

# **РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**КАЗАНЦЕВА ВЕРА ВИКТОРОВНА**

**1 семестр**

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Чернобровов Н. В. Релейная защита. – М.: Энергия, 1998.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М., «Энергия», 1976 г.
3. Беркович М.А. и Семёнов В.А. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. Изд-е 5-е. М., «Энергия», 1971 г.
4. Кривенков В.В., Новелла В.Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М., «Энергия», 1981 г.
5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. 2-е изд. М., «Энергоатомиздат», 1986 г.
6. Гельфанд Я.Е. Релейная защита распределительных сетей. М., «Энергия», 1975 г.

# 1. Общие сведения о релейной защите

## 1.1. Назначение релейной защиты

В электроэнергетических системах могут возникать повреждения и ненормальные режимы работы.

**Повреждения**: короткие замыкания – сверх ток, понижение напряжения – потеря устойчивости.

**Ненормальные режимы** – отклонения напряжения, тока и частоты.

Развитие аварии может быть предотвращено быстрым отключением поврежденного участка при помощи специальных автоматических устройств – релейной защиты.

### **Назначение**

- ▣ выявление места КЗ и быстрое отключение поврежденного участка от неповрежденной части.
- ▣ выявление нарушений нормального режима и подача предупредительных сигналов или проведение операций, необходимых для восстановления нормального режима.

РЗ тесно связана с устройствами автоматики – АПВ, АВР, АЧР.

## 1.2. Повреждения и ненормальные режимы в ЭУ

Большинство повреждений в электроустановках приводит к *коротким замыканиям* (к.з.) фаз между собой или на землю. В обмотках электрических машин (генераторов, трансформаторов и электродвигателей), кроме того, бывают замыкания между витками одной фазы (*витковые замыкания*).

Основными причинами повреждений являются:

**Нарушения изоляции** токоведущих частей, вызванные её старением, неудовлетворительным состоянием, перенапряжениями, механическими повреждениями;

**Пошибки персонала** при операциях с электрооборудованием.

**Короткие замыкания (к.з.) являются наиболее опасными и тяжелыми видами повреждений.**

При коротком замыкании э.д.с  $E$  источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротивление генератора, трансформатора и линий. В контуре замкнутой накоротко э.д.с. возникает большой ток  $I_K$ , называемый **током к.з.**

Наибольшее снижение напряжения происходит в месте к.з.



## 1.2. Повреждения и ненормальные режимы в ЭУ

Увеличение тока и снижение напряжения, происходящие в результате к.з., приводят к ряду опасных последствий:

- Термическое действие тока к.з.;
- Понижение напряжения при к.з.;
- Нарушение устойчивости параллельной работы ;

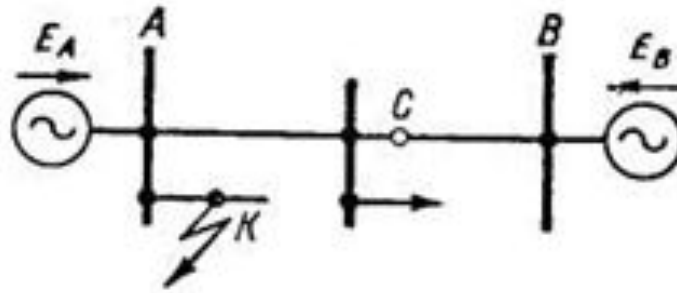


Рисунок 1 – Влияние понижения напряжения при к.з. на работу энергосистемы

В зависимости от числа замкнувшихся фаз к.з. подразделяются на *трёхфазные*, *двухфазные* и *однофазные*; замыкания с землёй и без земли; замыкания в одной и двух точках сети

## 1.2. Повреждения и ненормальные режимы в ЭУ

### *Трёхфазное к.з.*

Трёхфазное к.з. ( $K^{(3)}$ ) является симметричным режимом, при котором токи и напряжения во всех фазах равны по величине как в месте к.з., так и в любой точке сети:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{I}_K^{(3)}; \quad \dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_K^{(3)};$$

В точках, удалённых от места к.з. на небольшое расстояние фазные и междуфазные напряжения незначительны по величине, поэтому 3-х фазное к.з. представляет наибольшую опасность и является расчётным режимом при определении максимального тока к.з.

### *Двухфазное к.з.*

При двухфазном к.з. ( $K^{(2)}$ ) токи и напряжения разных фаз не одинаковы.

В повреждённых фазах в месте двухфазного к.з. проходят одинаковые по величине, но противоположные по направлению токи, а в неповреждённой фазе ток к.з. отсутствует.

С точки зрения влияния на устойчивость параллельной работы генераторов и на работу электродвигателей 2-х фазное к.з. представляет меньшую опасность, чем 3-х фазное к.з.

### *Однофазное к.з.*

Однофазное к.з. может возникнуть только в сетях с заземлённой нейтралью (сети **110 кВ** и выше). В месте 1-фазного к.з. фазы *С* фазное напряжение повреждённой фазы и фазные токи к.з. неповреждённых фаз будут равным нулю.

В некоторых случаях ток однофазного к.з. может быть больше тока трёхфазного к.з., однако этот режим представляет меньшую опасность для нормальной работы энергосистемы, чем 3-х и 2-х фазные к.з., так как в месте повреждения снижается до нуля только фазное напряжение поврежденной фазы.

## 1.2. Повреждения и ненормальные режимы в ЭУ

**Ненормальными режимами**, связанными с отклонением от допустимых значений тока, напряжения и частоты и представляющими опасность для электроснабжения потребителей электроэнергии и энергосистемы в целом, являются: **перегрузка оборудования, повышение напряжения, качания в системе.**

□ **Перегрузка оборудования** – это превышение тока по оборудованию сверх номинального значения. Если ток превышает номинальное значение, то за счёт выделяемого им дополнительного тепла через некоторое время температура токоведущих частей и изоляции превысит допустимую величину, что приведёт к ускоренному износу изоляции и её повреждению. Для предупреждения повреждения оборудования при перегрузках необходимо принимать меры по разгрузке или отключению оборудования.

□ **Повышение напряжения** – это превышение напряжения на оборудовании сверх допустимого значения.

При повышении напряжения необходимо его снижать вручную или отключать оборудование от сети.

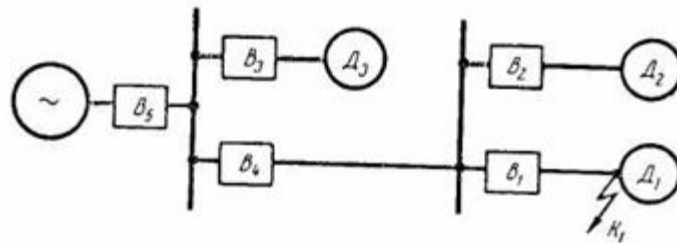
□ **Качания в системах** – периодическое изменение ("качание") тока, напряжения, активной и реактивной мощности.

Качания возникают при выходе из синхронизма работающих параллельно генераторов и сопровождаются возрастанием тока и снижением напряжения в сети. На эти изменения тока и напряжения защиты реагируют также, как и на симметричное к.з.

Кроме перечисленных ненормальных режимов, имеются и другие, ликвидация которых возможна при помощи релейной защиты и системной автоматики.

# 1.3. Требования, предъявляемые к релейной защите

**1. Селективность (избирательность)** – способность отключать только поврежденный участок сети (основное условие для обеспечения надёжного электроснабжения потребителей).



Все защиты делятся на **2 класса** по селективности:

- **защиты с относительной селективностью** – имеют защиты, на которые по принципу действия можно возложить функции резервных защит при к.з. на смежных элементах сети. С учётом этого такие защиты в общем случае должны выполняться с выдержками времени;
- **защиты с абсолютной селективностью** – имеют защиты, селективность которых при внешних к.з. обеспечивается их принципом действия, т.е. защита способна работать только при к.з. на защищаемом объекте. Поэтому защиты с абсолютной селективностью выполняются без выдержек времени.

## 1.3. Требования к релейной защите

**2. Быстродействие** – главное условие для сохранения устойчивости параллельной работы генераторов. Уменьшается время снижения напряжения у потребителей, повышается эффективность АПВ, уменьшается ущерб для оборудования.

Номинальное напряжение, кВ	Время действия релейной защиты, с
300...500	0,1...0,12
110...220	0,15...0,3
6...10	1,5...3

Критерий – остаточное напряжение не менее 60 % от номинального. Кроме того, нужно учитывать и время срабатывания выключателей:

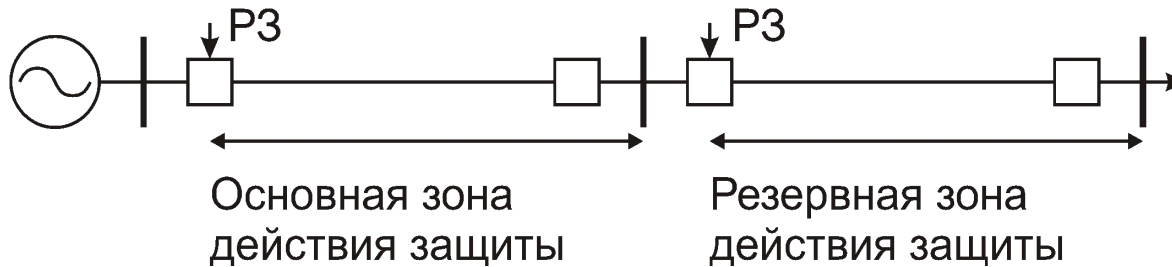
$t_{\text{откл}} = t_z + t_v$ , где  $t_z$  – время действия защиты,  $t_v$  – время отключения выключателя – 0,15...0,06 с.

Современные устройства быстродействующей релейной защиты имеют время действия **0,02-0,1 с**.

Быстродействующие защиты могут быть и *неселективными*, для исправления неселективности используется АПВ

# 1.3. Требования к релейной защите

**3. Чувствительность** – это свойство защиты, обеспечивающее выявление повреждения электрооборудования в самом начале его возникновения.



Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется **коэффициентом чувствительности**  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}$ , где  $I_{\text{к.мин}}$  – минимальный ток к.з.,  $I_{\text{с.з.}}$  – ток срабатывания защиты.

Резервирование следующего участка – важное требование. Если защита по принципу своего действия не работает за пределами основной зоны, ставят специальную резервную защиту.

# 1.3. Требования к релейной защите

**4. Надёжность.** *Требование надёжности состоит в том, что защита должна правильно и безотказно действовать в пределах установленной для неё зоны и не должна работать неправильно в режимах, при которых её работа не предусматривалась.*

Ненадёжная защита сама становится источником аварий.

При эксплуатации возможны следующие виды отказов в функционировании устройств релейной защиты:

- *отказы срабатывания* при требуемом срабатывании;
- *излишние срабатывания* при повреждениях в защищаемой зоне с требованием несрабатывания;
- *ложные срабатывания* при отсутствии повреждений в защищаемой зоне.

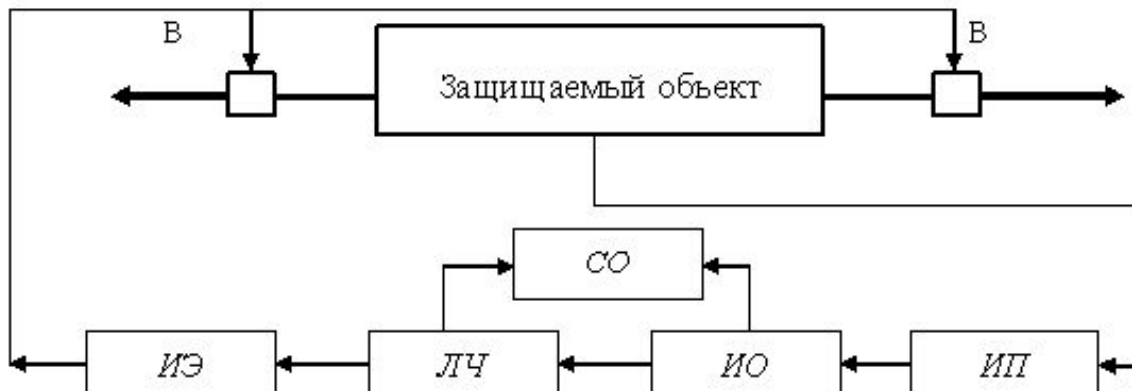
Требование надёжности обеспечивается совершенством принципов защиты и конструкцией аппаратуры, простотой выполнения, а также уровнем эксплуатации.

## 1.4. Основные органы релейной защиты

Релейная защита для выполнения функций, соответствующих её назначению, состоит, как правило, из *измерительных (пусковых) органов* и *логической части*.

*Измерительные (пусковые) органы* непосредственно и непрерывно контролируют состояние и режим работы защищаемого оборудования и реагируют на возникновение к.з. или нарушения нормального режима работы.

*Логическая часть* представляет собой схему, которая запускается измерительными (пусковыми) органами и формирует команды на отключение выключателей мгновенно или с выдержкой времени, запускает другие устройства, подаёт сигналы и производит прочие предусмотренные алгоритмом защиты действия.





## 1.5. Элементы релейной защиты

Основным элементом всякой схемы релейной защиты является *реле*. Под термином *реле* принято понимать *автоматически действующий аппарат, предназначенный производить скачкообразное изменение состояния управляемой цепи при заданных значениях величины, характеризующей определенное отклонение режима контролируемого объекта.*

В устройствах релейной защиты применяются реле *электрические, механические* и *тепловые*.

*Электрические реле* реагируют на электрические величины – ток, напряжение, мощность, частоту, сопротивление, угол между током и напряжением или двумя токами, или двумя напряжениями.

*Механические реле* реагируют на неэлектрические величины – давление, скорость истечения жидкости или газа, скорость вращения и т.д.

*Тепловые реле* реагируют на количество выделенного тепла или изменение температуры.

Наибольшее распространение в релейной защите и автоматике получили электрические реле.

## 1.5. Элементы релейной защиты

### *Классификация электрических реле.*

Все реле имеют: *воспринимающий (измерительный) орган*, который непосредственно воспринимает изменение электрических величин, подведённых к реле, и производит соответствующие им изменения в других органах реле; *исполнительный орган*, который, воздействует на внешние цепи, производит отключение выключателей, подачу предупредительных сигналов или запуск других реле. Частным случаем исполнительного органа являются контакты реле.

*В зависимости от электрической величины, на которую реагирует воспринимающий орган*, электрические реле бывают: **токовые, напряжения, мощности, сопротивления, частоты** и т.д.

*По характеру изменения воздействующей величины* реле делятся на **реле максимальные** и **реле минимальные**. *Максимальные реле* работают, когда значение воздействующей величины превосходят заданную, а *минимальные* – когда значение воздействующей величины снижается ниже заданной.

## 1.5. Элементы релейной защиты

Все реле *по назначению* условно можно разделить на три группы:

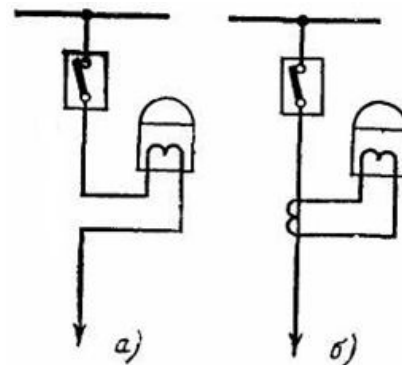
***Основные реле***, непосредственно реагирующие на изменение контролируемых величин, например, напряжения, мощности, частоты, сопротивления и т.д. (реле тока, напряжения, мощности, частоты, сопротивления).

***Вспомогательные реле***, управляемые другими реле и выполняющие функции введения выдержек времени, размножения контактов, передачи команд от одних реле к другим, воздействия на выключатели и т.п. (реле времени, промежуточные реле).

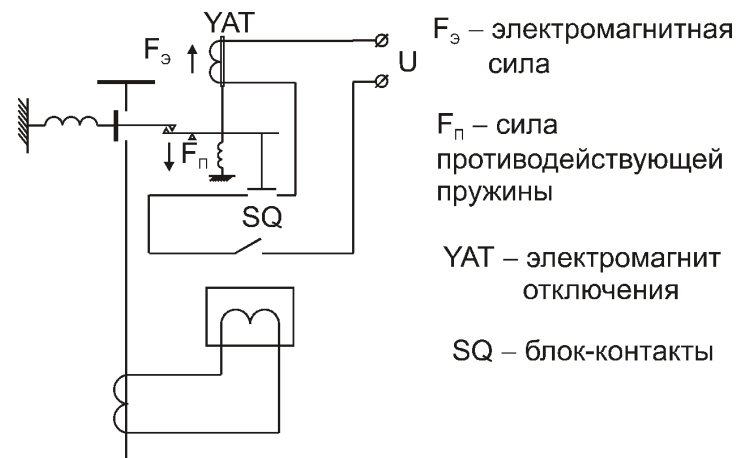
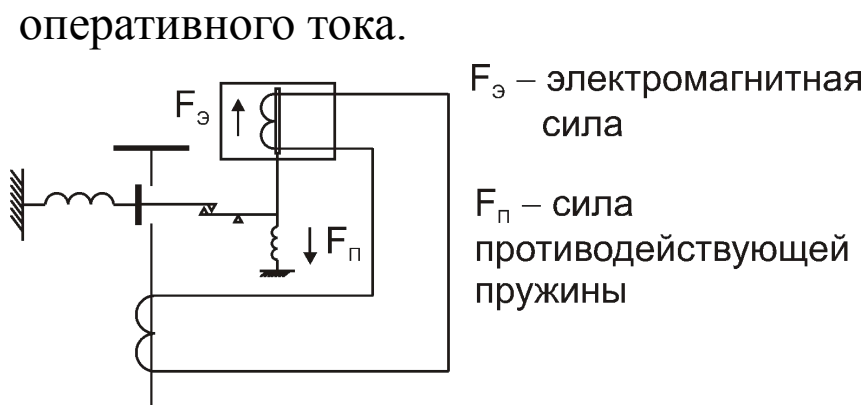
***Сигнальные (указательные) реле***, фиксирующие действие защиты и управляющие звуковыми и световыми сигналами (указательные реле).

## 1.5. Элементы релейной защиты

По способу включения воспринимающего органа различаются **реле первичные (а)**, у которых воспринимающий орган включается непосредственно в цепь защищаемого элемента, и **реле вторичные (б)**, у которых воспринимающий орган включается через измерительные трансформаторы тока или напряжения.



По способу воздействия исполнительного органа различаются **реле прямого действия (а)**, у которых исполнительный орган отключает выключатель путём прямого механического воздействия, и **реле косвенного действия (б)**, исполнительный орган которых воздействует на привод выключателя с помощью оперативного тока.



## 1.5. Элементы релейной защиты

*По принципу действия* электрические реле разделяются на следующие группы:

***Электромагнитные реле***, работа которых основана на воздействии магнитного потока обтекаемой током обмотки на ферромагнитный якорь;

***Поляризованные реле*** – электромагнитное реле со вспомогательным поляризующим магнитным полем;

***Магнитоэлектрические реле***, работа которых основана на взаимодействии постоянного магнита и обтекаемой током обмотки;

***Индукционные реле***, работа которых основана на взаимодействии магнитных полей неподвижных обмоток с магнитными полями токов, индуцируемых в подвижном элементе;

***Полупроводниковые реле***, работа которых основана на использовании свойств полупроводниковых приборов.



# 1.6. Изображение схем релейной защиты

(данная тема изучается студентом самостоятельно)

## 1.7. Источники оперативного тока

**Оперативный ток** – ток, питающий цепи дистанционного управления выключателями, оперативные цепи релейной защиты, автоматики и различные виды сигнализации.

*Источники оперативного тока должны обеспечивать высокую степень надёжности, быть постоянно готовы к действию и обеспечивать необходимую величину напряжения или тока в обмотках электромагнитов включения и отключения коммутационных аппаратов (выключателей и разъединителей).*

Для управления выключателями и питания устройств РЗА в электроустановках используются два вида оперативного тока: *постоянный* и *переменный*.

### *Постоянный оперативный ток*

Источниками данного тока являются аккумуляторные батареи напряжением 24, 48, 110 и 220 В.

### *Переменный оперативный ток*

Для питания оперативных цепей переменным током используется ток или напряжение сети. Источниками служат измерительные трансформаторы тока и напряжения, а также трансформаторы собственных нужд, подключаемые на ток и напряжение самой сети.

## 2. Измерительные преобразователи

Включение измерительных приборов и реле в электроустановках высокого напряжения переменного тока производится в большинстве случаев через измерительные преобразователи – *трансформаторы тока (ТТ)* и *трансформаторы напряжения (ТН)*.

Измерительные трансформаторы предназначены для изолирования измерительных приборов и реле от первичных цепей высокого напряжения и для уменьшения напряжения (тысячи вольт) и тока (сотни и тысячи ампер) до величин удобных для измерения.

В России трансформаторы напряжения обычно изготавливаются на номинальное вторичное напряжение 100 В, а трансформаторы тока – на номинальный вторичный ток 5 и 1 А.

Конструктивно трансформаторы напряжения отличаются от трансформаторов тока.



## 2.1. Трансформаторы тока

**Трансформатором тока** называется трансформатор, в котором при правильных условиях применения вторичный ток практически пропорционален первичному току и при правильном включении сдвинут относительно него по фазе на угол, близкий к нулю.

Он питает цепи защиты током сети и выполняет роль датчика, через который поступает информация к измерительным органам устройств релейной защиты.

Все трансформаторы тока можно классифицировать по следующим основным признакам:

**По роду установки** – для работы на открытом воздухе; для работы в закрытых помещениях; для встраивания во внутренние полости электрооборудования; для специальных установок.

**По способу установки** – проходные трансформаторы тока; опорные; встраиваемые;

**По числу коэффициентов трансформации** – с одним коэффициентом трансформации; с несколькими коэффициентами трансформации, получаемыми изменением числа витков первичной или вторичной обмотки, или обеих обмоток;

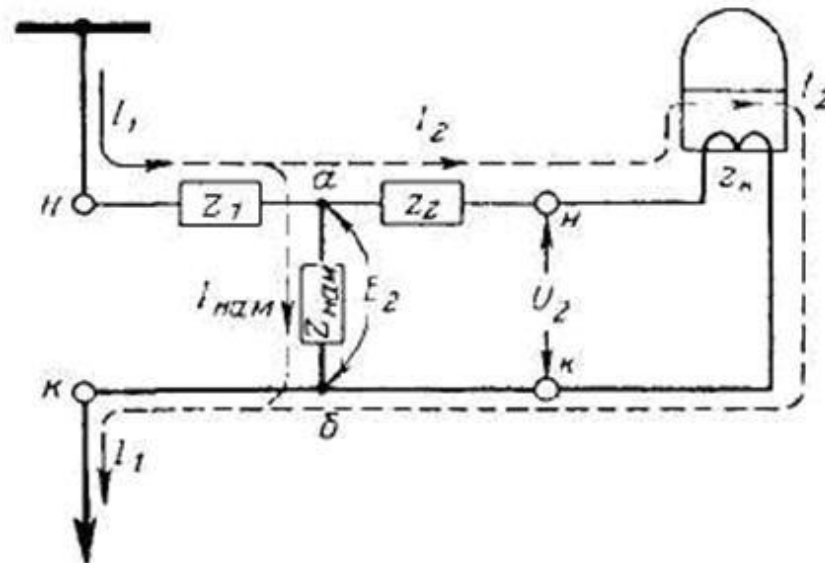
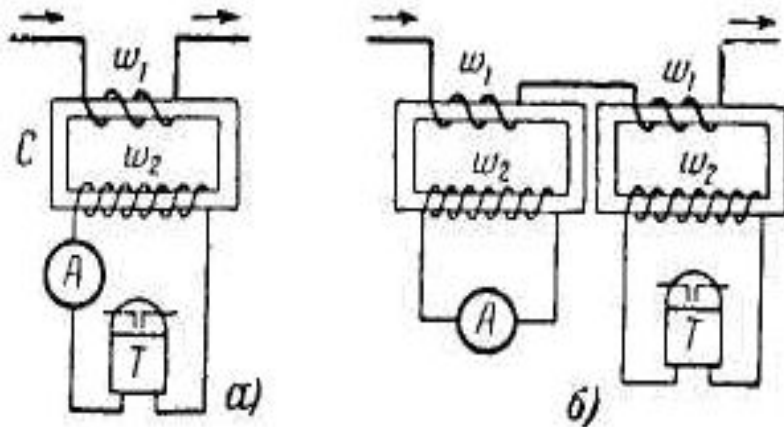
**По выполнению первичной обмотки** – одновитковые; многовитковые.

**По роду изоляции между первичной и вторичной обмотками ТТ** – с твёрдой изоляцией (фарфор, литая изоляция, прессованная изоляция ); с вязкой изоляцией (заливочные компаунды); с комбинированной изоляцией (бумажно – масляная, конденсаторного типа); с газообразной изоляцией (воздух, элегаз).

**По принципу преобразования тока** – электромагнитные трансформаторы тока; оптико – электронные трансформаторы тока.

## 2.1. Трансформаторы тока

### Устройство и принцип действия

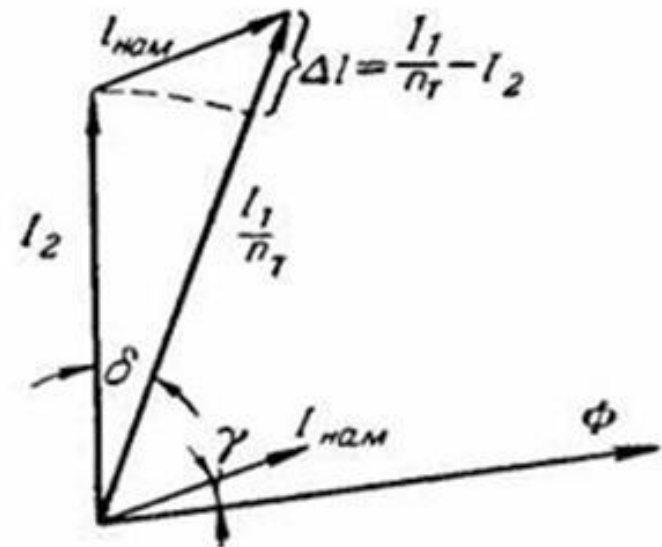


$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2 \Rightarrow F_0 = F_1 - F_2 \Rightarrow I_0 \omega_1 = I_1 \omega_1 - I_2 \omega_2$$

$$\Rightarrow I_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} = I_2 + I_{ном} \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad I_2 = \frac{(I_1 - I_{ном})}{n_T}$$

$$n_T = \frac{\omega_2}{\omega_1} \text{ — витковый коэффициент трансформации.}$$

$$\text{Если не учитывать потерь то: } I_2 = \frac{I_1}{n_T}$$



## 2.1. Трансформаторы тока

### Устройство и принцип действия

Различают следующие *виды погрешностей трансформаторов тока*:

1. **Токовая погрешность** (погрешность в коэффициенте трансформации) ( $\Delta I$ ):

$$\Delta I = \frac{I_1}{n_T} - I_2$$

2. **Угловая погрешность**, определяемая как угол  $\delta$

**Причиной возникновения погрешностей у трансформаторов тока является существование тока намагничивания.**

Чем меньше ток намагничивания, тем меньше погрешности *ТТ*.

При номинальном значении первичного тока ток намагничивания *ТТ* обычно не превышает 0,5 – 3% номинального тока.

**Величина тока намагничивания** зависит от э.д.с.  $E_2$  и сопротивления ветви намагничивания  $Z_{нам}$ , т.е.:

$$I_{нам} = \frac{E_2}{Z_{нам}}$$

Э.д.с.  $E_2$  можно определить как падение напряжения от тока  $I_2$  в сопротивлении вторичной обмотки  $Z_2$  и сопротивлении нагрузки  $Z_H$ , т.е.  $E_2 = I_2 (Z_2 + Z_H)$

Так как **величина вторичного тока  $I_2$**  зависит от величины первичного тока  $I_1$ , то э.д.с.  $E_2$ , а следовательно, и **ток намагничивания  $I_{нам}$  возрастают при увеличении тока  $I_1$**  или при увеличении сопротивления нагрузки  $Z_H$  подключённой ко вторичной обмотке.

## 2.1. Трансформаторы тока

### Устройство и принцип действия



Сопротивление ветви намагничивания  $Z_{нам}$  зависит от конструкции  $ТТ$  и качества стали сердечника. Это сопротивление не является постоянной величиной и зависит от характеристики намагничивания стали, представляющей собой зависимость тока намагничивания  $I_{нам}$  от величины магнитного потока  $\Phi_T$  в сердечнике трансформатора тока

Сопротивление  $Z_{нам}$  обратно пропорционально магнитному сопротивлению  $R_m$  сердечника трансформатора тока, определяемому конструктивными параметрами трансформатора тока:

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

Для уменьшения погрешностей трансформатор тока должен работать в прямолинейной части своей характеристики намагничивания (где ток намагничивания пропорционален потоку в сердечнике трансформатора). Это условие обеспечивается: конструктивными параметрами сердечника; правильным выбором нагрузки вторичной обмотки; снижением величины вторичного тока, что достигается выбором соответствующего коэффициента трансформации.

## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока и цепей тока реле токовых защит

Подключение пусковых реле тока к трансформаторам тока в схемах токовых защит может осуществляться по различным схемам:

- *соединение ТТ и обмоток реле в полную звезду;*
- *соединение ТТ и обмоток реле в неполную звезду;*
- *соединение ТТ в треугольник, а обмоток реле в звезду;*
- *соединение двух ТТ и одного реле в схему на разность токов 2-х фаз;*
- *соединение ТТ в фильтр токов нулевой последовательности.*

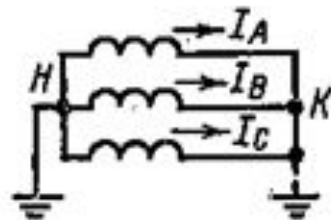
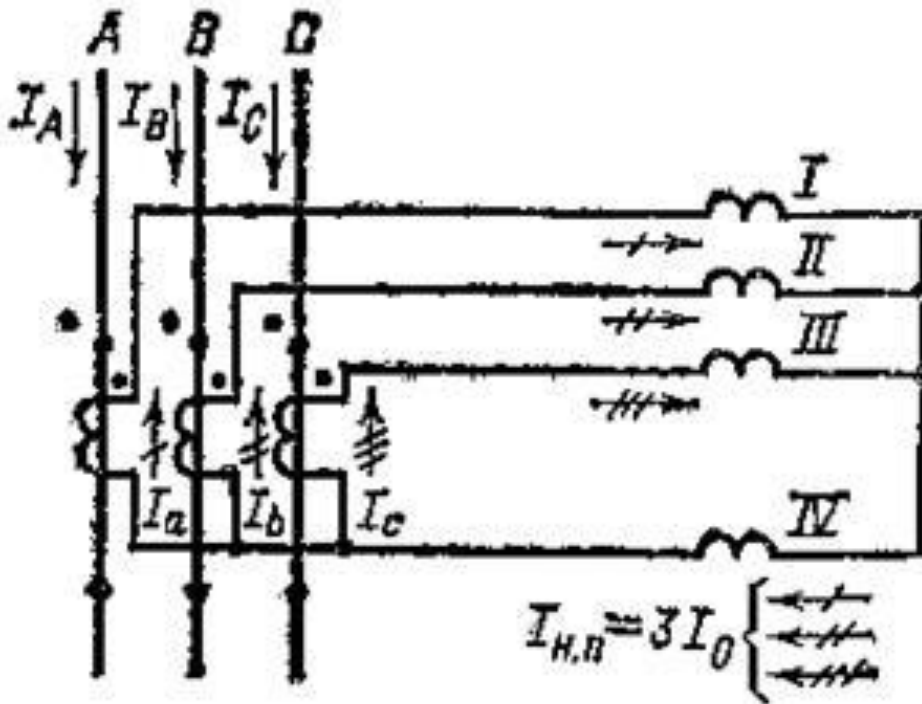
Для каждой схемы определяется отношение тока в реле  $I_p$  к току в фазе  $I_\phi$ , которое называется *коэффициентом схемы*:

$$K_{cx} = \frac{I_p}{I_\phi}$$

Коэффициент схемы необходимо учитывать при расчёте уставок и оценке чувствительности токовой защиты.

## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду

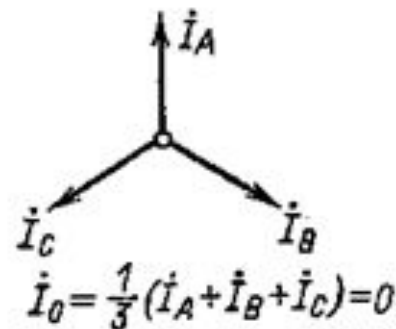


При нормальном режиме и трехфазном к.з. в реле I, II и III проходят токи фаз:

$$I_{\alpha} = \frac{I_A}{n_T} \quad I_{\beta} = \frac{I_B}{n_T} \quad I_{\gamma} = \frac{I_C}{n_T}$$

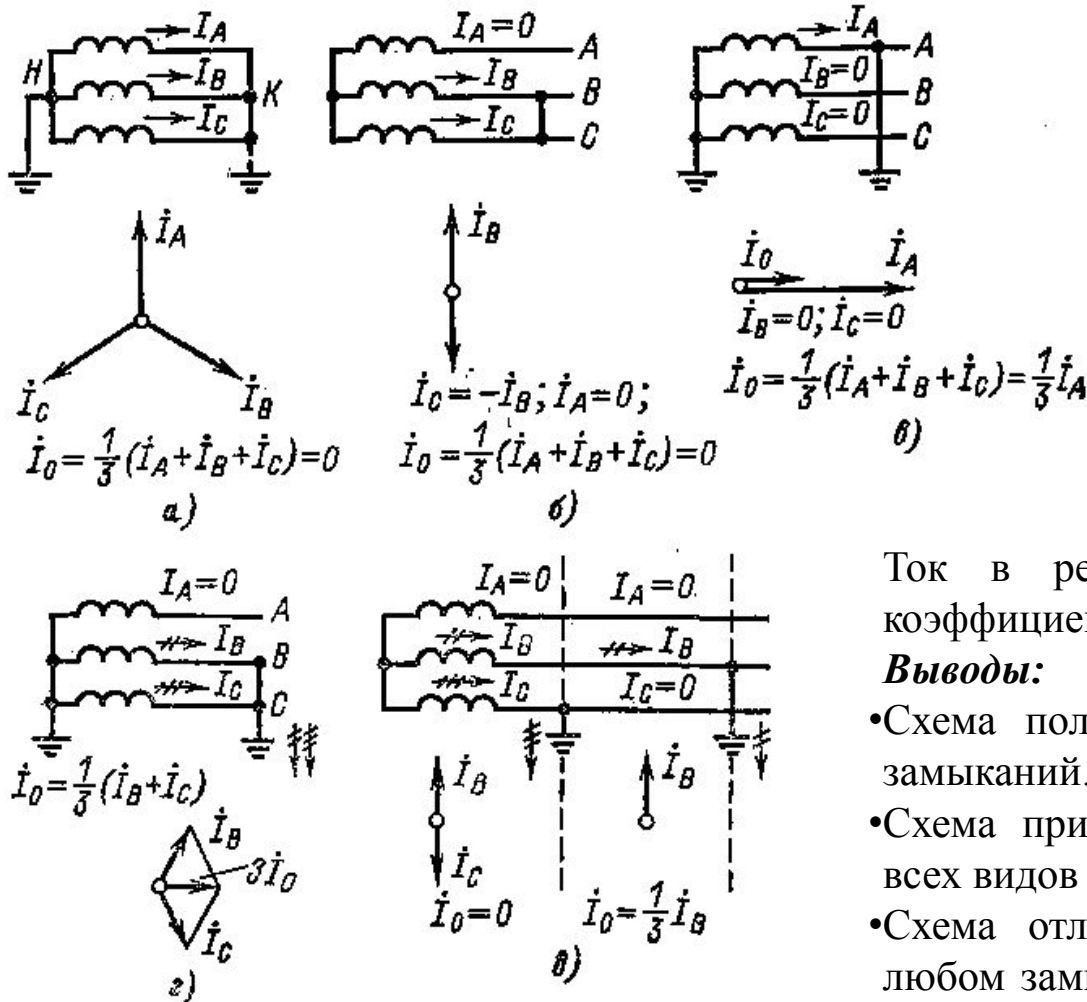
а в нулевом проводе — их геометрическая сумма, которая при симметричных режимах равна нулю.

$$I_{н.п.} = I_{\alpha} + I_{\beta} + I_{\gamma}$$



# 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

## Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду



Векторная диаграмма токов  
 а — при трехфазном к. з.;  
 б — при двухфазном к. з.;  
 в — при однофазном коротком замыкании;  
 г — при двухфазном к. з. на землю;  
 д — при двойном замыкании на землю в разных точках.

Ток в реле равен току в фазе, поэтому коэффициент схемы равен единице:  $K_{CX} = 1$ .

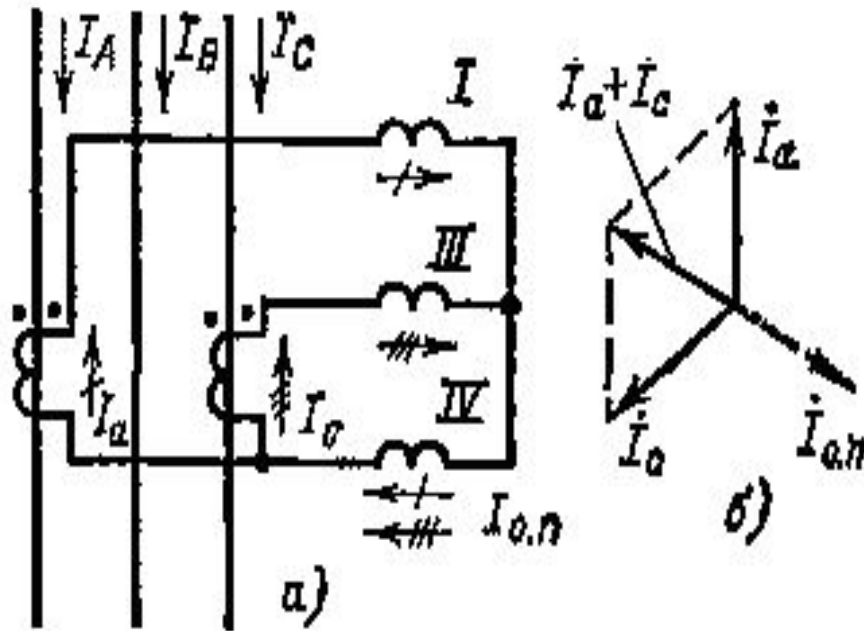
### Выводы:

- Схема полной звезды реагирует на все виды замыканий.
- Схема применяется для включения защиты от всех видов однофазных и междуфазных к.з.
- Схема отличается надежностью, так как при любом замыкании срабатывают по крайней мере два реле.



## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду

Соединение трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду



При нормальном режиме и трехфазном к.з. в реле I и III проходят токи фаз:

$$I_a = \frac{I_A}{n_T} \quad I_c = \frac{I_C}{n_T}$$

а в нулевом проводе — их геометрическая сумма, которая при симметричных режимах равна нулю.

$$I_{н.п.} = -(I_a + I_c) = I_b$$

**Выводы:**

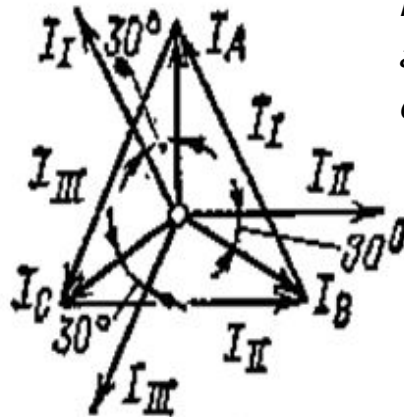
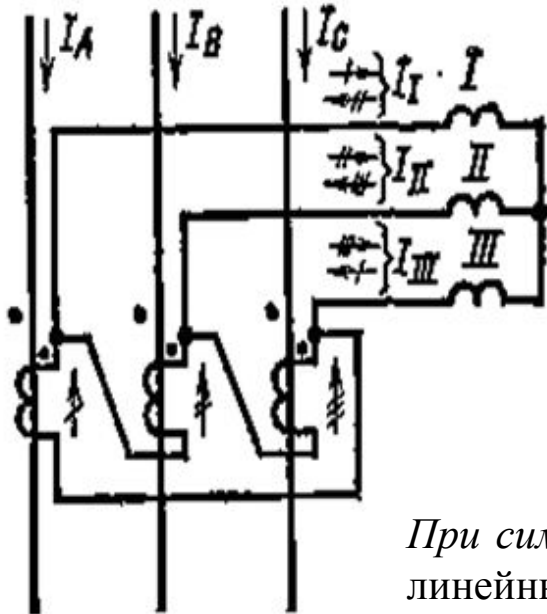
- Схема неполной звезды реагирует на все виды междуфазных замыканий.
- Схема достаточно надежна, т.к. при любом междуфазном замыкании срабатывают, по крайней мере, два реле.
- Для ликвидации однофазных замыканий требуется дополнительная защита.
- Используется для подключения защиты от междуфазных к.з.

Коэффициент схемы  $K_{CX} = 1$ .



## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

Соединение трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле в звезду



Из токораспределения видно, что в каждом реле проходит ток, равный геометрической разности токов двух фаз:

$$I_I = \frac{I_A}{n_T} - \frac{I_B}{n_T} \quad I_{II} = \frac{I_B}{n_T} - \frac{I_C}{n_T}$$

$$I_{III} = \frac{I_C}{n_T} - \frac{I_A}{n_T}$$

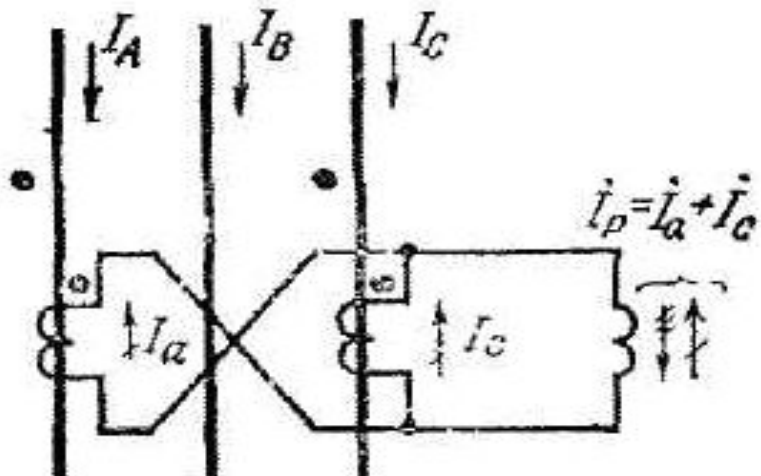
При симметричной нагрузке и трехфазном к.з. в каждом реле проходит линейный ток, в раз больший фазных токов и сдвинутый относительно последних по фазе на  $30^\circ$ . Коэффициент схемы  $K_{CX} = \sqrt{3}$

Схема соединения трансформаторов тока в треугольник обладает следующими особенностями:

1. Токи в реле проходят при всех видах к.з., и, следовательно, защиты по такой схеме реагируют на все виды к.з.
2. Отношение тока в реле к фазному току зависит от вида к.з.
3. Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника трансформаторов тока, не имея пути для замыкания через обмотки реле, значит при к.з. на землю в реле попадают только токи прямой и обратной последовательностей, т. е. только часть тока к.з.

## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

Соединение двух трансформаторов тока и одного реле,  
включенного на разность токов двух фаз



$ТТ$  устанавливаются в 2-х фазах (обычно  $A$  и  $C$ ), их вторичные обмотки соединяются разноимёнными зажимами, к которым параллельно подключается токовое реле. В некоторой литературе эту схему называют схемой *неполного треугольника*.

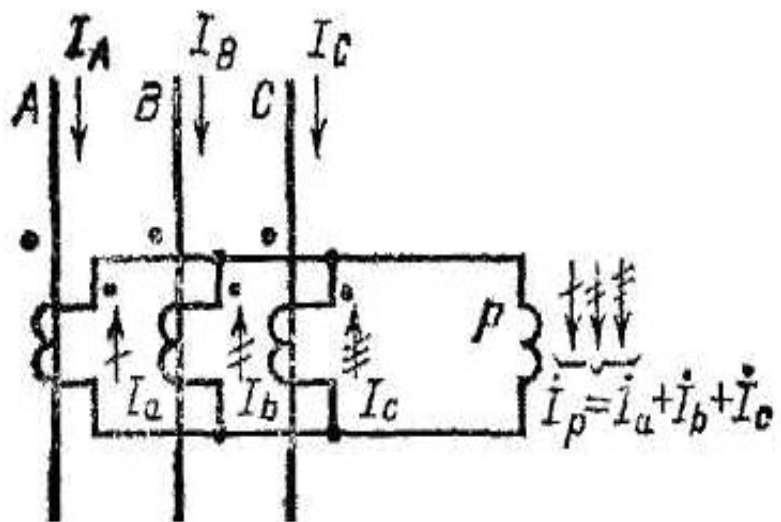
Ток в реле равен геометрической сумме токов двух фаз, в которых установлены  $ТТ$ :  $\vec{I}_P = \vec{I}_A - \vec{I}_C$

Такое соединение позволяет выполнить защиту от всех видов междуфазных замыканий. Схема отличается экономичностью, но в то же время обладает сравнительно невысокой надежностью – отказ реле ведет к отказу защиты.

Рассматриваемая схема может применяться только для защиты от междуфазных к.з. в тех случаях, когда она обеспечивает необходимую чувствительность при двухфазных к.з.

## 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

### Соединение двух трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности



$TT$  устанавливаются во всех фазах, а одноимённые зажимы их вторичных обмоток соединяются параллельно и к ним подключается обмотка реле.

Ток в реле равен геометрической сумме вторичных токов трёх фаз:  $I_p = I_a + I_b + I_c = 3I_0$

Ток в реле появляется только в режимах 1ф. к.з. и 2-х фазных к.з. на землю, так как только в этих режимах появляется ток нулевой последовательности.

Рассматриваемую схему часто называют *трёхтрансформаторным фильтром токов*  $I_0$  и применяют для защит от однофазных и 2-х фазных к.з. на землю.

# 2.2. Схемы соединений трансформаторов тока

## Выбор трансформаторов тока

Выбор трансформаторов тока для релейной защиты выполняется по следующему алгоритму:

1. Определяется рабочий ток защищаемого объекта  $I_{\text{раб}}$ .
2. По найденному значению тока и номинальному напряжению выбирается трансформатор тока.
3. Определяется максимально возможное значение тока повреждения защищаемого объекта  $I_{\text{к.макс.}}$ .
4. Рассчитывается кратность тока короткого замыкания как отношение  $K = \frac{I_{\text{к.макс.}}}{I_{\text{1.ном}}}$  где  $I_{\text{1.ном}}$  – номинальный первичный ток ТТ.
5. Зная кратность  $K$ , по кривой 10%-й погрешности определяется допустимая нагрузка  $Z_{\text{Н. доп}}$  для выбранного трансформатора тока.
6. Учитывая схему соединения ТТ, рассчитывается фактическая нагрузка трансформаторов тока  $Z_{\text{Н.факт.}}$  и сравнивается с допустимой  $Z_{\text{Н. доп}}$ .
7. Если  $Z_{\text{Н.факт.}} \leq Z_{\text{Н. доп}}$  считается, что трансформатор тока удовлетворяет требованиям точности и его можно использовать для данной схемы защиты. Если  $Z_{\text{Н.факт.}} > Z_{\text{Н. доп}}$ , то необходимо принять меры для уменьшения нагрузки.



# 3. Классификация защит

По видам *контролируемого параметра* защиты подразделяются на:

- токовые
- напряжения
- дистанции (сопротивления линии)
- частоты
- мощности и др.

По *принципу действия* бывают:

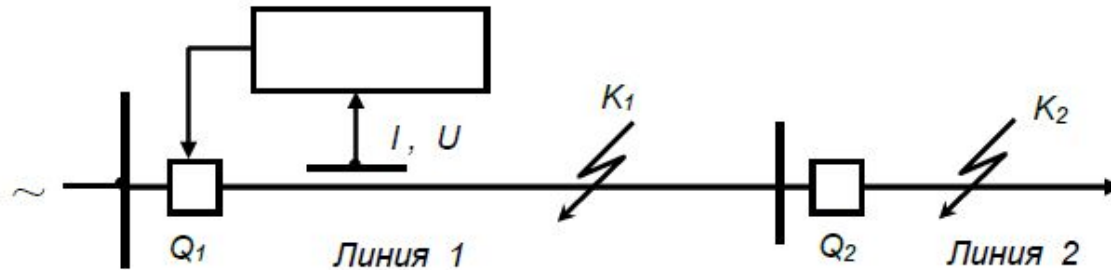
- основные защиты
- резервные защиты

По *способам обеспечения селективности* подразделяются на:

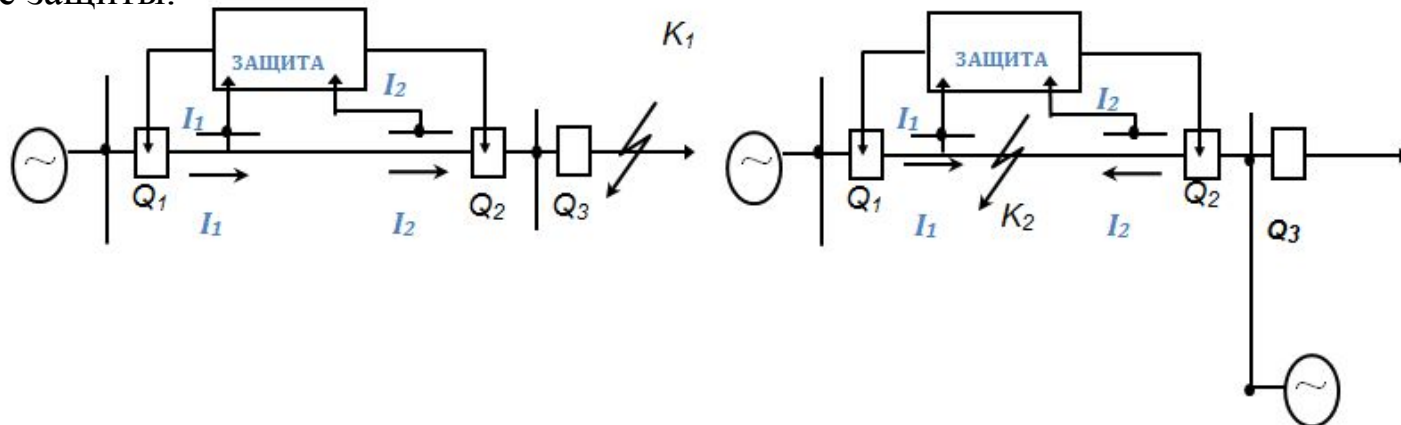
- защиты с относительной селективностью
- защиты с абсолютной селективностью

### 3. Классификация защит

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



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



# 3. Токовые защиты линии

Основным признаком возникновения к.з. и перегрузки является увеличение тока в линии. Этот признак используется для выполнения защит, называемых **токовыми**.

Для защиты линий от к.з. широкое распространение получили защиты, реагирующие на увеличение тока в фазах линии сверх определённого значения. Такие защиты получили название токовые защиты.

Токовые защиты подразделяются на **максимальные токовые защиты** и **токовые отсечки**.

В качестве реле, реагирующих на возрастание тока, используются максимальные токовые реле.

Главное их отличие в способе обеспечения селективности.

Селективность действия максимальных токовых защит достигается с помощью выдержки времени.

Селективность действия токовых отсечек обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.



# 3.1. Максимальная токовая защита линий

## Принцип действия

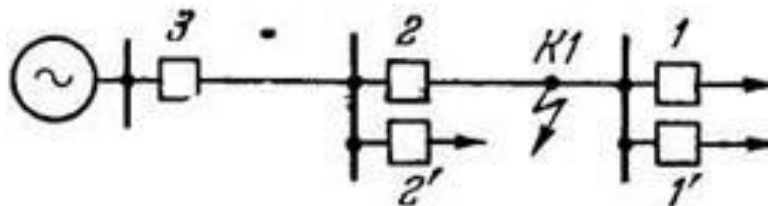
Максимальные токовые защиты являются основным видом защит для сетей с односторонним питанием и устанавливаются в начале каждой линии со стороны источника питания.

При таком расположении защит каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней или на шинах питающиеся от неё подстанции.

**Селективность МТЗ** обеспечивается соответствующим выбором *тока и времени срабатывания*.

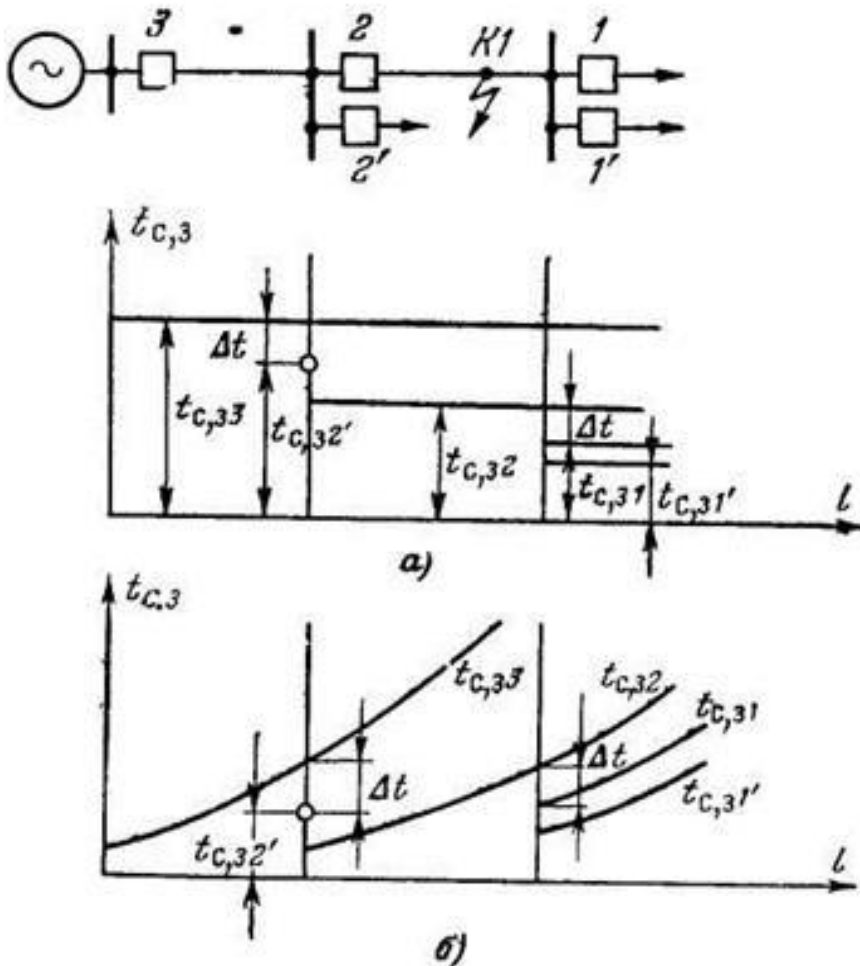
Защита наиболее удалённая от источника питания имеет наименьший ток срабатывания и наименьшую выдержку времени.

Защита каждой последующей линии имеет большую выдержку времени чем выдержка времени предыдущей защиты.



# 3.1. Максимальная токовая защита линий

## Принцип действия



Время срабатывания (выдержка времени) **МТЗ** в общем случае выбирается на ступень селективности ( $\Delta t$ ) больше наибольшей выдержки времени предыдущей защиты:

$$t_{c.з.2} = t_{c.з.1} + \Delta t ; t_{c.з.3} = t_{c.з.2} + \Delta t$$

Обычно в расчетах ступень селективности принимается равной **0,5с**.

Рассмотренный принцип выбора выдержек времени срабатывания для МТЗ с независимой выдержкой времени называется **ступенчатым**.

**МТЗ** в зависимости от типа используемых реле может иметь **независимую от величины тока** характеристику **выдержки времени** (а) или **зависимую от тока** характеристику **выдержки времени** (б). Наличие зависимой от тока выдержки времени принципиально позволяет ускорить отключение больших токов к.з.

**МТЗ** с независимой выдержкой времени реализуются на реле тока типа **РТ-40** и реле времени, а с зависимой выдержкой времени – на комбинированных реле тока и времени **РТ-80**.

# 3.1. Максимальная токовая защита линий

## Ток срабатывания защиты

Минимальный ток, при котором защита срабатывает называется **током срабатывания максимальной токовой защиты**.

Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие условия:

1. Ток срабатывания защиты должен быть больше максимального рабочего тока нагрузки:

**Ток срабатывания МТЗ выбирается большим максимального рабочего тока защищаемой линии (максимального тока нагрузки) с учетом необходимости возврата защиты после отключения к.з. защитой предыдущего участка сети.**

$I_{с.з.} > I_{раб.макс}$ , где  $I_{с.з.}$  – ток срабатывания,  $I_{раб.макс}$  – максимальный рабочий ток нагрузки

2. После отключения внешнего к.з. пусковые органы защиты должны вернуться в исходное состояние:

$$I_{с.з.} > \frac{I_{раб.макс}}{K_B} \qquad K_B = \frac{I_{воз.}}{I_{ср.}}$$

где  $K_B$  – коэффициент возврата токовых реле.

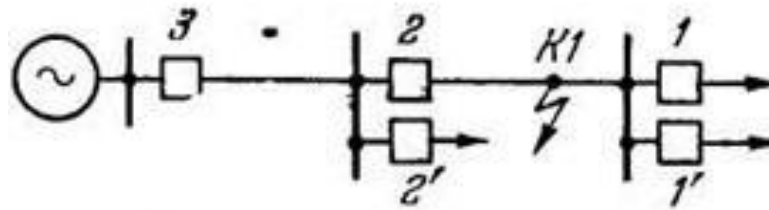
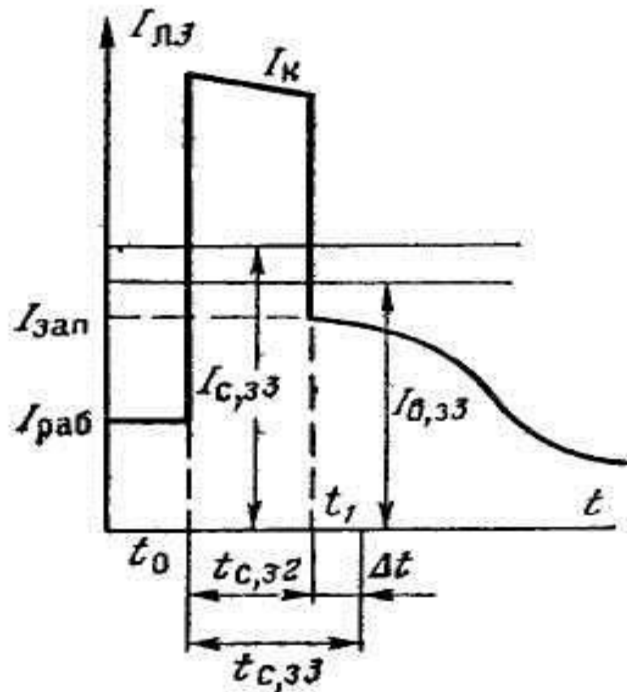
3. При выборе тока срабатывания необходимо учесть увеличение тока при пуске двигателей:

$I_{с.з.} > \frac{K_{с.зап}}{K_B} I_{с.зап}$ , где  $I_{с.зап}$  – коэффициент самозапуска, равный отношению пускового тока двигателя к его номинальному значению. Обычно в пределах 1,2-4.

# 3.1. Максимальная токовая защита линий

## Ток срабатывания защиты

Выбор тока срабатывания МТЗ по условию возврата реле после отключения к.з.



## 3.1. Максимальная токовая защита линий

### Ток срабатывания защиты

Окончательное выражение для расчёта тока срабатывания **МТЗ** запишется в следующем виде:

$$I_{с.р.} = \frac{K_n K_{с.зап.}}{K_B} I_{раб.макс}$$
, где  $K_n$  – коэффициент надёжности.

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

где  $n_{ТТ}$  – коэффициент трансформации ТТ,  $K_{сх}$  – коэффициент схемы. 
$$I_{с.р.} = \frac{K_n K_{с.зап.} \cdot K_{сх}}{K_B \cdot n_{ТТ}} \cdot I_{раб.макс}$$

**Чувствительность МТЗ** оценивается коэффициентом чувствительности  $K_{\chi}$ , равным отношению тока к.з. в минимальном режиме к току срабатывания защиты:

где  $I_{к.з.мин.}$  – минимальное значение тока 
$$K_{\chi} = \frac{I_{к.з.мин.}^{(2)}}{I_{с.з.}}$$

Чувствительность проверяется для двух режимов работы защиты – основного и режима резервирования.

**Если МТЗ является основной защитой**, то её чувствительность проверяется по к.з. в конце защищаемой линии. Значение  $K_{\chi}$  в этом случае:

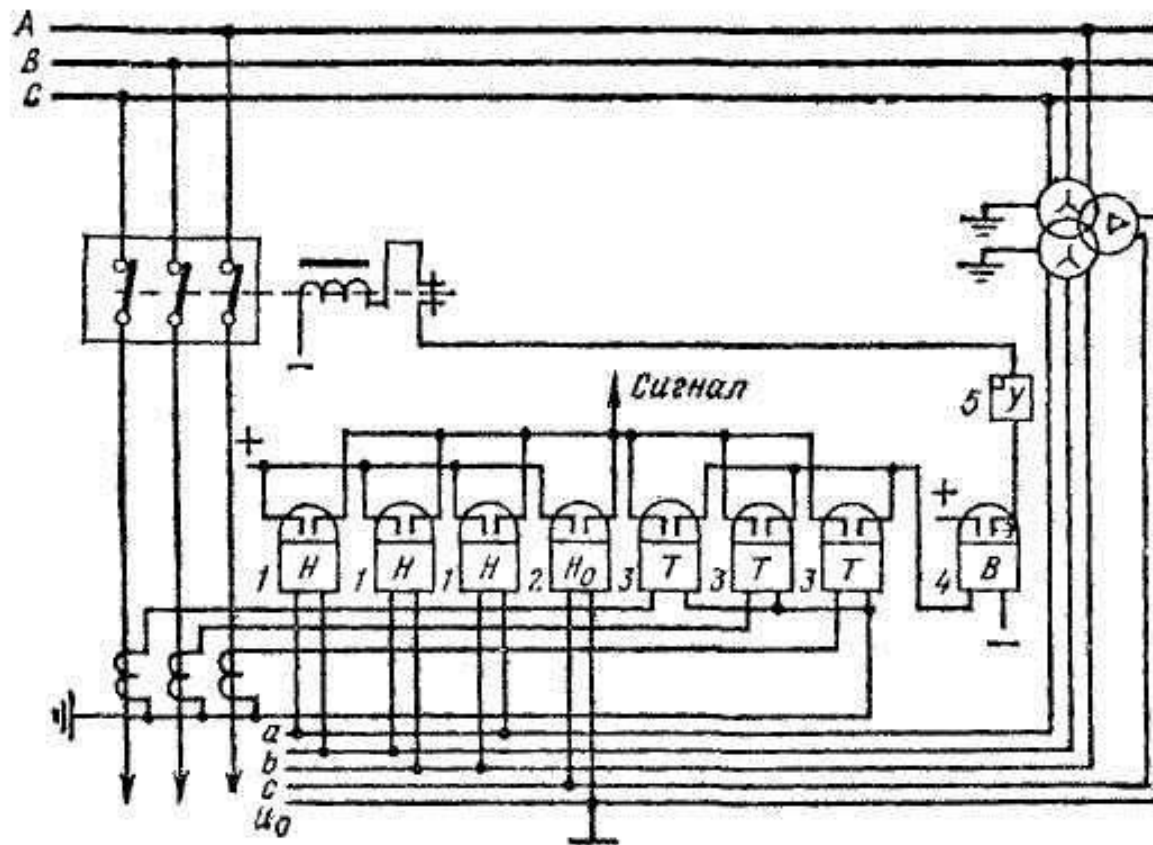
$$K_{\chi} \geq 1,5$$

**Если МТЗ работает в качестве резервной защиты**, то чувствительность проверяется по к.з. в конце резервируемой линии:

$$K_{\chi} \geq 1,2$$

## 3.2. Максимальная токовая защита линий с пуском (блокировкой) по напряжению

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты применяются схемы с пуском (с блокировкой) от реле минимального напряжения. Такая защита называется *максимальной токовой защитой с пуском (блокировкой) по напряжению*.



## 3.2. Максимальная токовая защита линий с пуском (блокировкой) по напряжению

**Ток срабатывания МТЗ с пуском по напряжению** отстраивается не от максимального тока нагрузки линии, а от тока нормальной нагрузки  $I_{н. норм}$ , который обычно в 1,5÷2,0 раза меньше  $I_{н. макс}$ .

$I_{с.з.} = K_n I_{н.норм}$  В результате этого чувствительность защиты при к.з. резко повышается.

**Напряжение срабатывания защиты** выбирается исходя из следующих условий:

□ реле напряжения не должны срабатывать (замкнуть контакты) при минимальном значении рабочего напряжения:

$$U_{с.з.} < U_{раб.мин.}$$

□ реле напряжения должны возвращаться (разомкнуть контакты) после отключения к.з. и восстановления напряжения до уровня минимального рабочего:

$$U_{воз.} < U_{раб.мин.} \quad U_{воз.} = \frac{1}{K_n} U_{раб.мин.} \quad K_B = \frac{U_{воз.}}{U_{с.з.}}$$

Учитывая коэффициент возврата  $K_B$ , окончательная формула для расчёта напряжения срабатывания **МТЗ** с пуском по напряжению:

$$U_{с.з.} = \frac{U_{раб.мин.}}{K_n K_B} \quad \text{Напряжение } U_{раб.мин.} \text{ обычно принимается на } \mathbf{5-10\%} \text{ ниже нормального значения.}$$

## 3.2. Максимальная токовая защита линий с пуском (блокировкой) по напряжению

**Чувствительность** проверяется по максимальному значению напряжения при к.з. в конце зоны действия защиты, при этом коэффициент чувствительности:

$$K_{\text{ч.}} = \frac{U_{\text{с.з.}}}{U_{\text{к.макс}}} \geq 1,5$$

*Максимальная защита с блокировкой минимального напряжения не действует при перегрузках, не сопровождающихся понижением напряжения, и имеет повышенную чувствительность к току к.з. по сравнению с простой максимальной защитой.*

Применяется на линиях с большой аварийной нагрузкой.

