



## Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем



*Направление подготовки  
140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»*

*Квалификация выпускника: бакалавр*



Презентации разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области»



## Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем



Тема лекции:

*Токовые защиты.*

*Часть 2.*

*Реле направления мощности*

Канд. техн. наук КОЗЛОВ А.Н.



Презентации разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области»

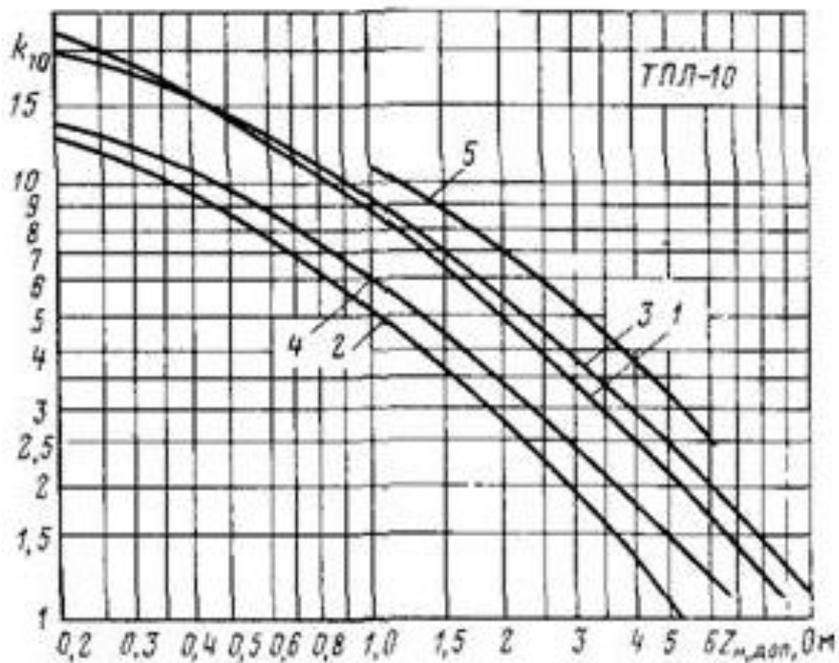
## Токовые защиты

### Выбор трансформаторов тока и определение их допустимой нагрузки в схемах релейной защиты

*Точность работы трансформаторов тока, предназначенных для релейной защиты, характеризуется полной погрешностью  $\varepsilon$ .*

*Она определяется, в частности, величиной вторичной нагрузки  $Z_{н.расч}$ , которая для каждой схемы соединения трансформаторов тока и реле зависит от вида и места короткого замыкания.*

*С увеличением вторичной нагрузки погрешность возрастает, но она не должна превышать 10 %. Этим требованием и ограничивается допустимая нагрузка  $Z_{н.доп}$  трансформатора тока.*



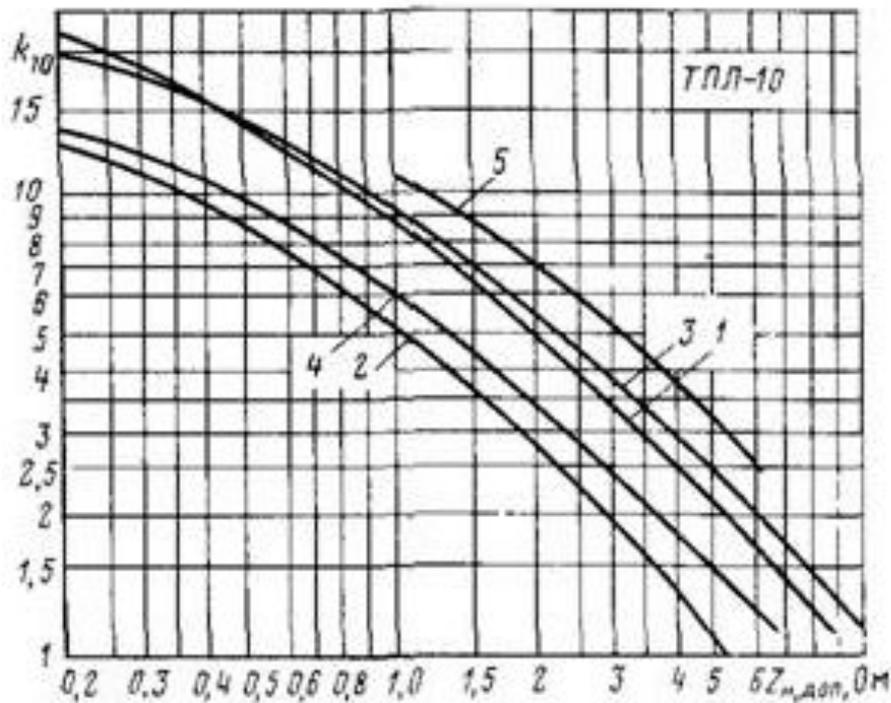
Кривые предельной кратности  
(десятипроцентной  
погрешности)  
трансформатора тока ТПЛ-10

Полная погрешность связана с предельной кратностью  $k_{10}$ , представляющей собой наибольшее отношение расчетного первичного тока  $I_{1.расч}$  к номинальному первичному току трансформатора тока  $I_{1.ном}$ , при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает  $\varepsilon = 10\%$ . Таким образом, выбор трансформаторов тока для релейной защиты сводится к определению расчетного первичного тока  $I_{1.расч}$  и максимальной допустимой вторичной нагрузки  $Z_{н.доп.}$ , при которых полная погрешность не превышает 10%.

Для этой цели служат кривые предельной кратности (см. рисунок), представляющие собой зависимость сопротивления нагрузки  $Z_{н.}$  от кратности первичного тока

$$k_{10} = I_{1.расч} / I_{1.ном} \quad \text{при } \varepsilon = 10\%.$$

Значения  $I_{1.расч}$  для различных защит даны в таблице 1:



$$k_{10} = I_{1,расч} / I_{1,ном} \quad \text{при } \varepsilon = 10 \%$$

Значения  $I_{1,расч}$  для различных защит даны в таблице 1:

Таблица 1

Наименование защиты	Расчетный первичный ток $I_{1,расч}$
Токовая отсечка и максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени	$1,1I_{с.з}$
Максимальная токовая защита с ограниченно зависимой выдержкой времени	$1,1I_{сог}^*$ , где $I_{сог}^* = I_{к.вн\max}^{(3)}$
Токовая направленная защита	$I_{к.вн\max}^{(3)}$
Продольная дифференциальная защита	$I_{к.вн\max}^{(3)}$
В защитах на переменном оперативном токе для дешунтируемых электромагнитов отключения УАТ	$(1,4...1,8)I_{с\ УАТ} K_1 / k_{сх}^{(3)}$ , где $I_{с\ УАТ}$ — ток срабатывания электромагнита, равный 1,5–3,0 А. Если для этой цели использовано реле РТМ, то $I_{с\ УАТ} = 5$ А

Порядок выбора трансформатора тока следующий:

- а) определяют максимальный рабочий ток защищаемого элемента;
- б) по максимальному рабочему току и номинальному напряжению защищаемого элемента выбирают трансформатор тока с соответствующим номинальным током  $I_{1.ном}$ ;
- в) определяют расчетный первичный ток  $I_{1.расч}$ , пользуясь таблицей 1;
- г) определяют предельную кратность  $k_{10} = I_{1.расч} / I_{1.ном}$ ;
- д) по соответствующим кривым предельной кратности для выбранного трансформатора тока находят допустимое значение вторичной нагрузки  $Z_{н.доп.}$ . Порядок определения показан на рисунке пунктирной линией;
- е) определяют действительную расчетную нагрузку  $Z_{н.расч.}$ , которая должна быть меньше (или равняться) допустимой, т. е.  $Z_{н.расч.} \leq Z_{н.доп.}$

Ниже, в таблице 2, приведены расчетные формулы максимальной нагрузки  $Z_{н.расч.}$ , которыми следует пользоваться при выборе трансформаторов тока.

