

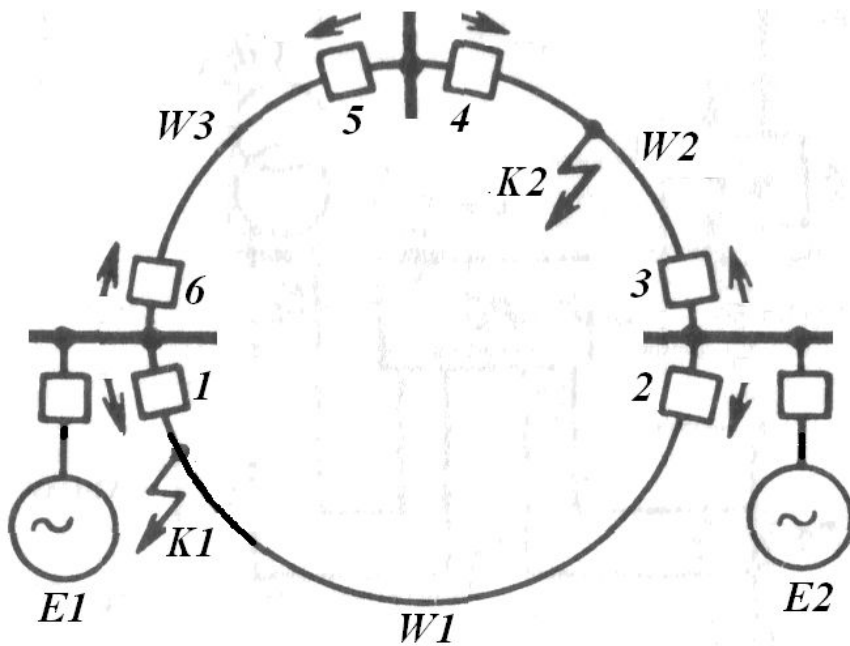
# ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

*Дистанционной* называют защиту, время действия которой зависит от расстояния (дистанции) от места установки защиты до точки КЗ. Чем ближе расположена защита к точке КЗ, тем с меньшим временем она работает.

## Назначение и принцип действия дистанционной защиты (ДЗ)

Кольцевая сеть с двумя источниками

питания



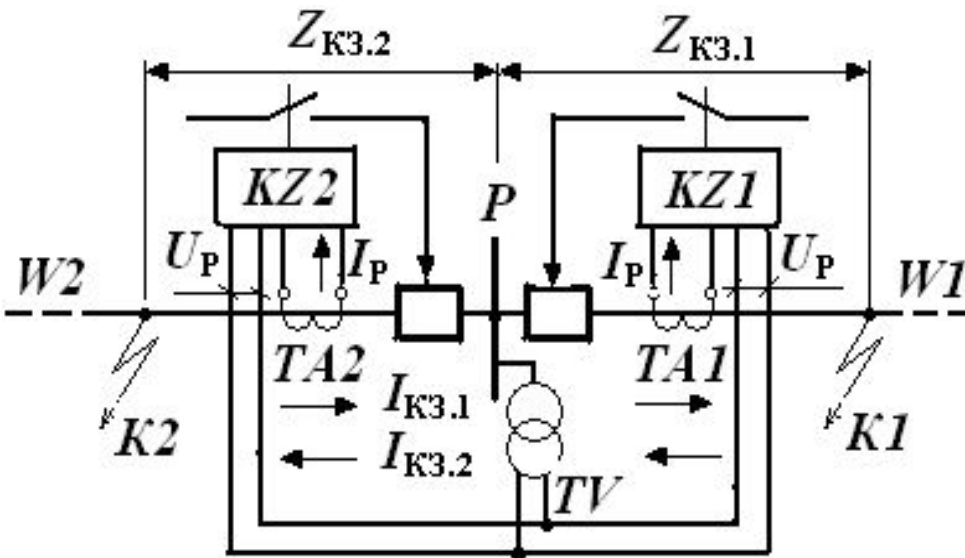
*Необходимость применения ДЗ* - невозможность обеспечения селективности в сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания направленными токовыми защитами.

При КЗ на линии *W1* в точке *K1* направленная МТЗ *1* должна подействовать быстрее защит *5* и *3*, т.е.  $t_{сз.1} < t_{сз.5} < t_{сз.3}$ , а при КЗ на линии *W2* в точке *K2* направленная МТЗ *3* должна действовать быстрее защиты *1*, т.е. т.е.  $t_{сз.1} > t_{сз.3}$ .

*Дистанционная защита реагирует на величину сопротивления до точки КЗ, которое прямо пропорционально расстоянию.*

**Основным органом ДЗ является дистанционный орган (ДО).** Он определяет удаленность КЗ от места установки защиты. В качестве ДО используется *реле сопротивления (KZ)*, реагирующие на полное сопротивление поврежденного участка ЛЭП.

### Подключение реле сопротивления к ИТ



Сопротивление фазы ЛЭП от места установки реле  $P$  до места КЗ (точки  $K$ ) пропорционально длине этого участка  $l_{PK}$ , так как  $Z_{PK} = Z_0 \cdot l_{PK}$ , где  $Z_{PK}$  - полное сопротивления участка ЛЭП длиной  $l_{PK}$ ;  $Z_0$  - удельное сопротивление ЛЭП (Ом/км). Реле сопротивления ( $KZ$ ) контролирует напряжение и ток ( $U_p$  и  $I_p$ ) в месте установки защиты.

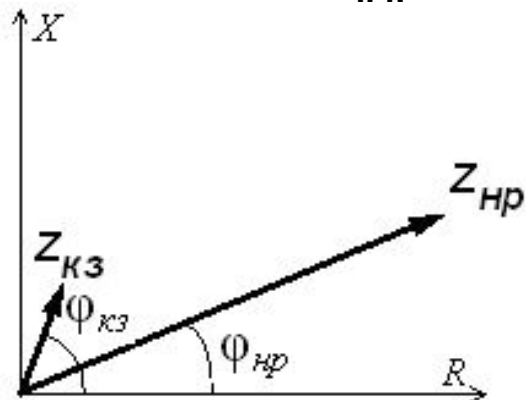
Оно замеряет сопротивлением  $Z$  как отношение  $U$  к  $I$ , т.е.  $Z = U / I$ .

**Наибольшее значение  $Z_p$ , при котором реле срабатывает, называется сопротивлением срабатывания реле  $Z_{с.р.}$ .**

В нормальном режиме работы  $Z_{н.р} = U_{н.р} / I_{н.р}$ . При этом  $Z_p = Z_{н.р} > Z_{с.р.}$ , в результате чего реле сопротивления не работает.

При возникновении КЗ происходит снижение  $U_p$  и увеличение  $I_p$ . Происходит уменьшение  $Z_p = Z_{кз} = U_{кз} / I_{кз}$ . Если в этом режиме  $Z_p = Z_{кз}$  будет меньше или равно  $Z_{с.р.}$ , то реле сопротивления сработает.

## Соотношение $Z_{нр}$ и $Z^{кз}$



Следовательно, *принцип действия дистанционной защиты основан на снижении сопротивления, измеряемого реле, при КЗ по сравнению с сопротивлением нагрузочного режима.*

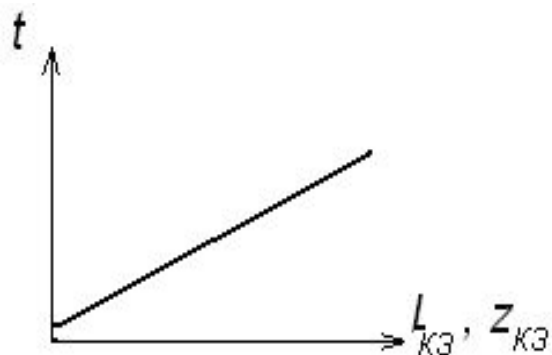
Дистанционная защита используется только как защита от КЗ.

Для обеспечения селективности:

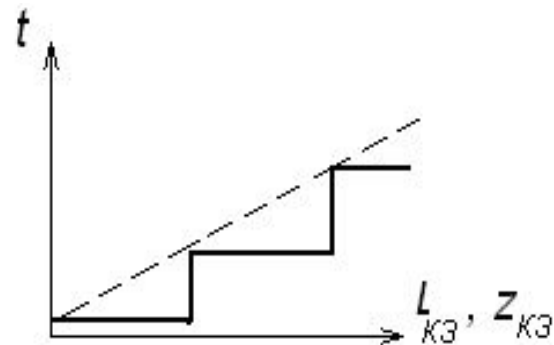
- ДЗ выполняются направленными, действующими при направлении мощности КЗ от шин в ЛЭП;
- выдержки времени у защит, работающих при одном направлении мощности, согласуются между собой.