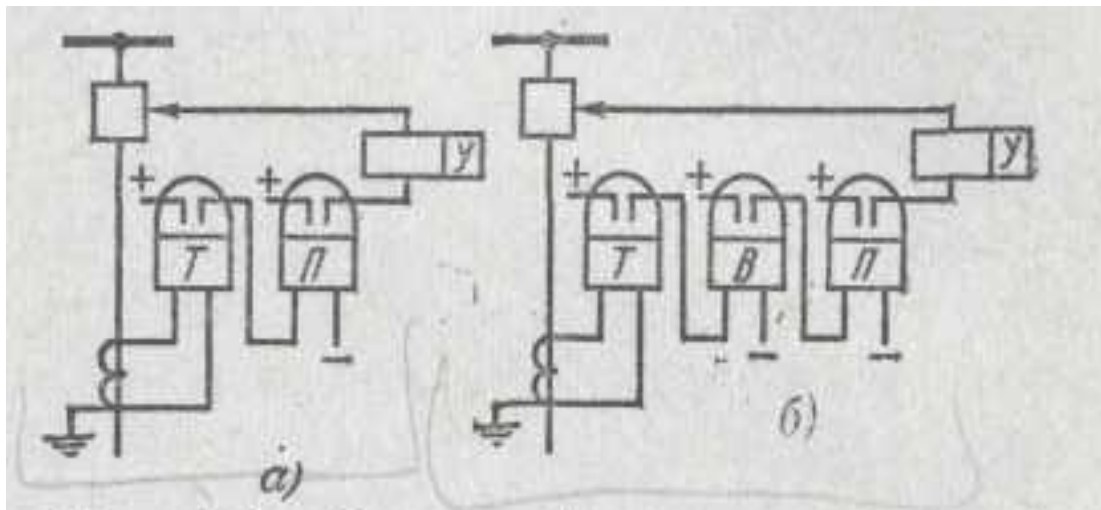


### 3.3. Токовые отсечки

**Отсечка** является разновидностью токовой защиты, позволяющей обеспечить быстрое отключение к. з. Токовые отсечки подразделяются на отсечки мгновенного действия и отсечки с выдержкой времени.

**Селективность** действия токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы так, чтобы отсечка не действовала при к. з. на смежных участках сети, защита которых имеет выдержку времени, равную или больше, чем отсечка.

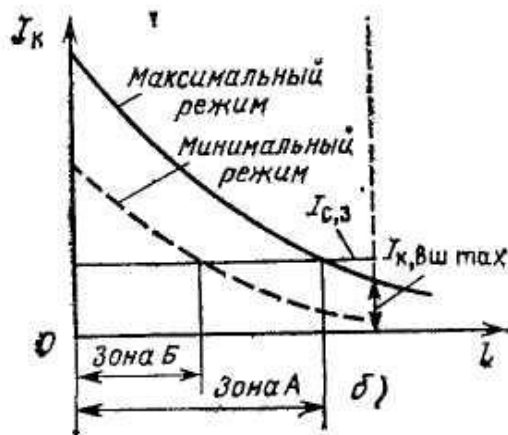
Принципиальные схемы отсечек мгновенных (без выдержки времени) и с выдержкой времени на постоянном оперативном токе изображены на рисунке:



а – ТО мгновенного действия;  
б – ТО с выдержкой времени

### 3.3. Токотые отсечки

*Токотая отсечка является быстродействующей токотой защитой, селективность действия которой обеспечивается соответствующим выбором тока ее срабатывания.*



Токотая отсечка не должна срабатывать при к.з. на смежном участке сети, поэтому её ток срабатывания отстраивается от максимального тока внешнего для данной линии к.з. (т.е. от максимального тока к.з. в конце защищаемой линии):

$$I_{с.з.} = K_n I_{к.вн.макс}$$

Кривая  $I_k=f(L)$  показывает изменения тока 3-х фазного к.з. в зависимости от расстояния до точки к.з. Кривая построена на основании выражения:

$$I_k^{(3)} = \frac{E_\phi}{X_c + X_{уд} L_k}$$

**Зона действия отсечки охватывает только часть линии** и меняется в зависимости от режима работы системы (зона **А** – при максимальном, зона **Б** – при минимальных режимах системы).

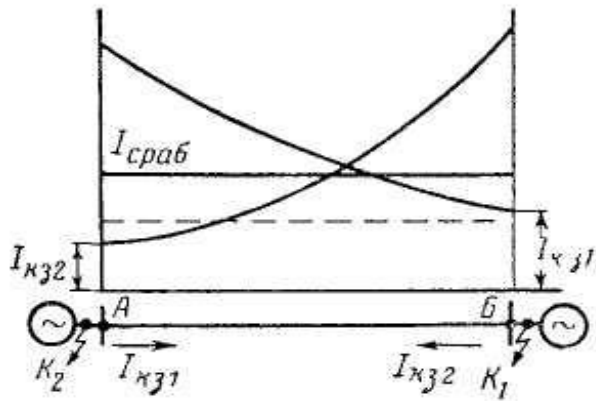
Зона действия отсечки определяется графически.

Зону **ТО** можно также определить по формуле:

$$X_{отс} = \frac{100}{X_l} \left( \frac{E_\phi}{I_{с.з.}} - X_c \right)$$

### 3.3. Токковые отсечки

**Токковая отсечка является быстродействующей защитой** и время её срабатывания  $t_{с.з.}$  определяется небольшой задержкой вызванной срабатыванием токовых и промежуточных реле, а также исполнительного органа защиты и составляет обычно не более **0,1 с.**



Для линий с 2-х сторонним питанием токи срабатывания отсечек по концам линии выбираются одинаковыми и равными.

$$I_{с.з.1} = I_{с.з.2} = K_H I_{н.вн.макс}$$

Существует зона при к.з. в которой будут срабатывать обе токовые отсечки по концам защищаемой линии. При к.з. вне этой зоны будет срабатывать только одна из отсечек.

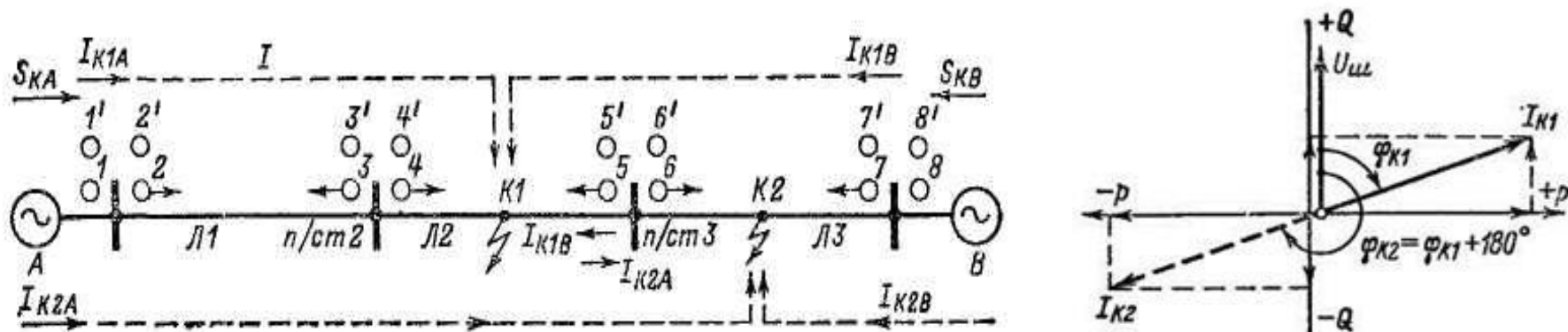
Время действия мгновенной отсечки складывается из времени срабатывания токовых и промежуточного реле.

**Достоинством ТО является быстрое отключение к.з., возникающих вблизи источника питания, т.е. повреждений сопровождающихся большими токами к.з.**

**Недостатком токовой отсечки является то, что она защищает только часть линии и не может быть использована в качестве основной защиты.**

## 3.4. Токовые направленные защиты линий

В сетях с 2-х сторонним питанием направление тока и мощности к.з. зависит от места возникновения к.з. и может иметь два противоположных направления.



*Определяя направление мощности к.з., проходящей по линии, можно выявить, где возникло к.з. – на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.*

*Направленной называется защита, действующая только при определённом направлении (знаке) мощности к.з.*

Направленные защиты для обеспечения селективности в сетях с 2-х сторонним питанием должны устанавливаться с обеих сторон каждой линии и действовать при направлении мощности от шин в линию, а выдержки времени защит, работающих при одном направлении мощности, должны согласовываться между собой по ступенчатому принципу, нарастая по направлению к источнику питания, от тока которого они действуют.

## 3.4. Токовые направленные защиты линий. Максимальная токовая направленная защита

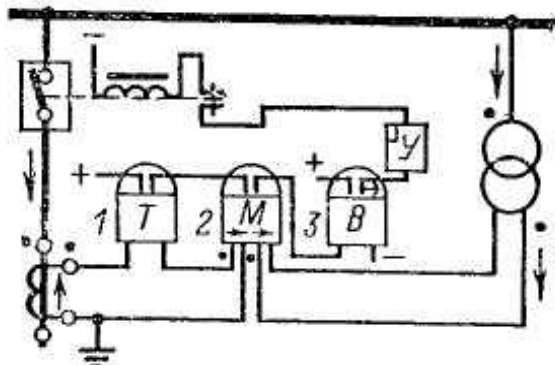
Защита, реагирующая на значение тока и направление (знак) мощности к.з., называется **максимальной токовой направленной защитой**.

Защита должна приходиться в действие при соблюдении 2-х условий:

- ток превышает заданное значение (уставку тока срабатывания)
- знак мощности к.з. соответствует к.з. в защищаемом направлении

Орган, определяющий знак мощности к.з. называется **органом направления мощности**.

Кроме измерительного органа (реле тока), органа направления мощности (реле направления мощности), защита имеет орган выдержки времени (реле времени).



Упрощенная схема  
максимальной токовой  
направленной защиты

Реле направления мощности в схемах максимальных токовых направленных защит могут подключаться к токовым цепям и цепям напряжения по различным схемам, так как мощность, подводимая к реле  $S_p$  может иметь недостаточную для срабатывания реле величину (при близких к.з. за счёт снижения напряжения  $U_p$  или при неблагоприятных значениях угла  $\phi_p$  когда  $\sin$  равен или близок к нулю).

$$S_p = U_p \cdot I_p \sin (\alpha - \phi_p)$$

## 3.4. Токовые направленные защиты линий. Максимальная токовая направленная защита

Наибольшее применение нашли **90-градусные** и **30-градусные** схемы подключения реле направления мощности.

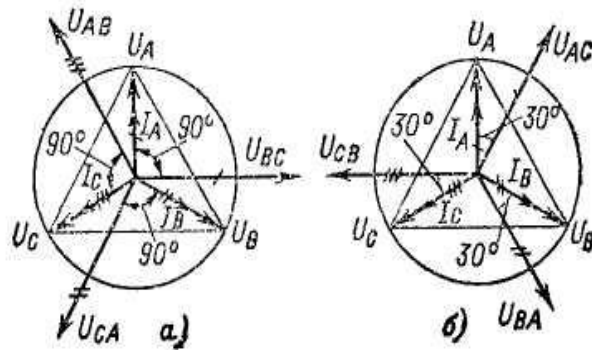
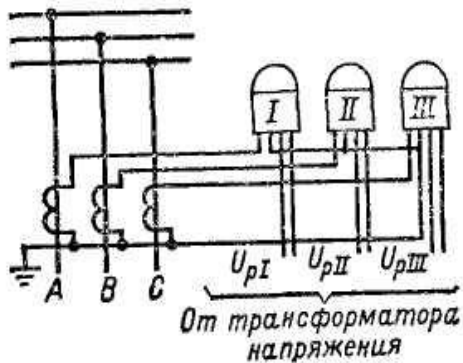


Схема включения реле направления мощности и векторные диаграммы токов и напряжений, подводимых к реле:  
а) при 90-градусной схеме;  
б) при 30-градусной схеме.

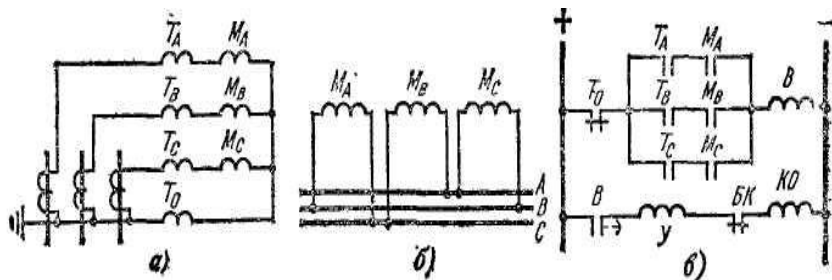
## 3.4. Токовые направленные защиты линий. Максимальная токовая направленная защита

Реле направления мощности включенные на ток неповреждённых фаз может действовать неправильно, поэтому в схемах направленных токовых защит применяют *пофазный пуск*, принцип действия которого заключается в том, что пусковые реле разрешают замыкать цепь на отключение только реле мощности включённым на токи повреждённых фаз.

*Защита дополняется устройством, контролирующим исправность цепей напряжения, т.к. при нарушениях в цепях напряжения питающих реле направления мощности защита может подействовать неправильно.*

Для *отключения однофазных к.з.* обычно применяются отдельные защиты, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности. Поэтому максимальная токовая направленная защита часто используется только в качестве защиты от междуфазных к.з., а при замыканиях на землю защита блокируется с помощью специального токового реле, включаемого в нулевой провод трансформаторов тока соединенных в звезду на ток нулевой последовательности.

Развёрнутая схема максимальной токовой направленной защиты с блокировкой при замыкании на землю



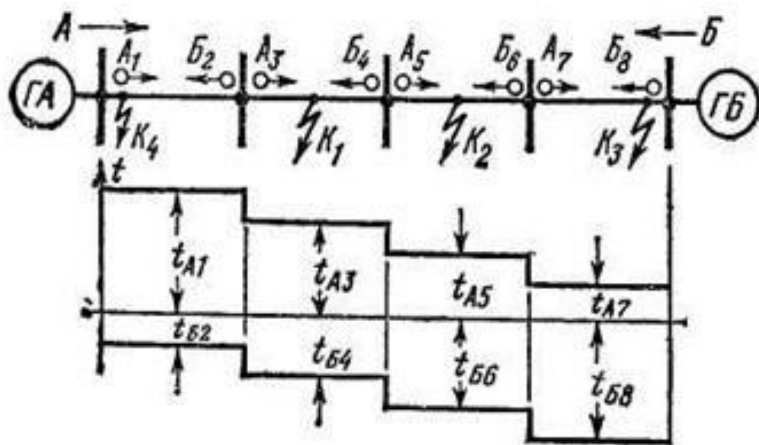
- а) цепи тока
- б) цепи напряжения
- в) цепи постоянного тока



## 3.4. Токовые направленные защиты линий. Максимальная токовая направленная защита

**Ток срабатывания** токовых направленных защит выбирается аналогично току срабатывания обычных *МТЗ* по условиям отстройки от максимальных нагрузочных режимов. При этом **отстройка производится от токов, направленных от шин в линию.**

**Выбор выдержек времени** токовых направленных защит производится по встречно-ступенчатому принципу. При этом защиты разделяются на две группы с учётом направленности их действия, т.е. производится согласование по времени защит, действующих в одном направлении.



$$t_{A7} < t_{A5} < t_{A3} < t_{A1}$$

$$t_{B2} < t_{B4} < t_{B6} < t_{B8}$$

**Чувствительность** токовых пусковых органов максимальной токовой направленной защиты оценивается по току 2-х фазного к.з. в конце защищаемой линии и в конце резервируемых участков.



## 3.5. Токовые направленные защиты линий. Токовые направленные отсечки

Реле направления мощности в схемах направленных отсечек не позволяет им действовать при мощности к.з. направленной к шинам. Следовательно, ***отстройка тока срабатывания направленной отсечки должна вестись только от токов к.з. направленных от шин в линию.*** В этом заключается принципиальное отличие токовой направленной отсечки от ненаправленной.

Направленные отсечки применяются в сетях с 2-х сторонним питанием. В этом случае  $I_{с.з.}$  у направленной отсечки меньше, а зона её действия значительно больше, чем у ненаправленной отсечки.

***Схема мгновенной направленной отсечки отличается от схемы направленной максимальной токовой защиты только отсутствием реле времени.***

Направленные **ТО** могут выполняться мгновенными или с выдержкой времени. Ток срабатывания её выбирается аналогично простой **ТО** с тем отличием, что направленную токовую отсечку не требуется отстраивать от к.з. за шинами данной подстанции (от к.з. «за спиной»), т.к. в этом случае мощность к.з. направлена к шинам и защита блокируется реле направления мощности. Кроме того, ***направленные отсечки необходимо отстраивать от токов при качаниях или снабжать специальной блокировкой от качаний.***

***Сочетание токовых направленных отсечек (мгновенных и с выдержками времени) и максимальных токовых направленных защит позволяет получить токовые направленные защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени.***

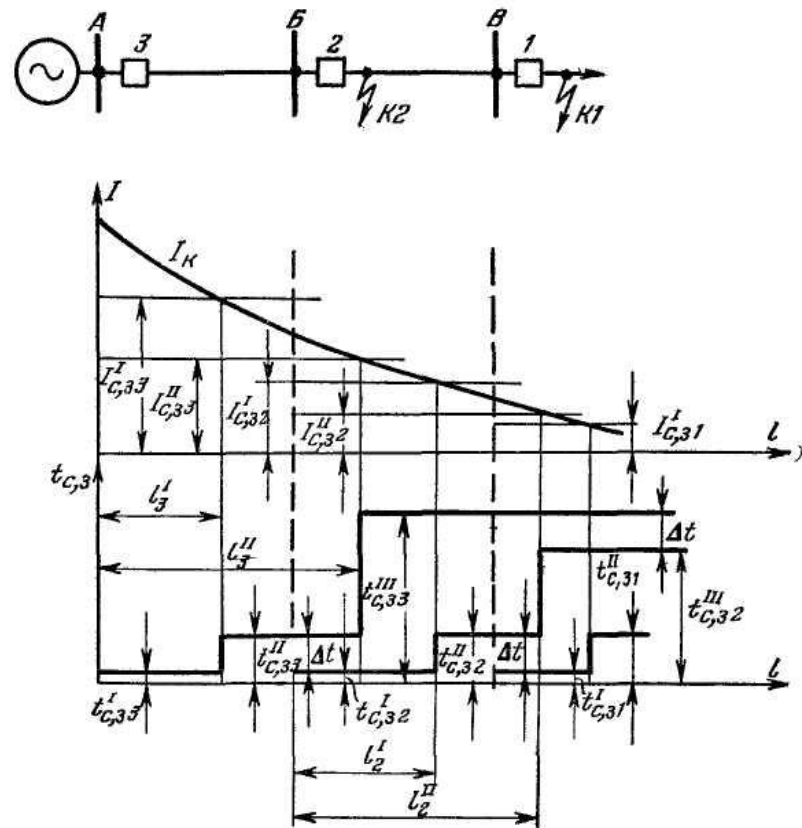
## 3.6. Токовая защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени

Сочетанием ***ТО*** и ***МТЗ*** можно обеспечить надёжную защиту линии на всём её протяжении. Такая защита называется ***токовой защитой со ступенчатой характеристикой выдержки времени***.

Токовая защита со ступенчатой выдержкой времени срабатывания может выполняться 2-х или 3-х ступенчатой. В 2-х ступенчатой защите в качестве первой ступени используется ***ТО***, а в качестве второй – ***МТЗ***. В 3-х ступенчатой защите первая ступень представляет собой мгновенную ***ТО***, вторая ступень – ***ТО*** с выдержкой времени, а третья – ***МТЗ***.

Первая ступень защиты обеспечивает отключение к.з. сопровождающихся большими токами к.з. в начале линии. Вторая ступень предназначена для отключения поврежденной линии при возникновении к.з. вне зоны первой ступени, а третья ступень выполняет функции дальнего резервирования.

### 3.6. Токовая защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени



На рисунке изображена сеть с односторонним питанием, защиты которой осуществляются 3-х ступенчатыми токовыми защитами (участки А-Б и Б-В).

Токи срабатывания первых ступеней защиты (мгновенных ТО) отстраиваются от токов максимального к.з. на шинах противоположных подстанций:

$$I_{C,3,2}^I = K_H I_{K1}^{(3)} \quad I_{C,3,3}^I = K_H I_{K2}^{(3)}$$

Время срабатывания определяется временем действия исполнительного органа защиты – промежуточных реле:

$$t_{C,3,2}^I = t_{C,3,3}^I \leq 0,1c$$

Токи и времена срабатывания вторых ступеней защит (ТО с выдержкой времени) отстраиваются от токов и времени срабатывания первых ступеней защит предыдущего участка сети:

$$I_{C,3,2}^{II} = K_H I_{C,3,1}^I \quad I_{C,3,3}^{II} = K_H I_{C,3,2}^I \quad t_{C,3,2}^{II} = t_{C,3,1}^I + \Delta t = t_{C,3,3}^{II} = t_{C,3,2}^I + \Delta t \approx 0,6c$$

Параметры срабатывания третьих ступеней защит (МТЗ) определяется как у обычной максимальной токовой защиты.

## 3.6. Токовая защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени

**Чувствительность вторых ступеней** защит определяется минимальным током к.з. в конце защищаемой линии и считается приемлемой, если  $K_{\text{ч}} \geq 1,3 \div 1,5$ .

Очевидно, что при к.з. на линии будет действовать первая (при к.з. в начале линии) или вторая (при к.з. в конце линии) ступень защиты, а третья ступень будет выполнять функции резервной защиты при повреждениях на соседних (следующих) участках сети.

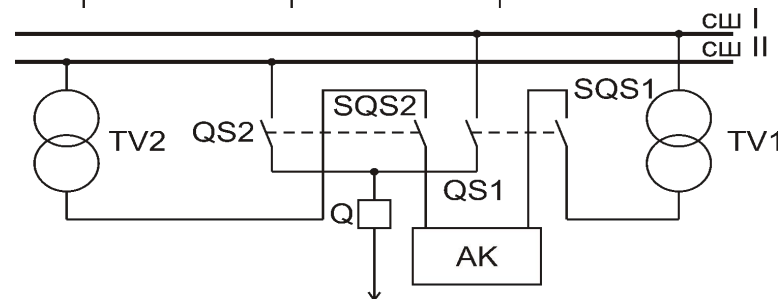
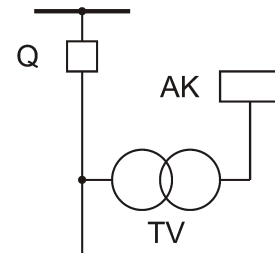
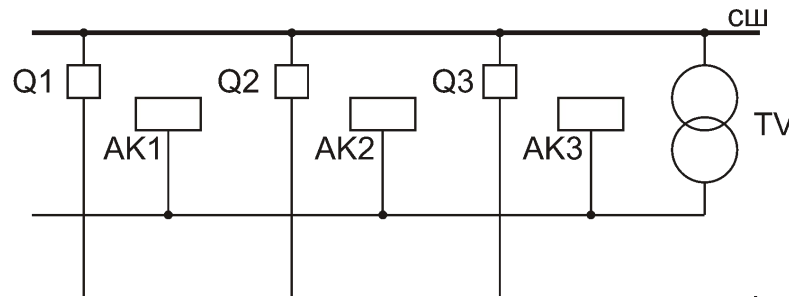
- 1.Токовые защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени, представляющие собой сочетание токовых отсечек и максимальной токовой защиты обеспечивают быстрое отключение к.з. на защищаемой линии.**
- 2.Токовые ступенчатые защиты нашли широкое применение для защиты от междуфазных к.з. в радиальных высоковольтных сетях напряжением до 35 кВ с односторонним питанием.**
- 3.По принципу действия ступенчатые токовые защиты не обеспечивают требование селективности в кольцевых сетях и сетях с несколькими источниками питания.**

# 4. Трансформаторы напряжения

## Основные сведения. Принцип действия

Трансформатор напряжения (ТН) по принципу действия и конструктивному выполнению аналогичен обычному силовому трансформатору и состоит из: стального сердечника (магнитопровода), собранного из тонких пластин трансформаторной стали, и 2<sup>x</sup> обмоток – первичной и вторичной, изолированных друг от друга и от сердечника.

Для питания защит ТН могут устанавливаться на шинах электростанций и подстанций и питать защиты всех присоединений или устанавливаться на каждом присоединении



SQS - вспомогательный контакт разъединителя

# 4. Трансформаторы напряжения

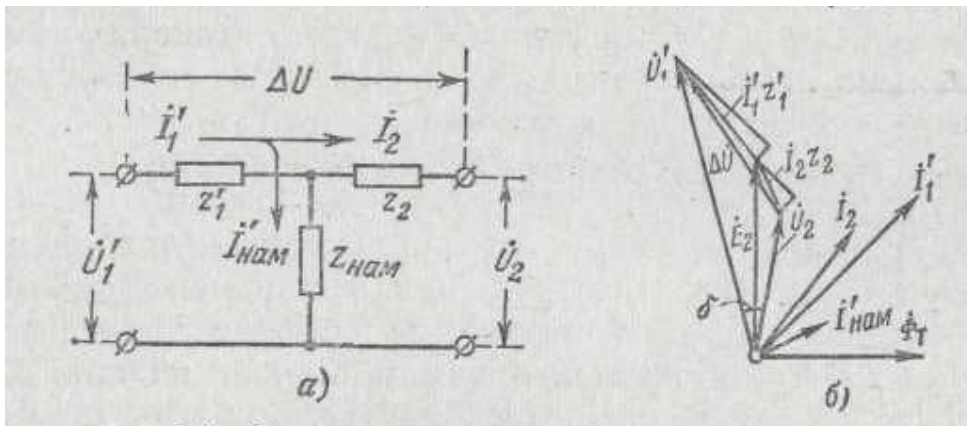
## Погрешности ТН

Напряжение  $U_{2xx}$ , меньше первичного напряжения  $U_1$  во столько раз, во сколько раз число витков вторичной обмотки  $W_2$  меньше числа витков первичной обмотки  $W_1$ : 
$$\frac{U_1}{U_{2xx}} = \frac{W_1}{W_2}$$

Отношения чисел витков обмоток называется коэффициентом трансформации и обозначается  $n_H$ :

$$n_H = \frac{W_1}{W_2}$$

Следовательно, можно записать: 
$$\frac{U_1}{U_{2xx}} = \frac{W_1}{W_2} = n_H$$



$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{n_H} - \Delta \dot{U},$$

Из этой же схемы следует, что

$$\Delta \dot{U} = I'_{нам} z'_1 + I_2 (z'_1 + z_2).$$

Для уменьшения погрешности трансформатора напряжения необходимо уменьшать сопротивление обмоток  $z_1$  и  $z_2$ , ток намагничивания  $I'_{нам}$  и ток нагрузки, т. е. вторичный ток  $I_2$ .

Погрешность по величине вторичного напряжения принято оценивать в процентах:

$$\Delta U \% = \frac{U_2 - \frac{U_1}{n_H}}{U_1/n_H} 100, \quad (6-3)$$

# 4. Трансформаторы напряжения

## Схемы соединений ТН

### Схема соединения ТН в звезду

Схема предназначена для получения напряжения фаз относительно земли и междуфазных (линейных) напряжений. Три первичные обмотки трансформатора напряжения *ТН1* соединяются в звезду. Начала каждой обмотки (выводы *A, B, C*) присоединяются к соответствующей фазе линии, а концы *X, Y, Z* объединяются в общую точку (нейтраль *H<sub>1</sub>*) и заземляются.

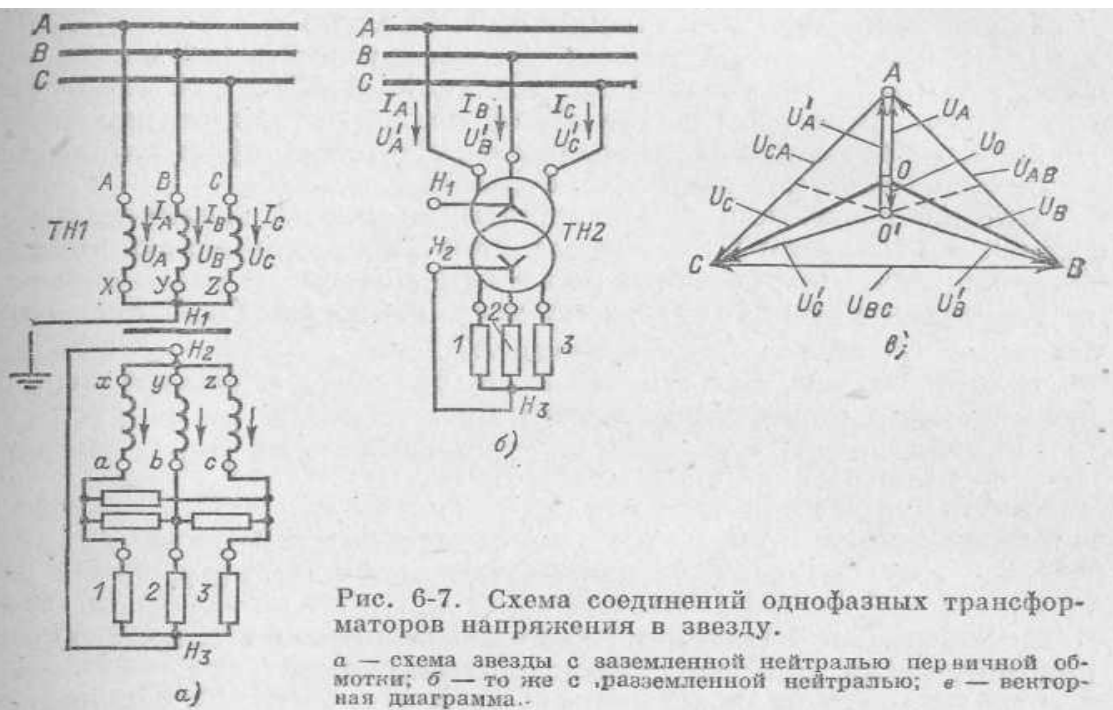


Рис. 6-7. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в звезду.

*a* — схема звезды с заземленной нейтралью первичной обмотки; *б* — то же с разземленной нейтралью; *в* — векторная диаграмма.

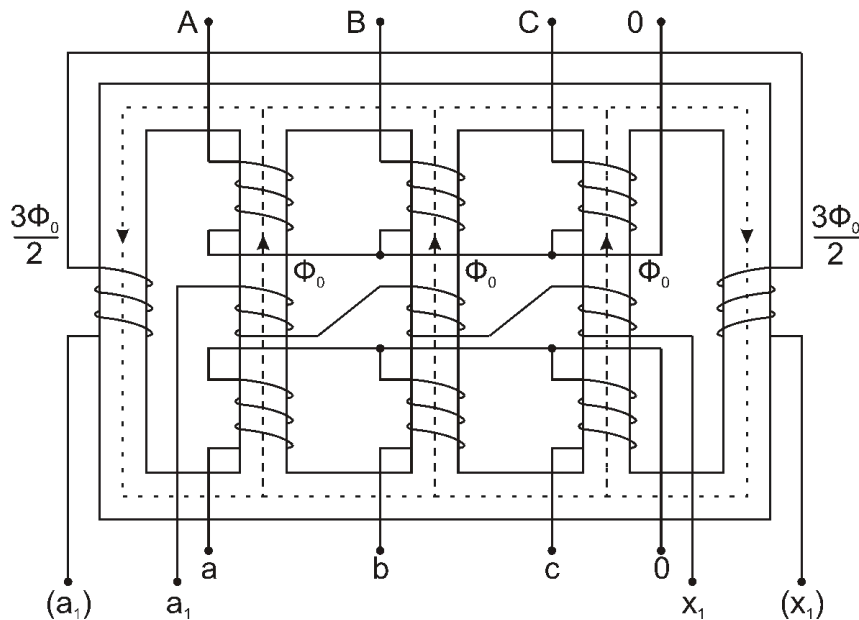
$$\dot{U}_A = \dot{U}'_A + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_B = \dot{U}'_B + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_C = \dot{U}'_C + \dot{U}_0.$$

Сумма

$$\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 3\dot{U}_0, \quad \text{а} \quad \dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0.$$

## 4. Трансформаторы напряжения

### Схемы соединений ТН



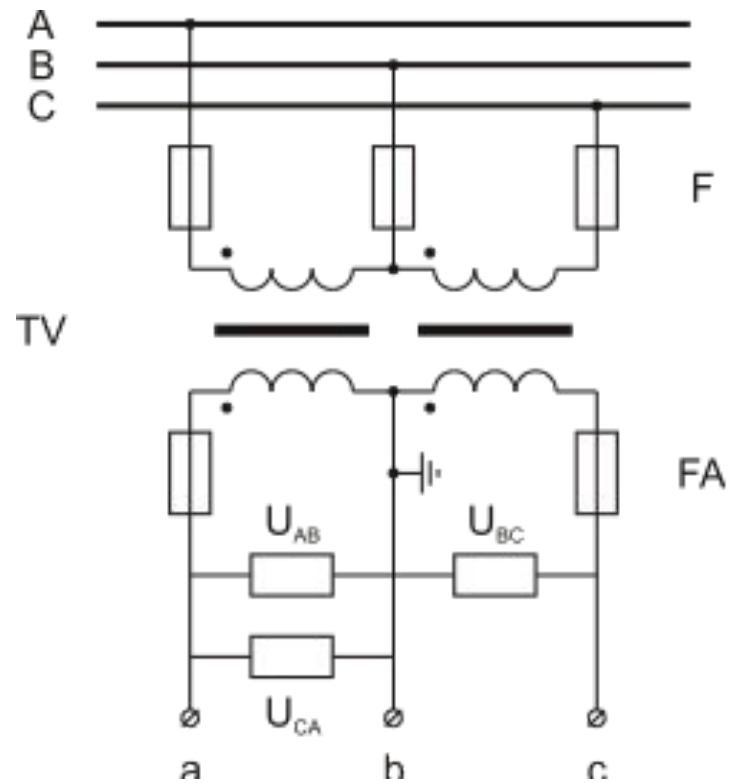
Трехфазные трехстержневые ТН не применяются, так как в их магнитопроводе нет пути для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности  $\Phi_0$ , создаваемых током  $I_0$  в первичных обмотках при замыкании на землю в сети. Поток  $\Phi_0$  замыкается через воздух, это резко увеличивает  $I_{\text{НАМ}}$ , вызывая недопустимый нагрев трансформатора.

