питания поляризующей обмотки реле трансформаторов тока *2* (со стороны фазных выводов автотрансформатора) при замыкании на землю в автотрансформаторе не приводит, в отличие от схемы рис. П-1, к неправильному действию реле направления мощности (рис. П-6,*е*), поскольку в рассматриваемом случае обе составляющие тока в поляризующей обмотке реле от трансформаторов тока *1* и *2* имеют направления, соответствующие созданию правильного поляризующего момента в реле.

В соответствии с изложенным в данном приложении целесообразно для трехобмоточных трансформаторов применение схемы рис. П-5,*б* во всех случаях, а для автотрансформаторов — схемы П-5,*в*, в тех случаях, когда не удовлетворяется соотношение П-5. В схемах П-5,*б* и П-5,*в* соотношение коэффициентов трансформации трансформаторов тока *1* и *2* следует,



а) Короткое замыкание на напряжении 220 кв в схеме рис. П-5,б

б) Короткое замыкание на напряжении 110кв в схеме рис. П-5,б

в) Короткое замыкание на напряжении 220кв в схеме рис. П-5,в (направление тока в нейтрали автотрансформатора противоположно направлению тока в линии 220кв).

г) Короткое замыкание на напряжении 220кв в схеме рис. П-5,в (направления токов в нейтрали автотрансформатора и в линии 220кв совпадают).

д) Короткое замыкание на напряжении 110кв в схеме рис. П-5,в.

е) Короткое замыкание на выводах 110кв автотрансформатора в схеме рис. П-5,в

Рис. П-6. Условное токораспределение в цепях поляризующей обмотки реле направления мощности при включении ее по схемам рис. П-5,*б* и П-5,*в* и замыканиях на землю в сетях 110 и 220 *кв*.

Примечания. 1. Коэффициенты трансформации трансформатора и автотрансформатора приняты $n_т = n_{ат} = 2$.

2. Составляющая $P_к$ мощности короткого замыкания в месте повреждения, поступающая со стороны трансформатора (или автотрансформатора), для всех случаев принята одинаковой.

3. Составляющая мощности короткого замыкания от сети смежного напряжения для случаев *а—в*, *д* и *е* принята $0{,}7P_к$ и для случая *г* — $0{,}4P_к$.

4. Коэффициенты трансформации трансформаторов тока *1* и *2* условно приняты равными $n_{1т.т} = 1$ и $n_{2т.т} = 2$.

как правило, принимать в соответствии с табл. П-1. Однако в случаях, когда при повреждениях на одной из сторон трансформатора (или автотрансформатора) реле направления мощности не удовлетворяет требованию чувствительности, следует проверить возможность повышения чувствительности реле путем изменения коэффициента трансформации трансформаторов тока *1* или *2*.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

СОГЛАСОВАНИЕ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В КОЛЬЦЕВОЙ СЕТИ

В кольцевой сети из одиночных линий, не имеющей диагональных связей (рис. П-7,*а*), определение тока срабатывания второй ступени защиты линии производится по условию согласования ее по чувствительности с первой ступенью защиты предыдущего участка при замыкании на последнем и каскадном его отключении. Так, например, ток срабатывания второй ступени защиты *1* определяется по условию согласования с защитой *2* в режиме, когда линия *п/ст. Б — п/ст. В* отключена со стороны *п/ст. В*.

Указанное вытекает из следующего.

При замыкании на землю в точке *К* в режиме, когда кольцо замкнуто, в схеме замещения нулевой последовательности (рис. П-7,*б*) точка токораздела находится на одной из подстанций кольца. Ток от этой подстанции протекает к месту повреждения по обеим линиям кольца, приключенным к данной подстанции. На схеме рис. П-7,*б* точка токораздела принята на *п/ст. Г*.

Схема, приведенная на рис. П-7,*б* может быть преобразована в схему рис. П-7,*в* на основании соотношений:

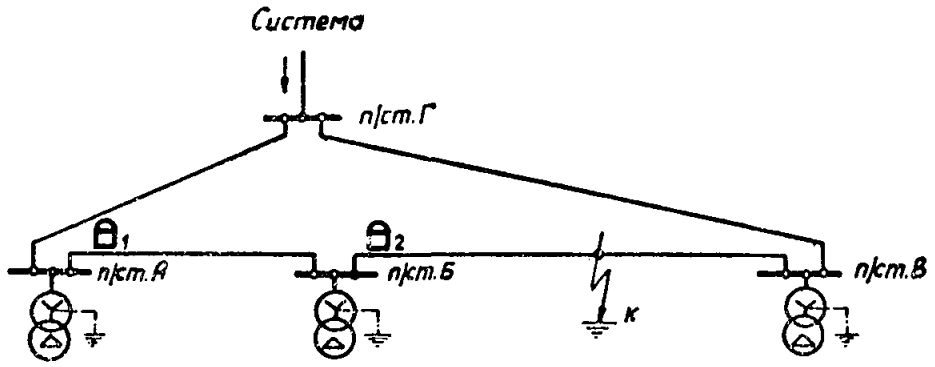
$$\dot{I}_{Г-А} Z_{Г-1} = \dot{I}_{Г-В} Z_{Г-2} = \dot{I}_Г Z_Г$$

и

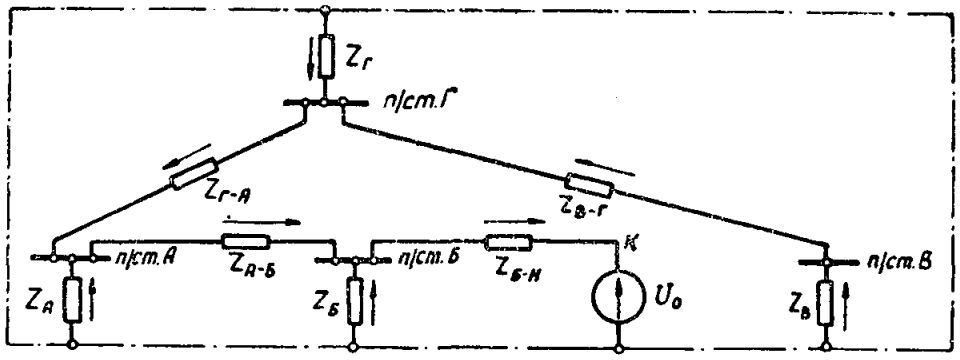
$$\dot{I}_{Г-А} + \dot{I}_{Г-В} = \dot{I}_Г.$$

Согласно схеме, приведенной на рис. П-7,*в*, коэффициент токораспределения для линии *п/ст. А — п/ст. Б* при замкнутом кольце

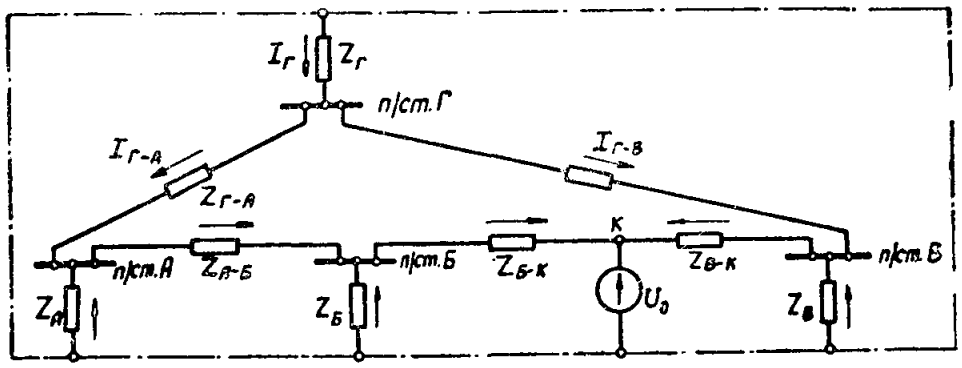
$$k_т^{(з)} = \frac{Z_Б}{Z_Б + Z_{А-Б} + Z_А // (Z_{Г-А} + Z_{Г-1})} \quad (\text{ПII-1})$$



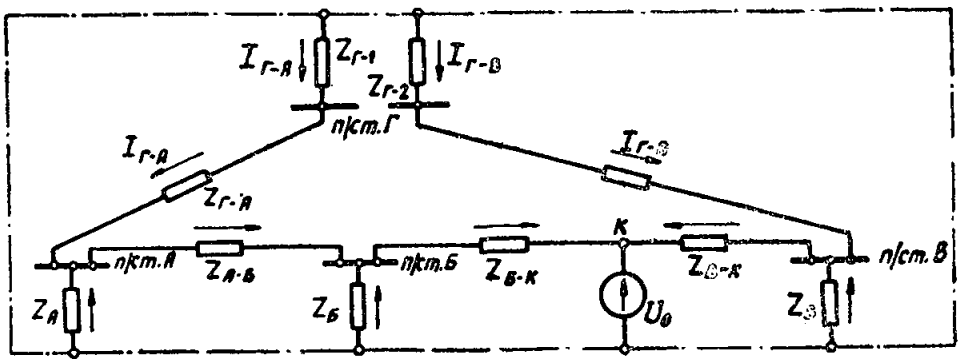
а) Исходная схема.