По зависимости времени действия ДЗ от расстояния или сопротивления до места КЗ  $t_{сз} = f(l_{PK} \text{ или } Z_{PK})$  они делятся на две группы:

с плавнорастающими характеристиками



со тупенчатыми характеристиками



# Принцип выполнения селективной защиты ЛЭП с помощью ступенчатой ДЗ

## Упрощенная структурная схема трехступенчатой ДЗ

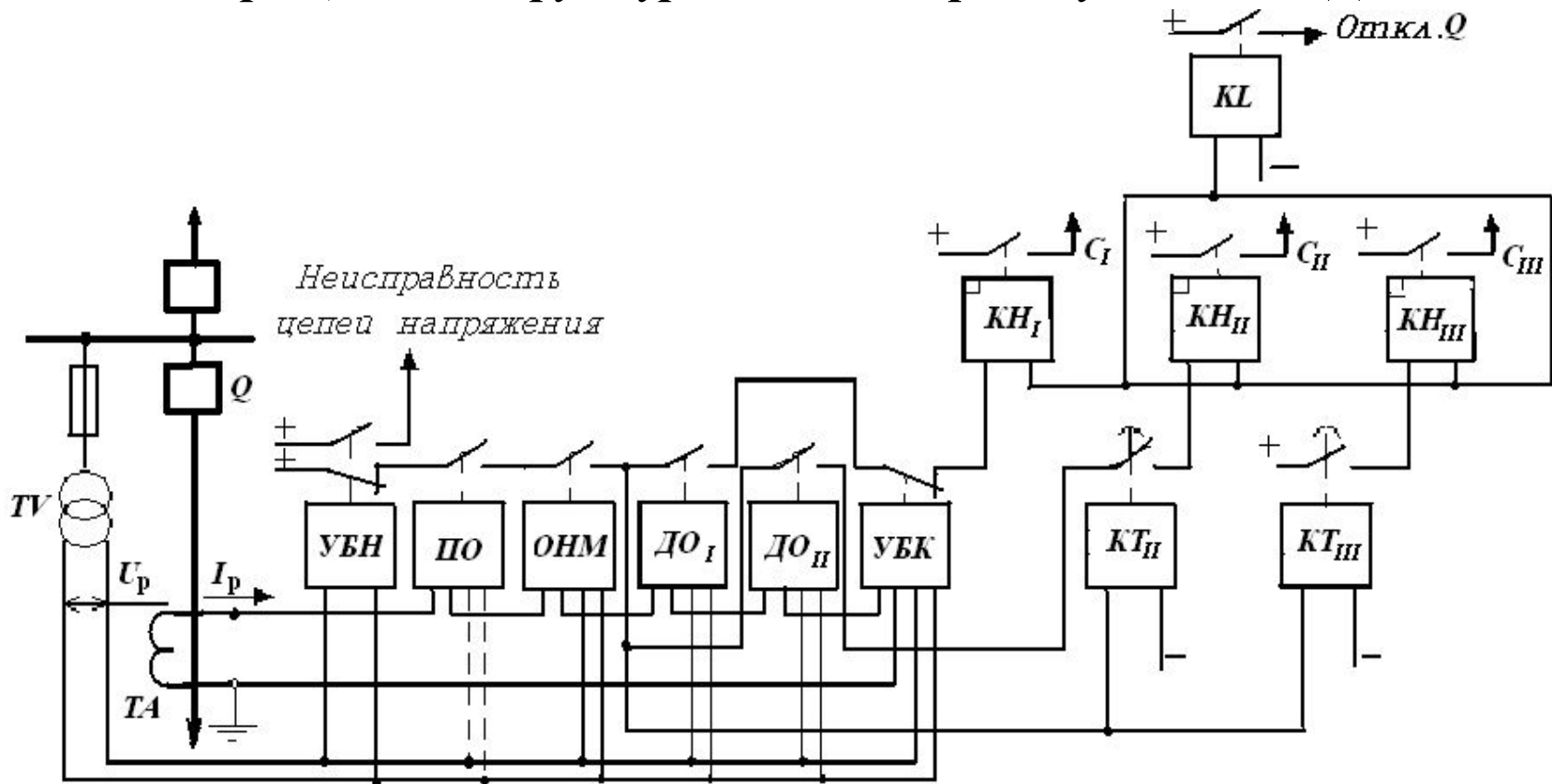


Схема содержит следующие элементы:

$ДО_I, ДО_{II}$  - дистанционные органы I и II ступеней;  $ПО$  - пусковой орган;

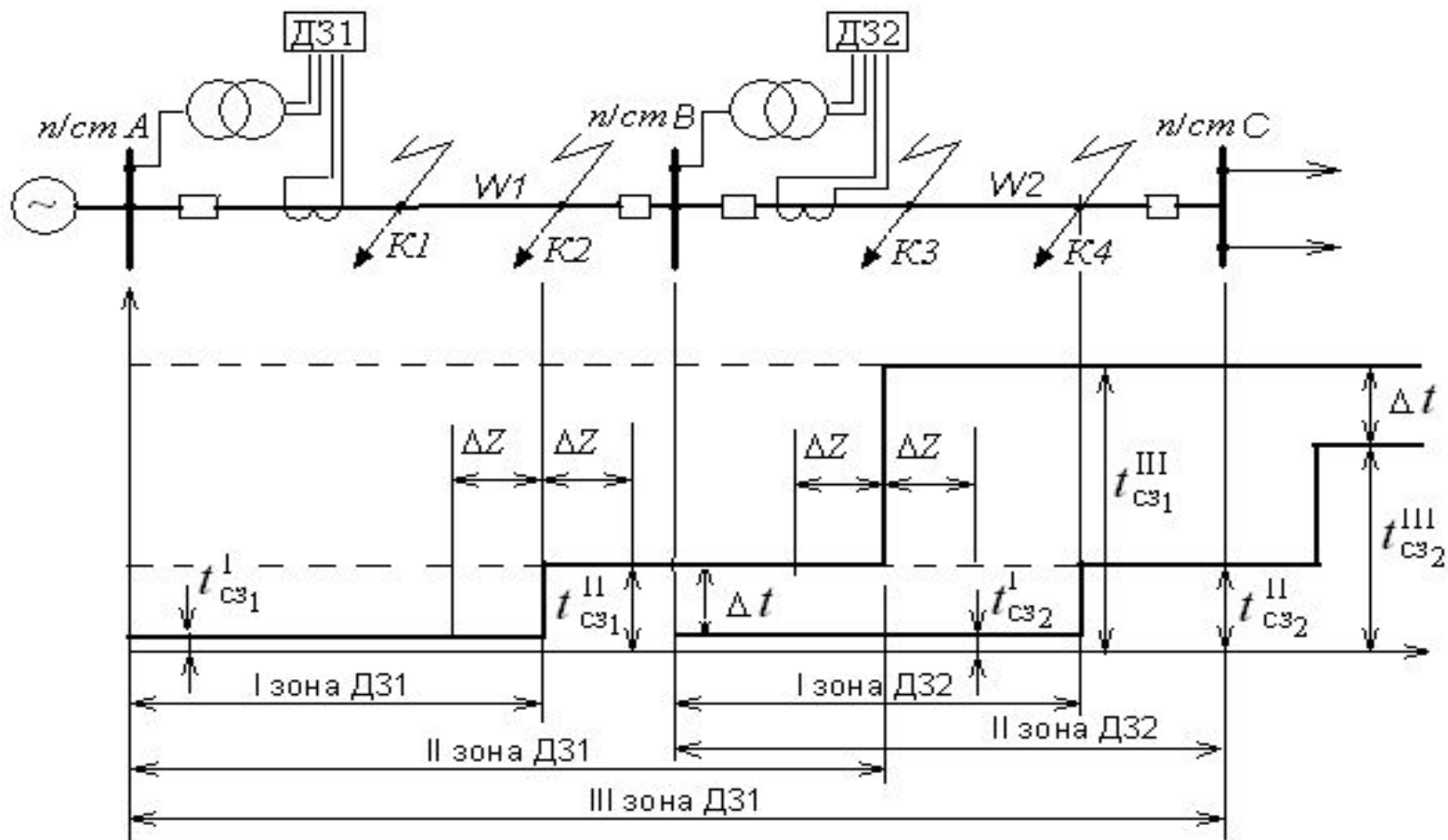
$ОНМ$  - орган направления мощности;  $УБК$  - устройство блокировки от качаний;

$УВН$  - устройство блокировки от нарушения цепей переменного напряжения;

$КТ_{II}, КТ_{III}$  - органы выдержки времени II и III ступеней;

$КН_I, КН_{II}, КН_{III}$  - сигнальные реле I, II и III ступеней;  $КЛ$  - выходное реле ДЗ.

# Согласование выдержек времени трехступенчатых дистанционных защит



$\Delta Z$  - погрешность дистанционного реле;  $\Delta t$  - степень селективности

**I ступень ДЗ** защищает (85-90) % длины ЛЭП;

**II ступень ДЗ** защищает оставшая часть защищаемой ЛЭП и шины противоположной подстанции;

**III ступень ДЗ** является резервной. Ее протяженность выбирается из условия охвата следующего участка, на случай отказа его РЗ или выключателя.