Возможна дополнительная обмотка на основных или дополнительных стержнях для получения напряжения нулевой последовательности.



## 4. Трансформаторы напряжения Схемы соединений ТН

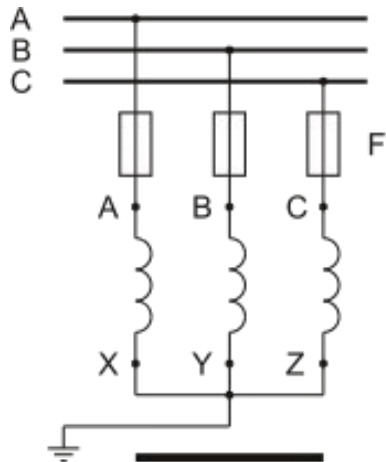
Схема соединения обмоток ТН в открытый треугольник



# 4. Трансформаторы напряжения

## Схемы соединений ТН

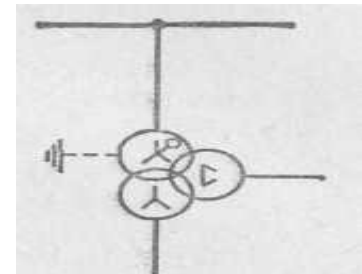
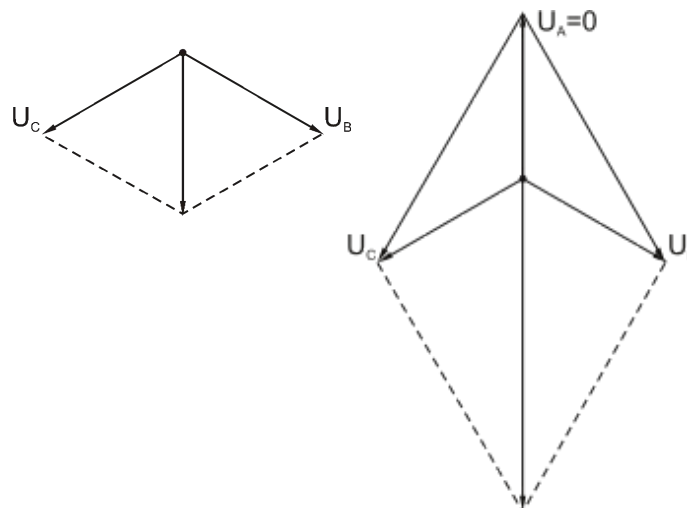
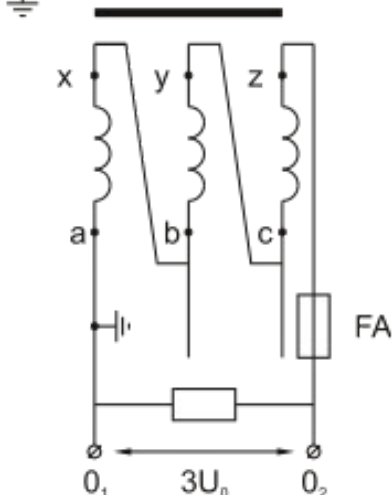
Схема соединения обмоток однофазных ТН в фильтр напряжения нулевой последовательности



Напряжение на зажимах разомкнутого треугольника равно геометрической сумме напряжений вторичных обмоток:

$$U_p = \vec{U}_a + \vec{U}_b + \vec{U}_c = \frac{\vec{U}_A}{n_H} + \frac{\vec{U}_B}{n_H} + \frac{\vec{U}_C}{n_H}$$

$$U_p = \frac{\vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C}{n_H} = \frac{3U_0}{n_H}$$



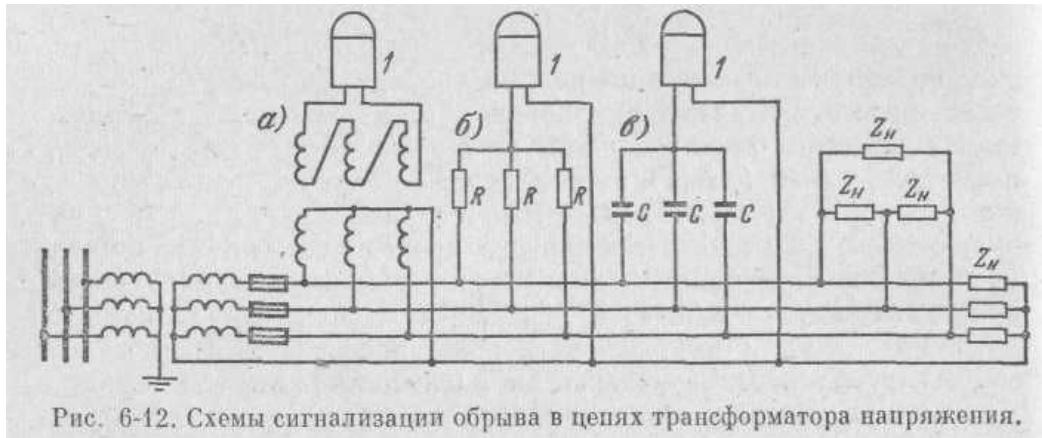
# 4. Трансформаторы напряжения

## Повреждения в цепях трансформаторов напряжения и контроль за их исправностью

### Повреждения в цепях ТН

Во вторичных цепях трансформатора напряжения могут возникать повреждения (к. з. и обрывы). Короткие замыкания вызывают опасное увеличение тока в трансформаторе, и поэтому для его защиты устанавливаются предохранители или автоматы, прерывающие цепь при появлении повышенных токов. Повреждения вторичных цепей, а также их нарушение при перегорании предохранителей или действии автоматов искажают величину и фазу 'коричного напряжения, что приводит к неправильной работе защиты.

**Блокирующие устройства, реагирующие на появление  $U_0$  и  $I_0$  при повреждениях в цепях напряжения**



# 4. Трансформаторы напряжения

## Повреждения в цепях трансформаторов напряжения и контроль за их исправностью

### Контроль цепей разомкнутого треугольника ТН



Рис. 6-14. Периодический контроль исправности цепи обмотки, соединенной в фильтр напряжения нулевой последовательности.

### Блокирующее устройство на сравнении напряжений двух вторичных обмоток ТН Схема с семиобмоточным трансформатором

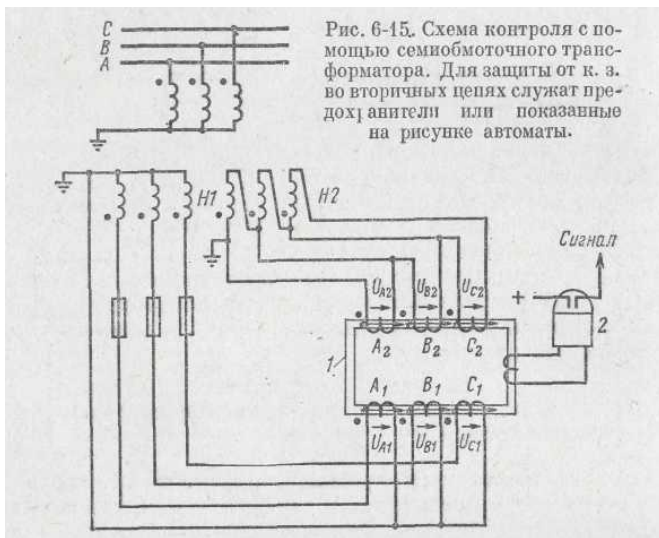


Рис. 6-15. Схема контроля с помощью семиобмоточного трансформатора. Для защиты от к. з. во вторичных цепях служат предохранители или показанные на рисунке автоматы.

$$w_{A_1} = w_{A_2} = w; \quad w_{B_1} = w_{B_2} = \frac{2}{3} w; \quad w_{C_1} = w_{C_2} = \frac{1}{3} w.$$

$$(t_a + t_0) < t_3, \tag{6-5}$$

где  $t_a$ ,  $t_0$  и  $t_3$  — время срабатывания автомата, блокировки и защиты соответственно.

## 4. Трансформаторы напряжения

Повреждения в цепях трансформаторов напряжения и контроль за их исправностью

Блокирующее устройство на сравнении напряжений двух вторичных обмоток ТН  
Схема с тремя однофазными трансформаторами

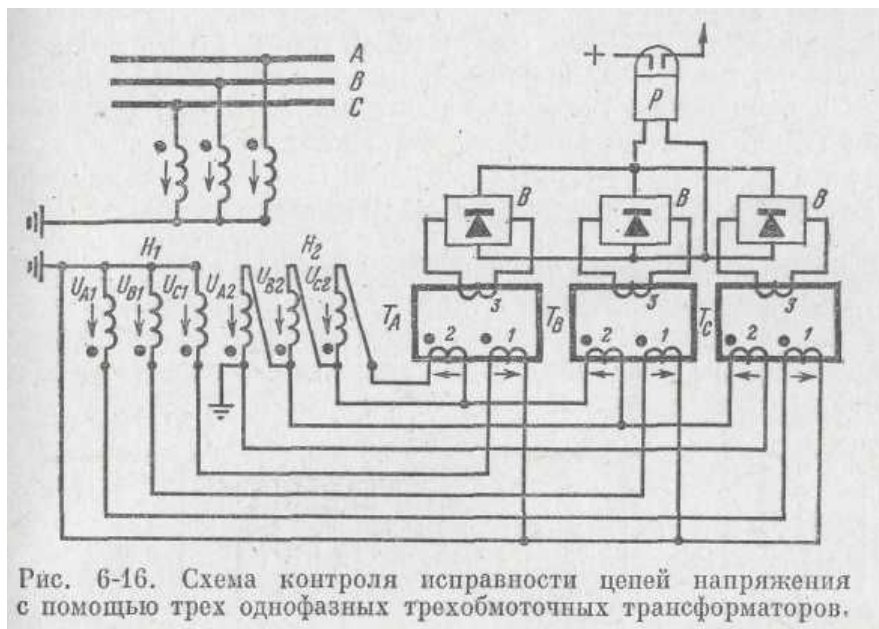


Рис. 6-16. Схема контроля исправности цепей напряжения с помощью трех однофазных трехобмоточных трансформаторов.

# 5. Фильтр обратной последовательности

Фильтр напряжения обратной последовательности является устройством, при помощи которого можно получить напряжение  $U_{mn}$ , пропорциональное составляющей обратной последовательности, содержащейся в напряжении сети

$$\dot{U}_{mn} = k \dot{U}_{2\text{сети}}$$

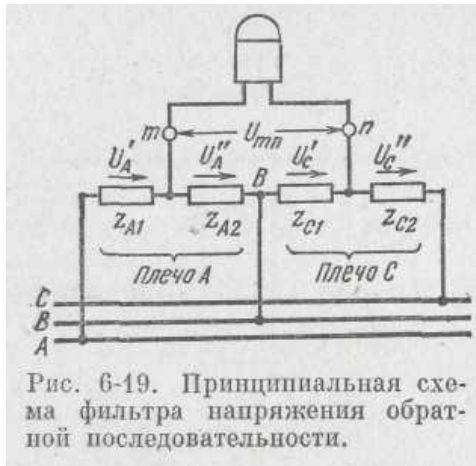


Рис. 6-19. Принципиальная схема фильтра напряжения обратной последовательности.

$$U_{mn1} = 0.$$

$$\dot{U}'_A = -\dot{U}'_C.$$

Векторы падения напряжения в активном и емкостном сопротивлении каждого плеча сдвинуты на  $90^\circ$  и равны в сумме напряжению, питающему данное плечо, т. е.

$$\dot{U}_{Ar} + \dot{U}_{Ax} = \dot{U}_{AB} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{Cr} + \dot{U}_{Cx} = \dot{U}_{BC}.$$

$$\frac{U_{Ar1}}{U_{Ax1}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}} = \sqrt{3} \quad \text{и} \quad \frac{U_{Cx1}}{U_{Cr1}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}} = \sqrt{3}.$$

$$r_A = \sqrt{3} x_A \quad \text{и} \quad x_C = \sqrt{3} r_C.$$

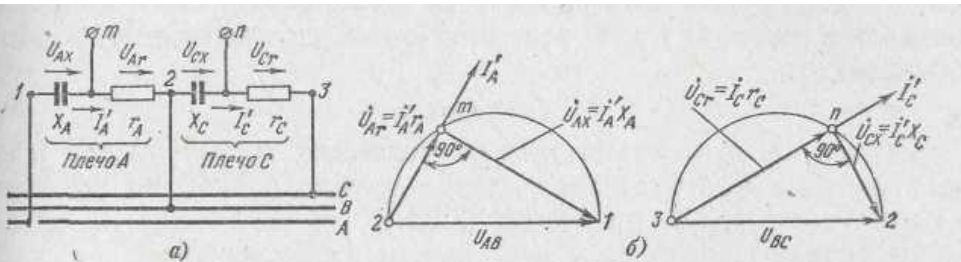


Рис. 6-20. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности.

а — схема; б — векторные диаграммы напряжений в плечах А и С.

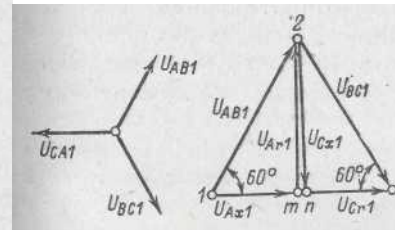


Рис. 6-21. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения прямой последовательности.

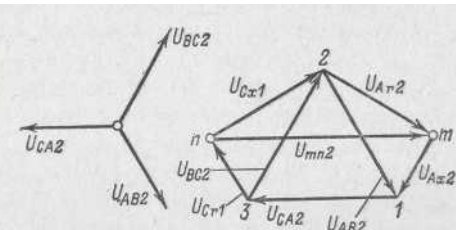


Рис. 6-22. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения обратной последовательности.

## 5. Фильтр обратной последовательности

$\dot{U}_{mn2}$  является напряжением на выходе фильтра, появляющимся при питании фильтра напряжением обратной последовательности:

$$\dot{U}_{mn2} = 1,5 \dot{U}_{CA2} = 1,5 \sqrt{3} \dot{U}_{\phi2} e^{j30} = k \dot{U}_{\phi2}, \quad (6-8)$$

где  $\dot{U}_{\phi2} = \dot{U}_{CA2} / \sqrt{3}$  — составляющая обратной последовательности фазного напряжения. Это означает, что фильтр, изображенный на рис. 6-20, действительно является фильтром обратной последовательности.

Сопротивление подключаемого к фильтру реле  $z_p$  подбирается с расчетом, чтобы отдаваемая фильтром мощность была максимальной. Для выполнения этого  $z_p$  должно равняться сопротивлению фильтра  $z_{\phi.х.х}$  в режиме, когда его выходные зажимы разомкнуты:

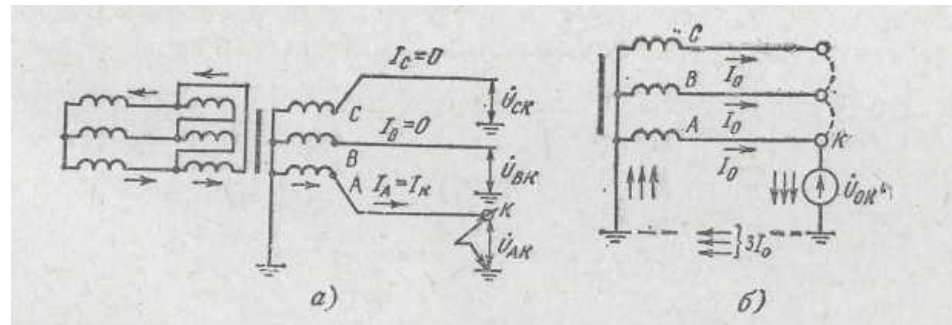
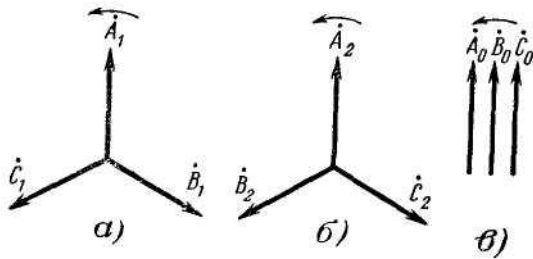
$$z_p = z_{\phi.х.х}.$$



# 6. Защита от замыканий на землю с большими токами замыкания на землю

1. Ток и напряжение нулевой последовательности в какой-либо точке сети равны:

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C); & \dot{U}_{AK} &= \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; & \dot{U}_{BK} &= \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0}; & \dot{I}_0 &= \frac{1}{3} \dot{I}_A = \frac{1}{3} \dot{I}_K; & \dot{U}_0 &= \frac{1}{3} (\dot{U}_B + \dot{U}_C). \\ \dot{U}_0 &= \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), & U_{CK} &= U_{C1} + U_{C2} + U_{C0}; & U_{A0} &= U_{B0} = U_{C0} = U_{0K}. & & & \text{откуда } I_K = 3I_0. \end{aligned}$$

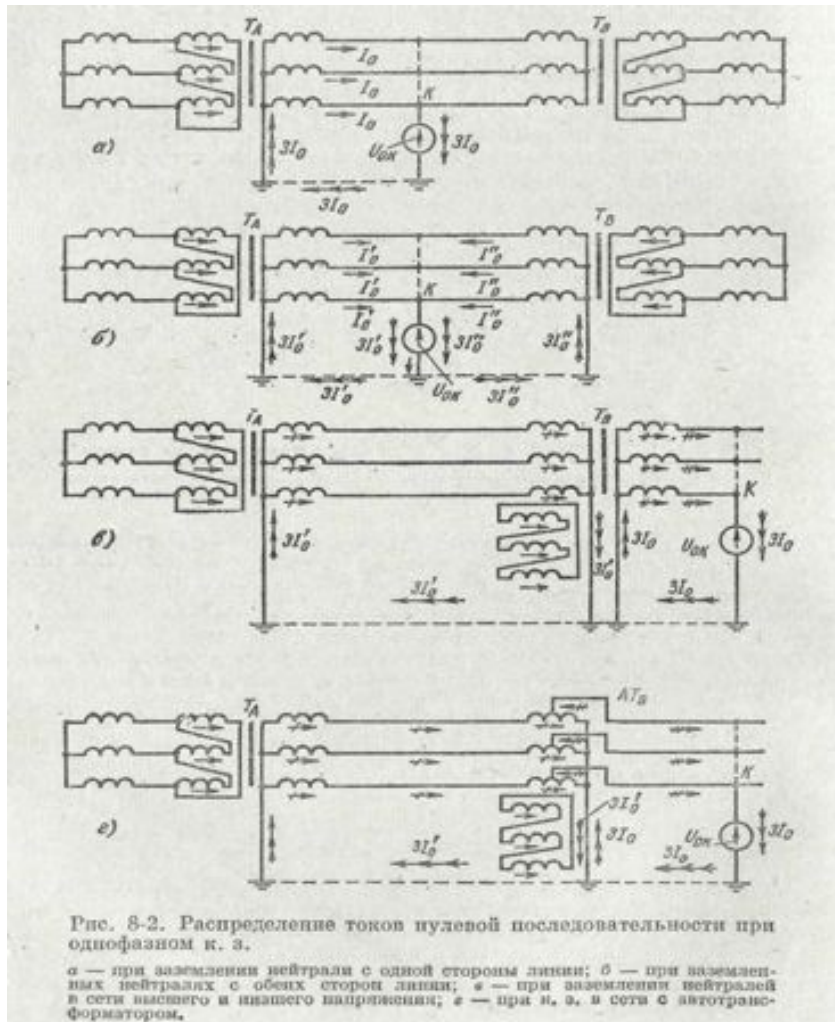


Напряжение  $U_{0K}$  появляющееся на каждой фазе в месте к. з. Под влиянием этого напряжения в каждой фазе возникают токи  $I_0$ . Они замыкаются по контуру фаза — земля через место повреждения (точка  $K$ ) и заземленные нейтралю.

Таким образом, при замыканиях на землю появление токов  $I_0$  возможно только в сети, где имеются трансформаторы с заземленными нейтралю.



## 6. Защита от замыканий на землю с большими токами замыкания на землю

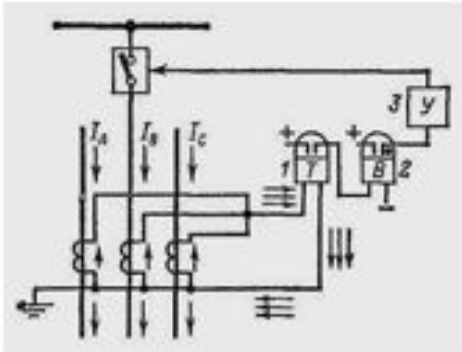


2. Если трансформатор имеет соединение обмоток  $Y/\Delta$ , то замыкание на землю на стороне треугольника не вызывает токов нулевой последовательности на стороне звезды.
3. Если сети различных напряжений связаны трансформатором, имеющим схему соединения  $Y/Y$ , с заземлёнными нулевыми точками обеих обмоток, то замыкание на землю в сети одной звезды вызывает появление токов нулевой последовательности в сети второй звезды.
4. При наличии автотрансформаторов, связывающих сети двух напряжений, замыкание на землю в сети одного напряжения вызывает появление токов нулевой последовательности в сети другого напряжения.

# 7. Максимальная токовая защита нулевой последовательности

## Схема и принцип действия

### Ток небаланса



$$I_p = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{n_T} = \frac{3\dot{I}_0}{n_T}$$

*MTZ нулевой последовательности имеет важное преимущество по сравнению с обычной MTZ, так как не реагирует на нагрузку и поэтому имеет высокую чувствительность.*

$$I_p = \left( \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_{A \text{ на м}}}{n_T} \right) + \left( \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_{B \text{ на м}}}{n_T} \right) + \left( \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_{C \text{ на м}}}{n_T} \right) =$$
$$= \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{n_T} - \left( \frac{\dot{I}_{A \text{ на м}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{B \text{ на м}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{C \text{ на м}}}{n_T} \right)$$

$$\dot{I}_p = \frac{3\dot{I}_0}{n_T} - \dot{I}_{\text{нб}}$$

*Ток небаланса равен геометрической сумме намагничивающих токов трансформаторов тока:*

$$\dot{I}_{\text{нб}} = \frac{\dot{I}_{A \text{ на м}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{B \text{ на м}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{C \text{ на м}}}{n_T}$$

Таким образом, ток срабатывания **MTZ** нулевой последовательности выбирается исходя из 2-х условий: по условию надёжного срабатывания защиты при к.з. в конце следующего участка цепи; по условию отстройки от токов небаланса:

# 7. Максимальная токовая защита нулевой последовательности

## Схема и принцип действия

### Ток небаланса

Для ограничения тока небаланса необходимо работать в ненасыщенной части характеристик намагничивания **ТТ** и иметь одинаковые токи намагничивания во всех фазах. Чтобы обеспечить эти условия, **ТТ** питающие защиту должны:

- удовлетворять условию **10%** погрешности при максимальном значении тока к.з. в начале следующего участка сети;
- иметь идентичные характеристики намагничивания во всех 3-х фазах;
- иметь одинаковые нагрузки вторичных цепей во всех фазах.

Таким образом, ток срабатывания **МТЗ** нулевой последовательности выбирается исходя из 2-х условий: *по условию надёжного срабатывания защиты при к.з. в конце следующего участка цепи;*  
*по условию отстройки от токов небаланса:*

$$I_{с.з.} < 3I_{о.к.мин.} \quad I_{с.з.} > 3I_{нб.макс.}$$

# 7. Максимальная токовая защита нулевой последовательности

## Схема и принцип действия

### Ток небаланса

Определяющим обычно является второе условие:  $I_{с.з.} = K_H I_{нб.макс.}$   $K_H = 1,3 \div 1,5$

Время срабатывания МТЗ нулевой последовательности выбирается по условию селективности на ступень  $\Delta t$  больше времени срабатывания защиты предыдущего участка

$$t_1 = t_2 + \Delta t$$

Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом чувствительности:

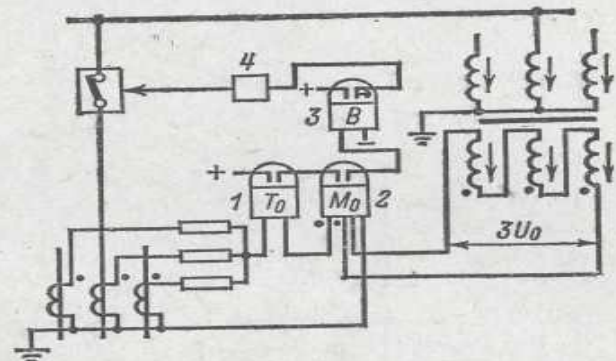
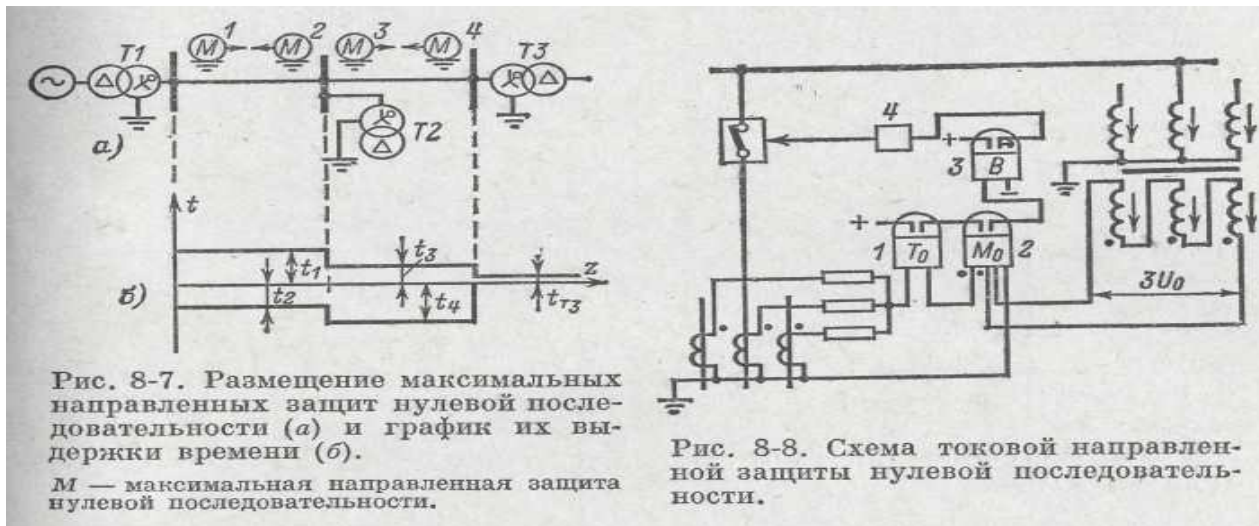
$$K_{\text{ч}} = \frac{3I_{0.\text{мин.}}}{I_{с.з.}} \geq 1,5$$

где:

$I_{0.\text{мин.}}$  - минимальный ток нулевой последовательности при 1ф. к.з. или 2-х ф. к.з. на землю в конце второго участка.

## 8. Токовые направленные защиты нулевой последовательности

В сетях с заземленными нулевыми точками, расположенными с обеих сторон рассматриваемого участка сети, селективное действие максимальной токовой защиты нулевой последовательности можно обеспечить только при наличии органа направления мощности



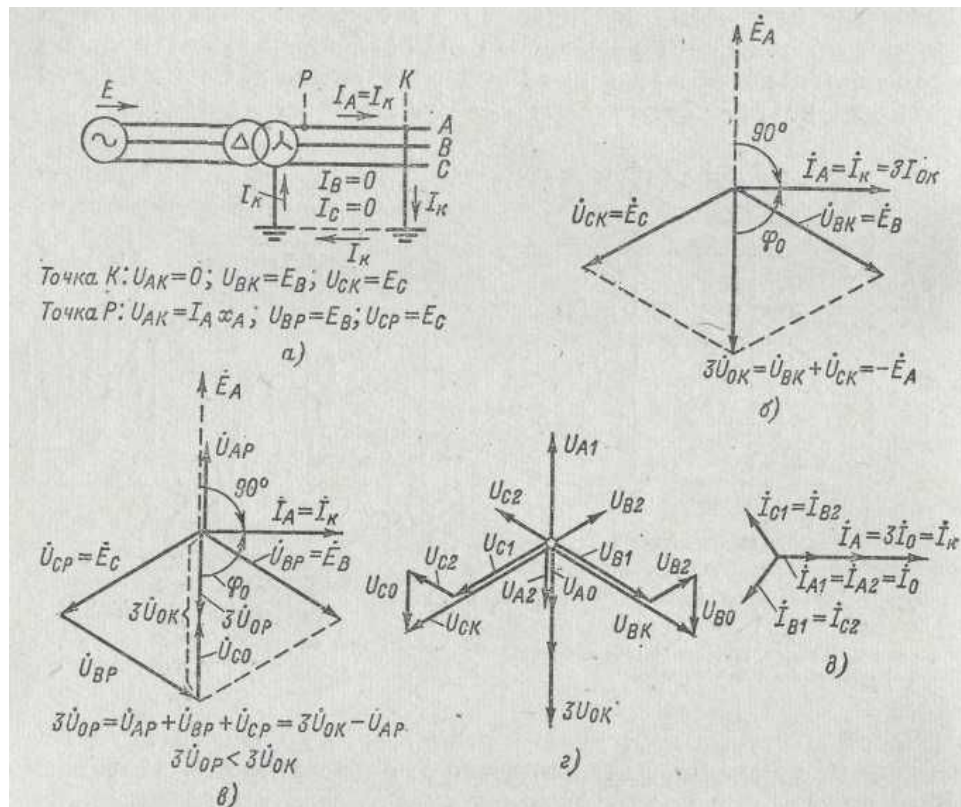
Мощность нулевой последовательности  $S_0 = U_0 I_0$

$$U_p = 3U_0, I_p = 3I_0$$

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = 3U_0 3I_0 \sin(\alpha - \varphi_0),$$

# 8. Токовые направленные защиты нулевой последовательности

Условия работы реле мощности и его поведение можно уяснить из рассмотрения векторных диаграмм напряжения и тока питающих реле ( $U_0$  и  $I_0$ ) при однофазных и двухфазных к. з. на землю.



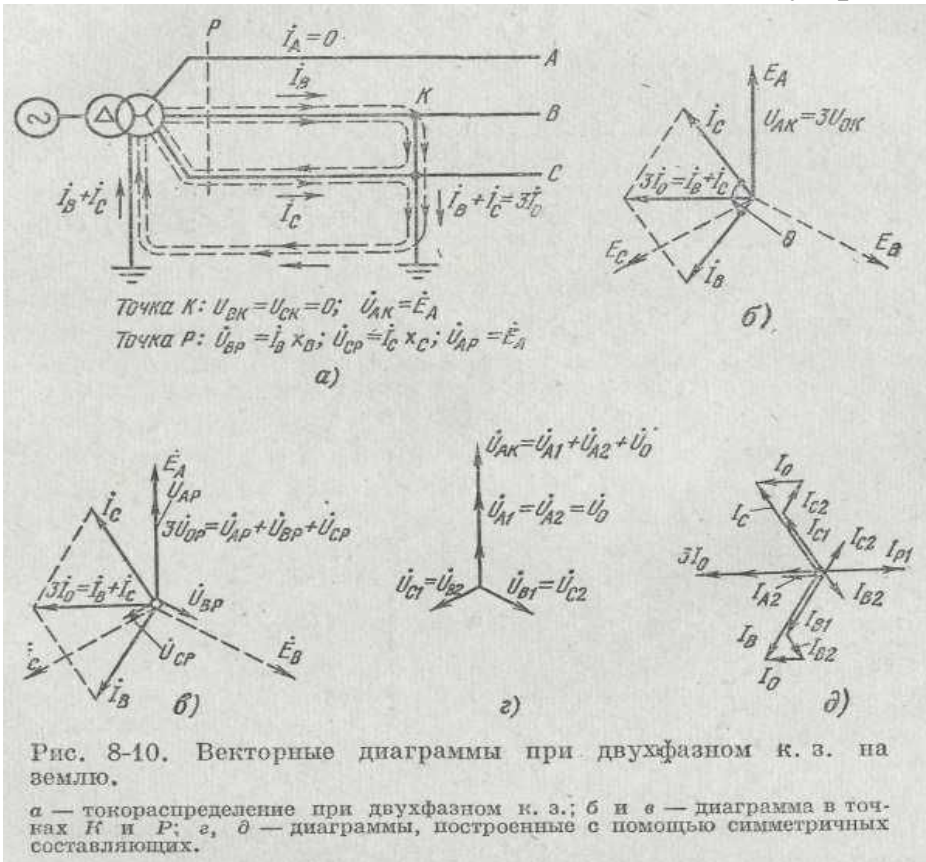
$$\dot{U}_{0K} = -\frac{1}{3} \dot{E}_A.$$

Рис. 8-9. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном к. з.  
 а — схема сети; б — диаграмма в точке К; в — диаграмма в точке Р; г, д — диаграммы, построенные с помощью симметричных составляющих.



# 8. Токовые направленные защиты нулевой последовательности

## Двухфазное к.з. на землю



Векторы  $\dot{I}_0$  и  $\dot{U}_0$  находятся геометрическим суммированием фазных токов и напряжений:

$$\dot{U}_{0K} = \frac{1}{3} \dot{U}_{AK}, \text{ а } \dot{I}_{0K} = \frac{1}{3} (\dot{I}_B + \dot{I}_C).$$

Напряжение  $\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3} (\dot{U}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP})$ ; с учетом того, что  $\dot{U}_{AP} = \dot{E}_A$ , находим:

$$\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3} (\dot{E}_A + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP}).$$

Отсюда и из векторной диаграммы следует, что  $U_{0P} < U_{0K}$ . Ток  $\dot{I}_0$  опережает  $\dot{U}_{0K}$  и  $\dot{U}_{0P}$  на угол  $\varphi_{0K}$ . Если не учитывать активного сопротивления, то  $\varphi_{0K} = 90^\circ$ .