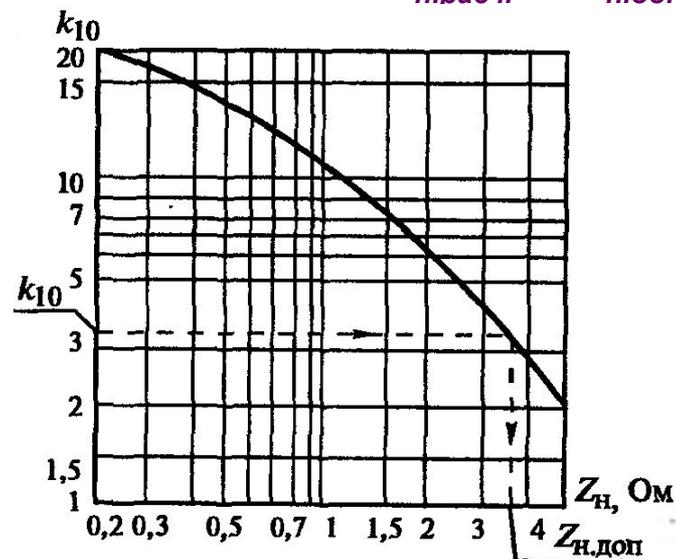
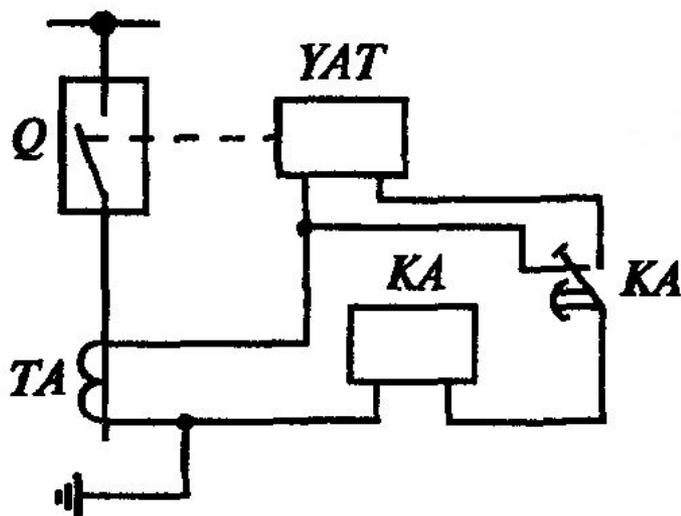


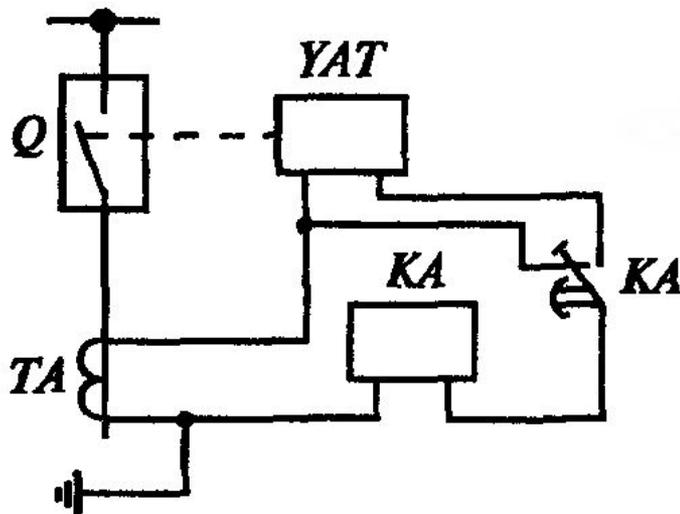
Таблица 2

Схемы соединения трансформаторов тока и реле	Место повреждения и расчетный вид КЗ	Расчетные формулы
Трехфазная схема соединения в полную звезду	а) $K^{(1)}$ в сети с заземленной нейтралью ( $K_1^{(m)}$ ) б) $K^{(2)}$ ( $K^{(3)}$ ) в сети с изолированной нейтралью ( $K_1^{(m)}$ )	а) $Z_{н.рсч} = Z_p + 2R_{пр} + R_{конт}$ б) $Z_{н.рсч} = Z_p + R_{пр} + R_{конт}$
Двухфазная двухрелейная схема соединения в неполную звезду	а) $K^{(2)}$ при повреждении на линии ( $K_1^{(m)}$ ) б) $K^{(2)}$ при повреждении за трансформатором $Y/\Delta - 11$ ( $K_2^{(m)}$ )	а) $Z_{н.рсч} = Z_p + 2R_{пр} + R_{конт}$ б) $Z_{н.рсч} = Z_p + 3R_{пр} + R_{конт}$
Двухфазная трехрелейная схема соединения в неполную звезду	$K^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta - 11$ ( $K_2^{(m)}$ )	$Z_{н.рсч} = 3(Z_p + R_{пр}) + R_{конт}$
Трехфазная схема соединения ТА в полный треугольник, а реле в полную звезду	$K^{(3)}$ $K^{(2)}$ на линии ( $K_1^{(m)}$ ), а также $K^{(2)}$ за трансформатором $Y/\Delta - 11$ ( $K_2^{(m)}$ )	$Z_{н.рсч} = 3(Z_p + R_{пр}) + R_{конт}$
Двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз)	$K^{(2)}$ на линии между фазами А и С ( $K_1^{(m)}$ )	$Z_{н.рсч} = 2(Z_p + 2R_{пр}) + R_{конт}$

*В системах электроснабжения для выполнения защиты часто используют переменный оперативный ток, источником которого является трансформатор тока ТА. Защита выполняется по схеме с дешунтированием электромагнита отключения УАТ:*



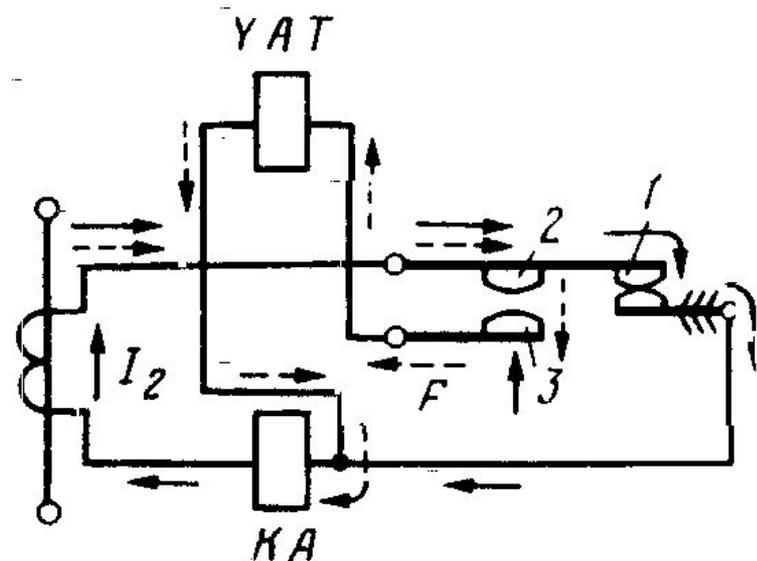
*В такой схеме трансформатор тока используется не только как измерительный, но и для питания электромагнита отключения выключателя. Схема выполняется так, что электромагнит отключения УАТ подключается к трансформатору тока ТА только при срабатывании защиты. При этом для предотвращения недопустимого размыкания цепи трансформатора тока используется реле КА с переключающим без размыкания цепи контактом, например, реле РТ-85.*