## Классификация схем дистанционных защит

*По назначению* ДЗ могут применяться в качестве *основных* или *резервных* защит различных элементов ЭЭС. В отечественных ЭЭС они применяются для действия при *междуфазных КЗ*. В сетях напряжением 35 кВ и ниже ДЗ должны работать при двойных замыканиях на землю.

*По числу ступеней* ДЗ подразделяются на *трехступенчатые*, *двухступенчатые* и *одноступенчатые*.

Для ЛЭП напряжением 10 и 35 кВ применяются ДЗ с плавно нарастающими характеристиками выдержек времени (типа ДЗ-10).

*По числу дистанционных органов на ступень защиты* различают *трехсистемные* (с тремя измерительными РС в каждой ступени) и *односистемные* (с одним измерительным РС, переключаемым с помощью пусковых органов на токи и напряжения поврежденных фаз) ДЗ.

*По типу пусковых органов* различают ДЗ с *токовым пуском* (например, типа ПЗ-3) в качестве ПО используются токовые реле – применяются в сетях с изолированными нейтралями) и с *дистанционным пуском* (в качестве ПО используются реле сопротивления).

*По типу реле сопротивления* различают ДЗ с *ненаправленными* (в сетях с изолированными нейтралями) и *направленными* РС. В первом случае в схему ДЗ дополнительно вводятся РНМ.

## Реле сопротивления

### *Основные требования, предъявляемые к реле сопротивления*

1. Реле сопротивления (особенно I степени) должны быть быстродействующими:  
 $t_{\text{ср}} = 0,01 - 0,02$  с в сетях 500 кВ,  $t_{\text{ср}} = 0,02 - 0,04$  с в сетях 110-220 кВ.
2. Реле сопротивления, выполняющие функции измерительных органов всех ступеней ДЗ, должны иметь высокую точность при срабатывании в конце зоны их действия:  $\Delta Z = Z_{\text{уст}} - Z_{\text{ср}} \leq 0,1 Z_{\text{уст}}$ .
3. Реле сопротивления II и III ступеней должны иметь  $k_{\text{в}} = Z_{\text{в}} / Z_{\text{ср}} = 1,05 - 1,1$ .

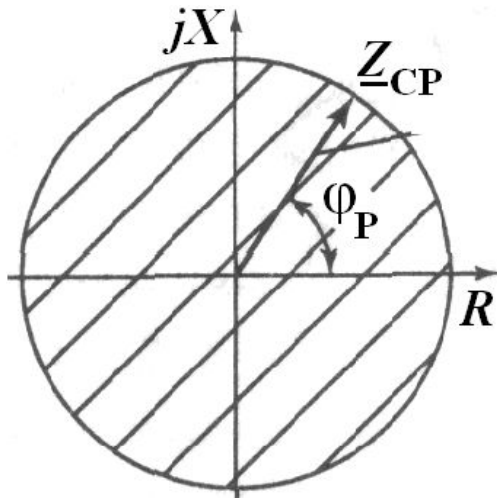
### *Элементные базы изготовления реле сопротивления*

1. Первоначально РС выполнялись на электромеханических элементах с использованием индукционного принципа действия.
2. С развитием полупроводниковой техники получили широкое применение статические конструкции РС на полупроводниковых приборах, выполняемые из отдельных (дискретных) элементов: диодов, резисторов, конденсаторов (комплекты РС типов КРС-1, КРС-2 и КРС-3).
3. С развитием микроэлектронной техники (ИМС) начался выпуск РС с улучшенными параметрами на интегральных операционных усилителях (РС типа С-108).  
При этом уменьшились габариты и потребление реле, повысилась их надежность, появилась возможность выполнения РС с характеристиками более сложной формы.
4. Создание на основе сверхбольших ИМС микропроцессоров позволило приступить к выполнению РС и дистанционных защит в целом на микропроцессорной базе.  
Функции РС в таких защитах реализуются с помощью специальных программ.

## Характеристики срабатывания реле сопротивления

*Характеристикой срабатывания реле сопротивления* называют зависимость сопротивления срабатывания реле  $Z_{ср}$  от угла  $\varphi_p$  между напряжением  $U_p$  и током  $I_p$ , подводимым к нему от измерительных ТН и ТТ, т. е.  $Z_{ср} = f(\varphi_p)$ .

*Графическое изображение характеристик срабатывания реле*



*Ненаправленное реле полного сопротивления*

имеет  $Z_{ср}$ , независящее от угла  $\varphi_p$ .

Характеристика срабатывания этого реле выражается уравнением  $Z_{ср} = K$ , где  $K$  - постоянная величина, равная радиусу окружности.

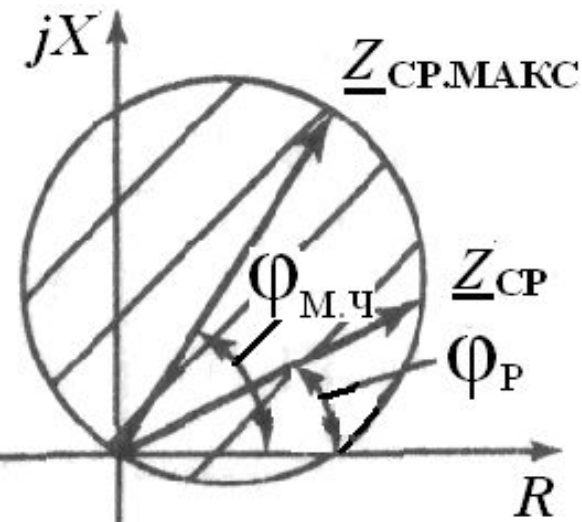
*Направленное реле полного сопротивления*

имеет  $Z_{ср}$ , зависящее от угла  $\varphi_p$ .

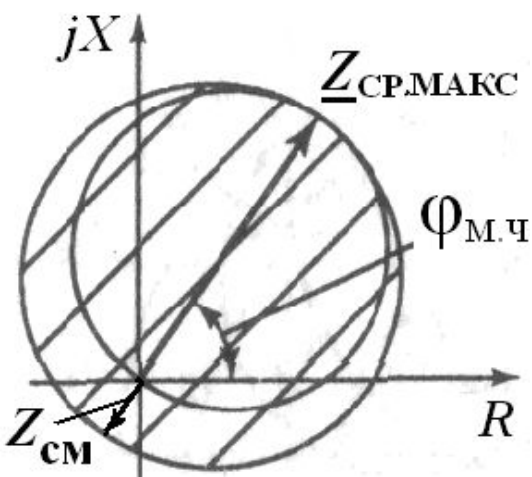
Зависимость сопротивления срабатывания этого реле от угла  $\varphi_p$  может быть представлена уравнением

$$Z_{ср} = Z_{ср \text{ макс}} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_p).$$

При  $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$ , где  $\varphi_{м.ч}$  - угол максимальной чувствительности реле,  $Z_{ср} = Z_{ср.макс}$ , т. е. равно диаметру окружности.



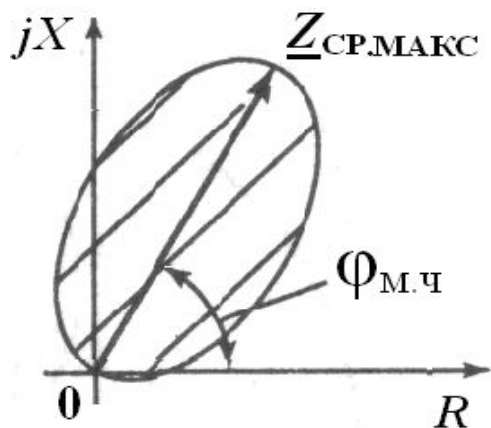




**Реле с круговой характеристикой, смещенной относительно начала координат.**

На рисунке показана характеристика, смещенная в III квадрант на расстояние  $Z_{см}$ .

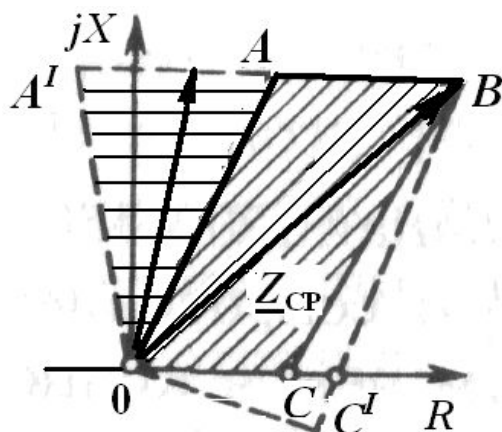
Возможно смещение характеристики срабатывания реле в сторону I квадранта.



**Реле с эллиптической характеристикой.**

Сопротивление срабатывания такого реле  $Z_{ср}$  зависит от угла  $\varphi_p$  и имеет наибольшее значение при  $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$ .