## 8. Токовые направленные защиты нулевой последовательности

### Уставки направленной защиты

**Ток срабатывания пускового токового реле** выбирается так же, как и у ненаправленной защиты нулевой последовательности.

**Чувствительность пускового реле защиты** проверяется при к. з. в конце второго участка.

На очень длинных линиях следует дополнительно проверять *чувствительность реле мощности* при к. я. в конце зоны защиты по выражению:

$$K_{\text{ч}} = S_{\text{р.мин}} / S_{\text{ср}},$$

где  $S_{\text{р.мин}}$  — мощность на зажимах реле в режиме, когда  $U_0$  и  $I_0$  имеют минимальное значение.

**Выдержки времени** направленной защиты выбираются по встречно-ступенчатому принципу.

Каждая защита отстраивается от соседней защиты, действующей при одном направлении мощности, на ступень  $\Delta t$ :  $t_1 = t_3 + \Delta t$ .



## 9. Отсечки нулевой последовательности

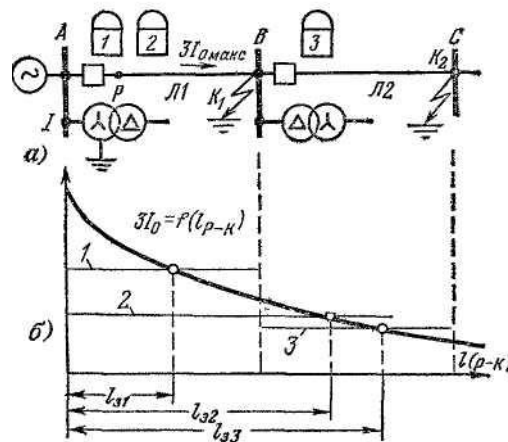
**Токовые (ненаправленные) отсечки нулевой последовательности** применяются на линиях с односторонним питанием места к. з. токами  $I_0$ , т. е. там, где заземленные нейтраль трансформаторов расположены с одной стороны линии.

**Мгновенные отсечки нулевой последовательности** отстраиваются от тока  $3I_{0\text{макс}}$  при к. з. на землю на шинах противоположной подстанции.

$$I_{с.з.} = K_H 3I_{0.м.макс}$$

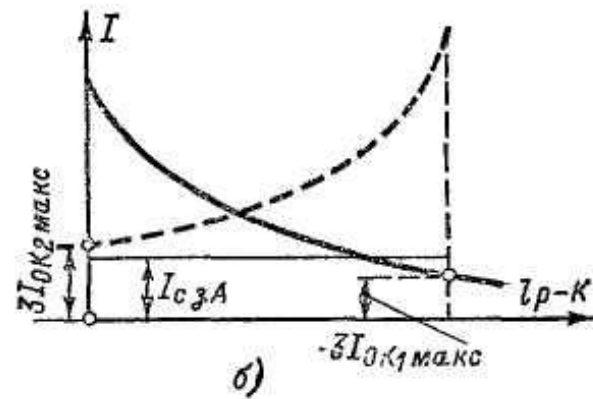
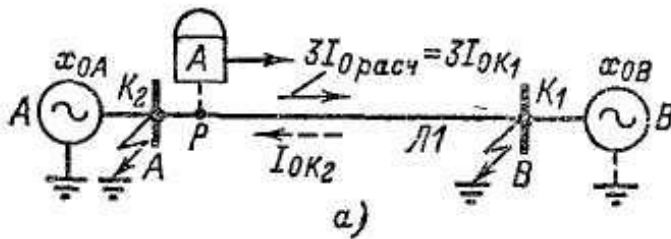
Отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени отстраивается по току и времени от мгновенной отсечки нулевой последовательности предыдущей линии:

$$t_2 = t_3 + \Delta t$$



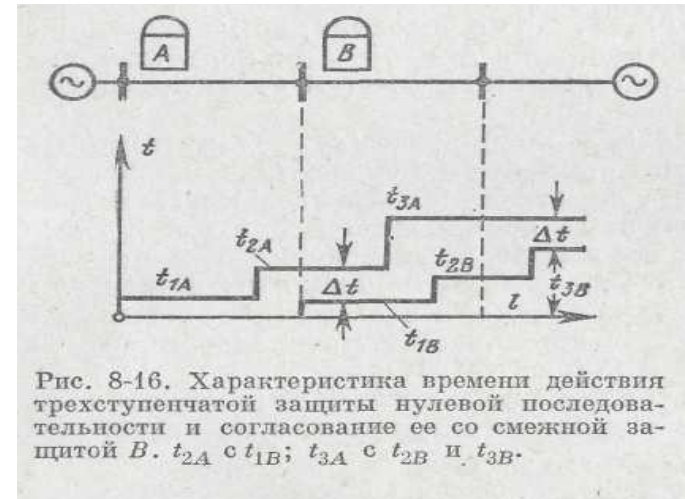
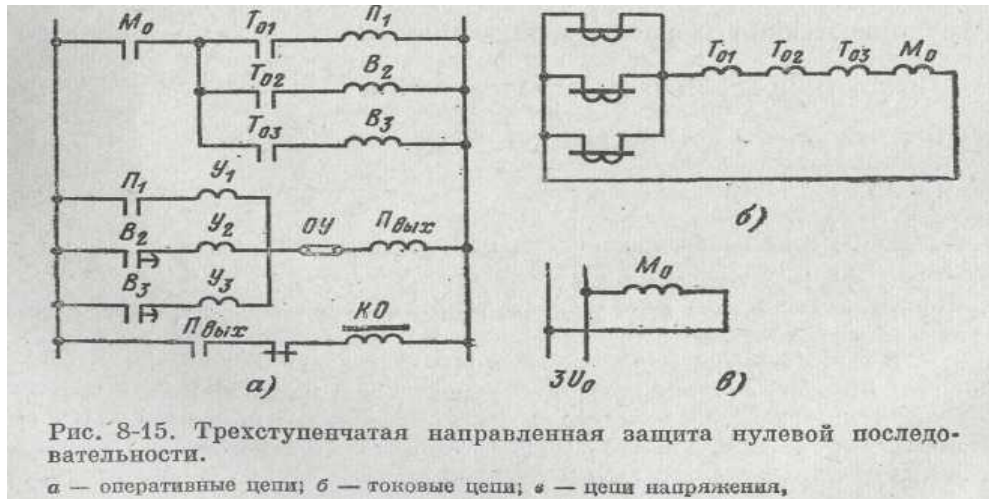
## 9. Отсечки нулевой последовательности

Схема отсечки с выдержкой времени аналогична схеме МТЗ нулевой последовательности. Мгновенная отсечка выполняется также, но без реле времени.



## 10. Ступенчатая защита последовательности

Большое распространение в сетях с глухозаземленной нейтралью получила ступенчатая защита нулевой последовательности, токовая и направленная.



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

## Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю

Сети с малым током замыкания на землю работают с изолированной нейтралью или с заземленной через дугогасящую катушку (ДГК).

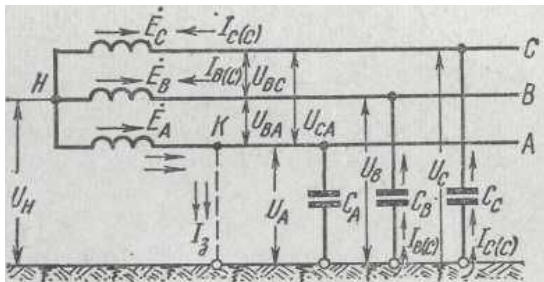


Рис. 9-1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью.

$$I_A = \frac{\dot{U}_A}{-jx_C}; \quad I_B = \frac{\dot{U}_B}{-jx_C};$$

$$I_C = \frac{\dot{U}_C}{-jx_C}. \quad (9-1)$$

$$\dot{U}_H = \dot{U}_{KH} = -\dot{E}_A!$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}'_H + \dot{E}_B \text{ и } \dot{U}'_C = \dot{U}'_H + \dot{E}_C$$

$$\dot{U}'_B = -\dot{E}_A + \dot{E}_B = \dot{U}_{BA} \text{ и } \dot{U}'_C = -\dot{E}_A + \dot{E}_C = \dot{U}_{CA}.$$

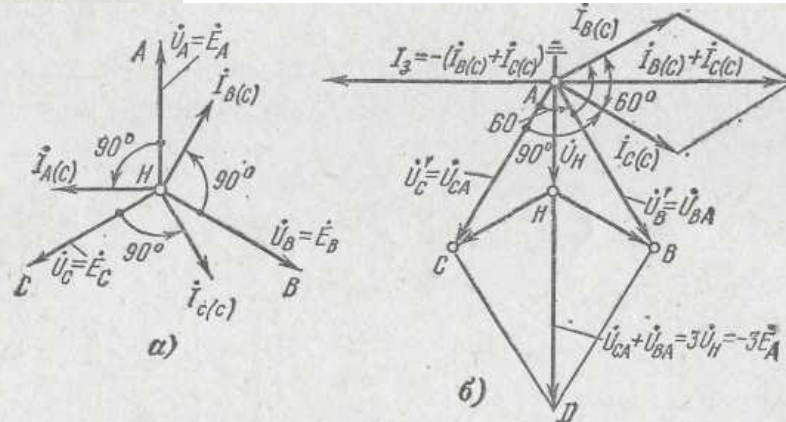


Рис. 9-2. Векторные диаграммы токов и напряжений в сети с изолированной нейтралью.

а — в нормальном режиме; б — при замыкании на землю фазы А.

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

## Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю

Токи при замыкании на землю. В месте повреждения К проходят токи, замыкающиеся через емкости фаз сети.

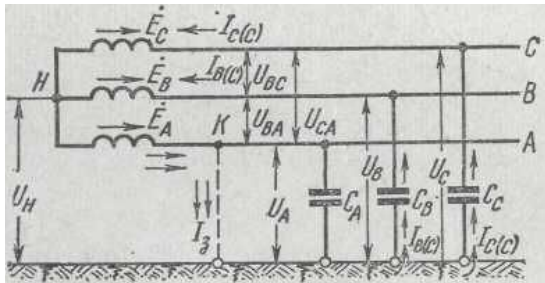


Рис. 9-1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью.

$$\dot{I}_{B(C)} = j \frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} \quad \text{и} \quad \dot{I}_{C(C)} = j \frac{\dot{U}_{CA}}{x_C}. \quad \dot{I}_3 = -(\dot{I}_{B(C)} + \dot{I}_{C(C)}).$$

$$\dot{I}_3 = -j \left( \frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} + \frac{\dot{U}_{CA}}{x_C} \right).$$

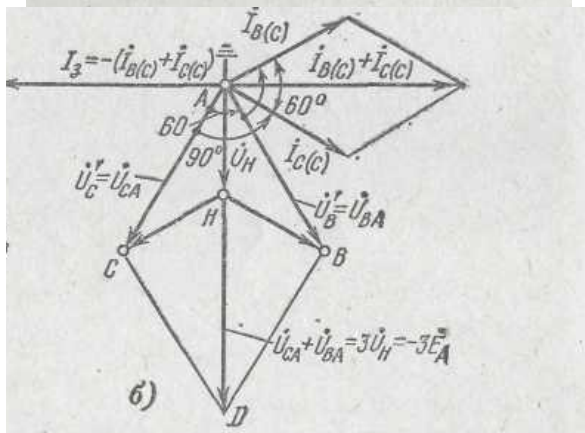
$$\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A,$$

$$\dot{I}_3 = j \frac{3\dot{E}_A}{x_C} = j \frac{3\dot{U}_\phi}{x_C}.$$

Ток  $I_3$  зависит от напряжения сети и емкости фаз ( $x_C = 1/\omega C$ ) и может быть подсчитан по формуле

$$I_3 = 3I_{C\phi} = 3 \frac{U_\phi}{x_C} = 3U_\phi \omega C_{уд} l \cdot 10^{-6},$$

где  $l$  — общая протяженность одной фазы сети;  $C_{уд}$  — емкость 1 км фазы сети относительно земли.



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токи и напряжения нулевой последовательности, возникающие при замыканиях на землю

Вследствие нарушения симметрии и баланса емкостных и фазных напряжений появляются составляющие нулевой последовательности:

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3} (\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C);$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C).$$

$$\dot{U}'_B = -\dot{E}_A + \dot{E}_B = \dot{U}_{BA} \text{ и } \dot{U}'_C = -\dot{E}_A + \dot{E}_C = \dot{U}_{CA}.$$

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3} (\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA});$$

и так как  $\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A = 3\dot{U}_H$ , то  $\dot{U}_{0к} = -\dot{E}_A = \dot{U}_H$ .

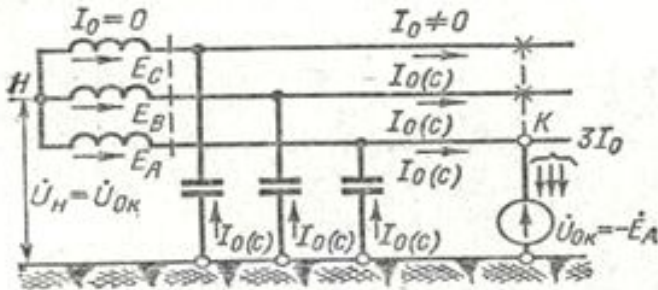


Рис. 9-3. Прохождение токов нулевой последовательности при замыкании на землю.

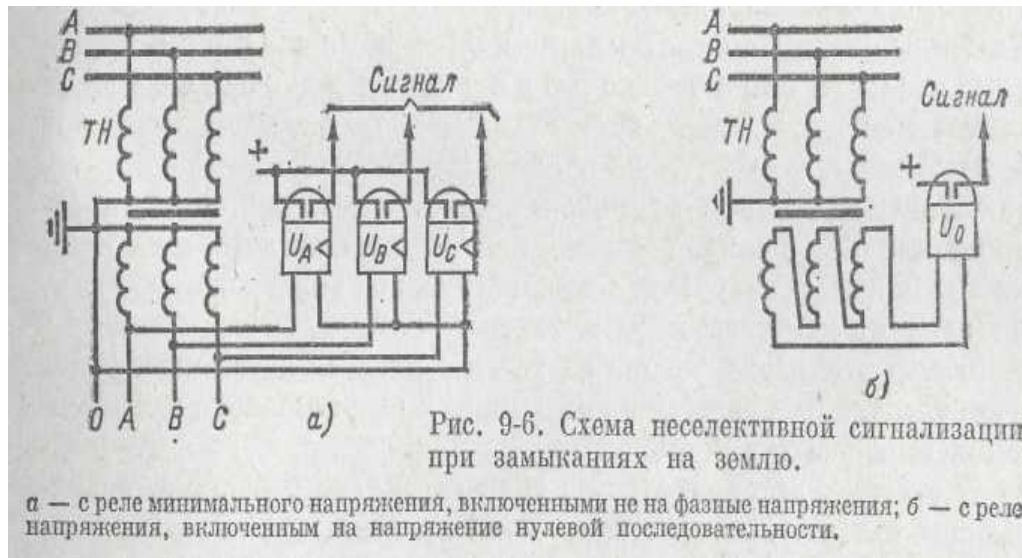
$$I_0 = -j \frac{\dot{U}_{0к}}{x_c} = -j \frac{\dot{E}_A}{x_c} = -j \frac{U_\Phi}{x_c},$$



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

## Принципы выполнения защиты от замыканий на землю

Простейшей защитой от замыканий на землю является общая неселективная сигнализация о появлении замыкания на землю без указания поврежденного участка.



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Способы получения искусственного тока

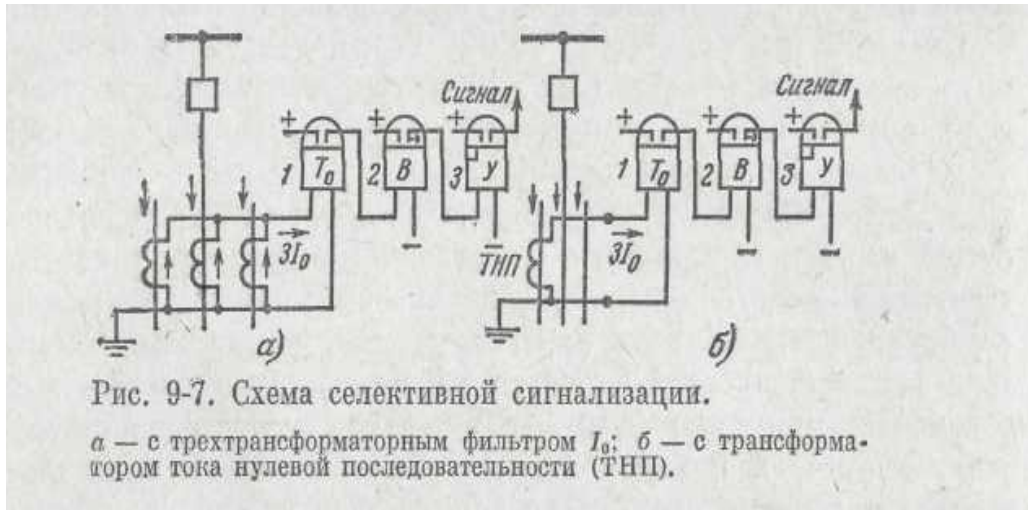
1. Включение активного сопротивления параллельно дугогасящей катушке с последующим его автоматическим отключением.
2. Работа с постоянной перекомпенсацией, при которой ток ДГК выбирается больше емкостного тока сети.
3. Наложение на ток повреждения тока не промышленной частоты (например, 100 или 25 Гц), подаваемого от специального источника в цепь ДГК. Этот ток замыкается по тому же контуру, что и ток дугогасящей катушки. На появление этого тока реагирует защита.



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Токовая защита, реагирующая на полный ток нулевой последовательности



## Размещение защит в сети

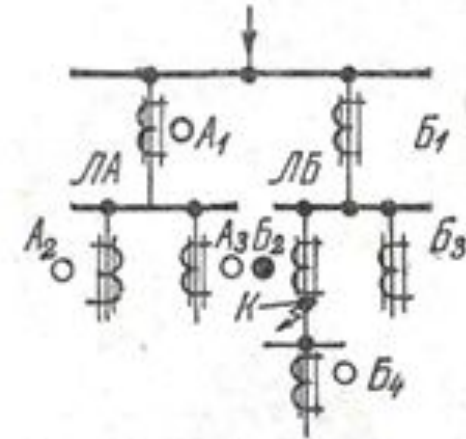


Рис. 9-10. Действие защиты в сети при замыкании на землю.  
● — сработавшая защита; ○ — не действовавшая защита.

$$3I_0 = I_A + I_B + I_C$$

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Распределение токов нулевой последовательности в сети при замыканиях на землю

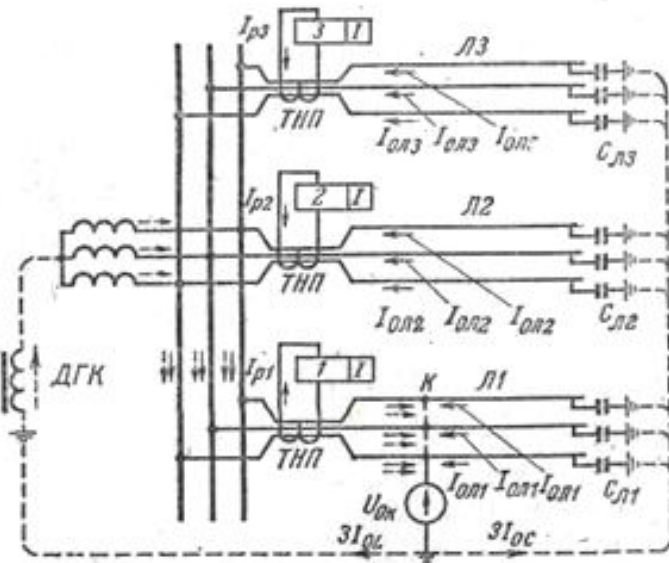


Рис. 9-11. Распределение токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю.

1. Емкостный ток нулевой последовательности проходит по всем поврежденным и неповрежденным линиям сети. Ток дугогасящей катушки замыкается только по поврежденной линии Л1.

2. В поврежденных линиях Л2 и Л3 проходит ёмкостный ток нулевой последовательности, замыкающейся через емкости фаз данной линии Сл2 и Сл3. Эти токи направлены к шинам и их величины равны:

$$3I_{0Л2} = 3U_{0к} \omega C_{Л2} \quad \text{и} \quad 3I_{0Л3} = 3U_{0к} \omega C_{Л3}.$$

3. Емкостный ток равен сумме ёмкостных токов всех неповрежденных линий.

$$I_{ТНП \text{ пов. л}} = 3I_{0с} - 3I_{0Л1} = 3U_{0к} \omega C - 3U_{0к} \omega C_{Л1},$$

4. Токораспределение показывает, что в некомпенсированной сети могут применяться направленные защиты, реагирующие на реактивную мощность нулевой последовательности, обусловленную емкостным током.

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Ток срабатывания токовой защиты

Для обеспечения селективного действия защиты необходимо отстроить ее ток срабатывания от емкостного тока, проходящего по защищаемой линии при замыканиях на землю на других присоединениях, и от тока небаланса при к. з. в сети. Если емкость фазы защищаемой линии равна  $C_{лр}$  то емкостный ток в защите при внешнем замыкании на землю равен утроенному току  $I_{ОЛ}$  этой линии, т. е.  $I_p = 3I_{0(л)} = 3U_{\phi} \omega C_{л}$ .

Первичный ток срабатывания защиты принимают равным:

$$I_{с.з} = k_n k_{\sigma} 3U_{\phi} \omega C_{л}$$

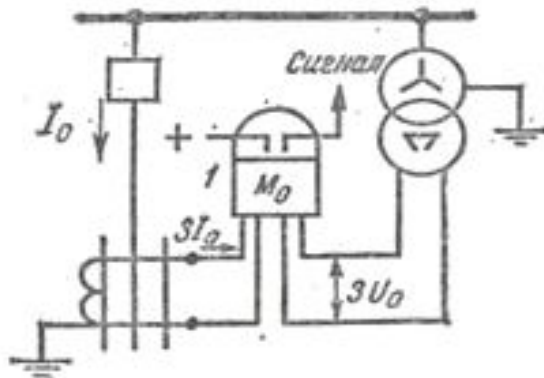
Чувствительность защиты при замыканиях на землю на защищаемой линии проверяется по отношению токов, протекающих через ТНП поврежденной линии, к току срабатывания защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ТНП пов. л}}}{I_{\text{с.з}}}$$

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Направленная защита



Учитывая, что емкостный ток  $I_0$  сдвинут относительно напряжения на  $90^\circ$ , применяют реле мощности синусного типа, реагирующее на

$$S_p = 3U_0 3I_0 \sin \varphi_0.$$

Рис. 9-13. Принципиальная схема направленной защиты от замыканий на землю.

*В сети, работающей с перекомпенсацией емкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в поврежденной линии, и емкостный ток в неповрежденной имеют одинаковое направление.*

В перекомпенсированной сети реле мощности используется в тех случаях, когда для действия защиты создается активный ток искусственным путем. В этом случае должно применяться реле мощности косинусного типа.

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

**Защиты, реагирующие на высшие гармоники тока компенсированной сети**

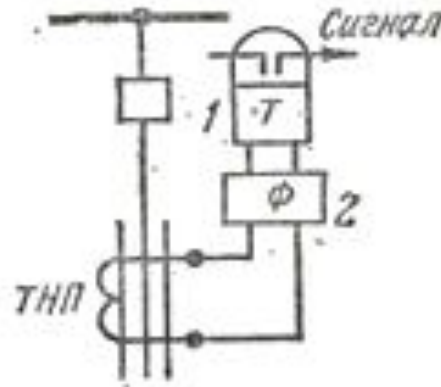


Рис. 9-14. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующая на токи высших гармоник.

# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности

## Защиты, реагирующие на токи неустановившегося режима

К этой группе относятся два вида защит. Одни реагируют **на появление тока высокой частоты**, а вторые — **на знак волн тока** или соответствующей ему мощности.

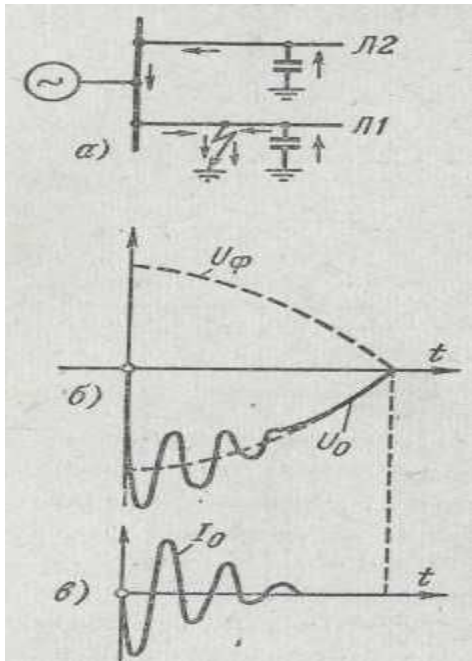


Рис. 9-15. Переходный процесс при замыкании на землю.

*a* — схема сети; *б* — кривая напряжения  $U_0$  и  $U_\phi$  в начальный момент замыкания на землю; *в* — кривая изменения тока  $I_0$  в начальный момент повреждения.

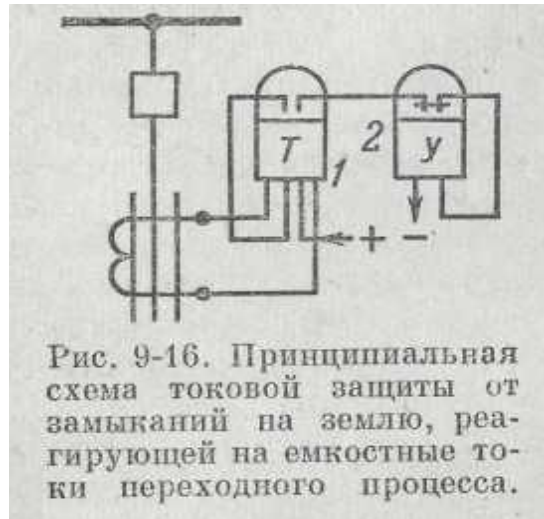


Рис. 9-16. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующей на емкостные токи переходного процесса.



Рис. 9-17. Знак волн тока, напряжения и мгновенной мощности при замыкании на землю.



# 11. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю

## Принцип работы и устройство ТНП

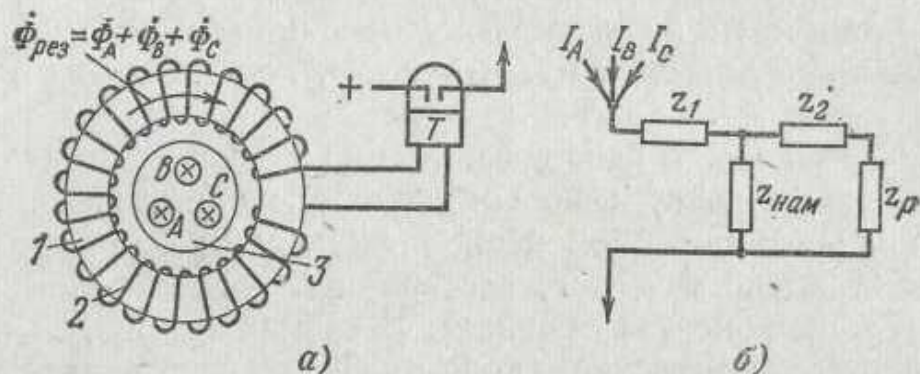


Рис. 9-8. Трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП).

а — устройство; б — схема замещения; 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — трехфазный силовой кабель.

Токи фаз  $I_A$ ,  $I_B$  и  $I_C$  создают в магнитопроводе соответствующие магнитные потоки  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$ ; складываясь, они образуют результирующий поток первичной обмотки:

$$\dot{\Phi}_{рез} = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C,$$

$$\Phi = \frac{wI}{R_M} = kI.$$

$$\dot{\Phi}_{рез} = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = k(I_A + I_B + I_C).$$

$$\Phi_{рез} = k3I_0.$$

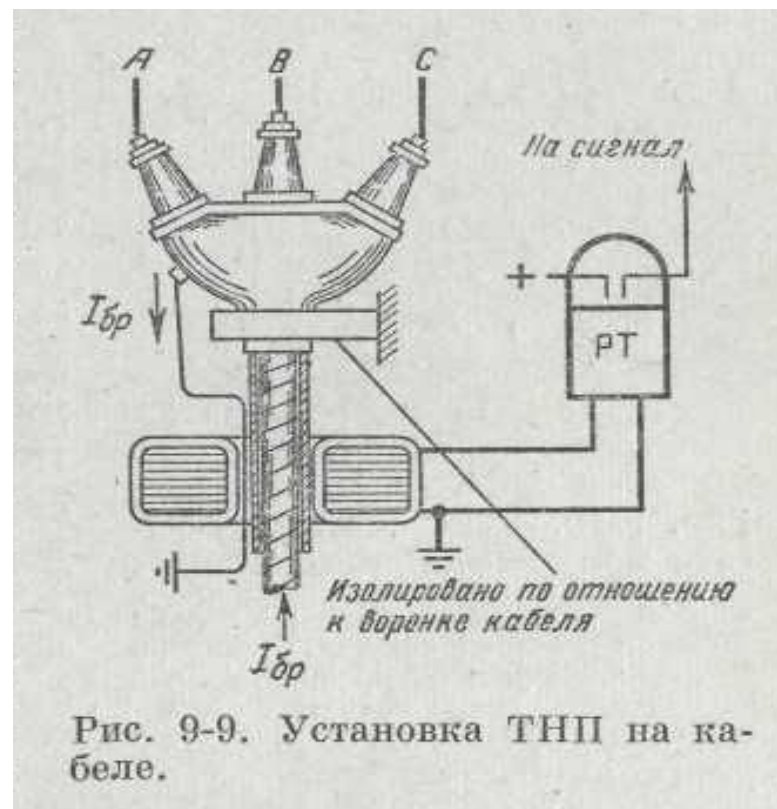


Рис. 9-9. Установка ТНП на кабеле.

## 12. Дифференциальная защита линий

На линиях, отходящих от шин электростанций или узловых подстанций энергосистем, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение к. з. в пределах всей защищаемой линии без выдержки времени ( $t = 0$ ). В этих случаях используются защиты, принцип действия которых обеспечивает отключение повреждений без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии, в том числе и на линиях малой протяженности.

К защитам такого типа относятся *дифференциальные защиты*. Они *обеспечивают мгновенное отключение к. з. в любой точке защищаемого участка и обладают селективностью при к. з. за пределами защищаемой линии (внешние к. з.)*.

*Дифференциальные защиты* подразделяются на:

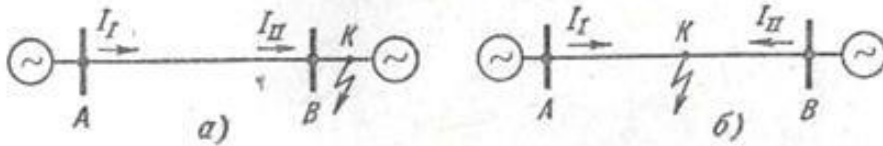
- **Продольные** – служат для защиты как одинарных, так и параллельных линий
- **Поперечные** – служат для защиты только параллельных линий



# 12. Дифференциальная защита линий

## Принцип действия продольной дифференциальной защиты

*Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на сравнении величины и фазы токов в начале и конце защищаемой линии.*



Имеются две принципиально различные схемы дифференциальных защит с **циркулирующими токами и уравновешенными напряжениями.**

При к.з. вне защищаемой линии ток в реле равен:

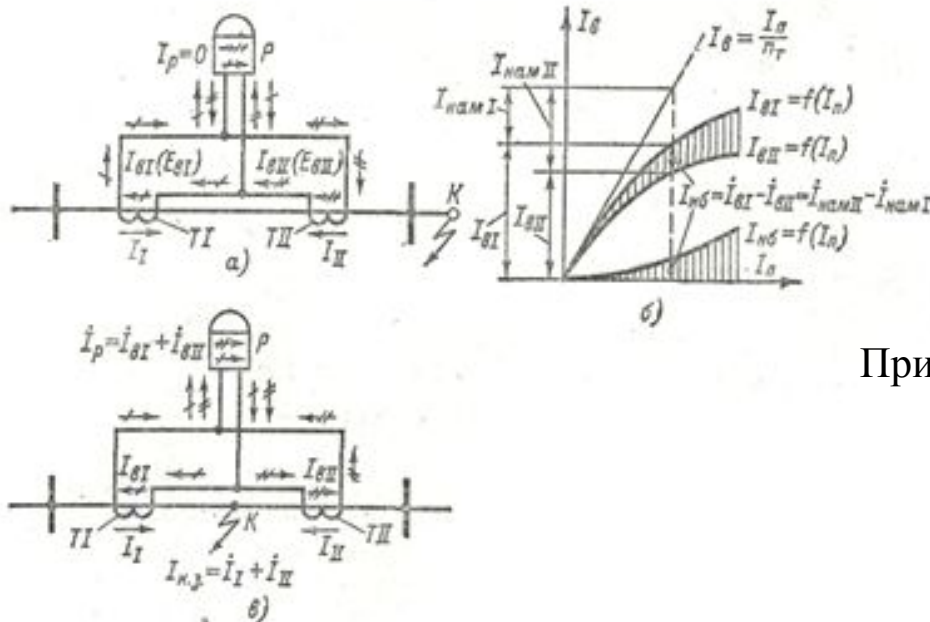
$$\begin{aligned} \dot{i}_p &= \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}, \\ \dot{j}_p &= \frac{\dot{I}_I}{n_{TI}} - \frac{\dot{I}_{II}}{n_{TII}}. \end{aligned}$$

За счет погрешности ТТ в реле появляется **ток небаланса**:

$$\dot{i}_{нб} = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}.$$

При к.з. на защищаемой линии ток в реле равен:

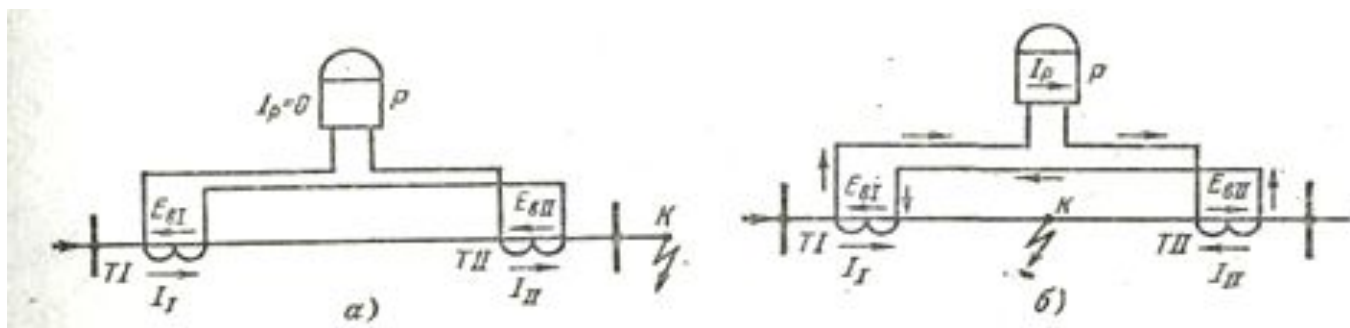
$$\dot{I}_p = \dot{I}_{вI} + \dot{I}_{вII} = \frac{\dot{I}_I}{n} + \frac{\dot{I}_{II}}{n} = \frac{\dot{I}_{к.з.}}{n},$$



# 12. Дифференциальная защита линий

## Принцип действия продольной дифференциальной защиты

Схема дифференциальных защит с уравновешенными напряжениями.