*В процессе переключения сначала электромагнит отключения YAT выключателя Q подключается к трансформатору тока (замыкается правый контакт КА), а затем он дешунтируется (размыкается левый контакт). Выключатель Q отключается, если ток в электромагните отключения окажется достаточным для его действия.*

Контактная система реле РТ-85 и РТ-90, предназначенная для дешунтирования электромагнита отключения фаз и разрыва цепи тока:

--- → — путь тока после замыкания контактов 2 и 3; → — путь тока до замыкания контактов 2 и 3



Таким образом, в такой схеме трансформатор тока работает в двух режимах:

- до срабатывания защиты в режиме источника тока. При этом нагрузкой ТА является сопротивление обмотки реле, сопротивление проводов и контактов, поэтому при срабатывании защиты от ТА требуется только мощность, необходимая для действия реле, и полная погрешность не должна превышать  $\varepsilon = 10\%$ .

- после срабатывания защиты - в режиме, близком к режиму отдачи максимальной мощности. Срабатывая, защита дешунтирует электромагнит отключения и его обмотка оказывается последовательно включенной с обмоткой реле, в связи с чем нагрузка трансформатора тока значительно возрастает, его вторичный ток уменьшается.

В этих условиях трансформатор должен обеспечить отдачу мощности, необходимой для действия электромагнита отключения, а реле не должно возвращаться в исходное состояние и его контакты способны надежно дешунтировать цепь электромагнита отключения.

## Токовые защиты

### Токовые защиты на электромеханической элементной базе

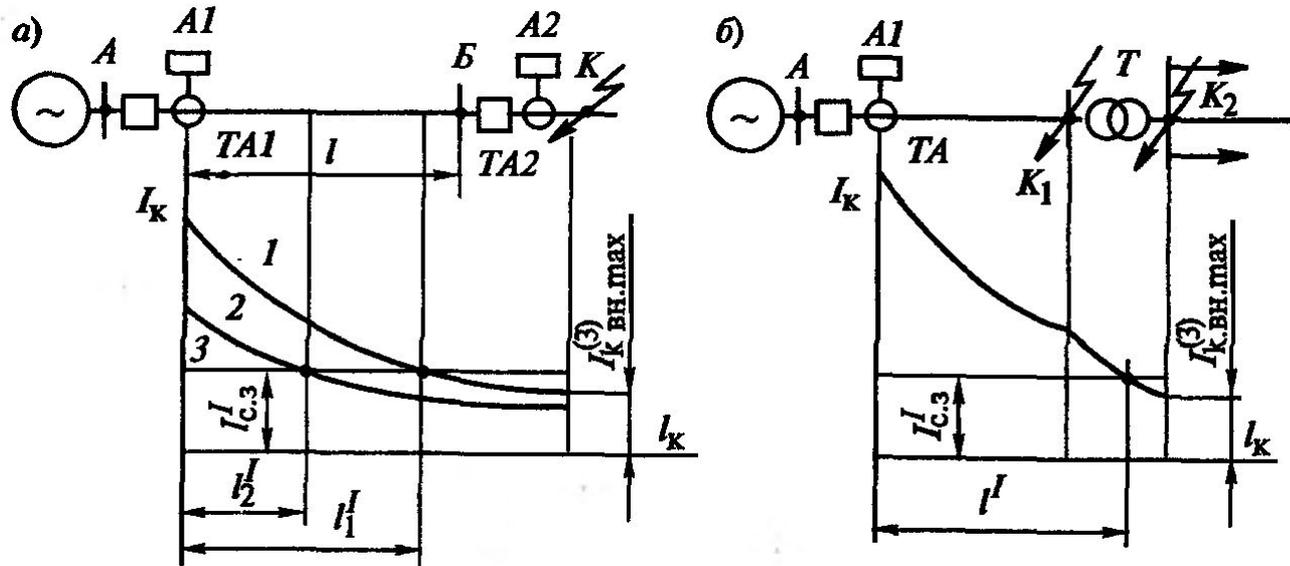
*В общем случае токовые защиты содержат три ступени, являются относительно селективными и могут осуществлять как ближнее, так и дальнее резервирование.*

*Быстродействующая **первая** ступень защиты - токовая отсечка без выдержки времени - имеет только измерительный орган, а вторая и третья ступени - токовая отсечка с выдержкой времени и максимальная токовая защита - содержат два органа: измерительный и выдержки времени.*

*Вторую ступень выполняют с независимой от тока выдержкой времени, а третью - с независимой и с зависимой.*

# 1. Первая ступень токовой защиты от междуфазных: коротких замыканий – токовая отсечка без выдержки времени

Селективное действие первой ступени токовой защиты (чаще всего ее называют либо мгновенной токовой отсечкой, либо просто отсечкой) достигается тем, что ее ток срабатывания принимается большим максимального тока короткого замыкания, проходящего через защиту при повреждении вне защищаемого элемента.