Сопротивление  $Z_{ср. макс}$  в этом случае равно большой оси эллипса.



**Реле с характеристикой в виде многоугольника.**

Четырехугольная характеристика реле в большей мере, чем другие характеристики, совпадает с контуром области расположения векторов  $Z_p$  при КЗ и поэтому является наиболее рациональной. Возможна характеристика срабатывания в форме *треугольника*.

## Принципы выполнения реле сопротивления

Все разновидности реле сопротивления основаны на сравнении абсолютных значений или фаз двух или нескольких напряжения  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_n$ .

Каждое из них является функцией напряжения  $\underline{U}_p$  и тока  $\underline{I}_p$ , получаемых от ТТ и ТН.

Реле с характеристиками срабатывания в виде *окружности* и *эллипса* выполняются по принципу сравнения двух напряжений:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= k_{U1}\underline{U}_p + k_{I1}\underline{I}_p, \\ \underline{U}_2 &= k_{U2}\underline{U}_p + k_{I2}\underline{I}_p.\end{aligned}$$

Для получения реле с характеристикой в форме *треугольника* или *четырёхугольника* производится сравнение трех или четырех напряжений.

Реле сопротивления на полупроводниковых элементах выполняются:

- на сравнении абсолютных значений двух напряжений;
- на сравнении фаз этих напряжений.

Последние выполняются на ИМС и имеют большее быстродействие (они могут срабатывать в течение полупериода промышленной частоты, т. е. с  $t \approx 0,01$  с).

Реле сопротивления на сравнении абсолютных значений двух напряжений используют диодные схемы сравнения двух типов:

- на балансе напряжений;
- на балансе токов.



Напряжения  $U_1$  (рабочее) и  $U_2$  (тормозное) подводятся к выпрямителям  $VS1$  и  $VS2$ .

Выпрямленные напряжения  $|\underline{U1}|$  и  $|\underline{U2}|$  сопоставляются по значению *в схеме сравнения на балансе напряжений*, токи  $|\underline{I1}|$  и  $|\underline{I2}|$  - *в схеме сравнения на балансе токов*.

На зажимах *(m-n) исполнительного органа (ИО)* результирующее напряжение равно  $U_{рез} = |\underline{U1}| - |\underline{U2}|$ , результирующий ток  $I_{рез} = |\underline{I1}| - |\underline{I2}|$ .

*Исполнительный орган* реагирует на знак  $U_{рез}$  или  $I_{рез}$ . В качестве *ИО* используется магнитоэлектрическое реле или схема с использованием операционных усилителей.

Граничным условием срабатывания реле является равенство  $|\underline{U2}| = |\underline{U1}|$  или  $|\underline{I1}| = |\underline{I2}|$ .

Выражая эти напряжения через  $U_p$  и  $I_p$ , получим уравнение начала срабатывания реле:

$$|k_U \underline{U}_p| = |k_I \underline{I}_p|.$$

Разделив обе части равенства на  $k_U I_p$ , получим  $Z_p$ , при котором реле начнет работать:

$$(|\underline{U}_p| / |\underline{I}_p|) = |(k_I / k_U)| \text{ или } Z_p = Z_{cp} = \text{const.}$$

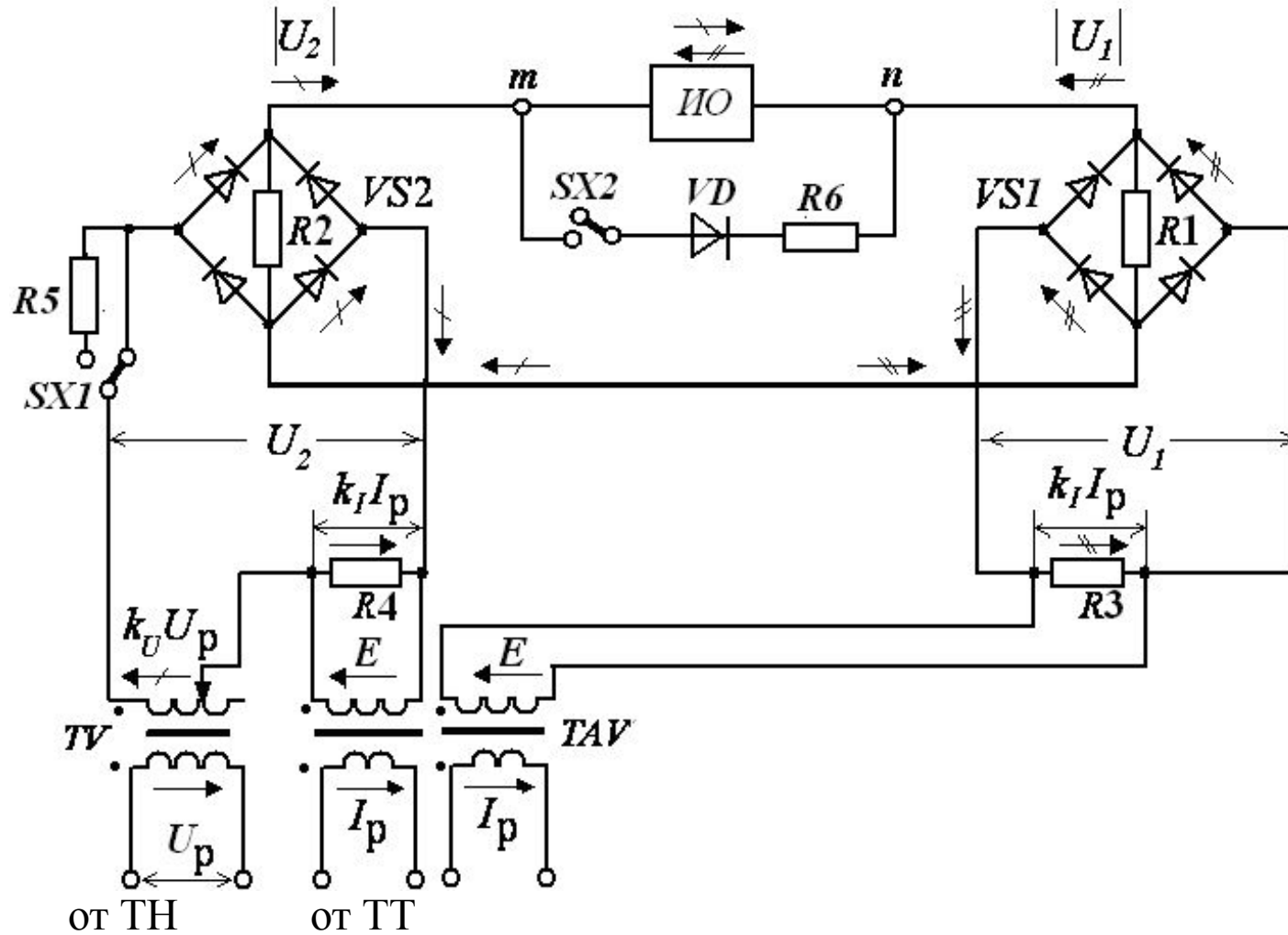
Реле будет работать при сопротивлении  $Z_p \leq Z_{cp}$ .

Сопротивление, измеряемое реле ( $Z_p$ ), определяется отношением  $U_p$  и  $I_p$ , а величина установленного на реле сопротивления срабатывания ( $Z_{cp}$ ) - отношением  $k_I / k_U$ .

Сопротивление срабатывания реле является величиной, независимой от угла между векторами  $U_p$  и  $I_p$ . Оно имеет характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат и радиусом, равным  $Z_{cp} = (k_I / k_U)$ .

$Z_{cp}$  регулируется изменением  $k_I$  и  $k_U$ , т. е. изменением коэффициента пропорциональности между вторичной ЭДС трансреактора  $TAВ$  и его первичным током и коэффициента трансформации трансформатора напряжения  $TV$ .

**Направленное реле сопротивления с круговой характеристикой  
(упрощенная схема направленного реле сопротивления типа КРС-1)**



Для получения характеристики в виде окружности, проходящей через начало координат, к схеме сравнения реле подводятся два напряжения  $\underline{U}_1 = k_I I_p$  и  $\underline{U}_2 = k_U \underline{U}_p - k_I I_p$ .

**Рабочее напряжение  $\underline{U}_1$**  подается на вход *VS1*. **Тормозное напряжение  $\underline{U}_2$** , образованное геометрическим суммированием  $k_U \underline{U}_p$  и  $-k_I I_p$ , подается на вход *VS2*.

Выпрямленные напряжения  $|\underline{U}_1|$  и  $|\underline{U}_2|$  сопоставляются по значению в схеме сравнения на балансе напряжений. Условие срабатывания реле:  $|\underline{K}_I \underline{I}_p| \geq |\underline{K}_U \underline{U}_p - \underline{K}_I \underline{I}_p|$ .