г) Токораспределение после размыкания кольца.



б) Токораспределение до размыкания кольца.



в) Токораспределение до размыкания кольца (преобразованная схема „б").

Рис. П-7. Токораспределение в схемах замещения нулевой последовательности при замыкании на землю в кольцевой сети.

Примечание. Условия преобразования схемы *б* в схему *в*:

$$\dot{I}_{Г-А}Z_{Г-1}=\dot{I}_{Г-В}Z_{Г-2}=\dot{I}_{Г}Z_{Г};\qquad \dot{I}_{Г-А}+\dot{I}_{Г-В}=\dot{I}_{Г};\qquad Z_{Г}=\frac{Z_{Г-1}Z_{Г-2}}{Z_{Г-1}+Z_{Г-2}},$$

где $Z_Г$ — суммарное сопротивление системы, приведенное к шинам п/ст. Г.

Для случая каскадного отключения линии *п/ст. Б— п/ст. В* со стороны *п/ст. В* схема замещения нулевой последовательности дана на рис. П-7,*г*. При разомкнутом кольце коэффициент токораспределения для линии *п/ст. А — п/ст. Б*

$$k_{т}^{(р)} = \frac{Z_{Б}}{Z_{Б} + Z_{А-Б} + Z_{А}//[Z_{Г-А} + Z_{Г}//(Z_{В-Г} + Z_{В})]} \quad \text{(ПII-2)}$$

Из рассмотрения рис. П-7,*в* и П-7,*г* и сравнения выражений (ПII-1) и (ПII-2) следует, что при повреждении на линии *п/ст. Б — п/ст. В* коэффициент токораспределения для линии *п/ст. А — п/ст. Б:*

а) при разомкнутом кольце не зависит от места повреждения на линии *п/ст. Б — п/ст. В*;

б) имеет наибольшее значение в случае разомкнутого кольца [последний член знаменателя в (ПII-1) больше, чем в (ПII-2), и, следовательно, $k_{т}^{р} > k_{т}^{з}$].

ПРИЛОЖЕНИЕ III

ПРОВЕРКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОРГАНА НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ СТУПЕНЧАТОЙ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Чувствительность органа направления мощности проверяется для направленной ступени защиты с наименьшим током срабатывания. При применении реле направления мощности с поляризующей обмоткой напряжения, реагирующего на мощность $S_{р} = U_{р} I_{р} \sin(\varphi_{р} + \alpha)$, указанная проверка может быть выполнена исходя из выражения:

$$3I_{0з} 3U_{0з} \geqslant k_{ч.мин} n_{н} n_{т} S_{с.р}, \quad \text{(ПII-1)}$$

где $I_{0з}$, $U_{0з}$ — ток и напряжение нулевой последовательности в месте установки защиты;

$k_{ч.мин}$ — минимально допустимый коэффициент чувствительности реле направления мощности, принимается $k_{ч.мин} = 1{,}5$ при повреждении в конце зоны резервирования и $k_{ч.мин} = 2{,}0$ при повреждении в конце защищаемой линии;

$n_{н}$, $n_{т}$ — коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов напряжения и трансформаторов тока;

$S_{с.р}$ — мощность срабатывания реле направления мощности.

Имея в виду, что

$$U_{0з} = z_{0с} I_{0з}, \quad \text{(ПII-2)}$$

где $z_{0с}$ — сопротивление нулевой последовательности системы (рис. П-8,*а*), выражение (ПII-1) можно привести к виду

$$(3I_{0з})^2 z_{0с} \geqslant k_{ч.мин} n_{н} n_{т} S_{с.р}. \quad \text{(ПII-3)}$$

В соответствии с (ПII-3) коэффициент чувствительности реле направления мощности определяется по выражению

$$k_{ч} = \frac{(3I_{0з})^2 z_{0с}}{n_{н} n_{т} S_{с.р}}. \quad \text{(ПII-4)}$$

Выражения (ПII-1) и (ПII-4) являются исходными для проверки чувствительности органа направления мощности.

В целях упрощения проверки чувствительности органа направления мощности для исходной схемы, приведенной на рис. П-8,*а*, на рис. П-8,*в* и *г* построены кривые минимальных значений $z_{0с}$, при которых обеспечивается требование чувствительности органа направления мощности в зависимости от $3I_{0з}$ в соответствии с выражением

$$z_{0с} \geqslant \frac{k_{ч.мин} n_{н} n_{т} S_{с.р}}{(3I_{0з})^2}. \quad \text{(ПII-5)}$$

Данное выражение составлено на основании (ПII-3)

Кривые по выражению (ПII-5) построены для реле направления мощности типа ИМБ-178/1 и РБМ-178/1 в предположении постоянства мощности срабатывания этих реле и повреждений в конце зоны резервирования (рис. П-8,*в*) $k_{ч.мин} = 1{,}5$ и в конце защищаемой линии (рис. П-8,*г*) $k_{ч.мин} = 2$. Реле направления мощности удовлетворяет указанным коэффициентам чувствительности, если в рассматриваемом режиме при данном токе $3I_{0з}$ сопротивление системы $z_{0с}$ больше сопротивления, полученного по расчетной кривой (рис. П-8,*в* или *г*).

Величина $z_{0с}$ в рассматриваемом режиме, необходимая для определения чувствительности реле по кривым, приведенным на рис. П-8, в сетях сложной конфигурации может быть либо замерена при расчете токов короткого замыкания на расчетной модели постоянного тока, либо при заданном токораспределении подсчитана на основании слагающей тока $I_{0т}$ в цепи заземленных трансформаторов, как показано на рис. П-8,*б*.

Расчетным режимом для проверки чувствительности реле направления мощности является режим, при котором произведение $(3I_{0з})^2 z_{0с}$ имеет наименьшее значение.

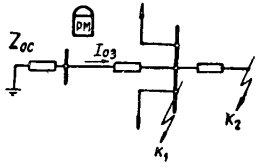
Для выяснения по рис П-8 обеспечения чувствительности защиты во всем диапазоне расчетных режимов для упрощения расчета можно воспользоваться приближенным способом (дающим запас), согласно которому в выражении (ПII-3) подставляется минимальное значение тока в защите ($3I_{0\,з.мин}$) из одного режима и минимальное значение сопротивления системы ($z_{0с.мин}$) из другого режима (из числа режимов, подлежащих рассмотрению).

В случаях, когда при такой проверке реле направления мощности не удовлетворяет требованию чувствительности, следует перейти к более точному способу, т. е. проверить реле в отдельных режимах работы сети. При этом, как правило, бывает достаточно проверки чувствительности в двух указанных выше режимах, а именно в режиме, соответствующем минимальному значению тока $3I_{0з}$, и в режиме, соответствующем минимальному значению сопротивления системы $z_{0с}$.

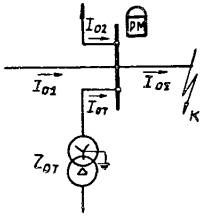
Как отмечено выше, проверенная таким образом защита удовлетворяет требованию чувствительности, если величина $z_{0с}$ в схеме замещения для рассматриваемого режима имеет большее значение, чем соответствующее значение $z_{0с}$ по кривым, приведенным на рис. П-8.

Коэффициент чувствительности реле направления мощности ($k_{ч.м}$) для режима, характеризуемого точкой *N*, лежащей вне расчетной кривой (рис. П-8,*в* и *г*), может быть найден согласно выражению, приведенному на рис. П-8,*д*.

Следует отметить, что при замыкании через переходное сопротивление реле направления мощности не будет ограничивать чувствительность защиты в целом,

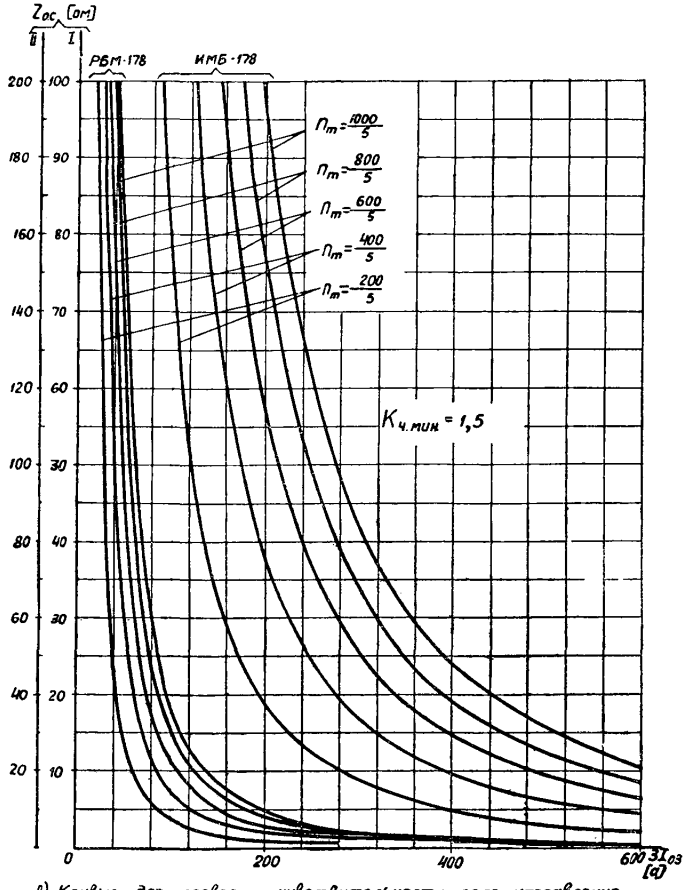


а) Расчетная схема замещения нулевой последовательности.