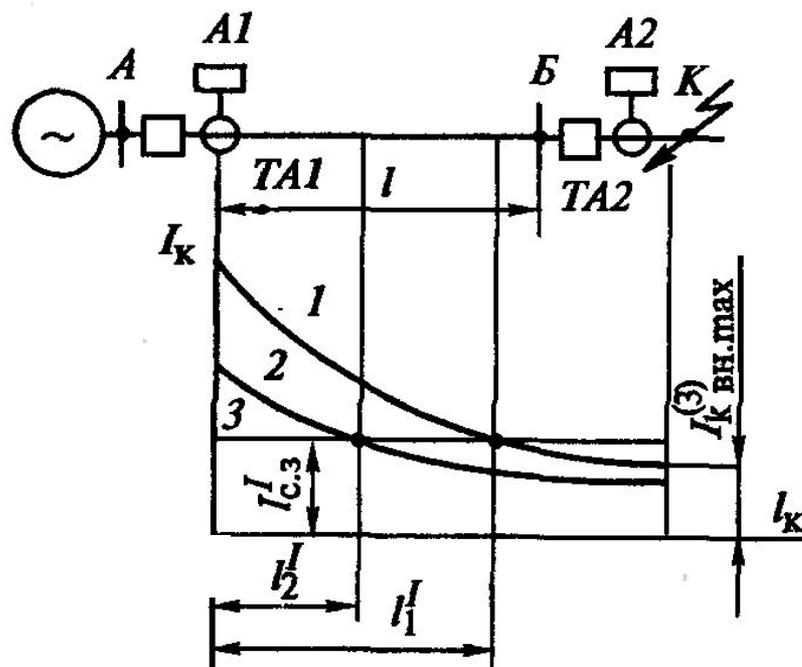


$$I_{с.з}^I = K_{отс}^I I_{к.вн.мах}^{(3)}$$

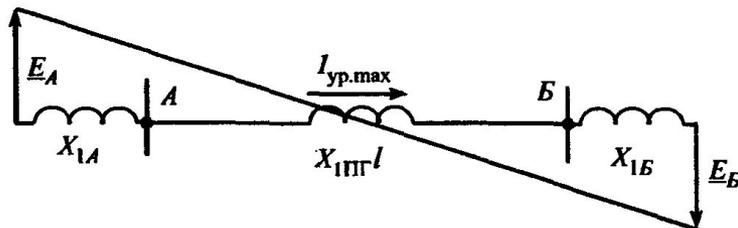
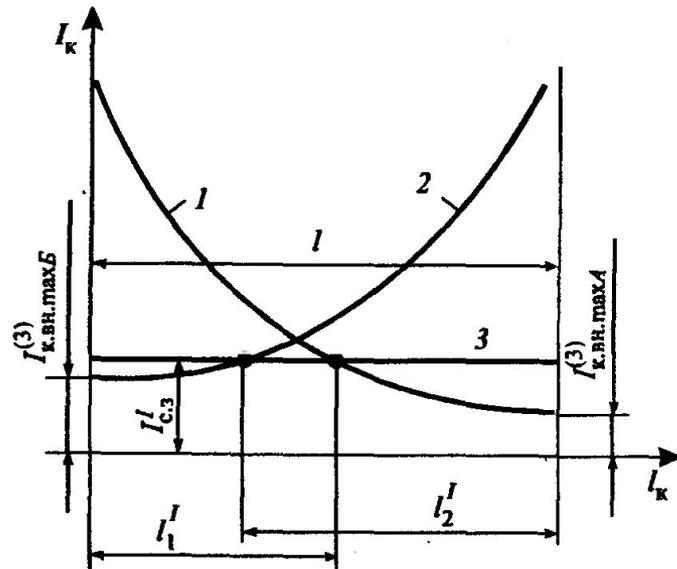
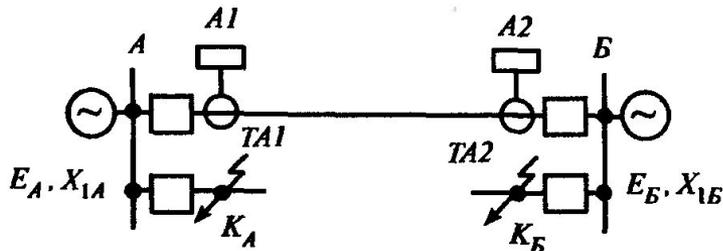
$$I_{с.р}^I = k_{отс}^I k_{сх}^{(3)} I_{к.вн.мах}^{(3)} / K_I.$$

Отсечка защищает не всю линию, а только некоторую ее часть. Как следует из указанных графиков, защищаемая зона тем больше, чем меньше ток срабатывания и чем больше крутизна кривой изменения тока КЗ, которая определяется режимом работы и видом короткого замыкания. Поэтому в зависимости от режима работы и вида короткого замыкания защищаемая зона отсечки изменяется.

Чувствительность защиты определяется длиной защищаемой зоны  $L$  и коэффициентом чувствительности  $k_{\text{ч}}$ . При КЗ у места установки защиты в минимальном режиме  $k_{\text{ч}} \geq 2$ .



## Выбор тока срабатывания токовой отсечки линии с двусторонним питанием.



Токовые отсечки используют и на линиях с двусторонним питанием. В этом случае они устанавливаются с обеих сторон защищаемой линии. Токи срабатывания отсечек должны быть выбраны таким образом, чтобы при внешних коротких замыканиях (точки  $K_A$  и  $K_B$ ) защиты не действовали:

$$I_{с.з}^I = I_{с.з1}^I = I_{с.з2}^I > I_{к.вн \max A}^{(3)}$$

$$I_{с.з}^I = I_{с.з1}^I = I_{с.з2}^I > I_{к.вн \max B}^{(3)}$$

первое условие:

$$I_{с.з}^I = I_{с.з1}^I = I_{с.з2}^I \geq k_{отс}^I I_{к.вн \max B}^{(3)}$$

второе условие:

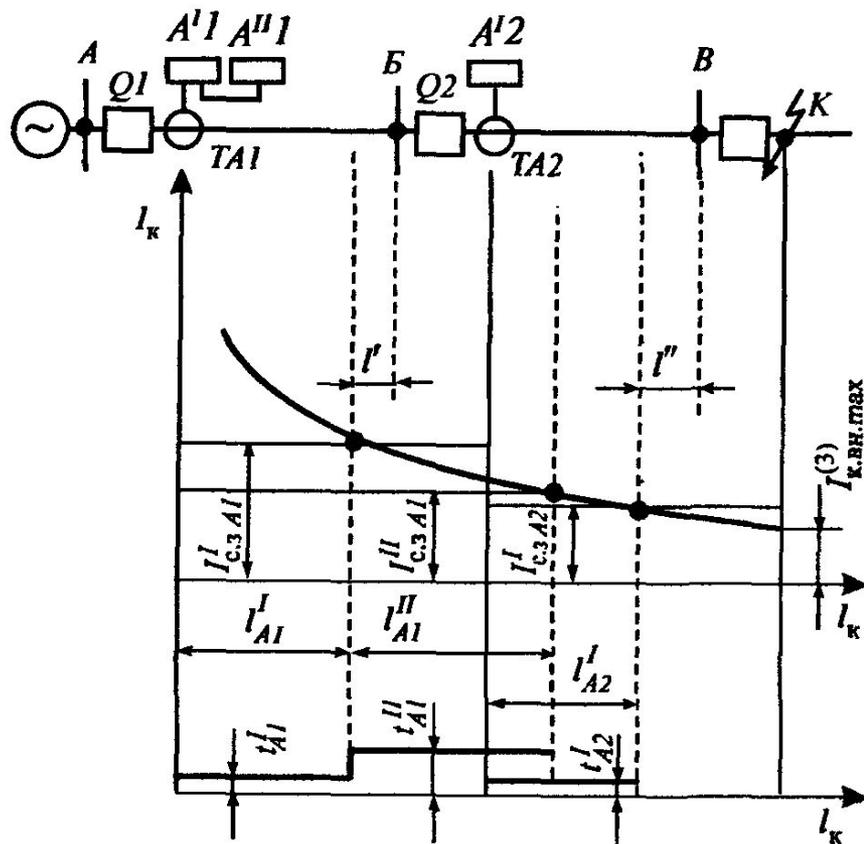
$$I_{с.з}^I = I_{с.з1}^I = I_{с.з2}^I \geq k_{отс}^I I_{ур. \max}$$

(отстройка от броска уравнительных токов, возникающих при качаниях генераторов)