Начало действия реле характеризуется равенством:

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2| \text{ или } |k_I \underline{I}_p| = |k_U \underline{U}_p - k_I \underline{I}_p|.$$

Разделим для этого обе части равенства на  $k_U \underline{I}_p$ , получим  $|k_I/k_U| = |\underline{U}_p / \underline{I}_p - k_I/k_U|$ . Учитывая, что  $Z_p = \underline{U}_p / \underline{I}_p$ , после преобразования получим  $Z_p = Z_{cp} = 2(k_I/k_U) = 2R$ .

Характеристика срабатывания направленного реле сопротивления имеет форму окружности, проходящей через начало координат.

**Сопротивление срабатывания  $Z_{cp}$**  реле изменяется с изменением  $\varphi_p$  (угла сопротивления  $Z_p$ ).

При  $\varphi_p = \varphi_{m.ч}$  сопротивление  $Z_{cp}$  имеет максимальное значение  $Z_{cp.max} = 2(k_I/k_U)$ . Угол вектора  $Z_{cp.max}$  равен углу вектора  $k_p$  который определяется параметрами  $X$  и  $R$  трансреактора  $TAVI$ .

При всех других значениях угла  $\varphi_p$

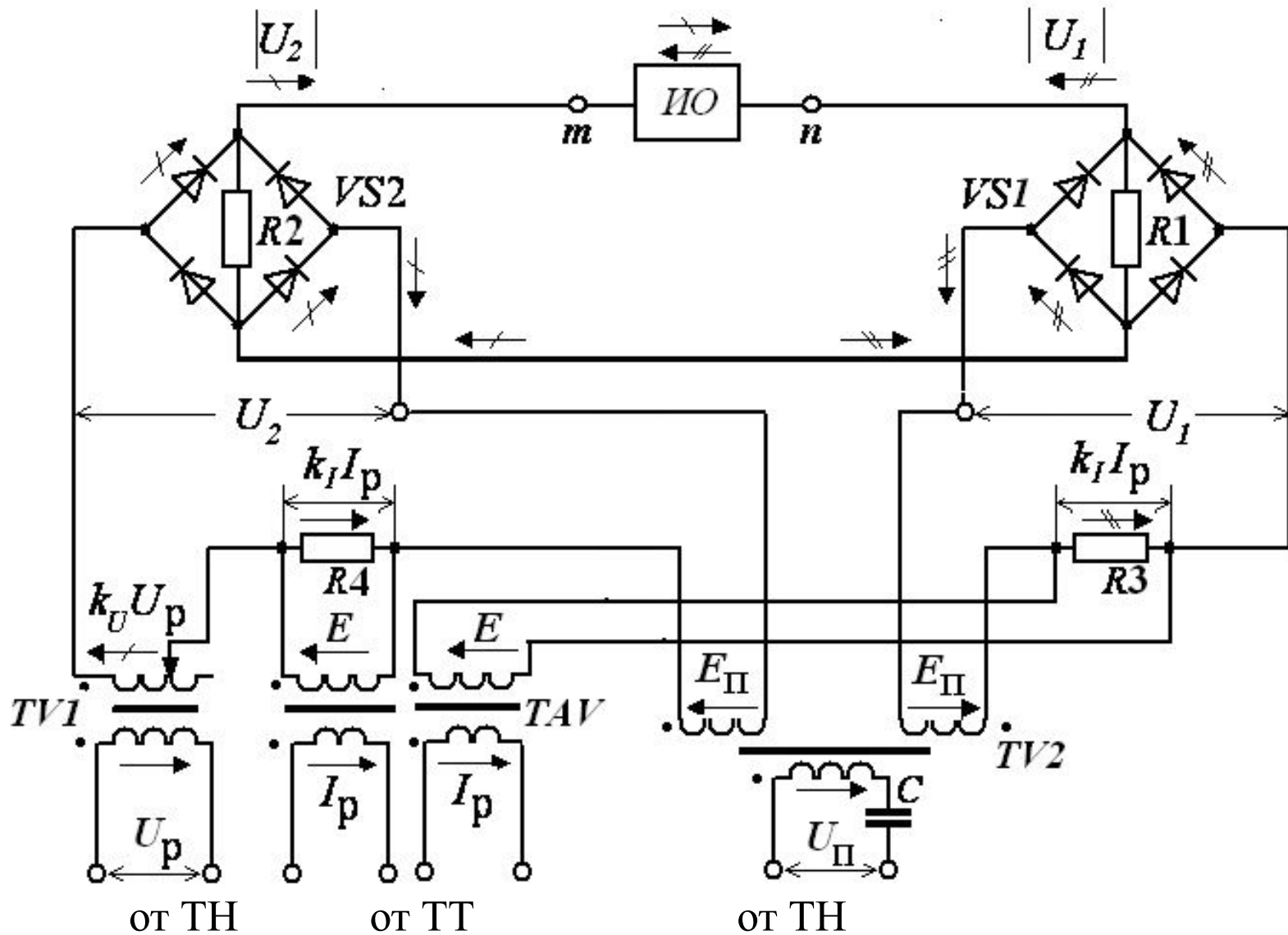
$$Z_{cp} = Z_{cp.max} \cos(\varphi_{m.ч} - \varphi_p) = 2(k_I/k_U) \cos(\varphi_{m.ч} - \varphi_p).$$

**Уставка срабатывания реле  $Z_y$**  задается модулем  $Z_{cp.max} = 2|(k_I/k_U)|$ .

В конструкции реле предусматривается регулирование уставки  $Z_y$  изменением значений  $k_U$  и модуля  $|k_I|$ . Это осуществляется изменением коэффициента трансформации  $TV$  (изменением числа вторичных витков) и числа витков первичной обмотки  $TAV$ .

Для получения **эллиптической характеристики срабатывания** у реле сопротивления типа КРС-1 используется дополнительная цепочка, состоящая из диода  $VD$  и активного сопротивления  $R6$ .

## Упрощенная схема направленного реле сопротивления типа КРС-2



Выполнение заданной уставки  $Z_{уст}$  осуществляется изменением числа витков первичных обмоток *TAV* и числа витков вторичной обмотки *TV1*.

## *Мертвая зона направленного реле сопротивления*

Причиной ее является снижением до нуля напряжения  $U_p$  при близких КЗ.

Для устранения мертвой зоны и четкой работы при малых значениях  $U_p$  у реле сопротивления типа КРС-1 характеристика срабатывания реле смещена в III квадрант на 6-12%  $Z_{c.p.}$

Для этого в тормозной контур реле накладкой **SX** вводится резистор **R5**.

Для устранения мертвой зоны у реле сопротивления типа КРС-2 в рабочий и тормозной контуры реле вводятся дополнительные одинаковые по значению ЭДС "памяти"  $\underline{E}_n$ .

Они создаются трансреактором **ТАV2**, на вход которого подается напряжение фазы, не подводимой к **TV1**. Например, если  $U_p = U_{AB}$ , то  $U_n = U_C$

С учетом этого условие срабатывания реле примет вид:

$$|k_I \underline{I}_p + \underline{E}_n| \geq |k_U \underline{U}_p - k_I \underline{I}_p + \underline{E}''|,$$

При близких КЗ, когда  $\underline{U}_p = \mathbf{0}$ , реле работает с напряжением  $\underline{E}_n$  (вместо  $\underline{U}_p$ ):

$$|\underline{E}_n + k_I \underline{I}_p| \geq |\underline{E}_n - k_I \underline{I}_p|.$$

При трехфазных КЗ, когда все напряжения снижаются до нуля, ЭДС  $\underline{E}_n$  поддерживается некоторое время за счет разряда конденсатора **C**.

По рассмотренным схемам выполняются реле сопротивления, используемые в качестве ПО и ДО I и II ступеней в дистанционной защиты панели типа ЭПЗ-1636.

Схема на балансе токов используется для выполнения реле сопротивления типа КРС-3, используемые в дистанционной защиты автотрансформаторов.



# Схемы включения реле сопротивления на напряжение и ток сети

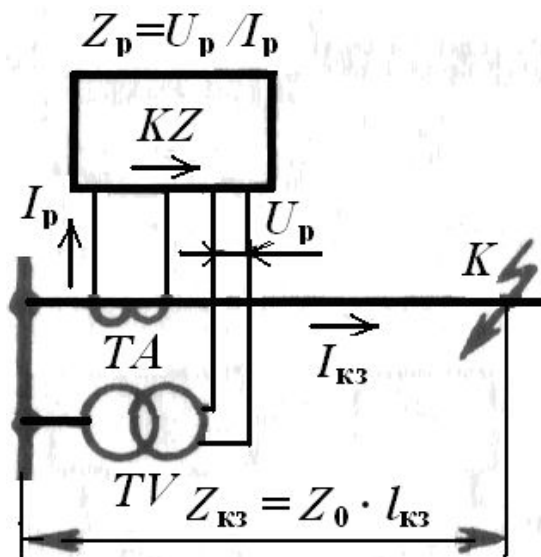
## Требования к схемам включения

**Дистанционные** реле сопротивления должны включаться на такие напряжения и токи сети, при которых сопротивление на зажимах реле  $Z_p$ :

- будет пропорционально расстоянию до места повреждения ( $l_{K3}$ );
- будет иметь одинаковые значения (по модулю и углу) при всех видах КЗ в одной точке.