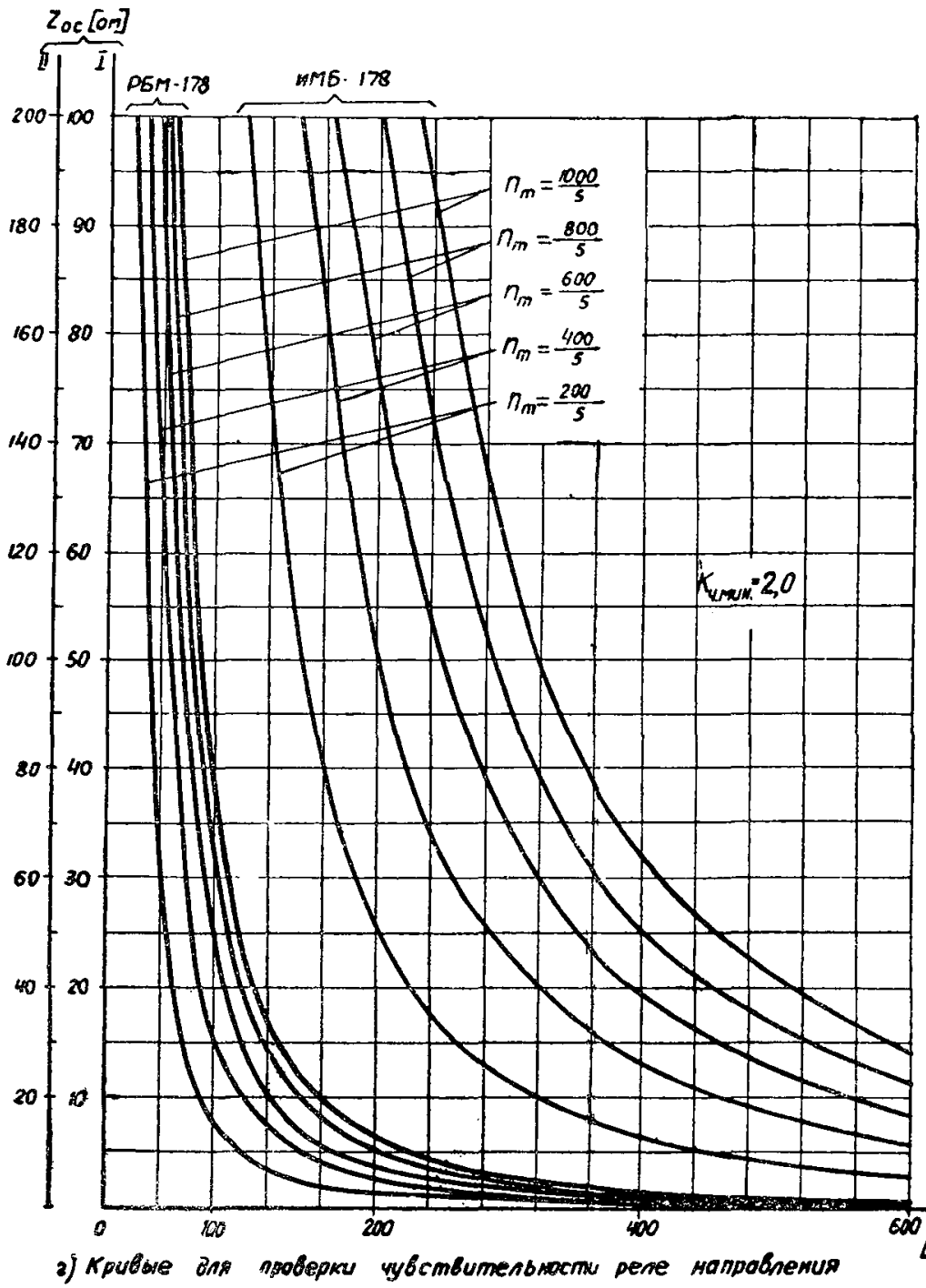


$$Z_{oc} = Z_{o\tau} \cdot \frac{I_{o\tau}}{I_{o2}}$$

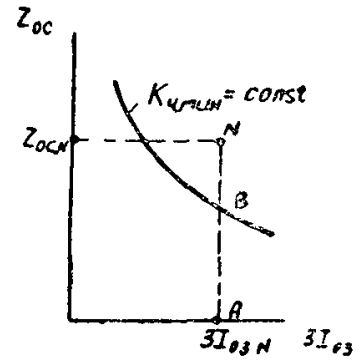
б) Пример определения Z_{oc} при заданном токораспределении.



в) Кривые для проверки чувствительности реле направления мощности при замыкании на землю в зоне резервирования (точка K_2).



г) Кривые для проверки чувствительности реле направления мощности при замыкании на землю на защищаемой линии (точка K_1).



$$K_ч = K_{ч.мин}\frac{AN}{AB},$$

где

$K_{ч.мин}$ = 1,5 (для схемы „б")

$K_{ч.мин}$ = 2,0 (для схемы „г")

д) Определение коэффициента чувствительности реле направления мощности в режиме N.

Рис. П-8. Проверка чувствительности реле направления мощности типа ИМБ-178/1 и РБМ-178/1.

Примечания: 1. Кривые рис. *в* и *г* построены по выражению

$$Z_{oc} = \frac{k_{ч.мин} n_н n_т S_{с.р}}{(3I_{0з})^2},$$

где $k_{ч.мин}$ — минимально допустимый коэффициент чувствительности для реле направления мощности;

$n_н$, $n_т$ — коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов (напряжения и тока);

$S_{с.р}$ — мощность срабатывания реле (принята 20 *ва* для реле типа ИМБ-178/1 и 1 *ва* для реле типа РБМ-178/1).

2. Кривые рис. *в* и *г* даны для сетей напряжением

а) 110 *кв* $\left(n_н = \frac{110\,000}{\sqrt{3}\cdot 100}\right)$ — шкала I.

б) 220 *кв* $\left(n_н = \frac{220\,000}{\sqrt{3}\cdot 100}\right)$ — шкала II.

3. Сопротивление z_{oc} приведено к напряжению:

а) 115 *кв* — для шкалы I;

б) 230 *кв* — для шкалы II.

если при металлическом замыкании в рассматриваемом режиме удовлетворяется условие:

$$k_{ч.т} \leqslant \sqrt{k_{ч.м}}, \qquad (\text{ПIII-6})$$

где $k_{ч.т}$ — коэффициент чувствительности токового пускового органа защиты;

$k_{ч.м}$ — коэффициент чувствительности реле направления мощности.