$$I_{ур \max} = 2E / (X_{1A} + X_{1лг l} + X_{1B})$$

## 2. Вторая ступень токовой защиты от междуфазных коротких замыканий - токовая отсечка с выдержкой времени

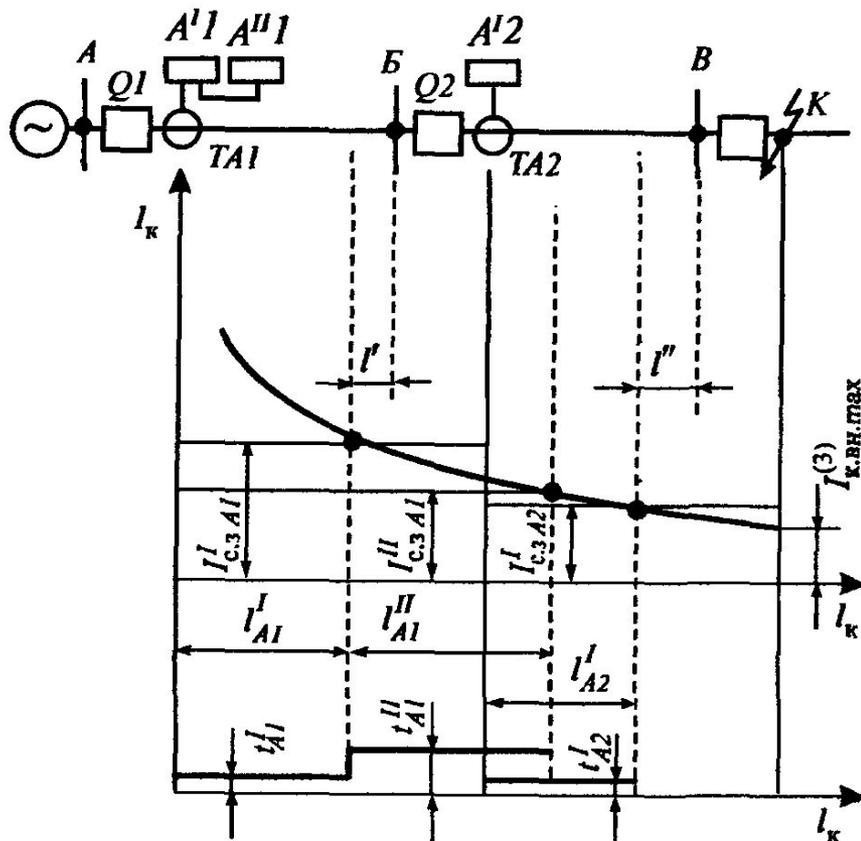
Основной недостаток токовой отсечки без выдержки времени состоит в том, что она защищает только часть линии. Участок в конце линии, за пределами зоны  $L$ , остается незащищенным.



В связи с этим возникает необходимость иметь вторую ступень токовой защиты. Вместе с первой ступенью она должна обеспечить защиту всей линии и шин приемной подстанции.

Для настройки второй ступени защиты линии АБ достаточно, чтобы ток срабатывания второй ступени был больше максимального тока КЗ, проходящего по линии АБ при повреждении в конце защищаемой зоны мгновенной отсечки линии БВ. Этот ток, как следует из рисунка, равен току срабатывания токовой отсечки первой ступени линии БВ:

$$I^II_{c.3A1} = k^II_{отс} I^I_{c.3A2} \quad k^II_{отс} = 1,1 \dots 1,05.$$



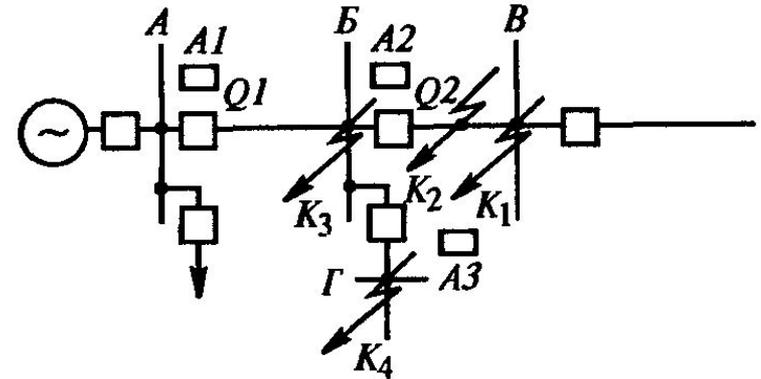
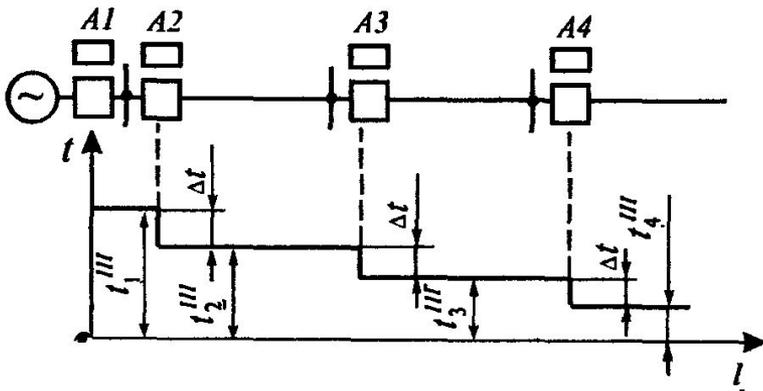
Так как вторая ступень  $A''1$  является относительно селективной, в ее действие необходимо ввести выдержку времени.

Для исключения излишних срабатываний защиты I при коротких замыканиях в зоне  $A'2$  токовой отсечки линии  $BВ$ , выдержка времени должна быть больше времени срабатывания  $t_{A2}^I$  этой отсечки на некоторое время  $\Delta t$ , называемое ступенью селективности, т. е. должно выполняться условие:

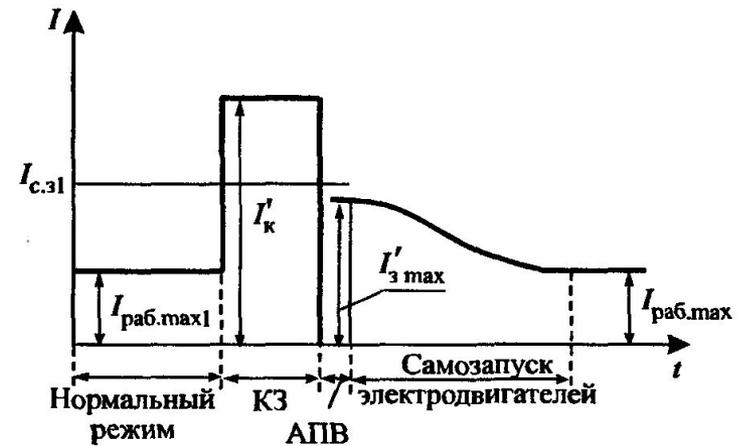
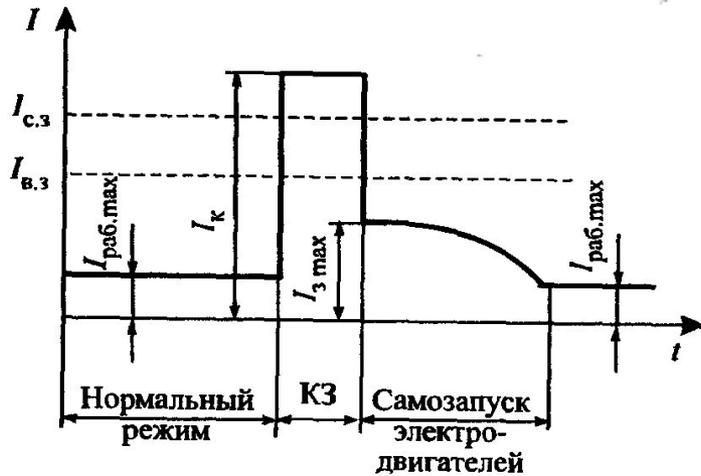
$$t_{A1}^{II} = t_{A2}^I + \Delta t$$

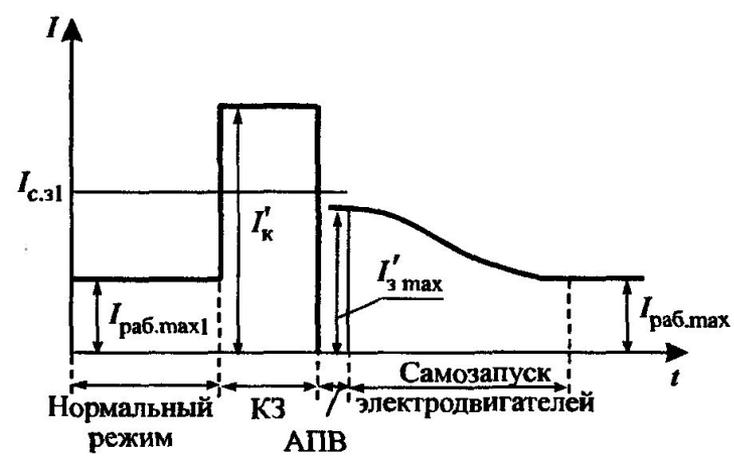
Ступень селективности учитывает время отключения выключателя  $Q2$ , погрешности во времени действия защит  $A''1$  и  $A'2$ , а также некоторое время запаса  $t_{зап}$ . В расчетах принимают  $\Delta t = 0,3...0,6$  с.