**Пусковые** реле сопротивления в односистемных защитах, должны работать только при повреждениях на определенных фазах, т.е. обладать **избирательностью**.

Место включения РС и точка КЗ в сети



**Существуют следующие схемы включения РС:**

1. Включение реле сопротивления на междуфазные напряжения и разность фазных токов (схема 1);
2. Включение реле сопротивления на фазные напряжения и фазный ток с добавкой тока  $3I_0$  (схема 2).

Эту схему называют схемой с токовой компенсацией;

3. Включение реле сопротивления на междуфазные напряжения и фазные токи (схема 3).

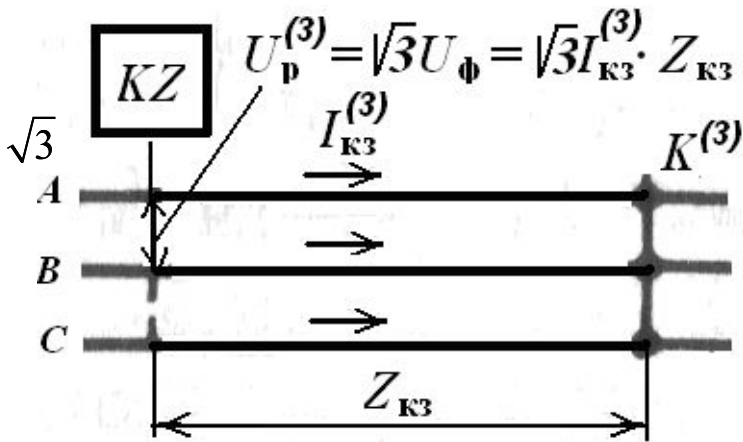
# 1. Включение реле сопротивления на междуфазные напряжения и разность фазных токов (схема 1)

используется для ДО I-й и II-й ступеней в односистемных защитах и всех трех ступеней в трехсистемных защитах от междуфазных замыканий.

Она обеспечивает постоянство замера сопротивлений при всех видах междуфазных КЗ.

Номер р	$U_p$	$I_p$
реле I	$U_{AB}$	$I_A - I_B$
II	$U_{BC}$	$I_B - I_C$
III	$U_{CA}$	$I_C - I_A$

## Напряжение $U_p$ , $I_p$ и сопротивление $Z_p$ при трехфазном КЗ



При трехфазных КЗ все три ДО защиты находятся в одинаковых условиях.

К каждому из них подводится междуфазное напряжение, равное:

$U_p^{(3)} = \sqrt{3} U_\phi = \sqrt{3} I_{K3}^{(3)} \cdot Z_{K3} = \sqrt{3} I_{K3}^{(3)} \cdot Z_0 l_{K3}$ ,  
 где  $I_{K3}^{(3)}$  - ток трехфазного КЗ, проходящий в фазе;  $Z_{K3}$  - сопротивление прямой последова-

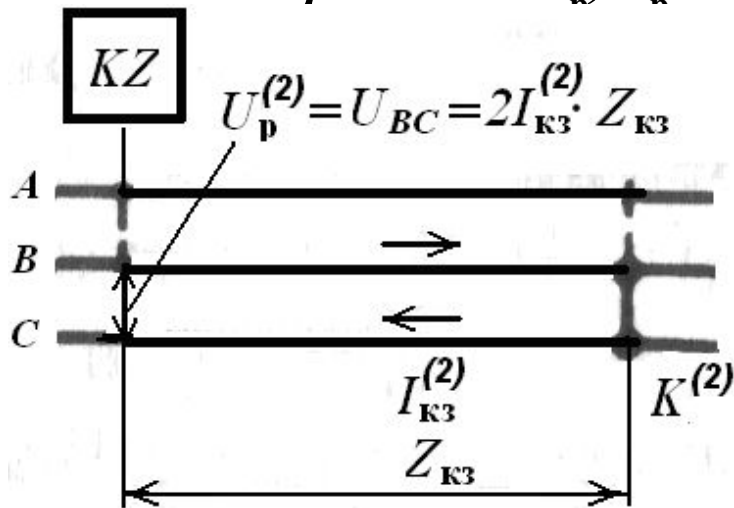
тельности фазы от места установки реле до точки КЗ;  $Z_0$  - удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 км;  $l_{K3}$  - расстояние до места КЗ.

Ток в каждом реле равен геометрической разности токов двух фаз, т. е.  $I_p^{(3)} = I_{K3}^{(3)}$ .

Следовательно, сопротивление на зажимах каждого РС равно:

$$Z_p^{(3)} = U_p^{(3)} / I_p^{(3)} = \sqrt{3} I_{K3}^{(3)} \cdot Z_0 l_{K3} / \sqrt{3} I_{K3}^{(3)} = Z_0 l_{K3} \equiv l_{K3}$$

## Напряжение $U_p$ , $I_p$ и сопротивление $Z_p$ при двухфазном КЗ



При двухфазных КЗ, например между фазами *B* и *C*, только один ДО, включенный на напряжение между поврежденными фазами, получает напряжение, пропорциональное расстоянию  $l_{\text{КЗ}}$ .

Это напряжение равно падению напряжения в фазах *B* и *C*:  $U_p^{(2)} = U_{BC} = 2I_{\text{КЗ}}^{(2)} Z_{\text{КЗ}}$ .

Ток в реле  $I_p^{(2)} = 2I_{\text{КЗ}}^{(2)} Z_{\text{КЗ}}$ .

Следовательно:  $Z_p^{(2)} = U_p^{(2)} / I_p^{(2)} = 2I_{\text{КЗ}}^{(2)} \cdot Z_0 l_{\text{КЗ}} / 2I_{\text{КЗ}}^{(2)} = Z_0 l_{\text{КЗ}} \equiv l_{\text{КЗ}}$ .

При КЗ между фазами *A-B* или *C-A*  $Z_p$  находится аналогично и также  $Z_p^{(2)} = Z_0 l_{\text{КЗ}}$ .

При двухфазных КЗ на землю  $Z_p^{(1,1)} = Z_0 l_{\text{КЗ}}$ .

При всех видах междуфазных КЗ сопротивление на зажимах реле равно сопротивлению до точки КЗ т.е.  $Z_p^{(3)} = Z_p^{(2)} = Z_p^{(1,1)} = Z_0 \equiv l_{\text{КЗ}}$ .

## 2. Включение реле сопротивления на фазные напряжения и фазный ток с добавкой тока

$3I_0$  (схема 2) используется для дистанционных органов защит от однофазных замыканий.

Номер реле	$U_p$	$I_p$
I	$U_A$	$\underline{I}_A + kI_0$
II	$U_B$	$\underline{I}_B + kI_0$
III	$U_C$	$\underline{I}_C + kI_0$

*Схема с токовой компенсацией* предусматривает три РС, каждое из которых включается на напряжение  $U_{\phi}$  и ток  $I_p = I_{\phi} + k3I_0$ , где  $I_{\phi}$  – ток той же фазы, что и напряжение  $U_{\phi}$ ;  $k3I_0$  – ток, пропорциональный току нулевой последовательности (НП).

Коэффициент пропорциональности  $k = (Z_0 - Z_1) / 3Z_1$ .

При таком значении  $k$  сопротивление на зажимах реле при однофазных КЗ  $Z_p = U_{\phi} / (I_{\phi} + k3I_0)$  получается равным сопротивлению прямой последовательности до места КЗ ( $Z_1$ ).

В сети с малым током замыкания на землю (35 кВ и ниже) ДЗ должны реагировать на междуфазные КЗ и двойные замыкания на землю.

Для этого их ДО нормально включаются на междуфазное напряжение и разность фазных токов (схема 1).

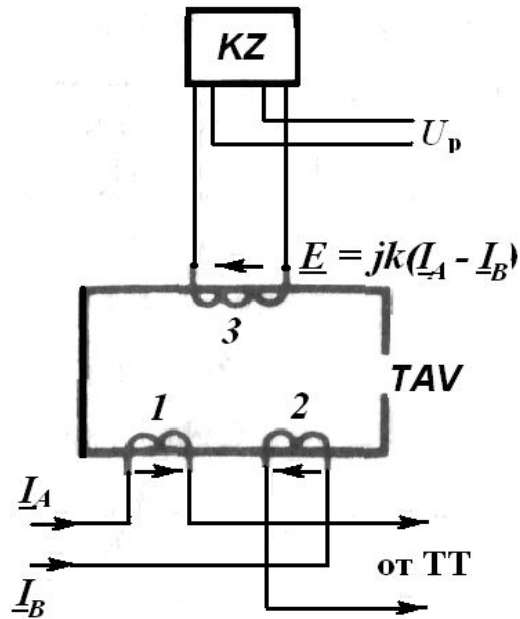
При появлении тока НП, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю  $K1$  и  $K2$ , ДО защит, установленные на этом участке, автоматически переключаются на напряжение фазы  $U_{\phi}$  и ток  $I_{\phi} + k3I_0$ .