При внешних к.з. ток в реле равен:

$$I_p = \frac{\dot{E}_{вI} - \dot{E}_{вII}}{z} = 0,$$

В схемах дифференциальных защит оба принцип нашли широкое применение.

## 12. Дифференциальная защита линий Токи небаланса в дифференциальной защите

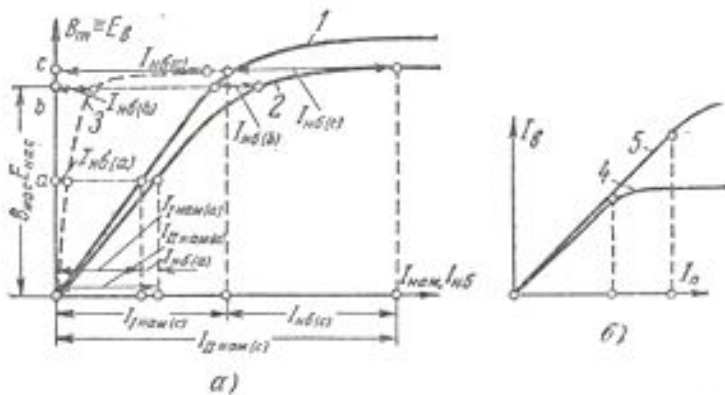
В схеме защиты с циркулирующими токами **ток небаланса** равен:  $\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{в1} - \dot{I}_{в11}$ .

Выразив вторичные токи через первичные с учетом погрешности ТТ, получим:

$$\dot{I}_{нб} = \left( \frac{\dot{I}_I}{n_T} - \dot{I}_{Iнам} \right) - \left( \frac{\dot{I}_{II}}{n_T} - \dot{I}_{IIнам} \right)$$

Так как при внешнем к.з.  $I_I = I_{II}$ , то:  $\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{IIнам} - \dot{I}_{Iнам}$ .

**Ток  $I_{нб}$  особенно возрастает при насыщении трансформаторов тока, так как при этом резко усиливается различие в токах намагничивания трансформаторов тока. Поэтому, помимо, обеспечения наибольшей идентичности характеристик намагничивания, стремятся к тому, чтобы при максимальном токе внешнего к. з. магнитопроводы трансформаторов тока не насыщались.**



Для выполнения этого условия используются следующие пути:

1. Применяются трансформаторы тока, насыщающиеся при возможно больших кратностях тока к. з. и вторичной нагрузки  $z_n$ .

2. Принимаются меры для ограничения величины вторичной э.д.с., от которой зависит значение магнитной индукции.

$$E_n = I_n (z_n + z_{нТ}) = \frac{I_{кз}}{n_T} (z_n + z_{нТ}),$$

# 12. Дифференциальная защита линий

## Токи небаланса в дифференциальной защите

Кроме того, для выравнивания токов  $I_{I\text{нам}}$  и  $I_{II\text{нам}}$  необходимо выравнивать нагрузку вторичных обмоток трансформаторов тока, т. е. обеспечивать условие  $Z_{I\text{H}} = Z_{II\text{H}}$ .

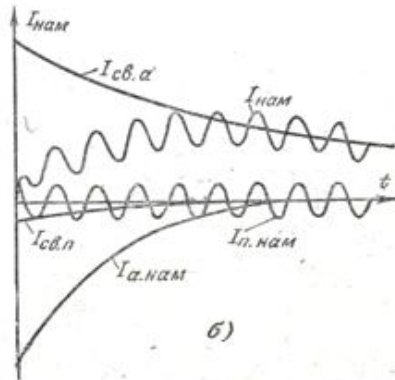
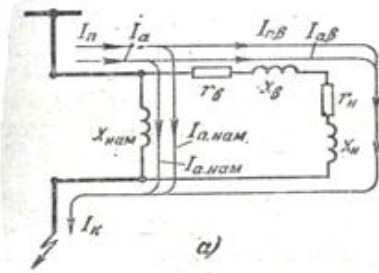
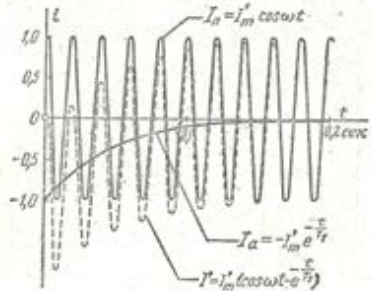
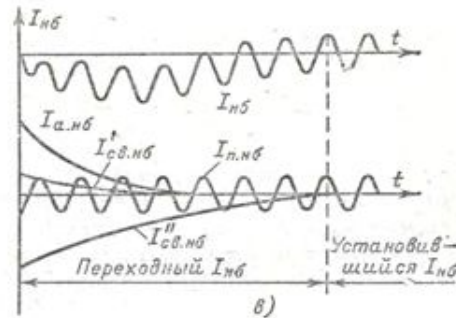
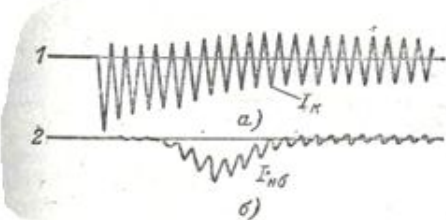


Схема замещения ТТ и распределение периодической и аperiodической составляющих тока к.з. между ветвями намагничивания и вторичной обмотки (а) и кривые тока намагничивания и его составляющих (б)



Ток небаланса в реле при внешних к.з.  
 а – ток к.з.  
 б – ток небаланса  
 в – разложение на периодическую и аperiodическую составляющие

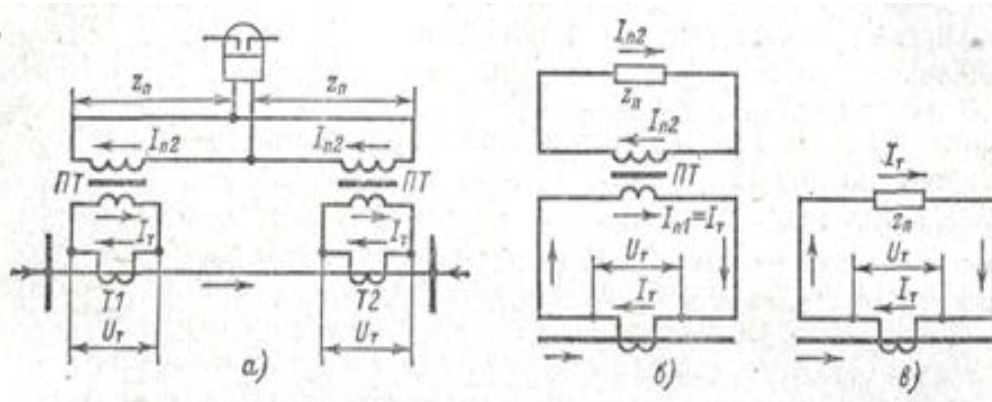
## 12. Дифференциальная защита линий

### Общие принципы выполнения продольной дифференциальной защиты линий

В основе всех разнообразных схем и конструкций дифференциальных защит лежат некоторые общие принципы, обусловленные особенностями условий работы этих защит на линиях.

Рассмотрим основные из них.

1. В дифференциальных защитах линий трансформаторы тока, соединяемые в дифференциальную схему, находятся на значительном расстоянии. Соединительные провода между ними имеют большое сопротивление и во много раз превышают допустимые пределы нагрузки самых мощных современных трансформаторов, тока.



Мощность, отдаваемая трансформатором тока в нагрузку.

$$S_T = U_r I_r,$$

$$U_r = I_{n2} z_n / n_n, \text{ но так как } I_{n2} = I_{n1} / n_n, \text{ то } U_r = \frac{I_{n1} z_n}{n_n^2} = \frac{I_r z_n}{n_n^2};$$

здесь учтено, что  $I_{n1} = I_r$ .

$$S_T = \frac{I_r^2 z_n}{n_n^2} = I_r^2 \frac{z_n}{n_n^2}.$$

$$\Rightarrow U_r = I_r z_n,$$

$$S_T = U_r I_r = I_r^2 z_n.$$

Указанный способ снижения нагрузки соединительных проводов используется во всех дифференциальных защитах линий.

## 12. Дифференциальная защита линий

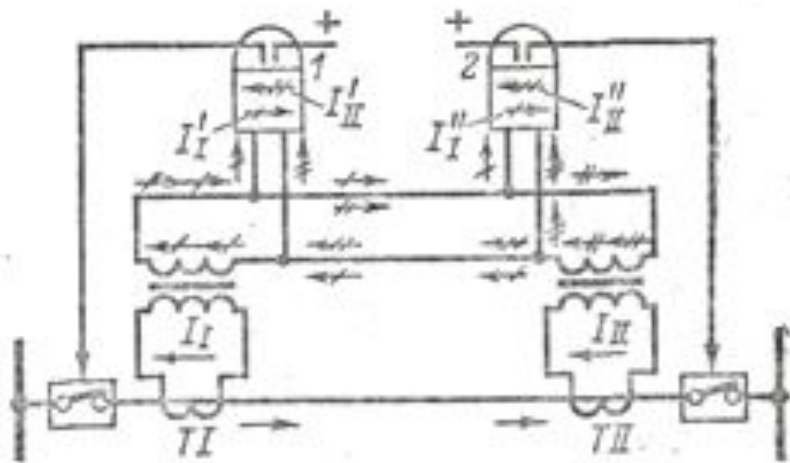
### Общие принципы выполнения продольной дифференциальной защиты линий

2. Дифференциальная защита должна воздействовать на отключение выключателей на обоих концах защищаемой линии.

Введение в схему второго, параллельно включенного реле вносит следующие изменения в условия работы защиты по схеме с циркуляцией токов:

а) Ток, поступающий от трансформаторов тока  $T_I$  и  $T_{II}$ , распределяется между ближним и дальним реле обратно пропорционально сопротивлениям их цепей.

б) При к.з. в зоне в схеме с одним реле в последнее поступает сумма вторичных токов ТТ, а в схеме в два реле в каждое из них попадает только часть вторичного тока от первого и второго ТТ.



$$I_p = \frac{I_I}{2} + \frac{I_{II}}{2} = \frac{I_{II}}{2}$$

# 12. Дифференциальная защита линий

## Общие принципы выполнения продольной дифференциальной защиты линий

3. Токи небаланса в дифференциальных защитах линии при сквозных к. з. могут достигать значительных величин не только в переходных режимах, но и в установившихся. Повышенное значение токов небаланса может обуславливаться большими кратностями токов внешнего к. з., вынужденной разнотипностью трансформаторов тока по концам линии, их значительной загрузкой, сопротивлением соединительных проводов и появлением  $I'_{нб}$ .

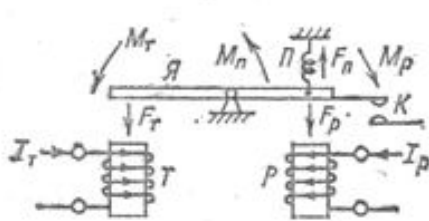


Рис. 10-10. Реле с тормозным действием.

$$I_P = I_{с.р} = \sqrt{\frac{k_2 w_T}{k_1 w_D}} I_T = k_T I_T.$$

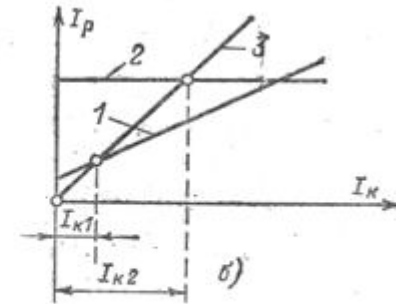
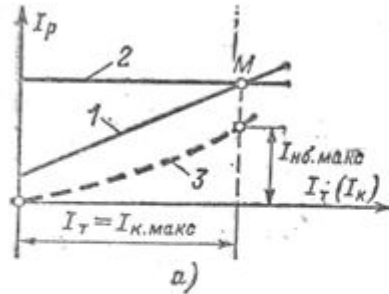


Рис. 10-11. Сравнение работы реле с торможением и без него.

а — при внешнем к. з.; б — при к. з. в зоне.

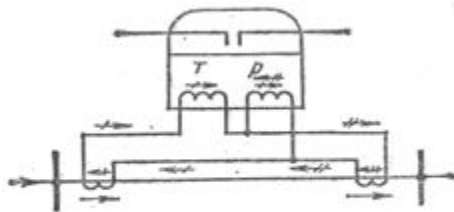


Рис. 10-12. Схема включения реле с торможением.

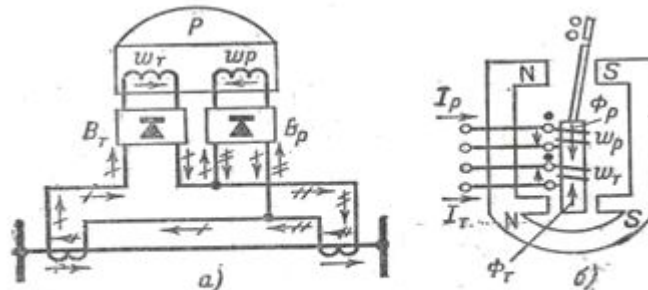


Рис. 10-13. Дифференциальная защита с тормозным реле на выпрямленном токе.

а — схема защиты; б — реагирующий орган.

Условие срабатывания реле можно выразить уравнением:

$$\Phi_D - \Phi_T = \Phi_{D0}$$

$$I_D w_D - I_T w_T = I_{D0} w_D$$

$$I_{с.р} = I_{D0} + \frac{w_T}{w_D} I_T = I_{D0} + k_T I_T,$$



## 12. Дифференциальная защита линий

### Общие принципы выполнения продольной дифференциальной защиты линий

4. Во всех рассмотренных схемах подразумевалась установка реле на трех фазах в тех случаях, когда защита должна реагировать на все виды к. з. Для выполнения таких схем необходимо шесть дифференциальных реле и не менее четырех соединительных проводов.

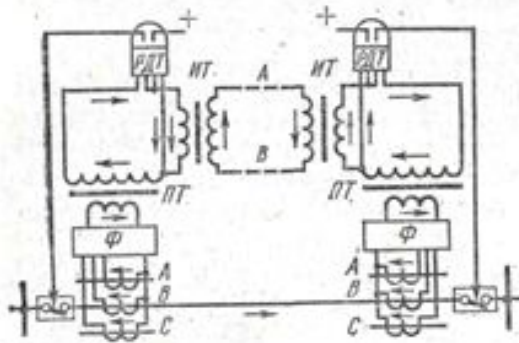


Рис. 10-14. Полная принципиальная схема однофазной дифференциальной защиты линий.

В нормальном режиме и при внешних к. з. по соединительным жилам, цепям промежуточного и изолирующего трансформаторов и тормозным обмоткам реле циркулирует ток, пропорциональный первичному току линии, а в рабочих обмотках проходит ток небаланса

$$I_{нб} = I_{нб, т.т} + I'_{нб}.$$

При к. з. на линии токи в рабочих обмотках суммируются, и хотя в тормозных обмотках реле протекает ток к. з., защита срабатывает, так как действие рабочей обмотки превосходит противодействие тормозной обмотки реле. В соединительных проводах *A* и *B* проходит небольшой ток, равный разности токов  $I_I - I_{II}$ .



# 12. Дифференциальная защита линий

## Устройство контроля исправности соединительных проводов

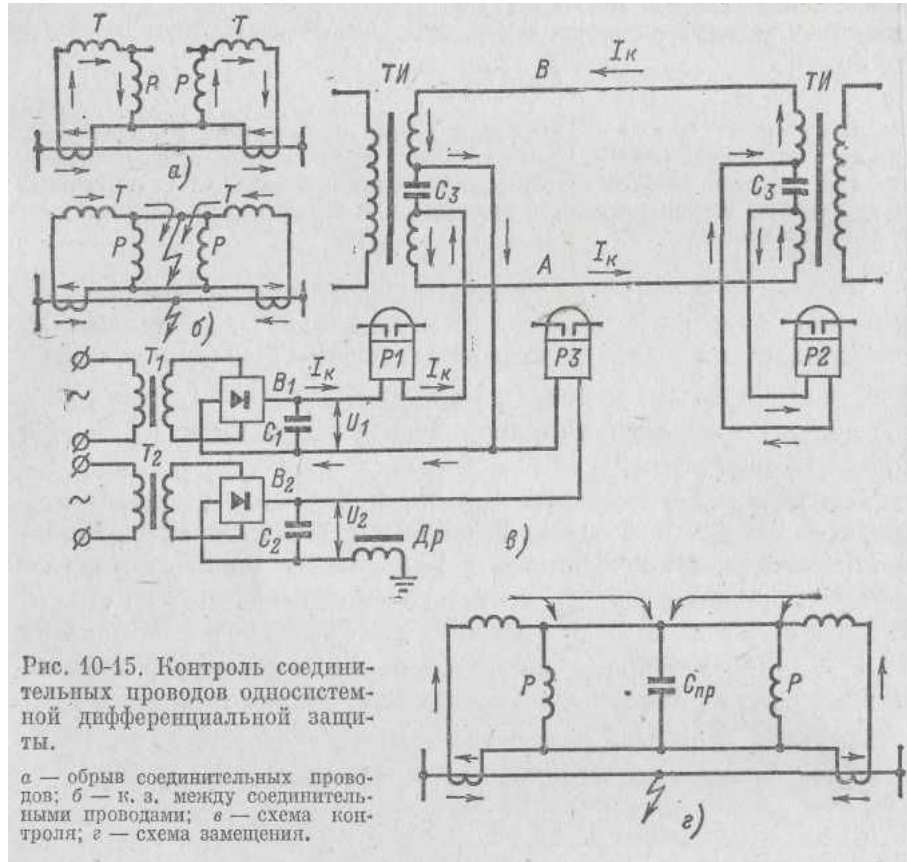


Рис. 10-15. Контроль соединительных проводов односистемной дифференциальной защиты.

а — обрыв соединительных проводов; б — к. з. между соединительными проводами; в — схема контроля; г — схема замещения.

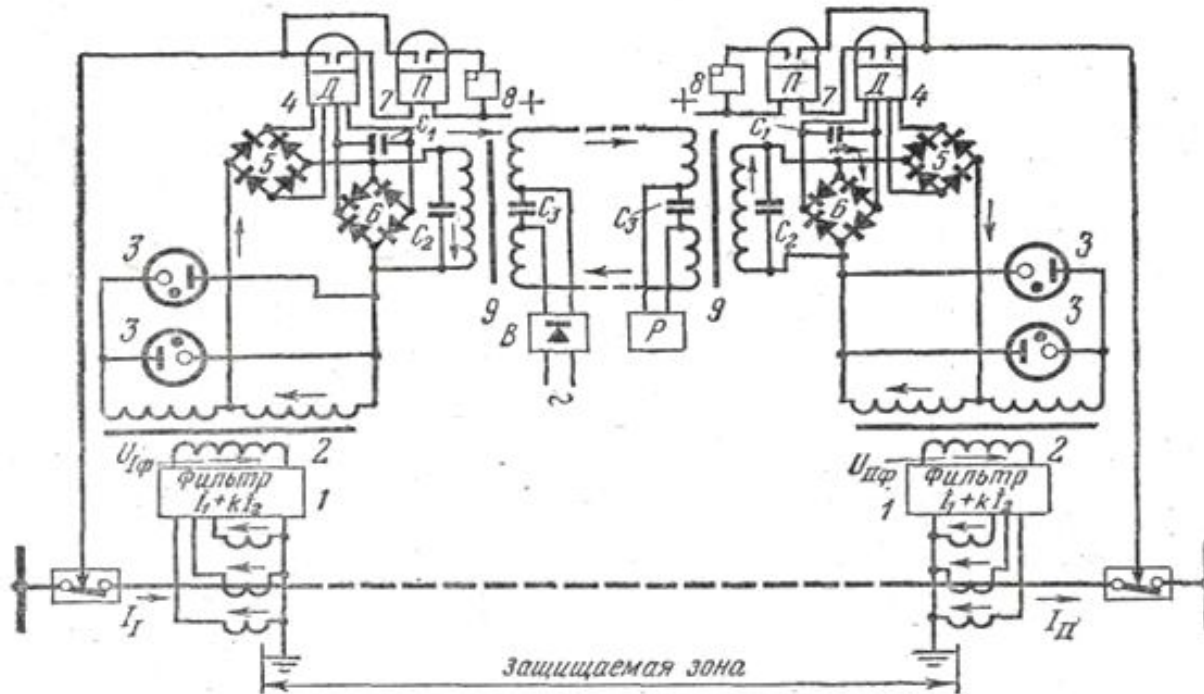
Для повышения надежности защиты ее снабжают устройством, контролирующим исправное состояние соединительных проводов. Устройство контроля может автоматически выводить защиту из действия, разрывая ее цепь отключения при повреждении соединительных проводов, или подавать сигнал о неисправности.

Первый способ более надежен.

Получило распространение устройство контроля, основанное на наложении на рабочий переменный ток, протекающий в соединительных проводах защиты, непрерывно циркулирующего контрольного постоянного тока.

## 12. Дифференциальная защита линий

### Продольная дифференциальная защита линий ДЗЛ

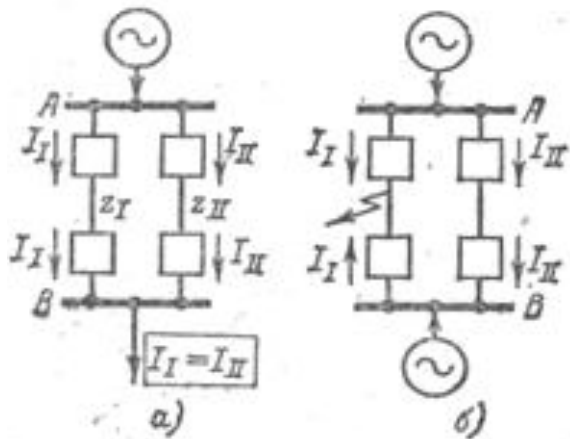


Защита состоит из двух полукомплектов, установленных на каждой стороне линии и соединенных между собой с помощью двух жил соединительного кабеля.

В каждый полукомплект защиты входят следующие элементы: 1 – комбинированный фильтр, 2 – промежуточный трансформатор со стабилизатором напряжения 3, 4 – дифференциальное реле с торможением, состоящее из реле Д и питающих его выпрямителей 5 и 6, 7 – промежуточное реле, 8 – указательное реле, 9 – изолирующий трансформатор.

## 12. Дифференциальная защита линий

### Принцип действия и виды поперечных дифференциальных защит параллельных линий



*Поперечные дифференциальные защиты* применяются на параллельных линиях, имеющих одинаковое сопротивление, и основаны на *сравнении величин и фаз токов*, протекающих по обеим линиям.

*Нарушение равенства токов в параллельных линиях по величине или фазе является признаком повреждения одной из них.*

*Поперечные дифференциальные защиты* применяются двух видов:

- на параллельных линиях, включенных под один общий выключатель – *токовая поперечная дифференциальная защита*
- на параллельных линиях с самостоятельными выключателями – *направленная поперечная дифференциальная защита*

# 12. Дифференциальная защита линий

## Токовая поперечная дифференциальная защита

### Принцип действия

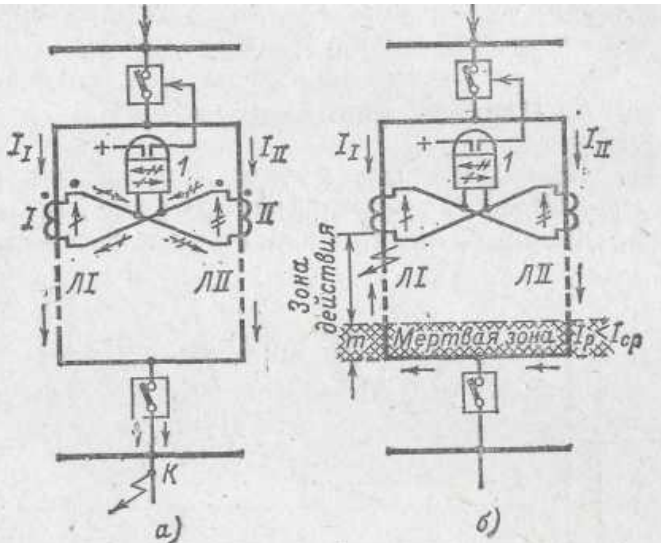


Рис. 10-21. Принцип действия токовой поперечной дифференциальной защиты.

а — режим нагрузки и внешнего к. з.; б — режим к. з. на одной линии ЛІ.

Токовая поперечная дифференциальная защита предназначена для параллельных линий с общим выключателем на обе линии.

При одностороннем питании параллельных линий защита устанавливается только со стороны источника питания, а в сети с двусторонним питанием — с обеих сторон параллельных линий.

$$n_{TI} = n_{TII} = n_T$$

В нормальном режиме и при внешнем к. з. ток в реле равен:

$$I_p = I_{вI} - I_{вII} = \frac{I_I}{n_T} - \frac{I_{II}}{n_T}$$

**Защита не реагирует на внешние к.з., нагрузку и качания. Выполняется без выдержки времени и не отстраивается от токов нагрузки.**

В реле протекает ток небаланса, вызванный погрешностью ТТ и некоторым различием первичных токов, обусловленным неточным равенством сопротивлений линии.

Ток срабатывания реле должен быть:  $I_{с.р} > (I'_{нб} + I''_{нб})$ .

В случае повреждения одной из параллельных линии токи становятся различными. И тогда в реле будет протекать ток, равный:

$$I_p = I_{вI} - I_{вII} = \frac{I_I - I_{II}}{n_T}$$

При токе в реле большим чем ток срабатывания защиты, защита действует и отключает общий выключатель обеих линий.

# 12. Дифференциальная защита линий

## Токовая поперечная дифференциальная защита

### Мертвая зона защиты

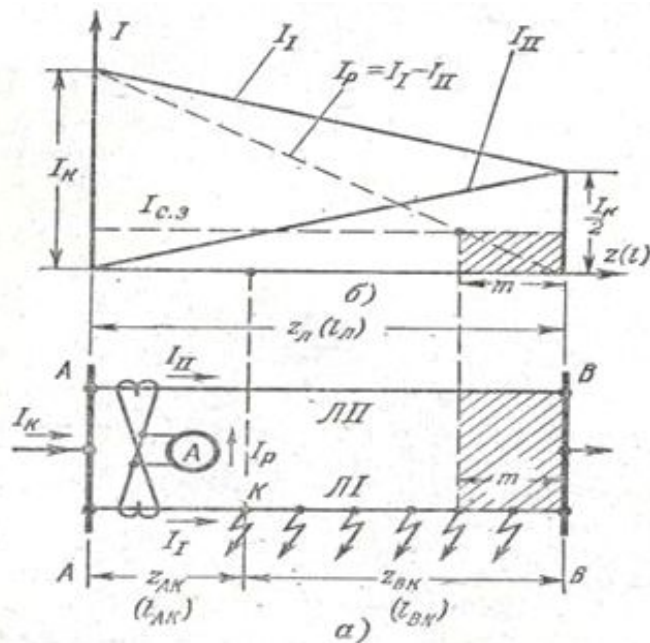


Рис. 10-22. Мертвая зона токовой поперечной дифференциальной защиты.

$z_L$  и  $l_L$  — сопротивление и длина линии;  $z_{AK}$  и  $z_{BK}$  — сопротивление от шив А и В до точки к. з. К.

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{II}}{z_I}, \quad \text{где } z_I = z_L - z_{BK}, \text{ а } z_{II} = z_L + z_{BK}.$$

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом

чувствительности  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{k.min}}{I_{c.з.}}$ , где  $I_{k.min}$  — минимальный ток к.з.,  $I_{c.з.}$  — ток

срабатывания защиты.

Защиту принято считать эффективной, если мертвая зона ее не превосходит 10%.

При отключении одной из параллельных линий поперечная дифференциальная защита превращается в мгновенную максимальную защиту оставшейся в работе линии и действует неселективно.

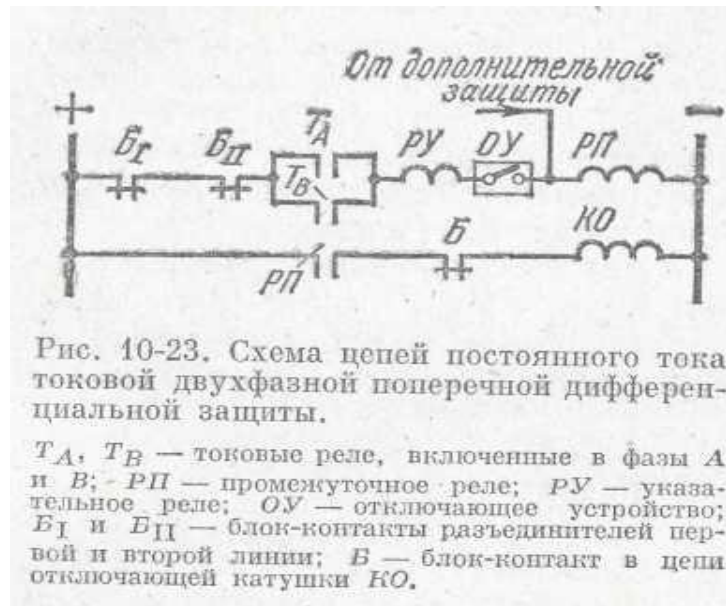
Поэтому при отключении одной линии поперечная дифференциальная защита должна выводиться из действия.



# 12. Дифференциальная защита линий

## Токовая поперечная дифференциальная защита

### Схема защиты



В сетях с малым током замыкания на землю защита выполняется на двух фазах. В сетях с большим током замыкания на землю защита устанавливается на трех фазах. В этом случае трансформаторы тока на каждой линии соединяются по схеме полной звезды с нулевым проводом.

Для отключения защиты при отключении одной из параллельных линий устанавливается отключающее устройство. В дополнение к отключающему устройству можно предусматривать автоматическое отключение защиты посредством блок-контактов  $B_I$  и  $B_{II}$  на разъединителях. При отключении одного из разъединителей его блок-контакт разрывает цепь, по которой подается плюс к защите.

# 12. Дифференциальная защита линий

## Направленная поперечная дифференциальная защита

### Принцип действия

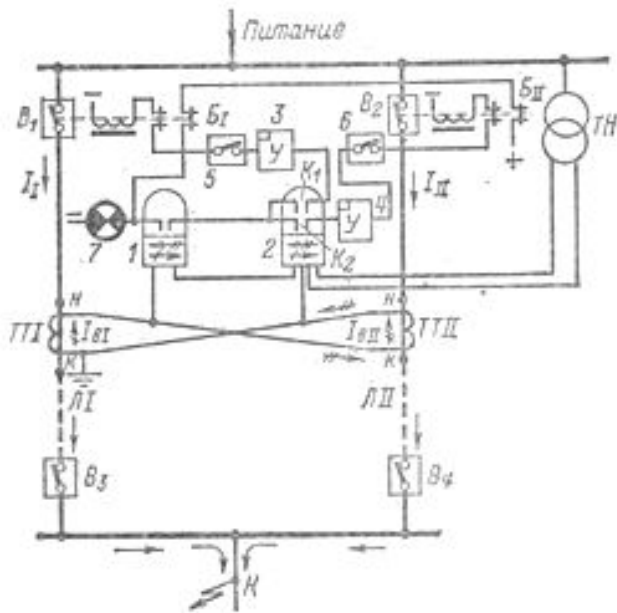


Рис. 10-24. Упрощенная схема и принцип действия направленной поперечной дифференциальной защиты параллельных линий.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется *коэффициентом*

*чувствительности*  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}$ , где  $I_{\text{к.мин}}$  – минимальный ток К.З.,  $I_{\text{с.з.}}$  – ток

срабатывания защиты.

При идеальной работе ТТ вторичные токи равны и тогда ток в реле равен 0.