### 3. Третья ступень токовой защиты от междуфазных коротких замыканий – максимальная токовая защита (МТЗ)



$$t_3^{III} = t_4^{III} + \Delta t; t_2^{III} = t_3^{III} + \Delta t; t_1^{III} = t_2^{III} + \Delta t.$$





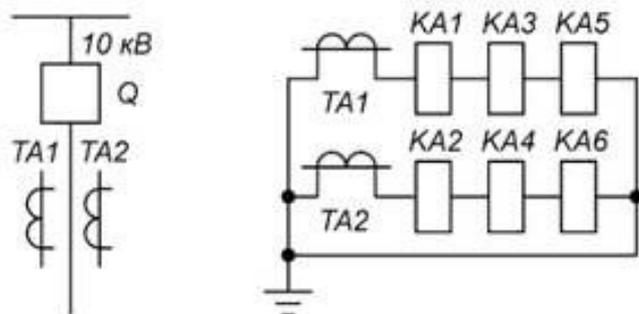
$$I_{\text{в.з}} = k_{\text{н}} \cdot k_{\text{з}} \cdot I_{\text{раб. макс}}$$

$$k_{\text{в}} = I_{\text{в.з}} / I_{\text{с.з}}$$

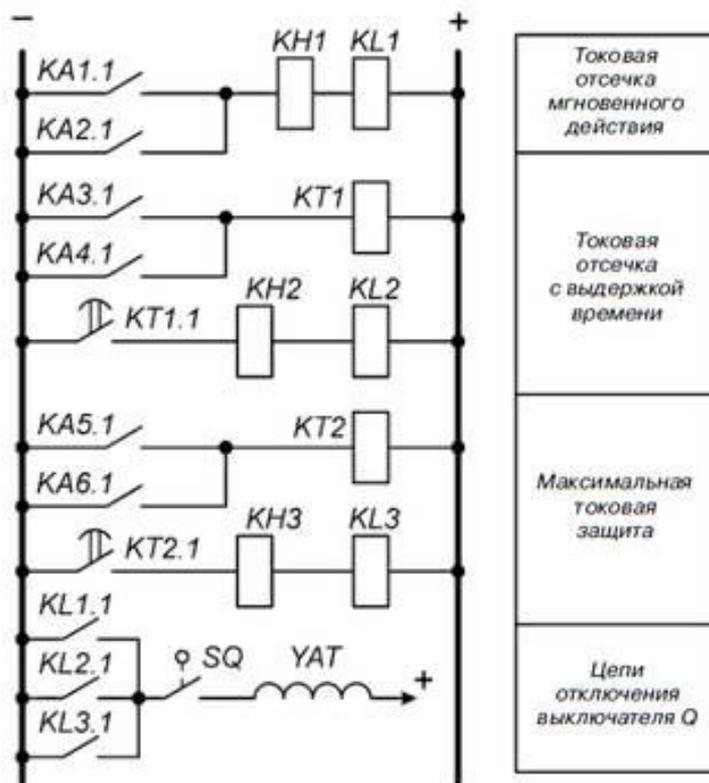
$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{з}}}{k_{\text{в}}} \cdot I_{\text{раб. макс}}$$

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к. мин.}}}{I_{\text{с.з.}}}$$

Коэффициент чувствительности должен быть не менее 1,5 при коротком замыкании в основной зоне и не менее 1,2 при коротком замыкании в зоне резервирования.

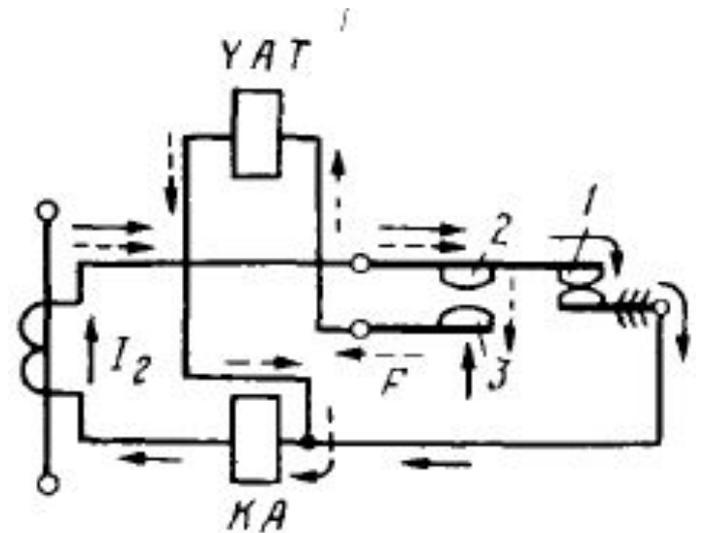
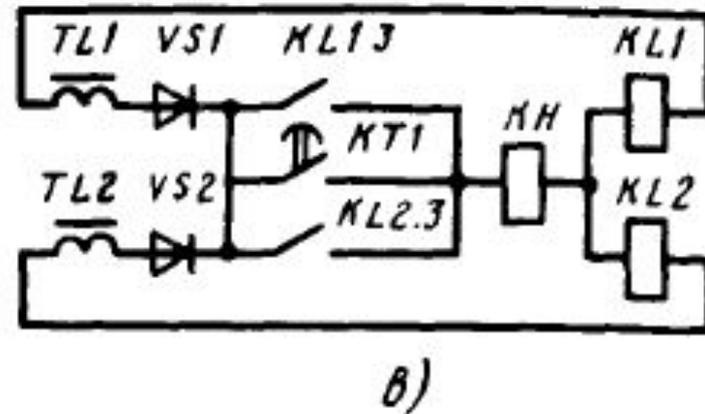
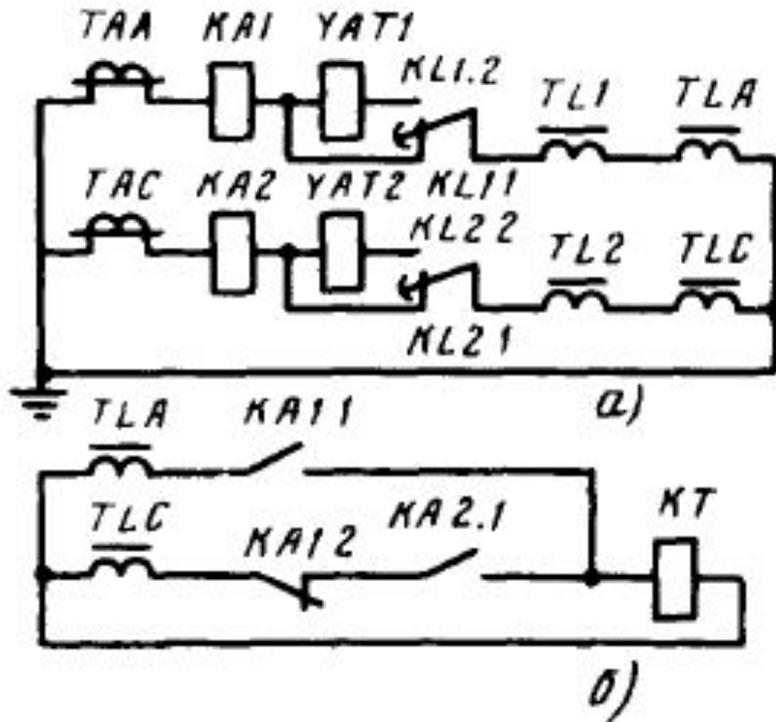