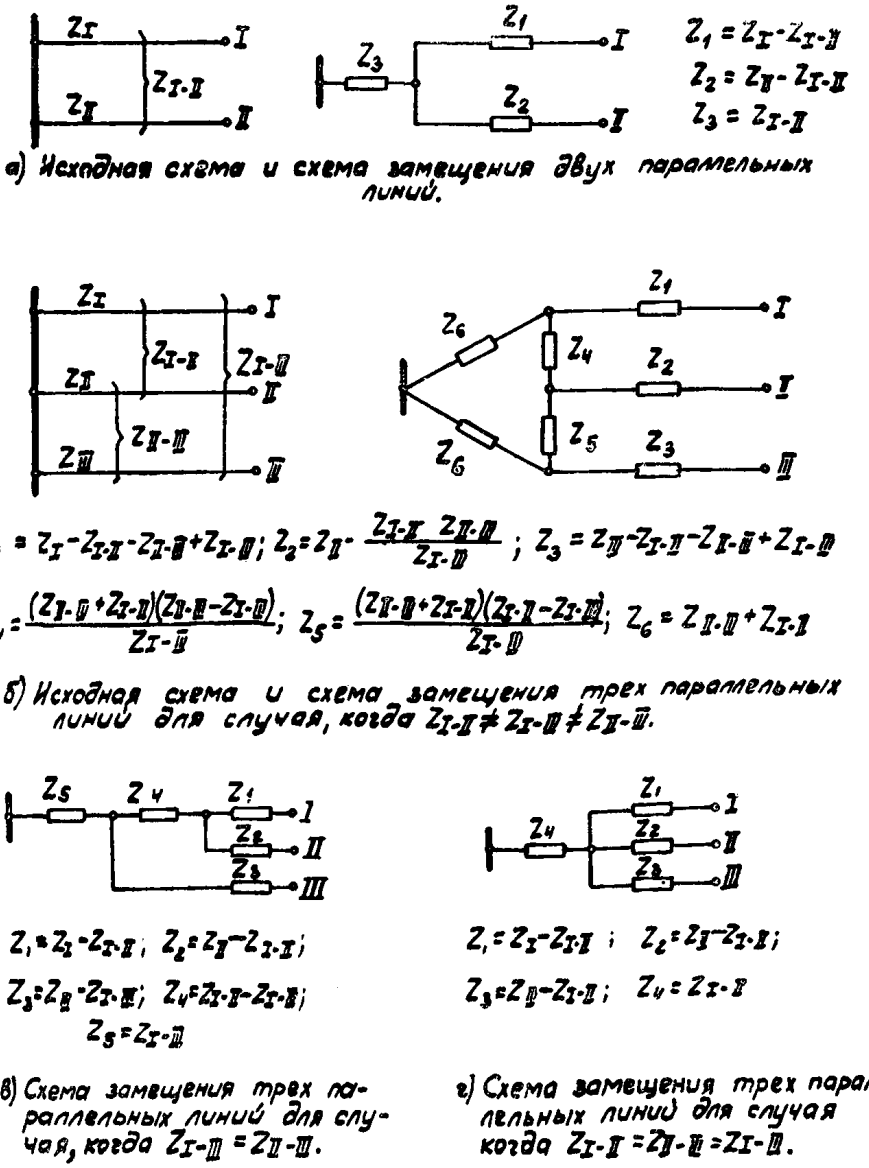
Как следует из выражения (ПIII-2), кривые, данные на рис. П-8, пригодны к непосредственному использованию только в тех случаях, когда защита установлена на одиночной линии (в рассматриваемом режиме отсутствуют обходные связи, шунтирующие линию с данной защитой), а также при отсутствии взаимоиндукции с другими электрическими цепями. Однако кривые, приведенные на рис. П-8,*в*, могут быть использованы для проверки чувствительности реле направления мощности при коротком замыкании в зоне резервирования защиты параллельных линий при включении реле направления мощности как на сумму токов, так и на ток одной линии; при этом в последнем случае необходимо учитывать, что левая часть выражения (ПIII-3) должна быть увеличена в 2 раза, в связи с чем при пользовании рис. П-8,*в* для рассматриваемого случая необходимо по оси абсцисс откладывать увеличенный в $\sqrt{2}$ раза ток ($3I_{0з}$) в месте установки защиты.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ МЕЖДУ НИМИ

Схемы замещения двух и трех параллельных линий с взаимоиндукцией между ними, имеющие общую точку с одного конца, приведены на рис. П-9 [Л. 4].

Схема замещения, приведенная на рис. П-9,*а*, имеет три фиксированные точки, а схемы замещения, приведенные на рис. П-9,*б* — *г*, имеют четыре фиксированные точки.



а) Исходная схема и схема замещения двух параллельных линий.

б) Исходная схема и схема замещения трех параллельных линий для случая, когда $Z_{I\text{-}II} \neq Z_{I\text{-}III} \neq Z_{II\text{-}III}$.

в) Схема замещения трех параллельных линий для случая, когда $Z_{I\text{-}III} = Z_{II\text{-}III}$.

г) Схема замещения трех параллельных линий для случая когда $Z_{I\text{-}II} = Z_{II\text{-}III} = Z_{I\text{-}III}$.

Рис. П-9. Схемы замещения нулевой последовательности двух и трех параллельных линий, имеющих общую точку с одного конца.

Примечание. Z_I; Z_{II}; Z_{III} — сопротивления нулевой последовательности одной линии;

Z_{I-II}; Z_{II-III}; Z_{I-III} — сопротивления взаимоиндукции между линиями.

На рис. П-10 даны схемы замещения двух параллельных линий, имеющих общие точки с обеих сторон, при замыкании на землю на одной из них в режиме, *когда линия включена с двух сторон, и в режиме одностороннего отключения линии*; при этом для левой и правой (по отношению к месту короткого замыкания) частей схемы используется способ составления схемы замещения, приведенный на рис. П-9,*а*.

Схемы замещения трех параллельных линий, имеющих общие точки с двух сторон, могут быть составлены аналогично на основании рис. П-9,*б* — *г*.

На рис. П-11 приведены варианты параллельных линий для случаев, когда одна из параллельных линий отключена и заземлена с обеих сторон. Данные схемы замещения справедливы для внешних (по отношению к этим линиям) повреждений. Для случая, когда рассматривается замыкание на землю на одной из линий, а другая заземлена с обоих концов, может быть использована схема замещения, приведенная на рис. П-11,*в*, при $z_{III}=0$, принимая место повреждения расположенным в точке *а*.

В случае параллельных линий с взаимоиндукцией, не имеющих общих точек в зоне сближения (рис. П-12,*а*), могут быть использованы схемы замещения, представляющие собой схемы полного многоугольника; в частности, для двух параллельных линий можно получить схемы полных четырехугольников, приведенные на рис. П-12,*б* и *в*, имеющие четыре фиксированные точки [Л. 4]. Однако эти схемы неудобны тем, что в них имеются отрицательные сопротивления, препятствующие применению их на расчетных моделях постоянного тока.

Для ряда схем нулевой последовательности, имеющих участки линий с взаимоиндукцией без общих точек между ними в пределах зоны сближения, могут быть составлены более простые схемы замещения, чем на рис. П-12, если путем преобразования примыкающих к рассматриваемым участкам элементов схемы могут быть приведены к виду схем рис. П-10 с общей точкой между взаимоиндуктирующими элементами [Л. 4 и Л. 5].

Ниже даны примеры, иллюстрирующие применение такого способа преобразования схем замещения.

1. На рис. П-13 показан способ составления схем замещения двух блоков трансформатор—линия (с взаимоиндукцией между линиями).

При составлении схем замещения учитывалось, что трансформаторы имеют заземленную нейтраль, а следовательно, и общую точку в схеме замещения нулевой последовательности (потенциал земли), а также то, что сопротивление трансформаторов может рассматриваться как часть собственного сопротивления линии слева от места замыкания на землю (рис. П-13,*б*). Используя для левой и правой частей схемы рис. П-13,*б* способ преобразования, данный на рис. П-9,*а*, можно получить схему замещения рис. П-13,*в* и далее окончательно рис. П-13,*г*.

2. На рис. П-14 дана схема замещения для случая замыкания на землю на одной из параллельных линий, общие точки которых находятся вне зоны сближения. Данная схема замещения справедлива и для случая, когда рассматриваемые линии имеют различные номинальные напряжения, но принадлежат общей системе, отдельные части которой работают синхронно. В этом случае сопротивление взаимоиндукции (в омах), приведенное к расчетной ступени напряжения, может быть приближенно определено по выражению [Л. 6].

$$\overset{\circ}{Z}_{I-II}=Z_{I-II}\frac{U_p^2}{U_{лI}U_{лII}} \qquad (П\ IV\text{-}1)$$

При расчете в относительных единицах, сопротивление взаимоиндукции, приведенное к базисной мощности, определяется выражением

$$\underset{*}{Z}_{I-II}=Z_{I-II}\frac{P_б}{U_{лI}U_{лII}} \qquad (П\ IV\text{-}2)$$

В выражениях (П IV-1) и (П IV-2):

z_{I-II} — сопротивление взаимоиндукции (в омах) между линиями ЛI и ЛII, имеющими сближение;

$U_р$ — напряжение (в *кв*) расчетной ступени, к которой приводятся элементы рассматриваемой схемы;

$U_{лI}$ и $U_{лII}$ — номинальные напряжения (в *кв*) линий ЛI и ЛII;

$P_б$ — принятая базисная мощность (в *Мва*).

Схема на рис. П-14 преобразуется аналогично тому, как преобразована на рис. П-13 часть схемы слева от места короткого замыкания.

3. На рис. П-15 рассмотрен способ составления схем замещения двух параллельных линий с одной общей точкой и ответвлением от одной из линий.

В первую очередь участок параллельных линий слева от точек *Б* и *а* рис. П-15,*а* замещается схемой рис. П-15,*б*. Преобразование треугольника с вершинами *о*, *б* и *Б* в эквивалентную звезду приводит к схеме рис. П-15,*в*.

Окончательная схема замещения (рис. П-15,*г*) получается при представлении участка линии справа от точек *а* и *Б* эквивалентной схемой рис. П-9,*а*, причем ветвь с взаимоиндукцией Z'_{I-II} включена последовательно с сопротивлением $Z_в$.

4. На рис. П-16 рассмотрен способ составления схемы замещения параллельных линий с ответвлениями на подстанцию, имеющую два трансформатора с заземленными нейтралями.