При внешних к.з., а также при нагрузке и качаниях защита не действует. Однако вследствие погрешности трансформаторов тока и некоторого неравенства сопротивлений линий вторичные токи  $I_{\text{ВI}}$  и  $I_{\text{ВII}}$  несколько различаются по величине и фазе, в результате чего в реле появляется ток небаланса  $I_{\text{р}} = I_{\text{нб}}$ .

Для исключения работы защиты при внешних к. з. ее ток срабатывания должен удовлетворять условию  $I_{\text{с.з.}} > I_{\text{нб}}$ .

# 12. Дифференциальная защита линий

## Направленная поперечная дифференциальная защита

### Принцип действия

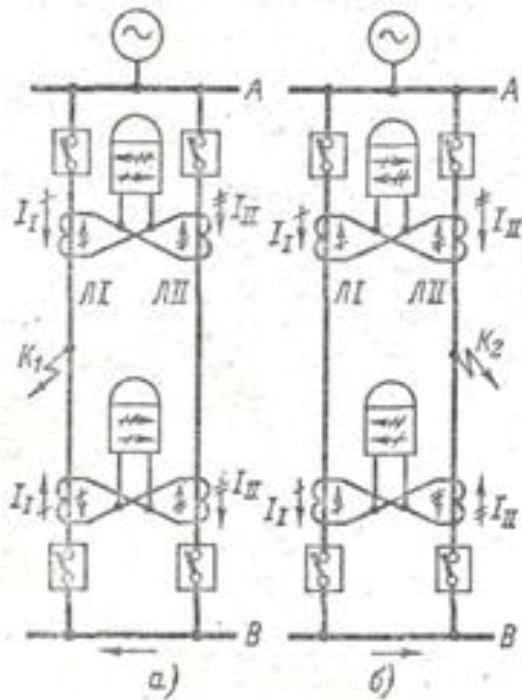


Рис. 10-25. Токораспределения в поперечной дифференциальной защите при к. з.

а — на LI; б — на LII.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется *коэффициентом*

*чувствительности*  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}$ , где  $I_{\text{к.мин}}$  — минимальный ток К.З.,  $I_{\text{с.з.}}$  — ток

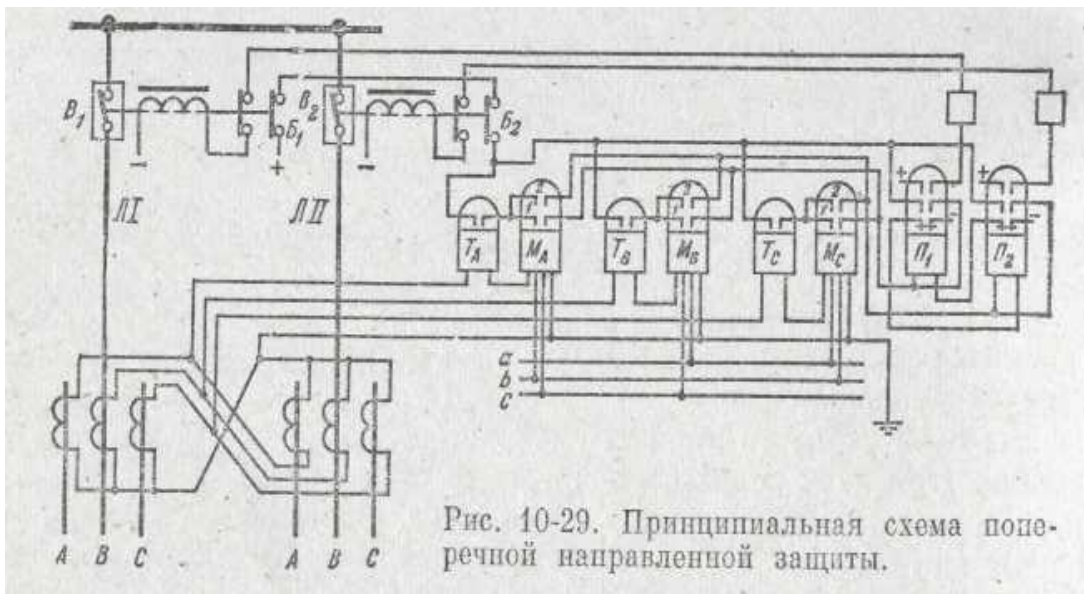
срабатывания защиты.



# 12. Дифференциальная защита линий

## Направленная поперечная дифференциальная защита

### Схемы



В качестве примера рассмотрим *схему трехфазной защиты*.

Рассмотренная трехфазная схема применяется в сети с большим током замыкания на землю от всех видов к. з.

В сети с малым током замыкания на землю, а также и в сети с глухозаземленной нейтралью при наличии поперечной дифференциальной защиты нулевой последовательности применяется двухфазная схема, отличающаяся от рассмотренной отсутствием трансформаторов тока, пусковых реле и реле мощности на одной фазе (например *B*).

# 12. Дифференциальная защита линий

## Выбор уставок направленной поперечной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи

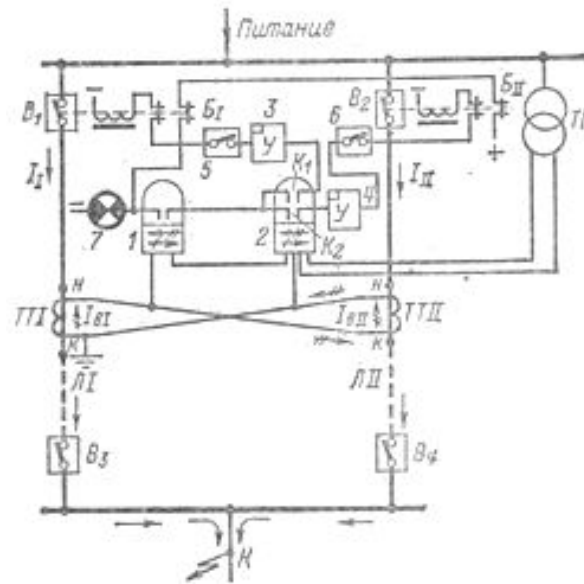


Рис. 10-24. Упрощенная схема и принцип действия направленной поперечной дифференциальной защиты параллельных линий.

**Ток срабатывания** пусковых реле защиты должен удовлетворять четырем требованиям:

1. Пусковые реле не должны действовать от тока небаланса  $I_{нб}$ , возникающего при внешних к. з.
- 3.

Для этого их ток срабатывания должен выбираться больше максимального тока небаланса при к. з. на шинах противоположной подстанции

$$I_{с.з.} = k_{н} I_{нб.макс}, \quad \text{где } k_{н} = 1,5 \div 2.$$

# 12. Дифференциальная защита линий

## Выбор уставок направленной поперечной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи

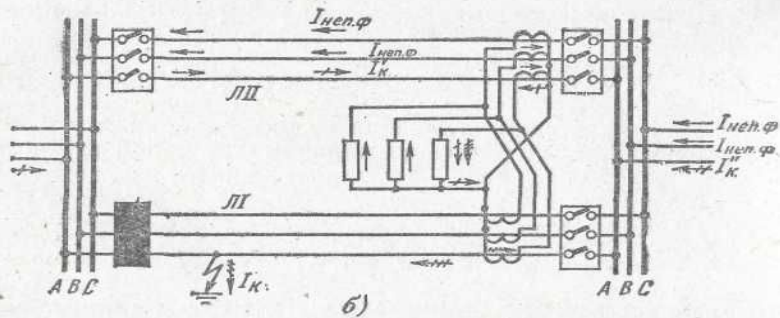
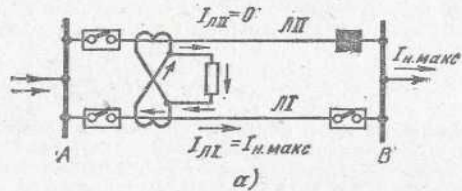


Рис. 10-30. Токораспределение в защите при каскадном отключении поврежденной линии с учетом токов нагрузки.

2. Пусковые реле должны быть отстроены от суммарного тока нагрузки  $I_{н \text{ макс}}$  параллельных линий для предотвращения ложного действия защиты при отключении одной из линий с противоположной стороны в нормальном режиме. Чтобы не допустить такого отключения, необходимо иметь:

$$I_{с.з} > I_{н \text{ макс}}, \text{ или } I_{с.з} = k_{н} I_{н \text{ макс}},$$

где  $k_{н}$  — коэффициент надежности.

3. Пусковые реле должны отстраиваться от токов в неповрежденных фазах  $I_{неп.ф.}$  при двухфазных и однофазных к.з. для этой цели:  $I_{с.з} > I_{неп.ф.}, I_{с.з} = k_{н} I_{неп.ф.}$

При выполнении этих условий и пофазном пуске защиты неселективное отключение линии из-за ложной работы реле мощности исключается, поскольку пусковые реле неповрежденных фаз не будут работать.

## 12. Дифференциальная защита линий

Выбор уставок направленной поперечной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется *коэффициентом чувствительности*  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}$ , где  $I_{\text{к.мин}}$  – минимальный ток К.З.,  $I_{\text{с.з.}}$  – ток срабатывания защиты.

# 12. Дифференциальная защита линий

## Направленная поперечная дифференциальная защита нулевой последовательности

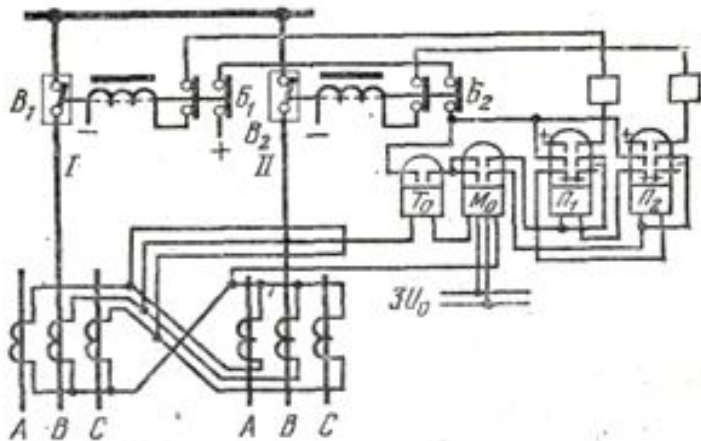


Рис. 10-32. Схема поперечной направленной дифференциальной защиты нулевой последовательности.

*Защита основана на сравнении величины и направления токов нулевой последовательности, протекающих по параллельным линиям при к.з. на землю.*

При внешних к. з. в дифференциальной цепи защиты появляется ток небаланса, от которого защита может ложно сработать. Для исключения ложного действия ток срабатывания пускового реле должен удовлетворять условию

$$I_{с.з.н.п} = k I_{н} I_{нб \cdot макс}$$

Поперечная дифференциальная защита нулевой последовательности обладает более высокой чувствительностью при к. з. на землю, чем защита, реагирующая на фазный ток

# 12. Дифференциальная защита линий

Направленная поперечная дифференциальная защита с отдельными комплектами от междуфазных и однофазных к.з.

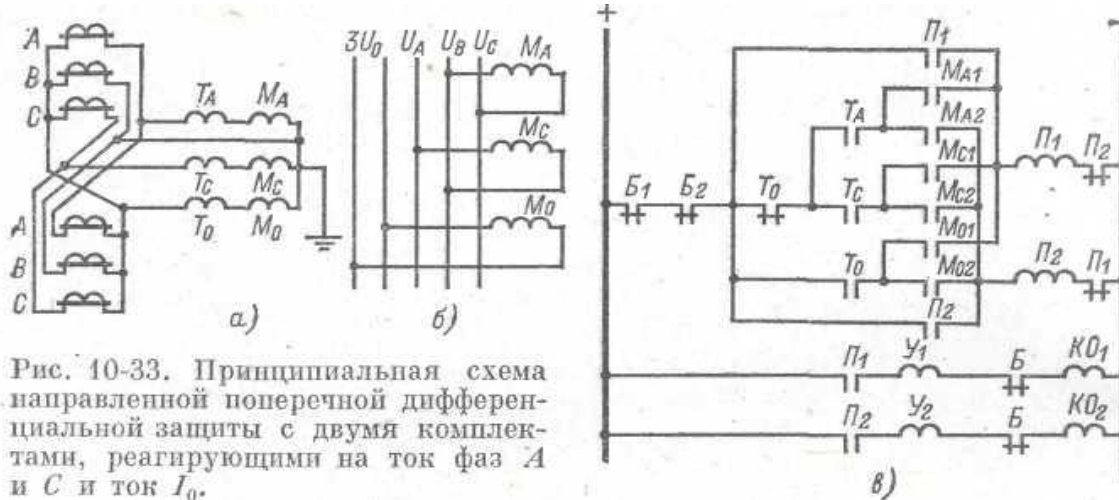


Рис. 10-33. Принципиальная схема направленной поперечной дифференциальной защиты с двумя комплектами, реагирующими на ток фаз А и С и ток  $I_0$ .

В тех случаях, когда фазная поперечная дифференциальная защита имеет недостаточную чувствительность к однофазным к. з., ее дополняют комплектом дифференциальной защиты нулевой последовательности. В этой схеме комплект, включенный на разность фазных токов, выполняется двухфазным.

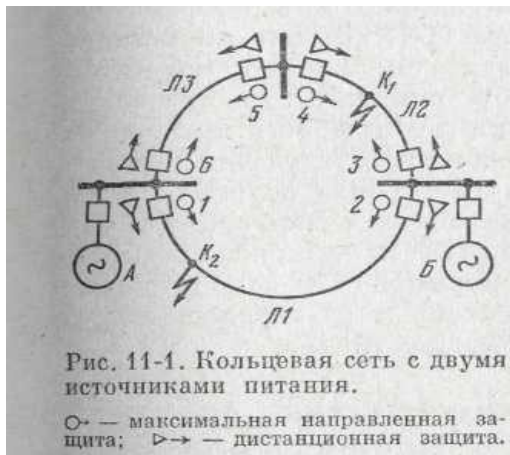
Ток срабатывания реле  $T_o$  ( $I_{с.з.н.п}$ ) должен удовлетворять условию  $I_{с.з.н.п} = k_n I_{нб \cdot макс}$  не только при внешних к. з., но также при трехфазных к. з. на одной из параллельных линий у места установки защиты.

Пусковое реле  $T_o$  не должно работать от тока небаланса возникающего в этом случае, так как иначе фазный комплект будет выведен из действия. Поэтому  $I_{с.з.н.п} = k_n$

# 13. Дистанционная защита

## Назначение и принцип действия

*Дистанционная защита – защита с необходимым быстродействием, обеспечивающая селективность и чувствительность в электрических сетях любой конфигурации.*

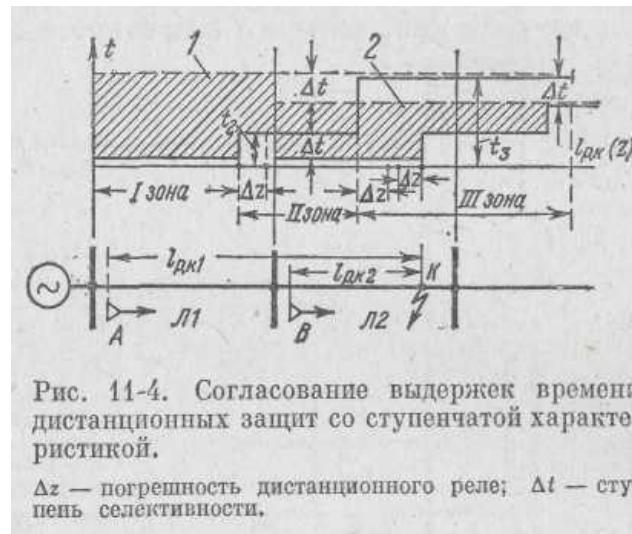
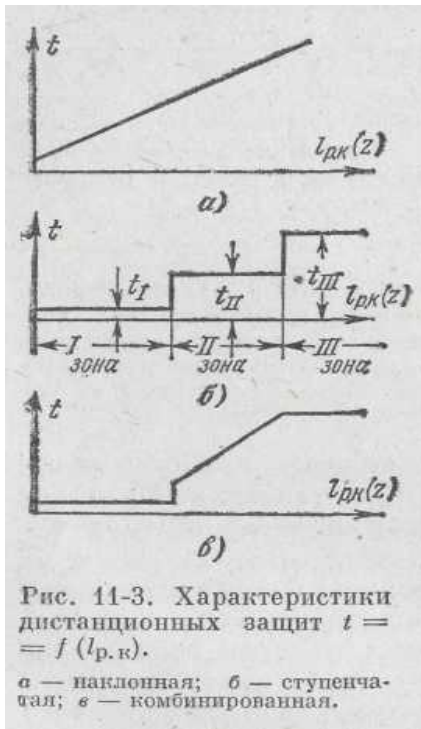


*Основным элементом дистанционной защиты является дистанционный орган (называемый также измерительным органом), определяющий удаленность, к. з. от места установки защиты.*



# 13. Дистанционная защита

## Характеристики выдержки времени дистанционных защит





# 13. Дистанционная защита

## Элементы и упрощенная схема дистанционной защиты

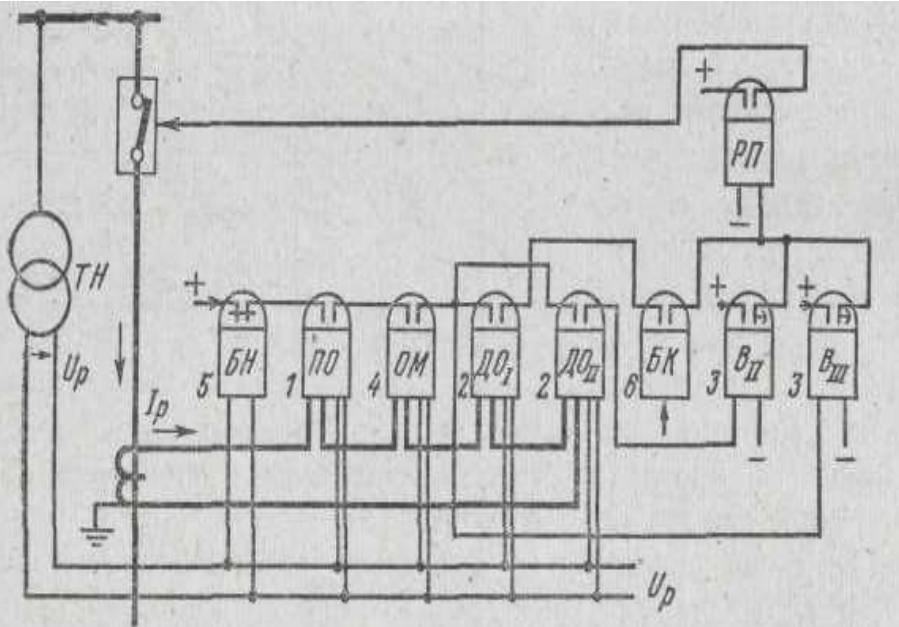


Рис. 11-5. Упрощенная схема трехступенчатой дистанционной защиты.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при КЗ в конце установленной зоны действия в минимальном режиме системы.

Чувствительность защиты характеризуется *коэффициентом*

*чувствительности*  $k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к.мин}}}{I_{\text{с.з.}}}$ , где  $I_{\text{к.мин}}$  – минимальный ток к.з.,  $I_{\text{с.з.}}$  – ток

срабатывания защиты.

- блокировки, автоматически выводящие защиту из действия в тех режимах, когда защита может сработать неправильно при отсутствии повреждения.

# 13. Дистанционная защита

## Характеристики срабатывания дистанционных реле и их изображения на комплексной плоскости

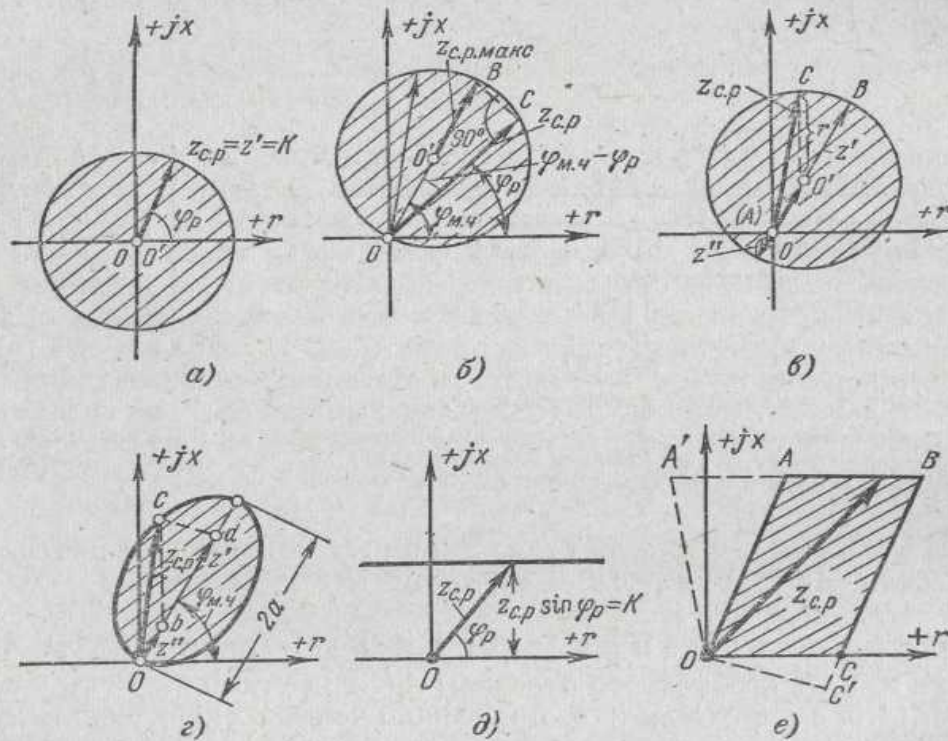


Рис. 11-7. Характеристики срабатывания реле сопротивления.

□ **Ненаправленное реле полного сопротивления (рис. а).**

$$z_{c.p} = K$$

□ **Направленное реле полного сопротивления (рис. б)**

$$z_{c.p} = z_{c.p \text{ макс}} \cos(\varphi_{m.ч} - \varphi_p)$$

□ **Реле со смещенной круговой характеристикой (рис. в)**

□ **Реле с эллиптической характеристикой (рис. г)**

□ **Реле с характеристикой в виде многоугольника (рис. е)**

# 13. Дистанционная защита

## Ненаправленное реле сопротивления с круговой характеристикой

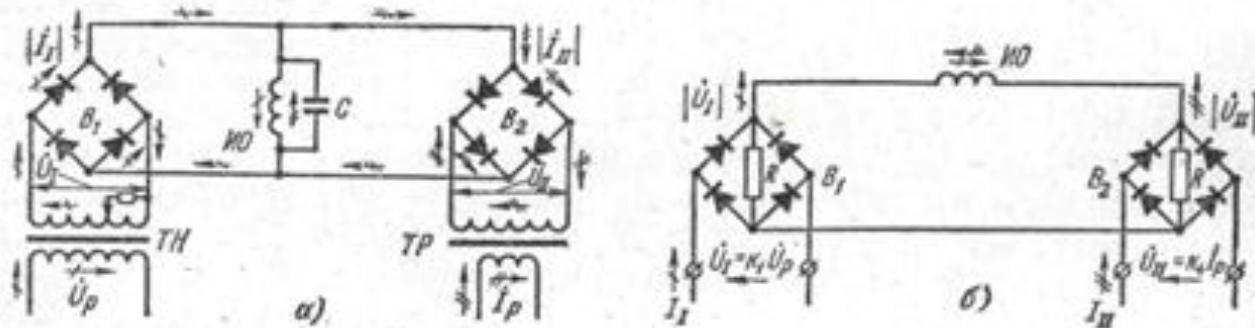


Рис. 11-9. Ненаправленное реле сопротивления, выполненное с помощью схем сравнения.

а — на балансе токов; б — на балансе напряжений.

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p.$$

$$z_p = z_{c.p} = \frac{|\dot{U}_p|}{|\dot{I}_p|} = \frac{k_4}{k_1} = |z'| = \text{const.}$$

$$z_{c.p} = \frac{k_4}{k_1} = \frac{|\dot{U}_0|}{|k_1 \dot{I}_p|}.$$

# 13. Дистанционная защита

## Направленное реле сопротивления с круговой характеристикой

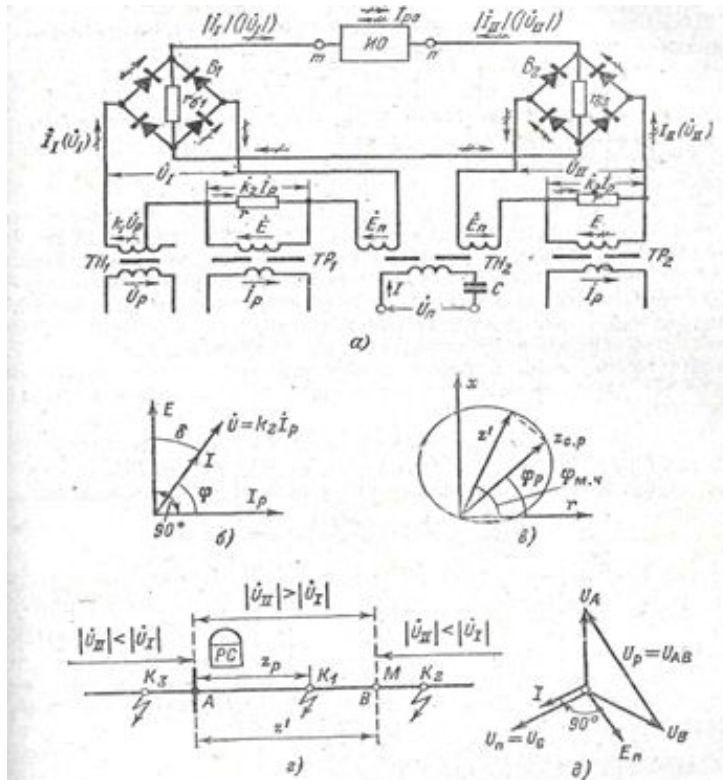


Рис. 11-10. Направленное реле сопротивления со схемой сравнения на балансе напряжений.  
 а — схема реле; б — векторная диаграмма трансформатора; в — характеристика реле;  $\varphi_{м.ч}$  — угол между  $z$  и осью  $z$ ; г — схема, поясняющая работу реле; д — векторная диаграмма ТН.

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_3 \dot{I}_p$$

## Направленное реле сопротивления с эллиптической (овальной) характеристикой

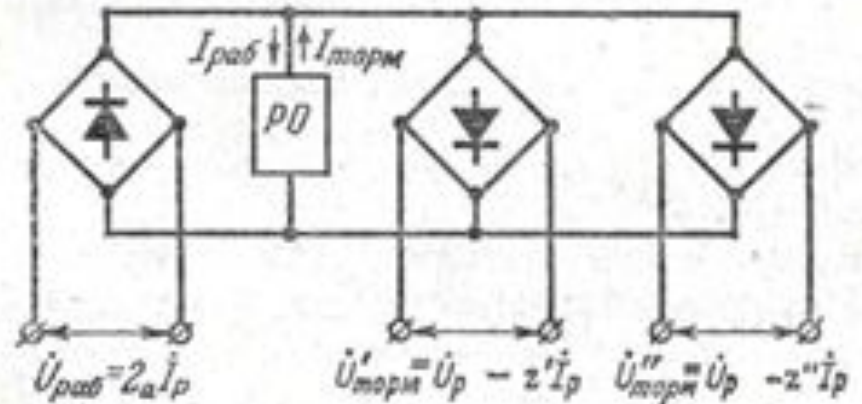
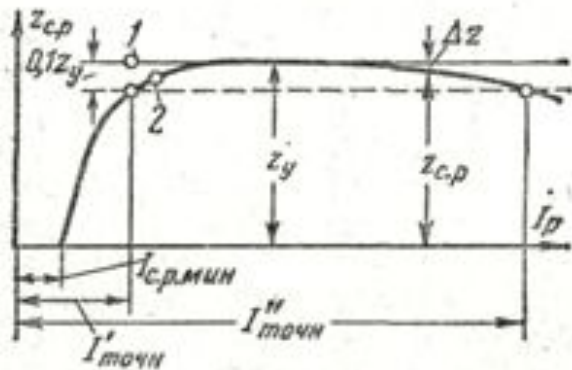


Рис. 11-11. Направленное реле сопротивления с эллиптической характеристикой, на сравнении трех напряжений.

# 13. Дистанционная защита

Точность работы реле сопротивления и ток точной работы



$$\Delta z = z_y - z_{c.p.}$$

*Каждое реле сопротивления может работать с достаточной точностью только в определенном диапазоне токов  $I_p$ .*

*Принято, что для дистанционных реле погрешность  $\Delta z_p$  не должна превышать 10%.*

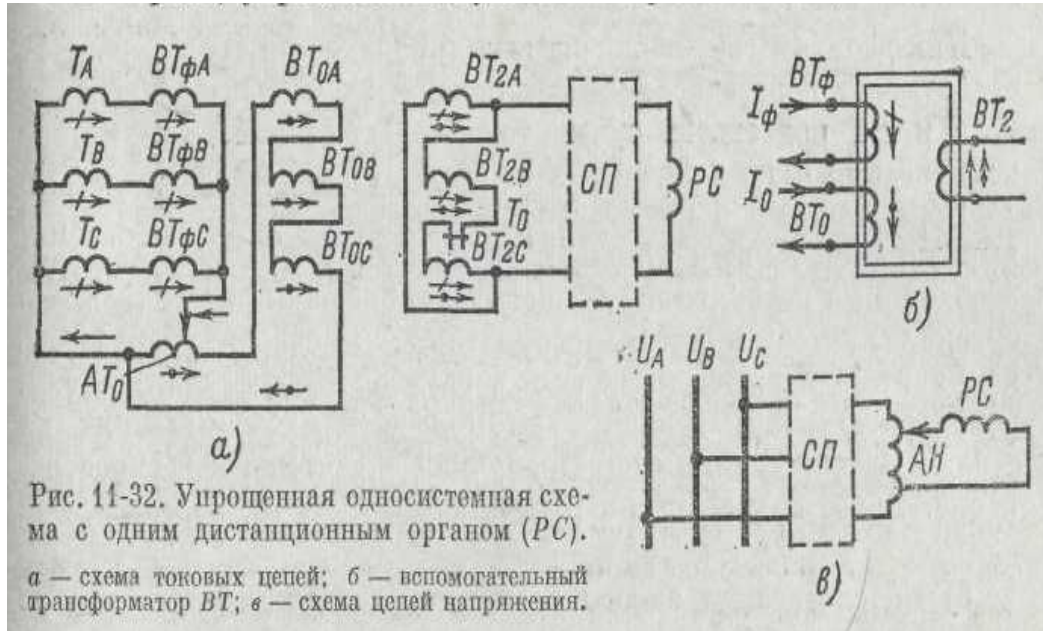
Рис. 11-24. Зависимость  $z_{c.p.}$  от тока в реле.

1 — идеальная характеристика; 2 — действительная характеристика.

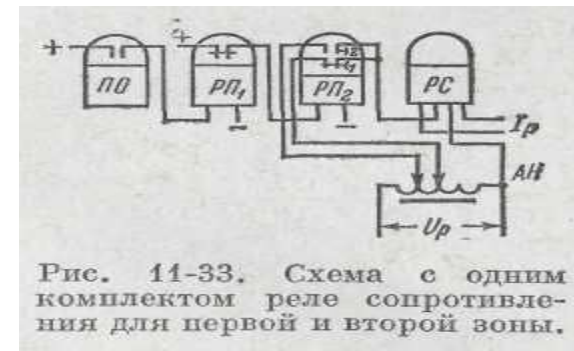


# 13. Дистанционная защита

## Упрощенные схемы дистанционных органов



$$I_2 = \frac{i_\phi + k3i_0}{n_{BT}}$$



# 13. Дистанционная защита

## *Причины искажающие работу дистанционных органов*

На работу дистанционных органов оказывают воздействие некоторые факторы, искажающие величины  $z_p$  так, что при этом нарушается пропорциональность между  $z_p$  и расстоянием  $l_k$  до места к.з. Эти искажения необходимо учитывать при выборе уставок во избежание нарушения селективности и недопустимого сокращения зон действия защиты.

*▣ Влияние переходного сопротивления*

*▣ Влияние токов подпитки от промежуточных подстанций*

*▣ Влияние разветвления при сочетании одинарной линии с параллельными*

*▣ Влияние погрешности измерительных трансформаторов*

## *Пусковые органы*

1. Токовые пусковые реле
2. Пусковые реле сопротивления
3. Ненаправленные пусковые реле сопротивления
4. Реле сопротивления с блокировкой, ограничивающей действие защиты при перегрузке

# 13. Дистанционная защита

## Схемы дистанционных защит

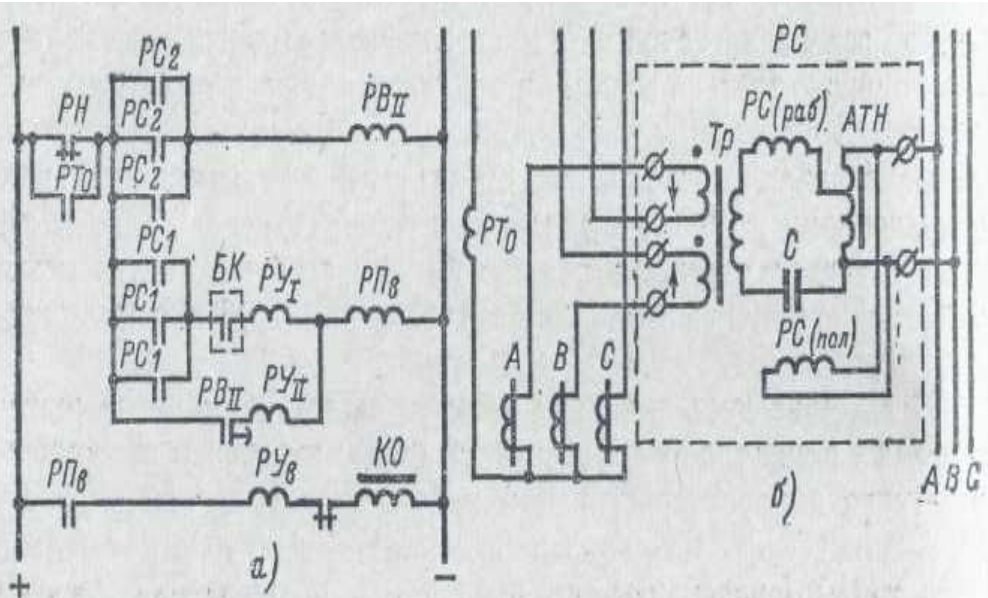


Рис. 11-41. Трехсистемная двухступенчатая дистанционная защита.  
а — схема оперативных цепей; б — схема цепей переменного тока одного реле.