## Токовая трехступенчатая защита

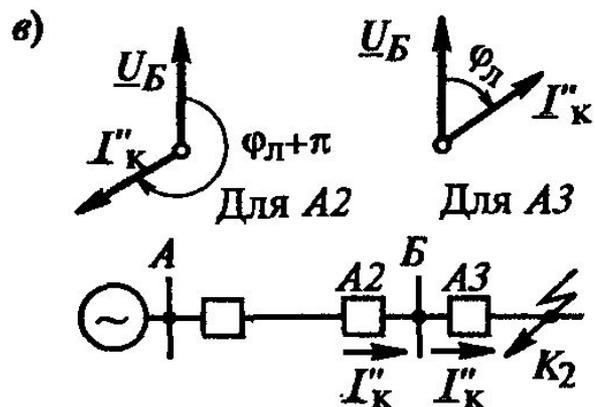
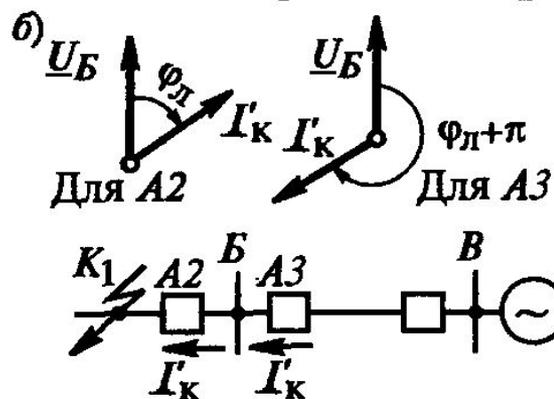
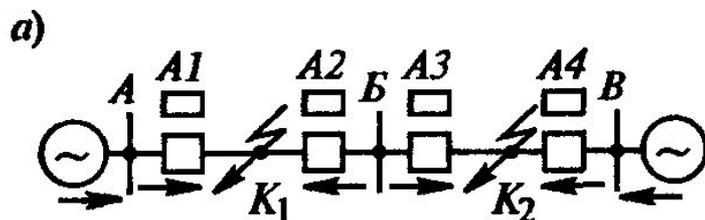




## Схема максимальной токовой защиты на переменном оперативном токе

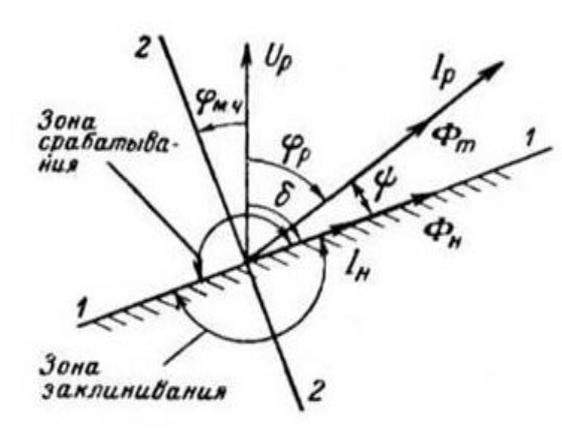
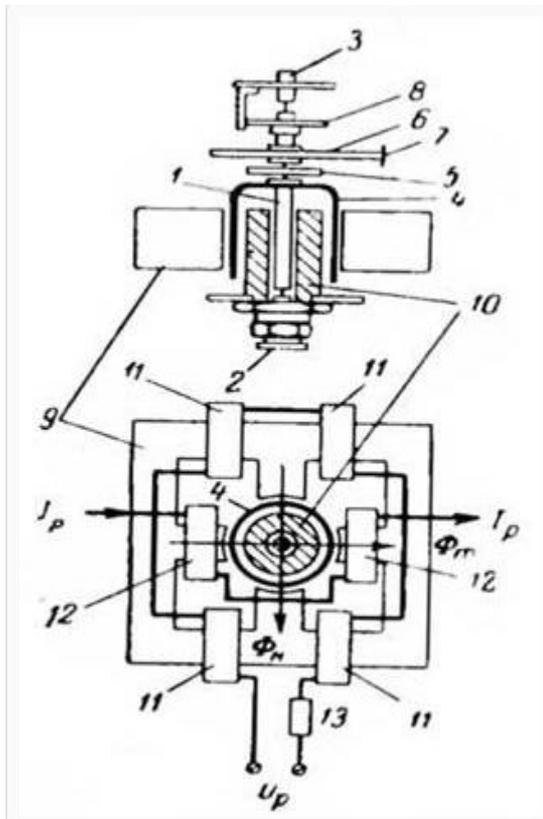


## Токовые направленные защиты



*Размещение защит в сети и векторные диаграммы, поясняющие действие токовой направленной защиты*

## Реле направления мощности

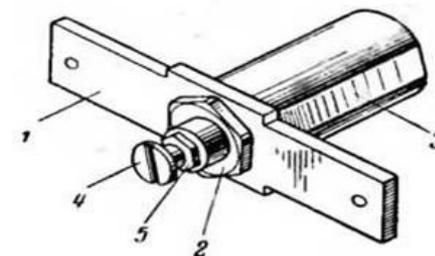


$$M = K\Phi_n \cdot \Phi_m \sin\psi$$

$$M = K_1 U_p I_p \sin\psi =$$

$$= K_1 U_p I_p \sin(\delta - \varphi_p)$$

Стальной сердечник реле выполнен в форме цилиндра с небольшим срезом по образующей для регулировки самохода.





## СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Реле направления мощности включаются, как правило, на фазный ток и междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения реле, называемое его схемой включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак мощности КЗ при всех возможных случаях и видах повреждений, и чтобы к РНМ подводилась возможно большая мощность.

Мощность  $S_p$  может иметь недостаточное для действия РНМ значение при КЗ, близких к месту установки реле, за счет снижения напряжения  $U_p$  или при неблагоприятном значении угла  $\varphi_p$ , при котором  $\sin(\alpha - \varphi_p)$  равен или близок к нулю. Отсюда следует, что, во-первых, РНМ должно включаться на такое напряжение, которое при близких КЗ не снижается до нуля, и, во-вторых, напряжение и ток, подводимые к реле, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними  $\varphi_p$  в условиях КЗ не достигал значений, при которых мощность на зажимах реле приближается к нулю.