Приведение исходной схемы (рис. П-16,*а*) к схеме замещения (рис. П-16,*в*) производится следующим образом:

а) участок линии слева от места ответвления, а также справа от места замыкания на землю замещается по схеме, приведенной на рис. П-9,*а*;

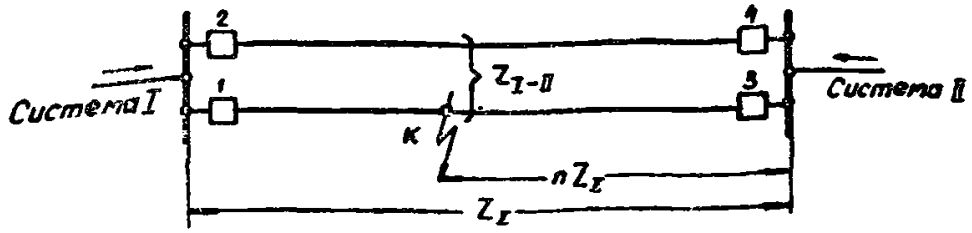
б) участок линии между местом ответвления и местом короткого замыкания также замещается по схеме рис. П-9,*а*, причем взаимоиндукция между линиями на участке между точками *В* и *К* $\frac{Z_{I-II}}{4}$ выносится за общую точку *О*.

При наличии на параллельных линиях нескольких двухцепных ответвлений схема может быть преобразована аналогичным образом

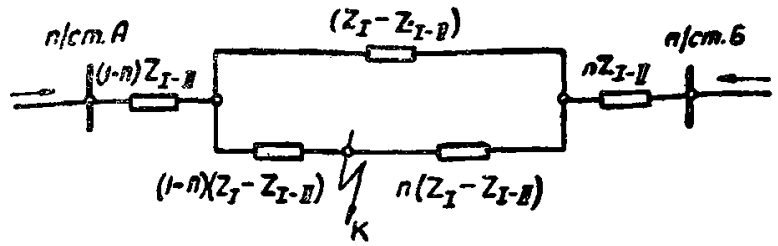
5. На рис. П-17 показан способ составления схем замещения трех параллельных линий с ответвлением от одной из них к заземленному трансформатору.

В рассматриваемом случае составление точной схемы замещения затруднительно, а поэтому в целях упрощения принято, что сопротивления взаимоиндукции между отдельными линиями на участке справа от места ответвления равны между собой в предположении, что этот участок короче, чем участок слева от ответвления.

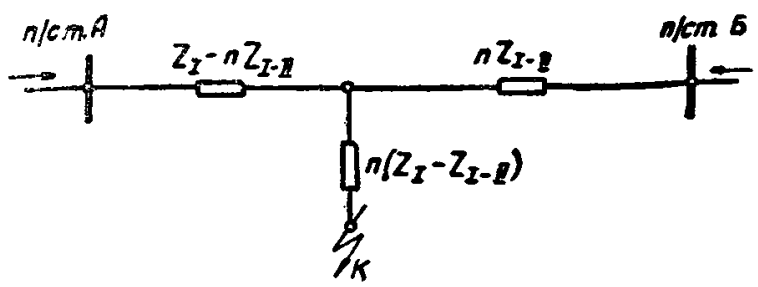
Для части схемы, приведенной на рис. П-17,*а*, слева от ответвления составлена схема замещения согласно рис. П-9,*б*, приведенная на рис. П-17,*б*. Последовательным преобразованием звезды из сопротивлений $Z_с$, Z_1 и Z_2 в треугольник (рис. П-17,*в*) и треугольника из сопротивлений Z_3, Z_4 и Z_{10} в звезду получена схема, данная на рис. П-17,*г*.



а) Исходная схема.



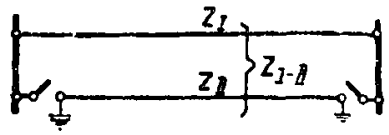
б) Схема замещения рис. „а".

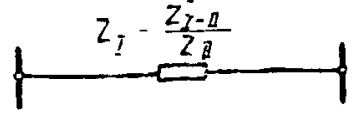


в) Схема замещения рис. „а"
при отключенном выключателе 1
(каскадное отключение поврежденной линии).

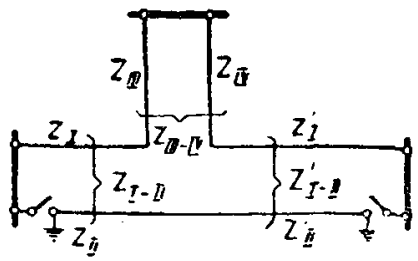
Рис. П-10. Схемы замещения нулевой последовательности двух параллельных линий с двумя общими точками.
Условные обозначения:

n — относительная длина линии от шин п/ст. Б до места повреждения;
Z_I — сопротивление нулевой последовательности одной линии;
Z_{I-II} — сопротивление взаимоиндукции между линиями.

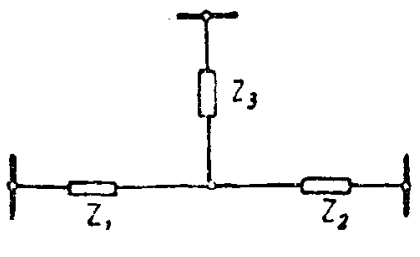




а) Исходная схема и схема замещения двух параллельных линий при заземлении одной из них с обоих концов.



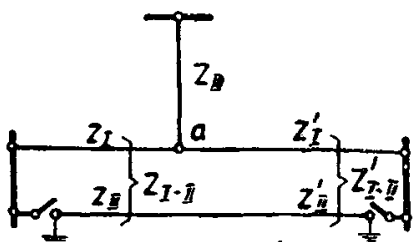
при $Z_{III} = Z_{IV}$, $Z_I = Z_{II}$, $Z'_I = Z'_{II}$



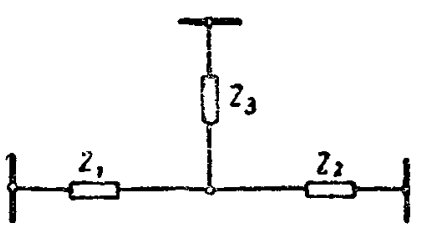
$$Z_1 = Z_I + Z_{III} - Z_{III-IV} - \frac{Z_{I-II}(Z_{I-II} + Z'_{I-II})}{Z_I + Z'_I}$$

$$Z_2 = Z'_I + Z_{III} - Z_{III-IV} - \frac{Z'_{I-II}(Z_{I-II} + Z'_{I-II})}{Z_I + Z'_I}; \quad Z_3 = Z_{III-IV} + \frac{Z_{I-II}\, Z'_{I-II}}{Z_I + Z'_I},$$

б) Исходная схема и схема замещения двух параллельных линий, одна из которых имеет заход шлейфом на п/станцию, а другая заземлена с обоих концов.



при $Z_I = Z_{II}$ и $Z'_I = Z'_{II}$

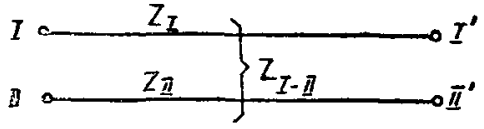


$$Z_1 = Z_I - Z_{I-II}\,\frac{Z_{I-II} + Z'_{I-II}}{Z_I + Z'_I}$$

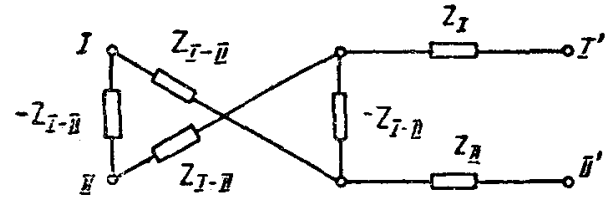
$$Z_2 = Z'_I - Z'_{I-II}\,\frac{Z_{I-II} + Z'_{I-II}}{Z_I + Z'_I}; \quad Z_3 = Z_{III} + \frac{Z_{I-II}\cdot Z'_{I-II}}{Z_I + Z'_I}$$

в) Исходная схема и схема замещения двух параллельных линий, одна из которых имеет ответвление на подстанцию, а другая заземлена с обоих концов.

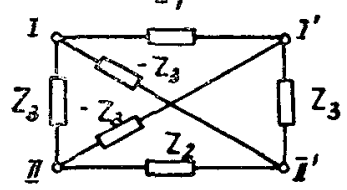
Рис. П-11. Схемы замещения нулевой последовательности параллельных линий при заземлении одной из этих линий с обоих концов.



а) Исходная схема параллельных линий.