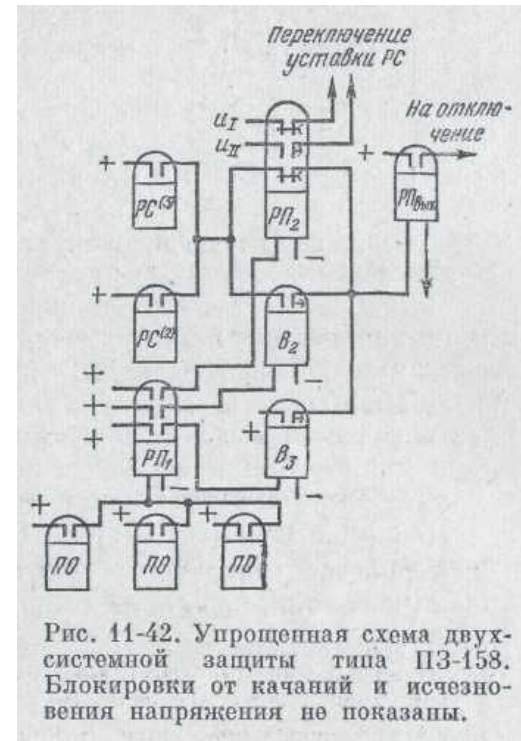


Рис. 11-42. Упрощенная схема двухсистемной защиты типа ПЗ-158. Блокировки от качаний и исчезновения напряжения не показаны.



# 13. Дистанционная защита

## Схемы защит на полупроводниках

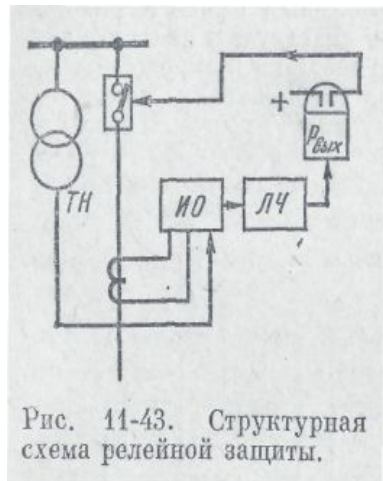


Рис. 11-43. Структурная схема релейной защиты.

### Схема, осуществляющая операцию ИЛИ

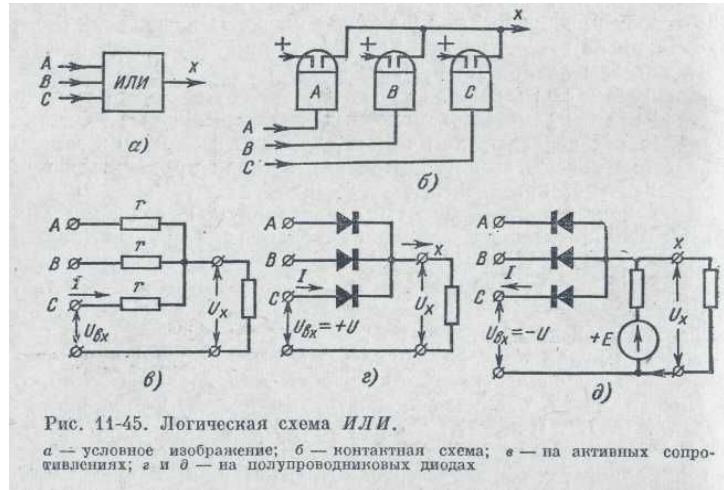


Рис. 11-45. Логическая схема ИЛИ.  
а — условное изображение; б — контактная схема; в — на активных сопротивлениях; г и д — на полупроводниковых диодах

### Схема, осуществляющая операцию И

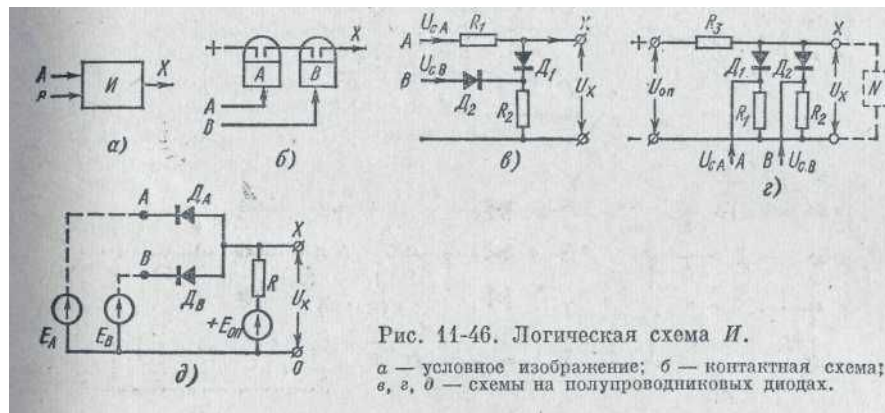


Рис. 11-46. Логическая схема И.  
а — условное изображение; б — контактная схема; в, г, д — схемы на полупроводниковых диодах.

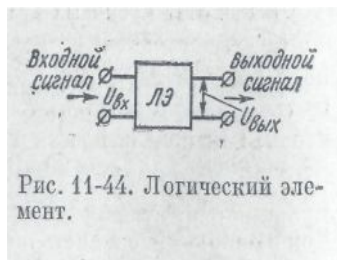


Рис. 11-44. Логический элемент.

### Схема, осуществляющая операцию НЕ

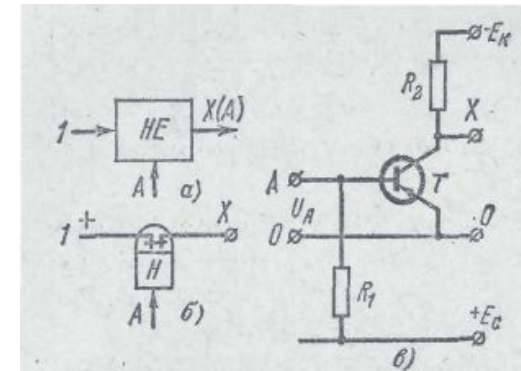


Рис. 11-47. Логическая схема НЕ.  
а — условное изображение; б — контактная схема; в — схема на транзисторе.

# 13. Дистанционная защита

## Выбор уставок

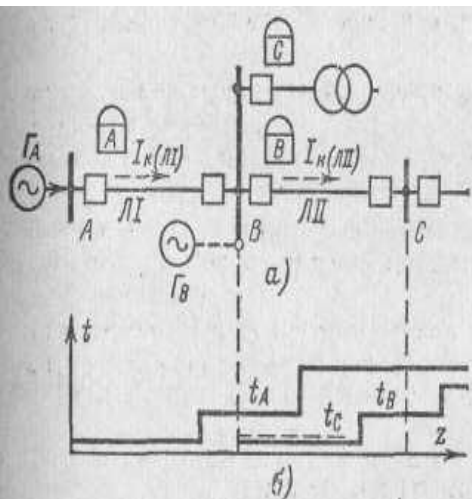


Рис. 11-56. Участок сети, защищаемый защитой А (а), и изображение характеристик выдержек времени дистанционных защит в осях  $z, t$  (б).

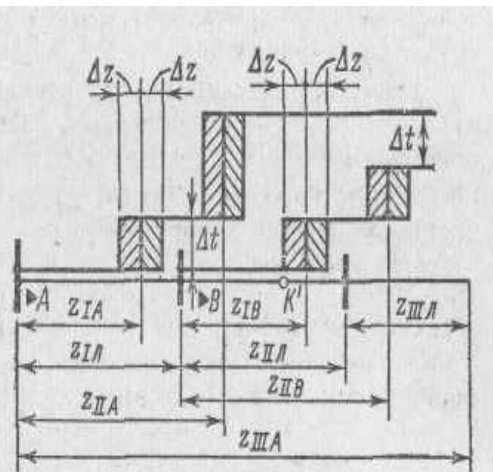


Рис. 11-57. Согласование характеристик дистанционных защит А и В двух смежных линий (рис. 11-56).

### Первая зона защиты.

Сопротивление срабатывания первой зоны  $z_{IA}$  выбирается из условия, чтобы дистанционный орган этой зоны не мог сработать за пределами защищаемой линии ЛІ

$$z_{IA} = k_1 z_{IL}$$

### Вторая зона

Выдержка времени выбирается равной:

$$t_{IIA} = t_{IB} + \Delta t$$

При нескольких источниках питания  $z_{IIA}$  выбирается с учетом токораспределения по выражению

$$z_{IIA} = k_{II} (z_{IL} + k_T k_I z_{IB}), \quad k_T = \frac{I_{н(ЛІІ)}}{I_{н(ЛІ)}}$$

$$k_q = \frac{z_{IIA}}{z_{I(ЛІ)}} \geq 1,25.$$

### Третья зона

Третья зона должна резервировать защиты присоединений, отходящих от шин подстанции В.

$$I_{с.з} = \frac{k_{II} k_3 I_{рзб. макс}}{k_{взз}}$$

$$I_{с.з} = k_{II} I_{неп. ф}^{(2)}$$

# 14. Высокочастотные защиты

## Назначение и виды высокочастотных защит

Высокочастотные (в. ч.) защиты являются быстродействующими и предназначаются для линий средней и большой длины. Они применяются в тех случаях, когда по условиям устойчивости или другим причинам требуется быстрое двустороннее отключение к. з. в любой точке защищаемой линии.

По принципу своего действия в. ч. защиты не реагируют на к. з. вне защищаемой линии и поэтому, так же как и дифференциальные защиты, не имеют выдержки времени. В настоящее время применяются два вида в. ч. защит:

- Пнаправленные защиты с высокочастотной блокировкой** (т. е. с блокировкой токами высокой частоты), основанные на сравнении направлений мощности к. з. по концам защищаемой линии:
- Пдифференциально-фазные в. ч. защиты**, основанные на сравнении фаз токов по концам линии.

# 14. Высокочастотные защиты

## Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой

Направленная в. ч. защита реагирует на направление (или знак) мощности к. з. по концам защищаемой линии.

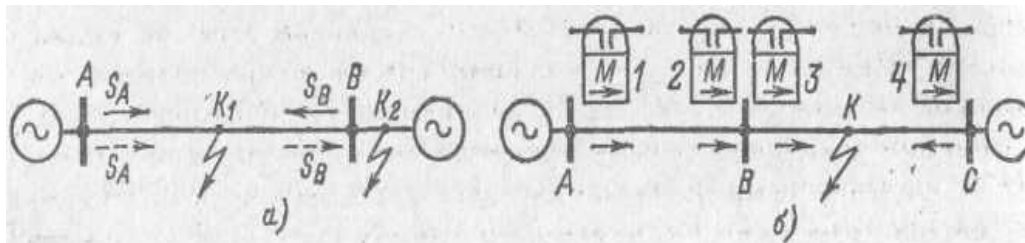


Рис. 12-1. Направление мощности по концам линии при к. з.

а — на линии ( $K_1$ ) и за ее пределами ( $K_2$ ); б — сравнение направления мощности по концам линии с помощью реле направления мощности  $M$ .

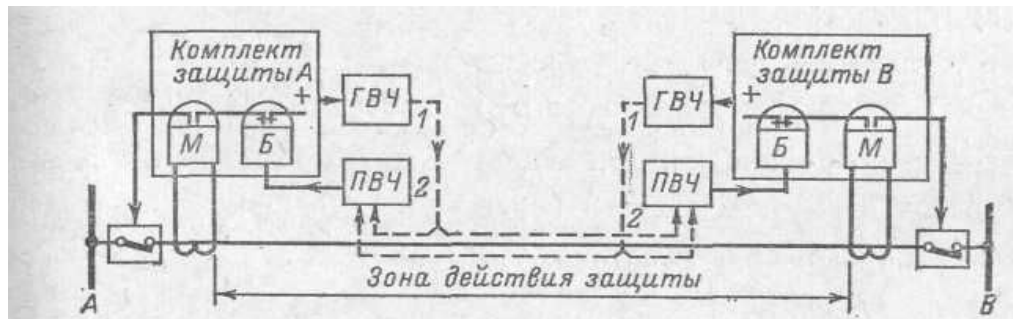


Рис. 12-2. Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой.

$M$  — реле мощности;  $Б$  — блокирующее реле;  $ГВЧ$  — генератор токов высокой частоты;  $ПВЧ$  — приемник токов высокой частоты.

# 14. Высокочастотные защиты

## Высокочастотная часть защиты

### 1. Канал токов высокой частоты

**Высокочастотным (в. ч.) каналом** называют путь, по которому замыкаются токи высокой частоты, используемые для блокировки защиты.

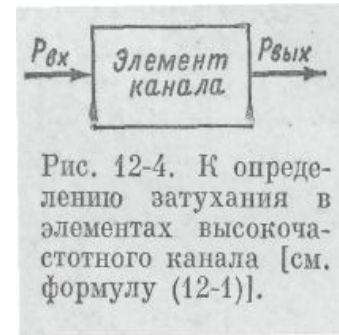
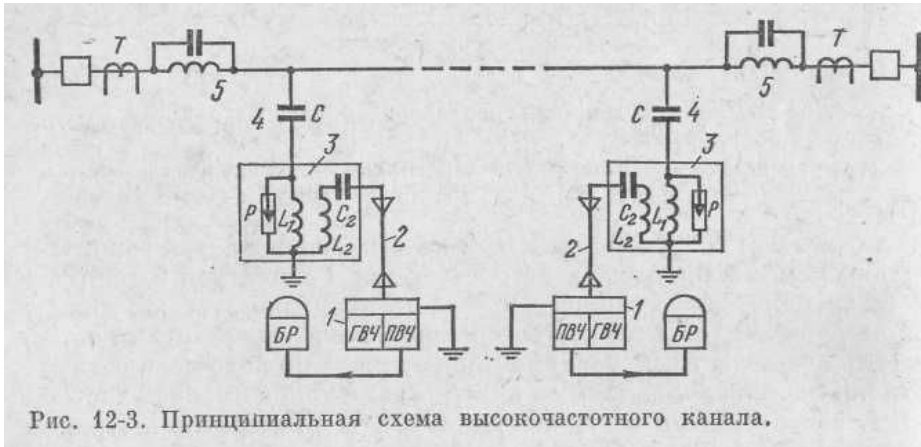


Рис. 12-4. К определению затухания в элементах высокочастотного канала [см. формулу (12-1)].

Потери энергии, происходящие при передаче в. ч. сигнала, называются **затуханием** и характеризуются величиной:

$$b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}},$$

где  $P_{\text{ВХ}}$  — мощность на входе рассматриваемого элемента канала (в начале элемента);

$P_{\text{ВЫХ}}$  — мощность, получаемая на его выходе (в конце элемента).

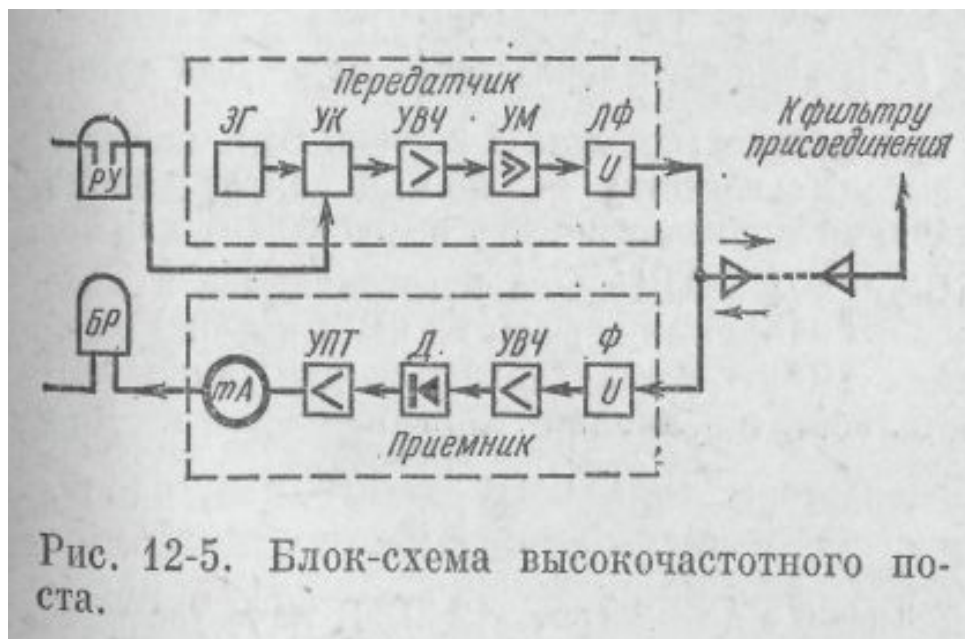


# 14. Высокочастотные защиты

## Высокочастотная часть защиты

### 2. Высокочастотный пост

**Высокочастотным (в. ч.) каналом** называют путь, по которому замыкаются токи высокой частоты, используемые для блокировки защиты.



# 14. Высокочастотные защиты

## Высокочастотная часть защиты

### 3. Элементы высокочастотного канала

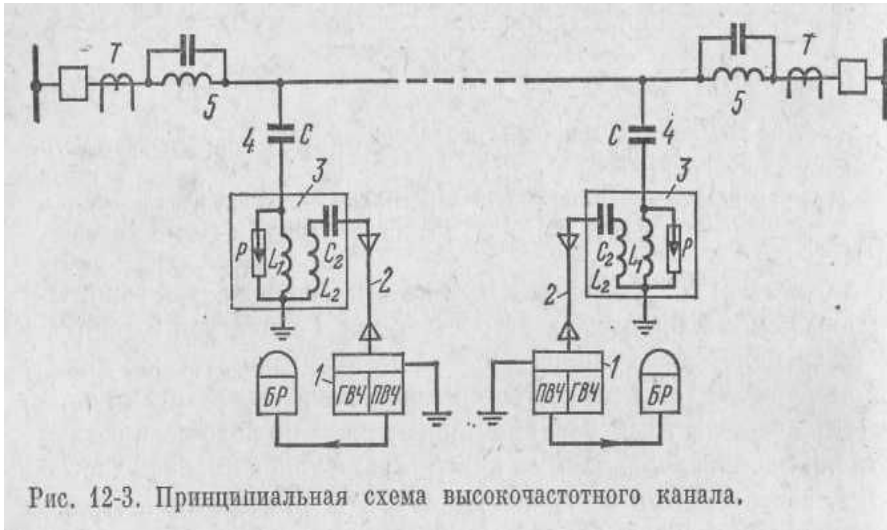


Рис. 12-3. Принципиальная схема высокочастотного канала.

- **Конденсатор связи** (4) предназначен для присоединения поста к линии высокого напряжения.
- **Высокочастотный кабель** (2)
- **Фильтр присоединения** (3) согласовывает входное сопротивление кабеля с входным сопротивлением линии
- **Заградитель** (5) преграждает выход токов высокой частоты за пределы линии

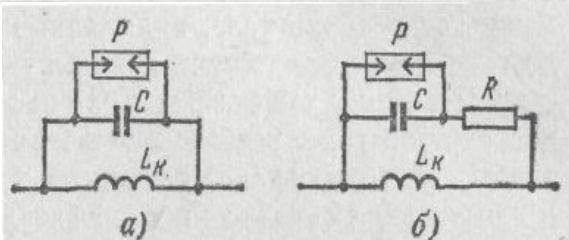


Рис. 12-7. Высокочастотный заградитель.  
а — резонансный (одночастотный); б — широкополосный.



# 14. Высокочастотные защиты

## Направленная защита с высокочастотной блокировкой

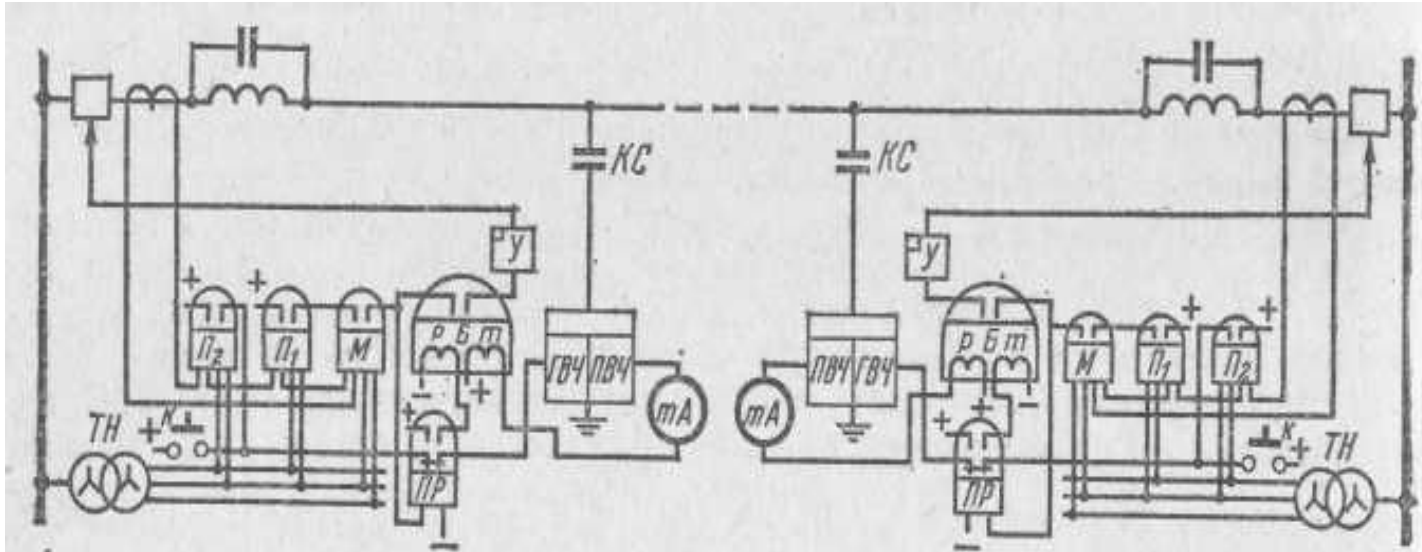


Рис. 12-9. Упрощенная схема направленной защиты с высокочастотной блокировкой (р — рабочая и т — тормозная обмотки блокирующего реле Б).

Защита состоит из трех основных элементов: пускового органа, органа направления мощности и блокирующего реле Б.

Токовые реле отстраиваются от нагрузки по формуле:

$$I_{с.з} = \frac{k_n}{k_{воз}} I_{н. макс.}$$

А реле сопротивления — по формуле:

$$z_{с.з} = \frac{1}{k_n k_{воз}} z_{раб. мин.}$$

# 14. Высокочастотные защиты

## Направленная защита с высокочастотной блокировкой Разновидности защит и схем

- **Направленная защита с высокочастотной блокировкой**
- **Дистанционная защита в сочетании с высокочастотной блокировкой**

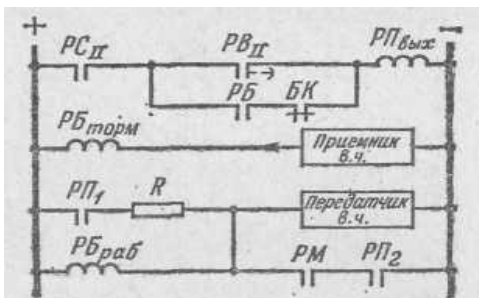


Рис. 12-11. Принципиальная схема дистанционной защиты в сочетании с высокочастотной блокировкой (для одной фазы).

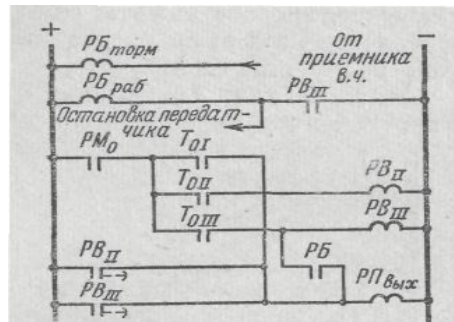


Рис. 12-12. Принципиальная схема направленной защиты нулевой последовательности в сочетании с высокочастотной блокировкой.

- **Фильтровая направленная защита с высокочастотной блокировкой**

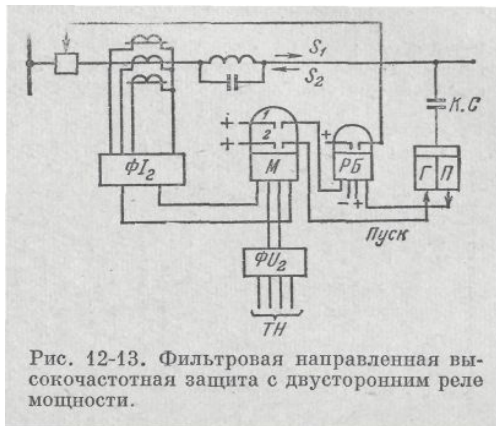


Рис. 12-13. Фильтровая направленная высокочастотная защита с двухсторонним реле мощности.

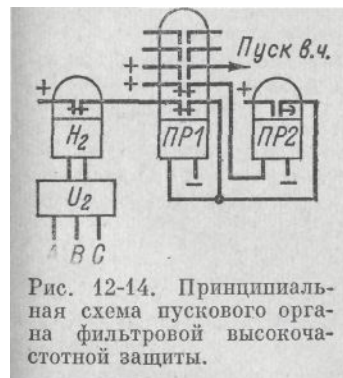


Рис. 12-14. Принципиальная схема пускового органа фильтровой высокочастотной защиты.

# 14. Высокочастотные защиты

## Дифференциально-фазная высокочастотная защита

*Дифференциально-фазная высокочастотная защита* основана на сравнении фаз тока по концам защищаемой линии.

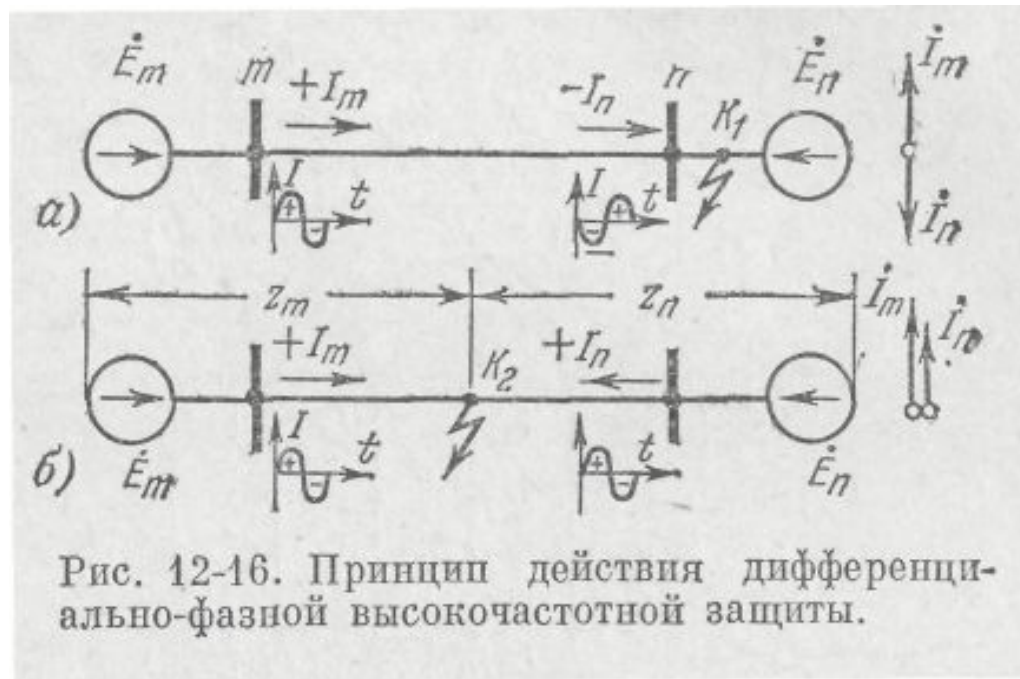


Рис. 12-16. Принцип действия дифференциально-фазной высокочастотной защиты.

# 14. Высокочастотные защиты

## Дифференциально-фазная высокочастотная защита

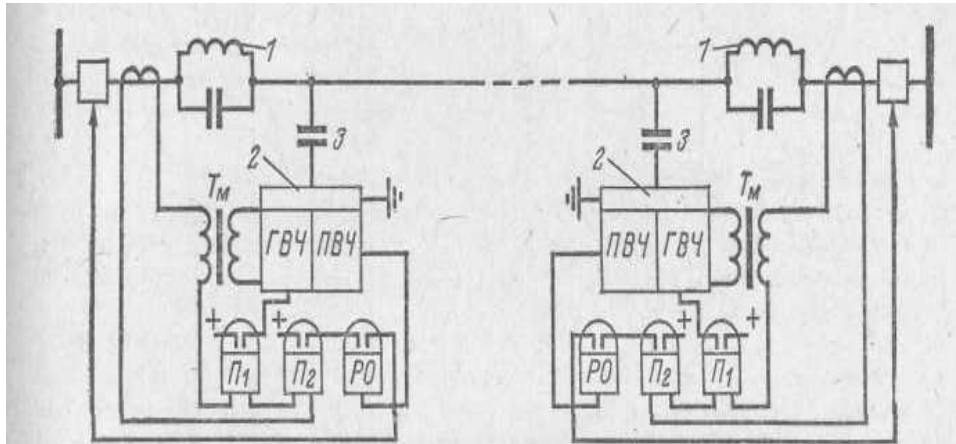


Рис. 12-17. Упрощенная принципиальная схема дифференциально-фазной высокочастотной защиты.

**Дифференциально-фазная защита состоит** из трех основных элементов:

**Пускового органа  $1T_1$  и  $\Pi_2$** , пускающего передатчик и разрешающего действовать защите при к. з.;

**Органа манипуляции**, управляющего (с помощью  $T_{\text{в}}$ ) передатчиком токов высокой частоты в зависимости от знака сравниваемых токов, и органа сравнения фаз токов, действующего на отключение при совпадении фаз токов, проходящих по концам линии.

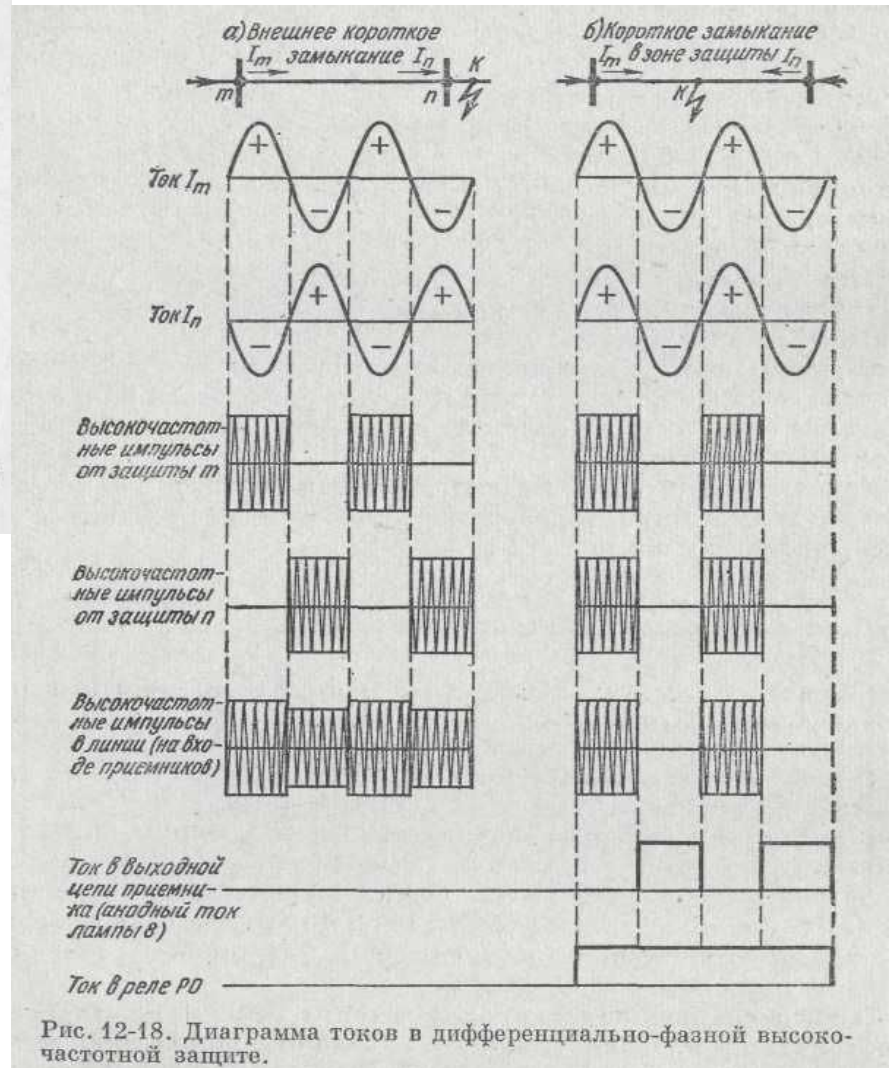


Рис. 12-18. Диаграмма токов в дифференциально-фазной высокочастотной защите.