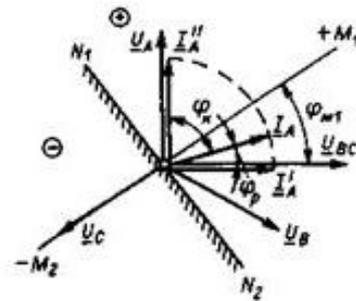
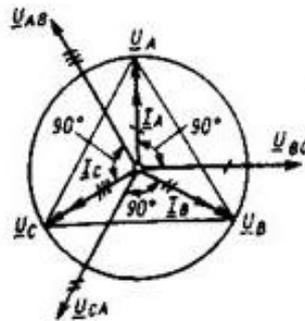
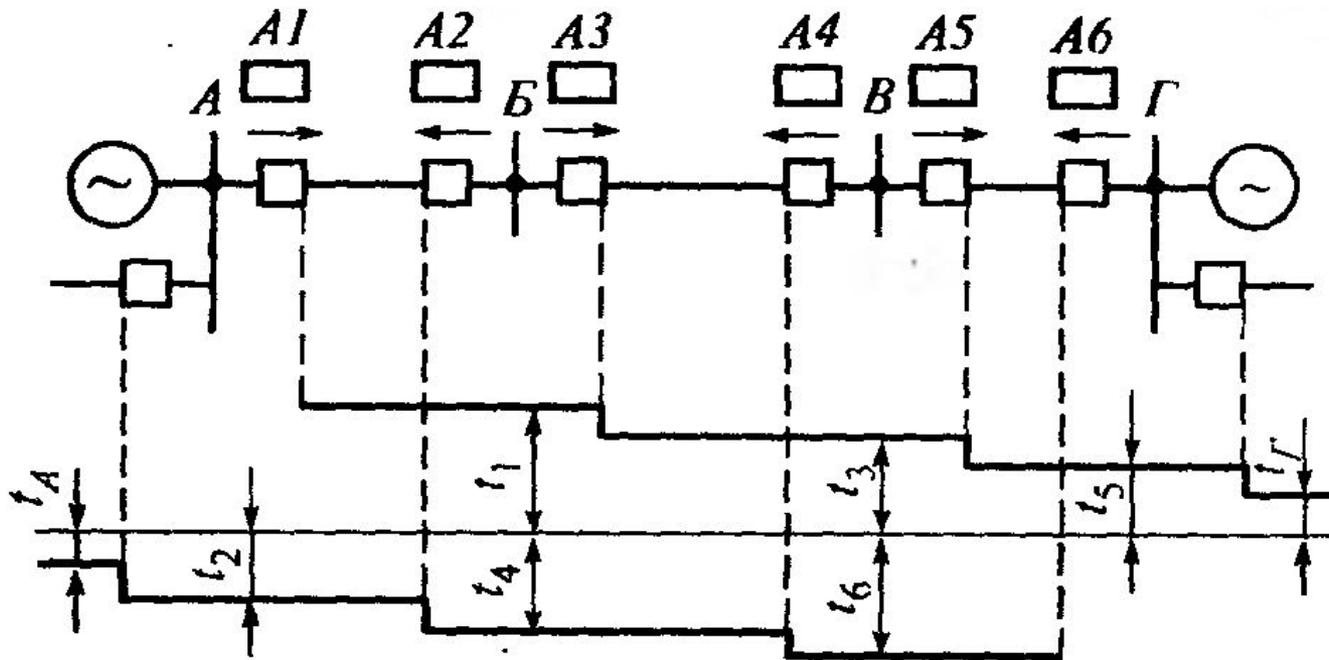


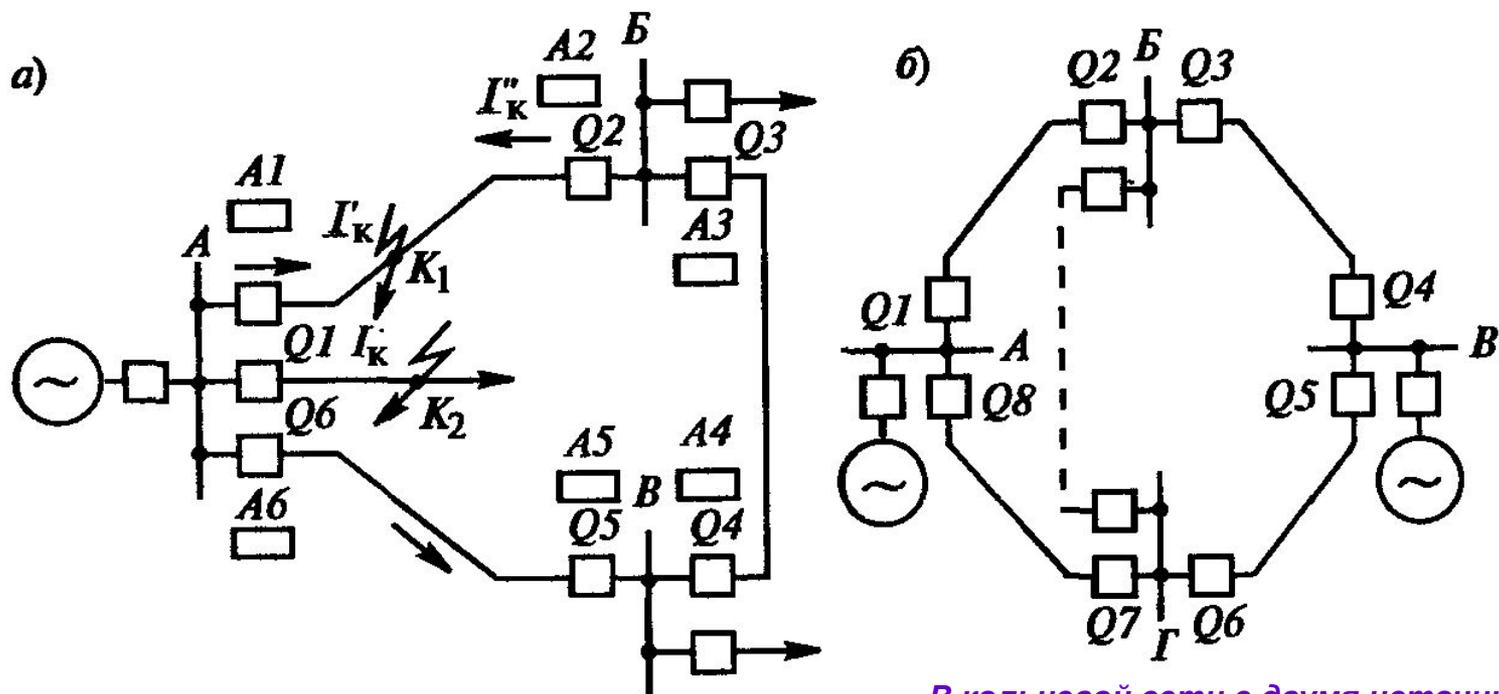
Рис. 7.5. Векторные диаграммы токов и напряжений, подводимых к реле направления мощности при 90-градусной схеме включения

Рис. 7.6. Векторная диаграмма напряжений и тока фазы А при трехфазном КЗ на защищаемой ЛЭП [линии моментов реле направления мощности  $M_{BP} = kU_p I_p \sin(60^\circ - \varphi_p)$ ]

*Встречно-ступенчатый принцип выбора выдержки времени максимальной токовой направленной защиты*



## Размещение и особенности работы максимальной токовой направленной защиты в кольцевых сетях



1. Защиты A2 и A5, установленные на приемных сторонах головных участков AB и AV, можно выполнять действующими без выдержки времени.
2. При коротком замыкании на головном участке AB вблизи шин подстанций A, ток  $I_k$  уменьшается и при некотором расстоянии между точкой  $K_1$  и подстанцией A становится меньше тока, необходимого для срабатывания защиты A2. Защита A2 срабатывает только после отключения защитой A1 выключателя Q1, когда весь ток повреждения проходит по кольцу. Такое поочередное действие защит называется каскадным, а указанная зона - зоной каскадного действия.

В кольцевой сети с двумя источниками питания, а также в кольцевой сети с одним источником питания при наличии диагональных связей, не проходящих через шины источника питания (связь между шинами Б и Г, показанная штриховой линией), встречно-ступенчатый принцип выбора выдержки времени **не обеспечивает селективного действия токовой защиты**.