б) Схема замещения рис. „а" (вариант 1)



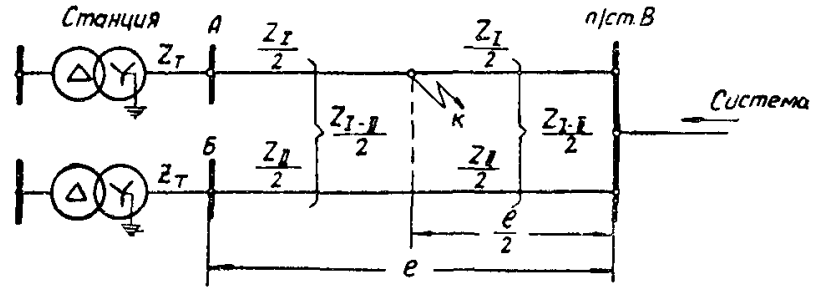
$$Z_1 = \frac{Z_I Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_{II}};$$

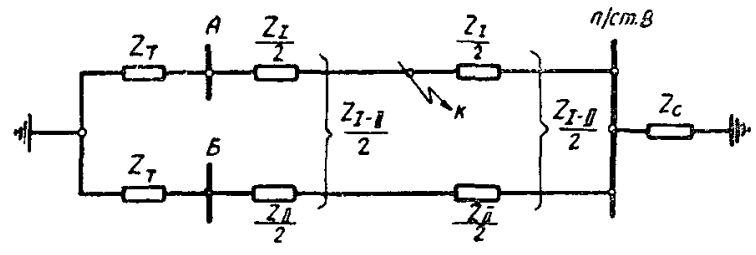
$$Z_2 = \frac{Z_I Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_I};$$

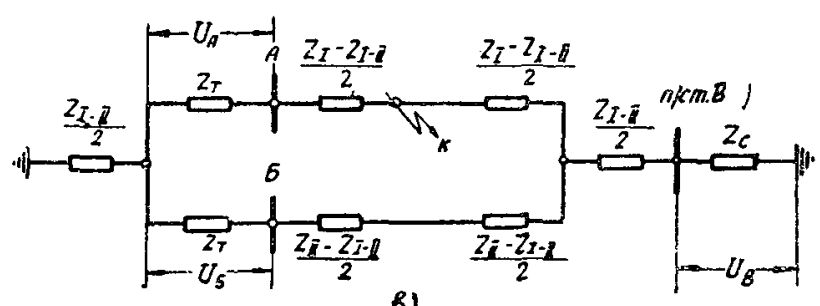
$$Z_3 = \frac{Z_I Z_{II} - Z_{I-II}^2}{Z_{I-II}};$$

в) Схема замещения рис. „а" (вариант 2)

Рис. П-12. Схемы замещения нулевой последовательности параллельных линий, не имеющих общих точек в зоне сближения (для случаев замыкания вне зоны сближения).







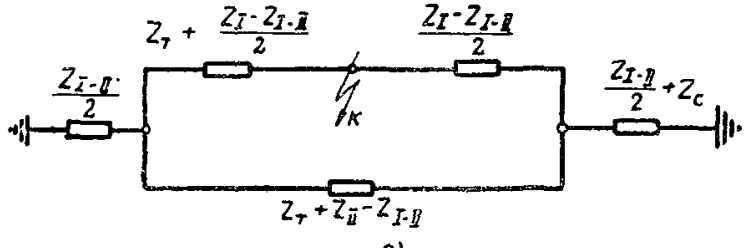
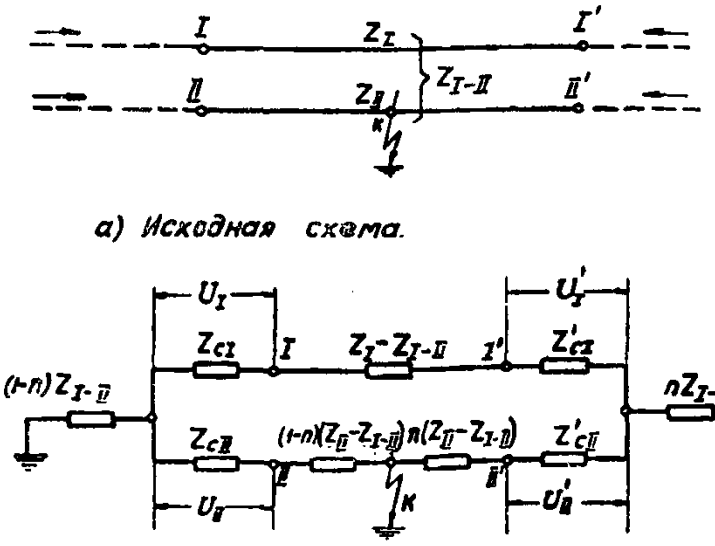


Рис. П-13. Схемы замещения нулевой последовательности двух параллельных блоков трансформатор — линия.
$U_А$, $U_Б$, $U_В$ — напряжения нулевой последовательности на шинах станции и *п/ст. В.*



а) Исходная схема.

б) Схема замещения.

Рис. П-14. Схема замещения нулевой последовательности параллельных линий, имеющих общие точки вне зоны сближения.

Примечания: 1. U_I, U_{II}, U'_I, U'_{II} — напряжения нулевой последовательности в точках I, II, I′ и II′.

2. n — относительная длина линии от точки II′ до места повреждения.

3. Z_{cI}, Z_{cII}, Z'_{cI}, Z'_{cII} — суммарные сопротивления нулевой последовательности систем.

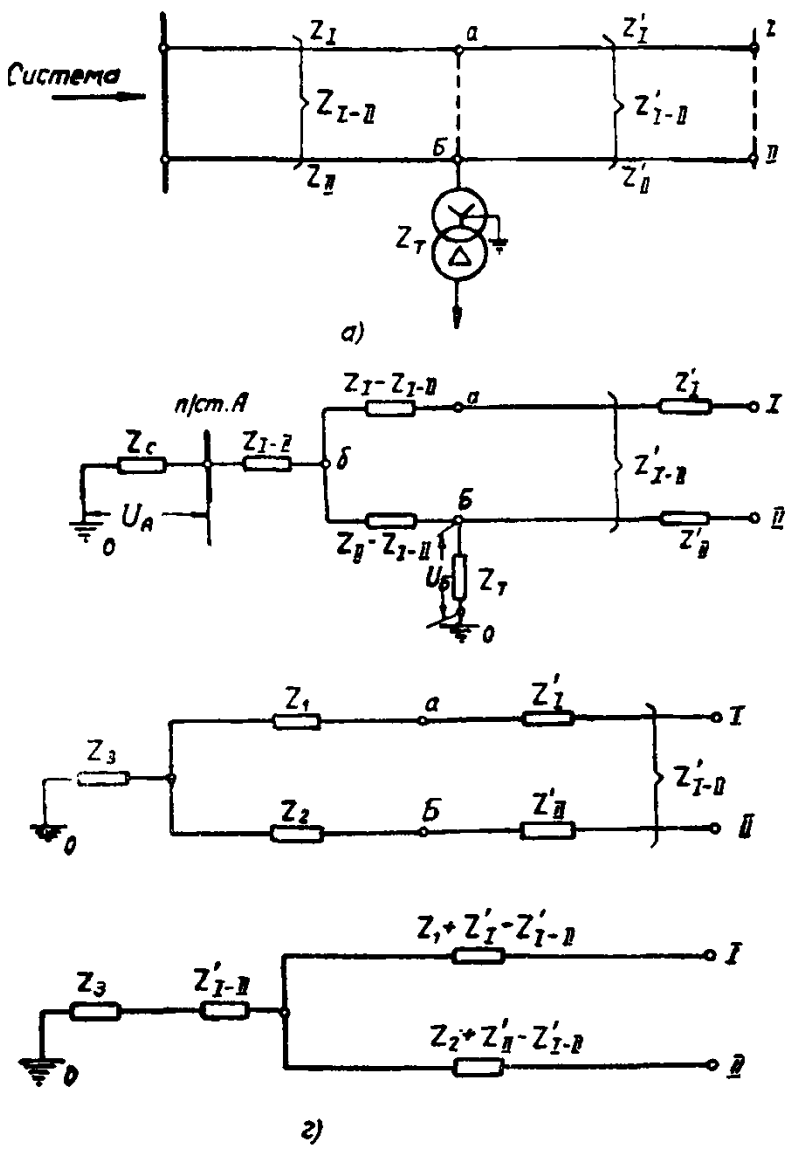


Рис. П-15. Схема замещения нулевой последовательности двух параллельных линий с общей точкой и ответвлением от одной из линий.

Примечания: 1. Z_C — суммарное сопротивление нулевой последовательности системы.