Для включения РС на разность токов двух фаз (схема 1) используются трансреакторы реле  $TAV$ , у которых для этой цели имеется две первичных обмотки  $1$  и  $2$ .

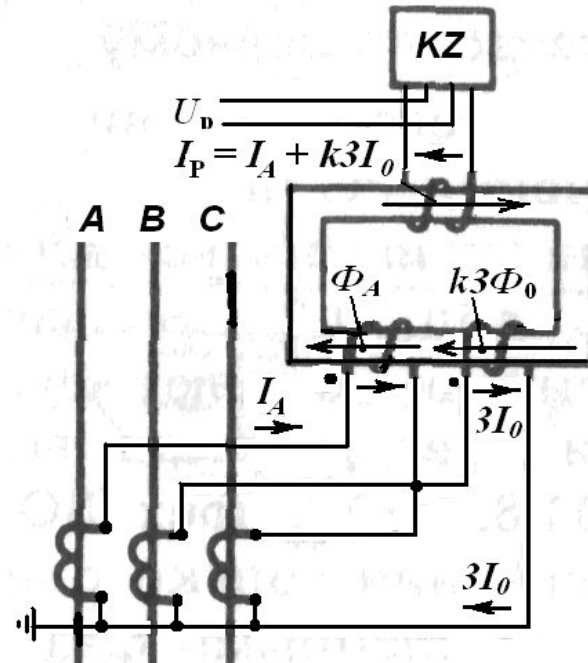
Наличие двух первичных обмоток у трансреакторов реле позволяет включать их на фазный ток и ток  $3I_0$ , необходимый для получения токовой компенсации. При этом ток вторичной обмотки трансреактора будет пропорционален  $I_p + k3I_0$ .

## Способы включения РС

на разность токов двух фаз



на  $I_p + k3I_0$



### 3. Включение реле сопротивления на междуфазные

**напряжения и фазные токи (схема 3)** используется для пусковых органов ДЗ в односистемных защитах от междуфазных замыканий.

Эта схема не обеспечивает постоянство замера

сопротивлений при различных видах междуфазных КЗ:

- при трехфазных КЗ в какой либо точке сети  $Z_p^{(3)} = \sqrt{3}Z_{кз}$ ;
- при двухфазных КЗ в той же точке  $Z_p^{(2)} = 2Z_{кз}$ .

Номер реле	$U_p$	$I_p$
I	$U_{AB}$	$\underline{I}_A$
II	$U_{BC}$	$\underline{I}_B$
III	$U_{CA}$	$\underline{I}_C$

Эта схема не обеспечивает постоянство замера сопротивлений при различных видах междуфазных КЗ:

- при трехфазных КЗ в какой либо точке сети  $Z_p^{(3)} = \sqrt{3}Z_{кз}$ ;
- при двухфазных КЗ в той же точке  $Z_p^{(2)} = 2Z_{кз}$ .

Данная схема, удовлетворяя первому из заданных условий  $Z_p \equiv I_{кз}$ , но не обеспечивает второго условия, так как  $Z_p^{(3)} \neq Z_p^{(2)}$ .

Поэтому ее нельзя применять для включения ДО I и II ступеней.

Но она обеспечивает *избирательность действия*, т.е. срабатывание каждого пускового реле только при определенном виде повреждения. При двухфазных КЗ в этой схеме срабатывает только одно реле, включенное на напряжение поврежденных фаз.

По факту срабатывания конкретного ПО дистанционные органы I и II ступеней автоматически переключаются на напряжения и токи поврежденных фаз (по схеме 1).

Нестабильность зоны действия пусковых РС, используемых одновременно в качестве ДО третьей ступени, допустима.

В схемах включения 1 и 3 в случае двухфазного КЗ из трех РС правильно наименьшее сопротивление замеряет только один из них, включенный на напряжение между поврежденными фазами. Величины сопротивлений, замеряемых двумя другими реле, имеют большие значения и поэтому не могут вызвать неселективного действия защиты.

## Погрешности реле сопротивления

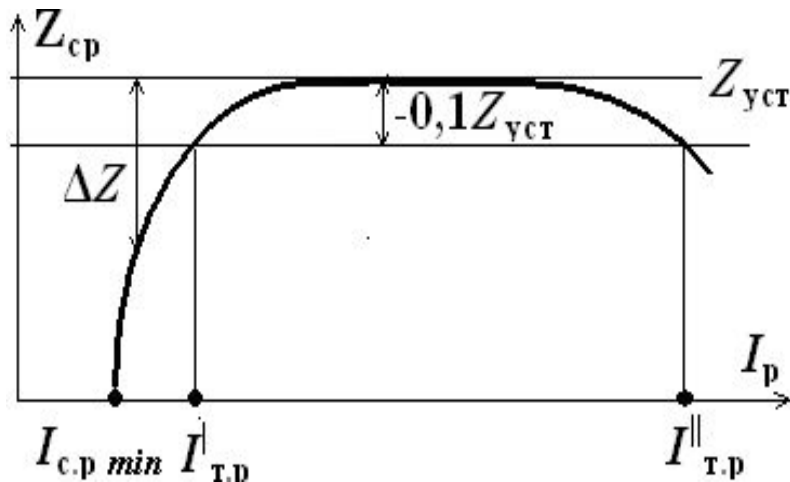
### *Погрешности реле сопротивления, обусловленные током $I_p$*

Реле сопротивления работают с погрешностью  $\Delta Z = Z_{уст} - Z_{с.р}$ .

В идеальном РС  $Z_{с.р}$  должно равняться  $Z_{уст}$ , независимо от значений  $U_p$  и  $I_p$ .

В действительности, вследствие ограниченной чувствительности ИО и других факторов,  $Z_{с.р}$  зависит не только от  $Z_{уст}$ , но и от значения тока  $I_p$ .

### *Характер зависимости $Z_{с.р} = f(I_p)$*



Реле сопротивления может работать с достаточной точностью только в определенном диапазоне токов  $I_p$ .

Для ДО  $\Delta Z$  не должна превышать  $0,1Z_{уст}$ .

Из этого условия по кривой  $Z_{с.р} = f(I_p)$  для реле сопротивления определяются токи точной работы.

*Токами точной работы называются токи, при которых величина  $\Delta Z \leq 0,1Z_{уст}$ .*

Их крайние значения:  $I_{т.р}^I$  и  $I_{т.р}^II$ .

Если  $I_{т.р}^I \leq I_p \leq I_{т.р}^II$ , то реле замеряет сопротивление с погрешностью не более 10%, а сопротивление срабатывания  $Z_{с.р}$  в этом случае будет не менее  $0,9Z_{уст}$ .

Погрешность  $\Delta Z$  в срабатывании реле приводит к сокращению его зоны действия.

## *Погрешности реле сопротивления, обусловленные другими факторами*

На работу РС оказывают влияние некоторые факторы, под воздействием которых нарушается пропорциональность между  $Z_p$  на входных зажимах реле и расстоянием  $l_{кз}$  до места КЗ. К ним относятся:

- переходное сопротивление  $R_{п}$  в месте повреждения;
- ток подпитки, посылаемый к месту КЗ от источников, подключенных между местом установки защиты и точкой КЗ;
- разветвление токов при сочетании одиночных ЛЭП с параллельными;
- погрешности ТТ и ТН, подающих к РС напряжение  $U_p$  и ток  $I_p$ .

### *Влияние переходного сопротивления $R_{п}$ в месте повреждения на $Z_p$*

При металлическом КЗ, когда  $R_{п} = 0$ , сопротивление на зажимах реле  $Z_p = Z_{кз} = Z_0 l_{кз}$ . Поскольку  $Z_p \equiv l_{кз}$ , то длина зоны действия ДО точно соответствует расстоянию до места КЗ.

Если замыкание происходит через  $R_{п}$ , то сопротивление контура КЗ состоит из сопротивления  $Z_{кз} \equiv l_{кз}$  поврежденного участка ЛЭП и переходного сопротивления  $R_{п}$ .