2. U_A, $U_Б$ — напряжения нулевой последовательности на шинах *п/ст. А* и в точке *Б*.

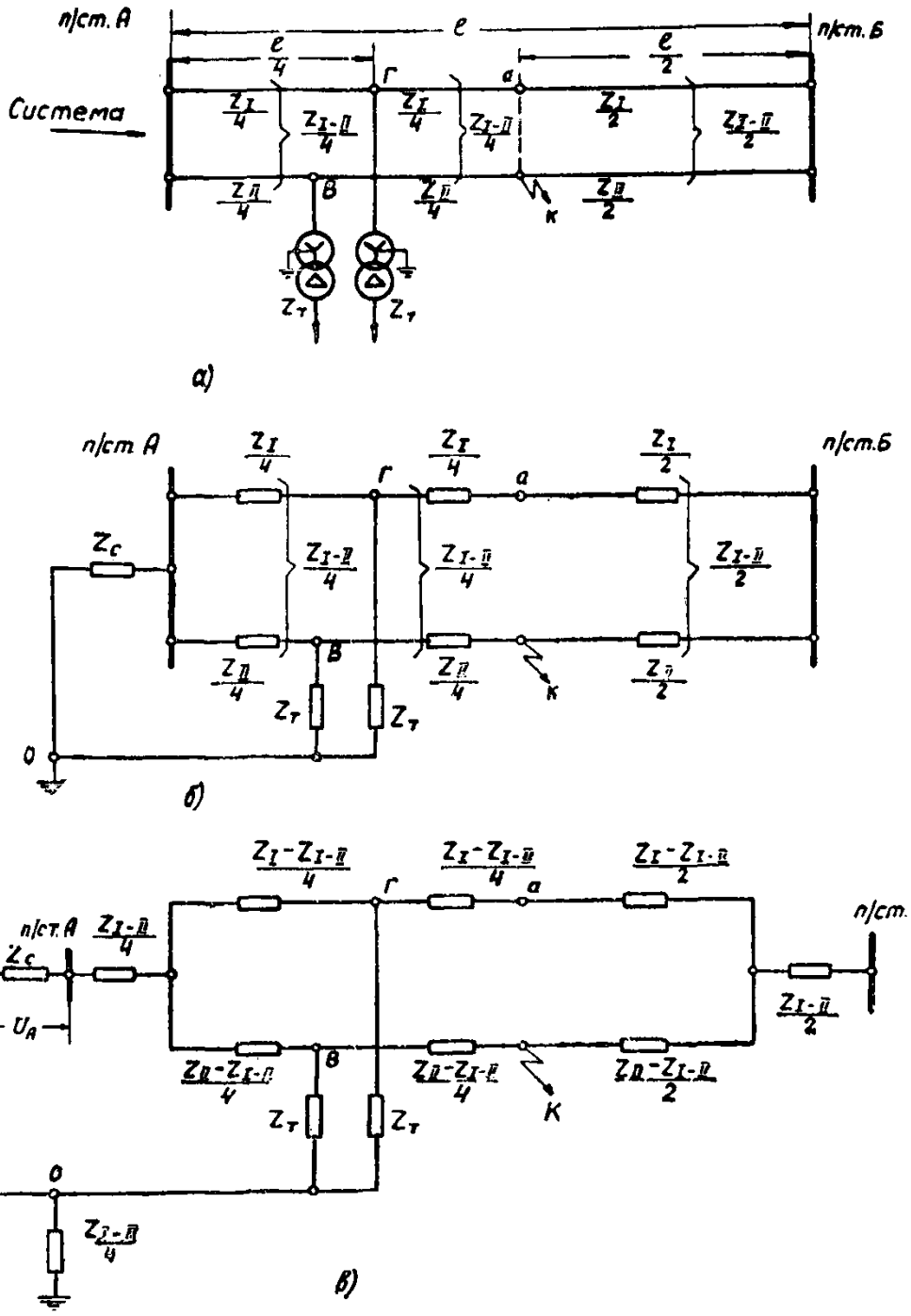


Рис. П-16. Схема замещения нулевой последовательности двух параллельных линий с ответвлениями к двум трансформаторам с заземленными нейтралями.

Примечания: 1. Z_C — суммарное сопротивление нулевой последовательности системы.

2. U_A — напряжение нулевой последовательности на шинах *п/ст. А*.

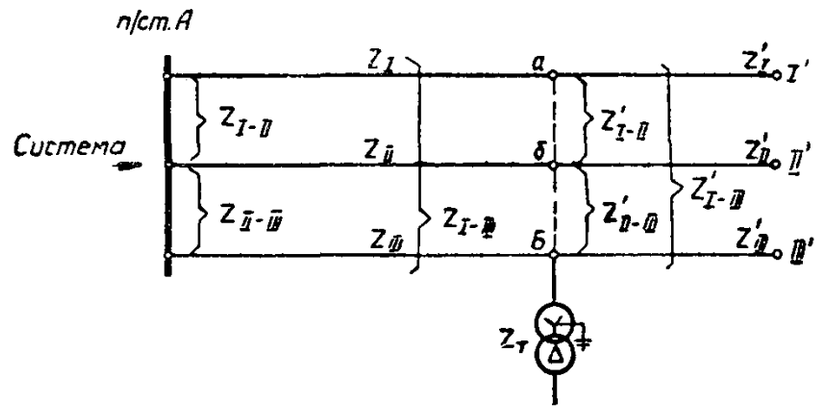
Преобразование треугольника, составленного из сопротивлений Z_T, Z_1 и Z_{II}, в звезду приводит к схеме, данной на рис. П-17,*д*.

Заменой участка схемы, приведенной на рис. П-17,*а*, справа от места ответвления схемой замещения согласно рис. П-9,*г* и вынесением сопротивления Z'_{I-II} за общую точку *О* (рис. П-17,*д*) получена окончательная схема замещения, данная на рис. П-17,*е*.

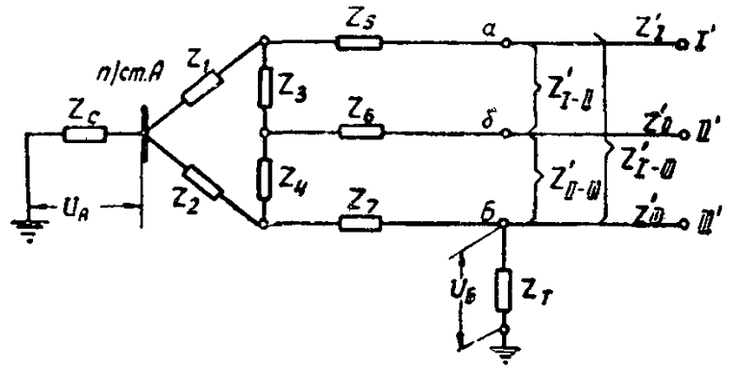
6. На рис. П-18 показан способ составления схемы замещения трех параллельных линий с одной общей точкой и петлевым ответвлением от одной из них.

Схема замещения, показанная на рис. П-18,*з*, получена на основании следующих преобразований:

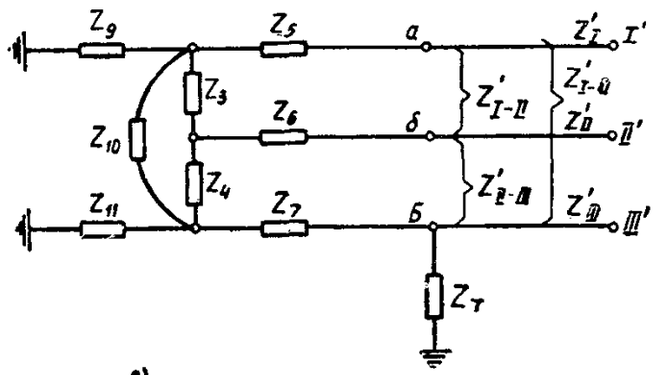
а) параллельные линии петлевого ответвления рис. П-18,*а* преобразованы согласно рис. П-9,*а*, получена схема, приведенная на рис. П-18,*б*;



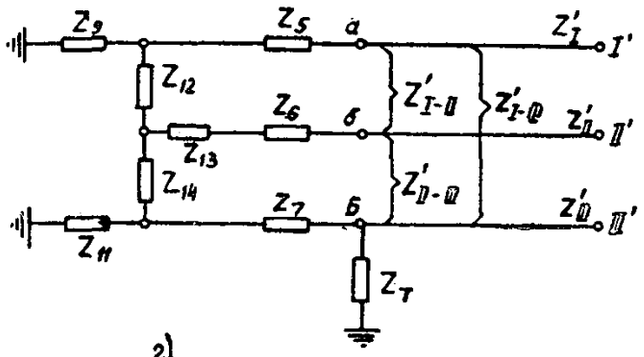
а)



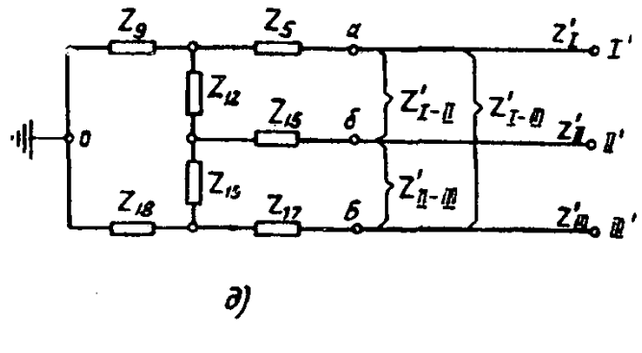
б)



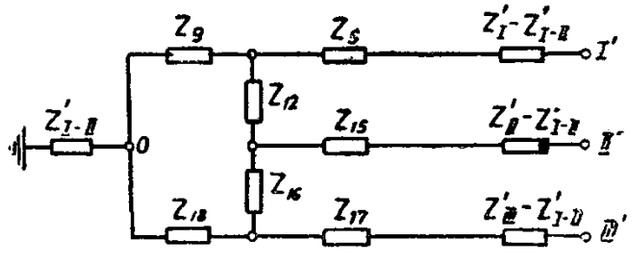
в)



г)



д)



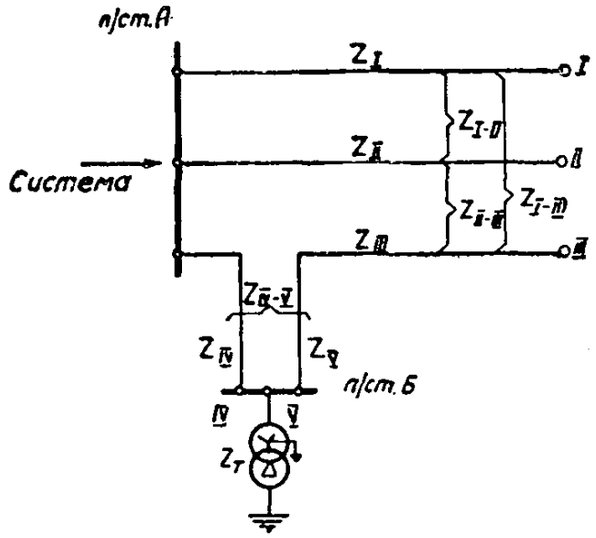
е)

Рис. П-17. Схема замещения нулевой последовательности трех параллельных линий с одной общей точкой и ответвлением от одной из них к заземленному трансформатору.

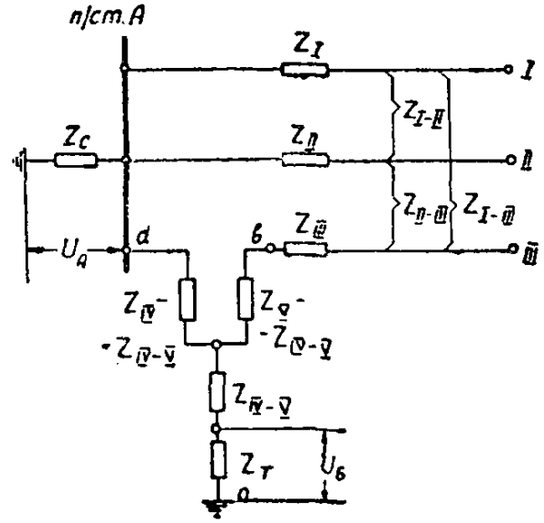
Примечания: 1. Z_C — суммарное сопротивление нулевой последовательности системы.

2. U_A, $U_Б$ — напряжения нулевой последовательности на шинах *п/ст. А* и в точке *Б*.

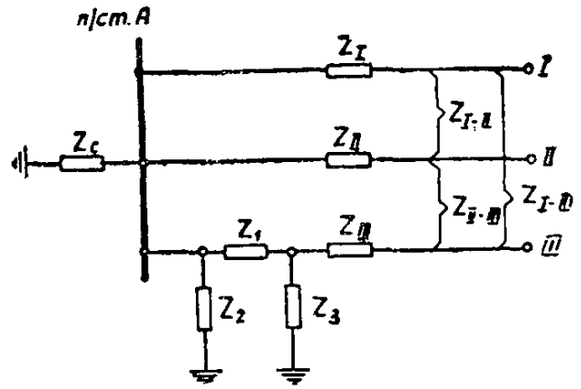
3. Принято, что $Z'_{I-II} = Z'_{II-III} = Z'_{I-III}$.



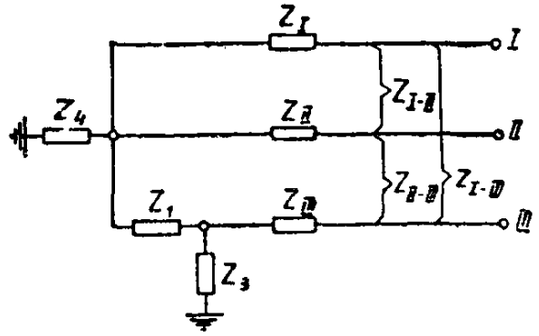
а)



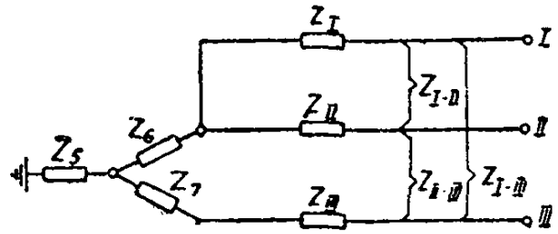
б)



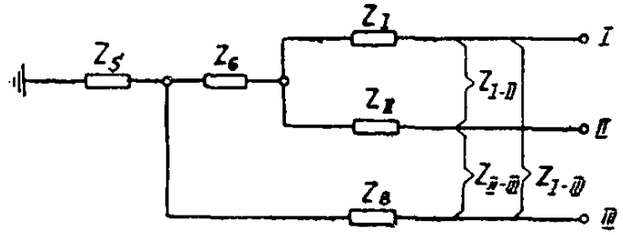
в)



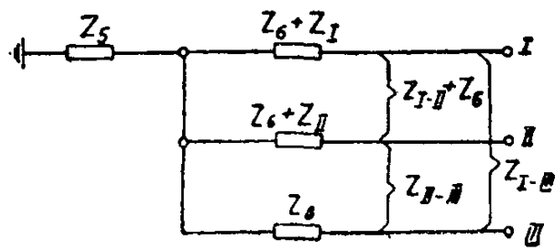
г)



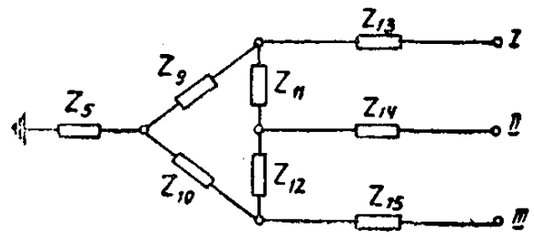
д)



е)



ж)



з)

Рис. П-18. Схема замещения нулевой последовательности трех параллельных линий с одной общей точкой и петлевым ответвлением от одной из них.

Примечания: 1. Z_C — суммарное сопротивление нулевой последовательности системы.

2. $U_А$, $U_Б$ — напряжение нулевой последовательности на шинах *п/ст. А* и *п/ст Б*.

б) звезда *abo* рис. П-18,*б* преобразована в треугольник с сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3 (рис. П-18,*в*). Далее, сопротивления Z_c и Z_2 складываются параллельно (рис. П-18,*г*);

в) преобразованием треугольника Z_4, Z_3, Z_1 в звезду Z_5, Z_6, Z_7 получена схема, данная на рис. П-18,*д*; последовательным сложением сопротивлений Z_7 и Z_{III} получена схема, приведенная на рис. П-18,*е*;

г) введением сопротивления Z_6 во взаимоиндукцию между линиями *I* и *II* (обратное преобразование схемы рис. П-9,*а*) получена схема, приведенная на рис. П-18,*ж*;

д) с помощью преобразования согласно рис. П-9,*б* получена окончательная схема замещения, приведенная на рис. П-18,*з*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет токов небаланса в схеме фильтра токов нулевой последовательности, Ленинградское отделение ГИДЭП, письмо РЗ-37-291 от 15/IV 1960.
2. Техническая информация № ТИ-86э, Ленинградское отделение ГИДЭП, 1959.
3. Материалы завода «Электроаппарат»: а) Технический отчет ТО 3574; 1952, б) К технической записке ТЗ-012; 1954.
4. Старр, Эквивалентные схемы, т. AJEE, 1932.
5. Гейнин Н. Г. Эквивалентные схемы замещения нулевой последовательности нескольких близко трассируемых линий, «Электричество», № 8, 1960.
6. Сопротивление взаимоиндукции между линиями различного напряжения в схемах замещения нулевой последовательности, ЛОТЭП, 1960.
7. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты, Госэнергоиздат, 1960.

ОПЕЧАТКИ

в вып. 1 „Руководящих указаний по релейной защите" — Защита генераторов, работающих на сборные шины

Страница	Колонка	Строка	Напечатано	Должно быть
2		7 снизу	„Теплопроект"	„Теплоэлектропроект"
11	Правая	2 снизу	Главэлектропроектом	Главэнергопроектом
50	Левая	23 сверху	$z_{\text{расч. возд. в}}$	$z_{\text{рас. возд. в}}$
63	Левая	1 снизу	$I_{\text{с.р.в}} = \dfrac{z_{\text{с.з.п}}}{w_{\text{в}}\left(1 + \dfrac{z_{\text{р}}}{z_{\text{э.нам.в}}}\right)}$	$I_{\text{с.р.в}} = \dfrac{I_{\text{с.з.п}}}{w_{\text{в}}\left(1 + \dfrac{z_{\text{р}}}{z_{\text{э.нам.в}}}\right)}$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Глава первая. Схемы защит нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 — 220 *кв* 5

Глава вторая. Расчет ступенчатых токовых направленных и ненаправленных защит нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110 — 220 *кв* 14

Глава третья. Примеры расчета защиты нулевой последовательности от замыканий на землю линий в сетях 110 — 220 *кв* 26

Приложение I. Использование трансформаторов тока в цепях трансформаторов и автотрансформаторов для питания поляризующей обмотки реле направления мощности нулевой последовательности 47

Приложение II. Согласование токовых защит нулевой последовательности в кольцевой сети 51

Приложение III. Проверка чувствительности органа направления мощности ступенчатой токовой направленной защиты нулевой последовательности 53

Приложение IV. Составление схем замещения нулевой последовательности параллельных линий с взаимоиндукцией между ними 56

Литература 63

gost.e-ecolog.ru