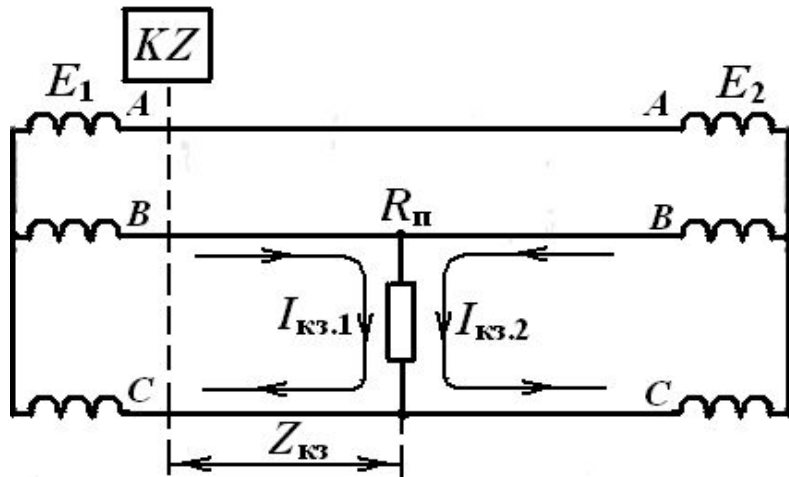
Переходное сопротивление может быть вызвано:

- при междуфазном КЗ электрической дугой;
- при КЗ на землю, кроме того, сопротивлением земли, и сопротивлением элементов, через которые произошло замыкание на землю.

Все переходные сопротивления можно считать активными.



## Влияние электрической дуги на величину сопротивления, замеряемого реле



На рисунке показано междуфазное КЗ фаз *B* и *C* через переходное сопротивление дуги  $R_{II}$  на ЛЭП с двусторонним питанием.

Реле сопротивления, реагирующее на междуфазные КЗ, включено на междуфазные напряжения и разность фазных токов (схема 1).

Из рисунка следует, что

$$Z_p = U_p / I_p = \frac{2I_{K3.1} \cdot Z_{K3} + I_{K3.\Sigma} \cdot R_{II}}{2I_{K3.1}} = Z_{K3} + \frac{I_{K3.\Sigma} \cdot R_{II}}{2I_{K3.1}} = Z_{K3} + \Delta Z,$$

где  $Z_{K3}$  – сопротивление прямой последовательности участка линии;

$R_{II}$  - переходное сопротивление дуги;

$I_{K3.1}$  – ток КЗ от источника  $E_1$ , проходящий через реле  $I_p$ ;

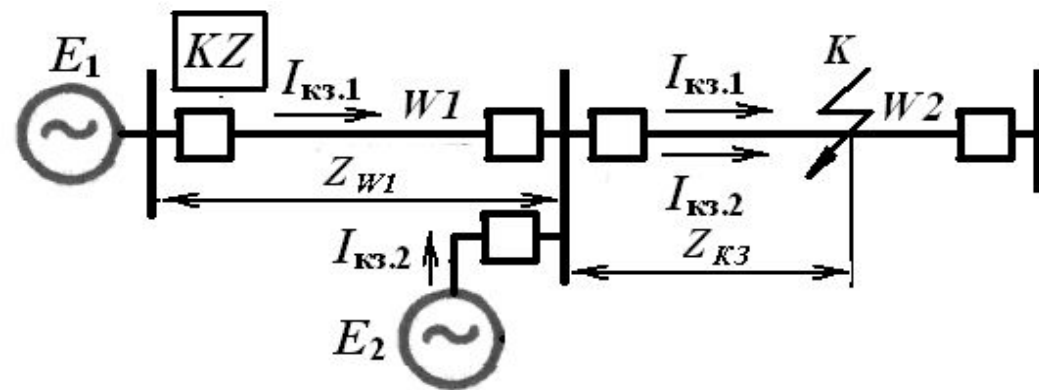
$I_{K3.\Sigma}$  – суммарный ток КЗ, проходящий через  $R_{II}$  от источников  $E_1$  и  $E_2$ ;

$\Delta Z = (I_{K3.\Sigma} \cdot R_{II}) / 2I_{K3.1}$  показывает увеличение  $Z_p$  по сравнению  $Z_{K3}$ .

**При замыканиях через дугу  $Z_p$  оказывается большим, чем действительное сопротивление до места КЗ, что приводит к сокращению зон I, II и III ступеней ДЗ.**

## *Влияние токов подпитки от промежуточных источников*

Между местом установки ДЗ и точкой повреждения могут быть включены промежуточные источники питания  $E_2$ , дающие дополнительный ток  $I_{K3.2}$  в точку КЗ.



Этот ток не проходит через реле защиты  $KZ$ , но, создавая дополнительное падение напряжения в сопротивлении поврежденного участка  $Z_{K3}$ , увеличивает напряжение на зажимах реле, а вместе с

ПРИМЕР 7

Напряжение на реле с учетом подпитки  $U_p = I_{K3.1} Z_{W1} + (I_{K3.1} + I_{K3.2}) Z_{K3}$ , ток в реле  $I_p = I_{K3.1}$ , отсюда

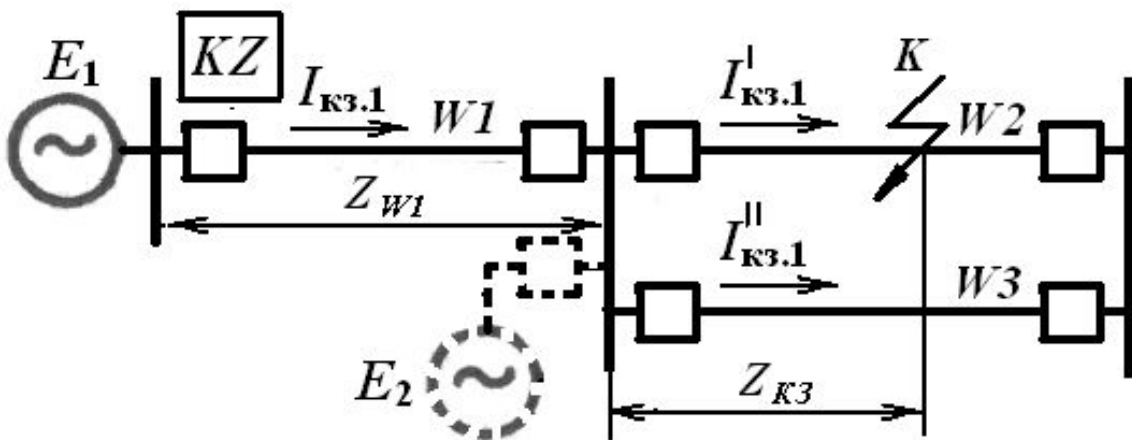
$$Z_p = U_p / I_p = Z_{W1} + \frac{I_{K1} + I_{K3.2}}{I_{K1}} \cdot Z_{K3} = Z_{W1} + K_{\Pi} Z_{K3}.$$

Коэффициент  $K_{\Pi} = \frac{I_{K1} + I_{K3.2}}{I_{K1}} > 1$  называется коэффициентом подпитки.

*При наличии подпитки сопротивление на зажимах реле оказывается большим, чем действительное сопротивление до места КЗ, что приводит к сокращению зон II и III ступеней ДЗ.*

## ***Влияние разветвления токов при сочетании одиночных ЛЭП с параллельными***

При сочетании одиночной ЛЭП с двумя параллельными и КЗ на одной из них, ток  $I_{K3}$ , протекающий через реле защиты **KZ**, разветвляется по параллельным линиям.



Напряжение на реле с учетом разветвления

$$U_p = I_{K3.1} Z_{W1} + I_{K3.1}^I Z_{K3},$$

ток в реле

$$I_p = I_{K3.1} \quad \text{отсюда}$$

$$Z_p = U_p / I_p = Z_{W1} + \frac{I_{K1}^I}{I_{K1}} \cdot Z_{K3} = Z_{W1} + K_p Z_{K3}.$$

Коэффициент  $K_p = \frac{I_{K1}^I}{I_{K1}} < 1$  называется коэффициентом разветвления.

***При наличии разветвления сопротивление на зажимах реле оказывается меньшим, чем действительное сопротивление до места КЗ, что приводит к сокращению зон II и III ступеней ДЗ.***

Одновременность подпитки и разветвления учитывается **коэффициентом токораспределения**  $K_T = I_{K3.W2} / I_{K3.W1}$ , где  $I_{K3.W1}$  - ток, протекающий через РС защиты, а  $I_{K3.W2}$  - ток в смежной (поврежденной) линии.

## *Влияние погрешностей измерительных трансформаторов*

*Токовая погрешность ТТ уменьшает вторичный ток по сравнению с его расчетным значением, что вызывает сокращение зоны действия всех ступеней ДЗ.*

*Угловая погрешность искажает значение угла  $\varphi_p$  сопротивления  $Z_p$  и влияет таким образом на работу направленных РС, у которых  $Z_p = f(\varphi_p)$ .*

*Для ограничения искажений в работе РС трансформаторы тока, питающие ДЗ, должны проверяться по кривым предельной кратности.*

*Погрешность по коэффициенту трансформации ТН уменьшает вторичное напряжение по сравнению с его расчетным значением, что вызывает увеличение зоны действия всех ступеней ДЗ.*

*Однако, погрешность ТН по коэффициенту трансформации невелика.*

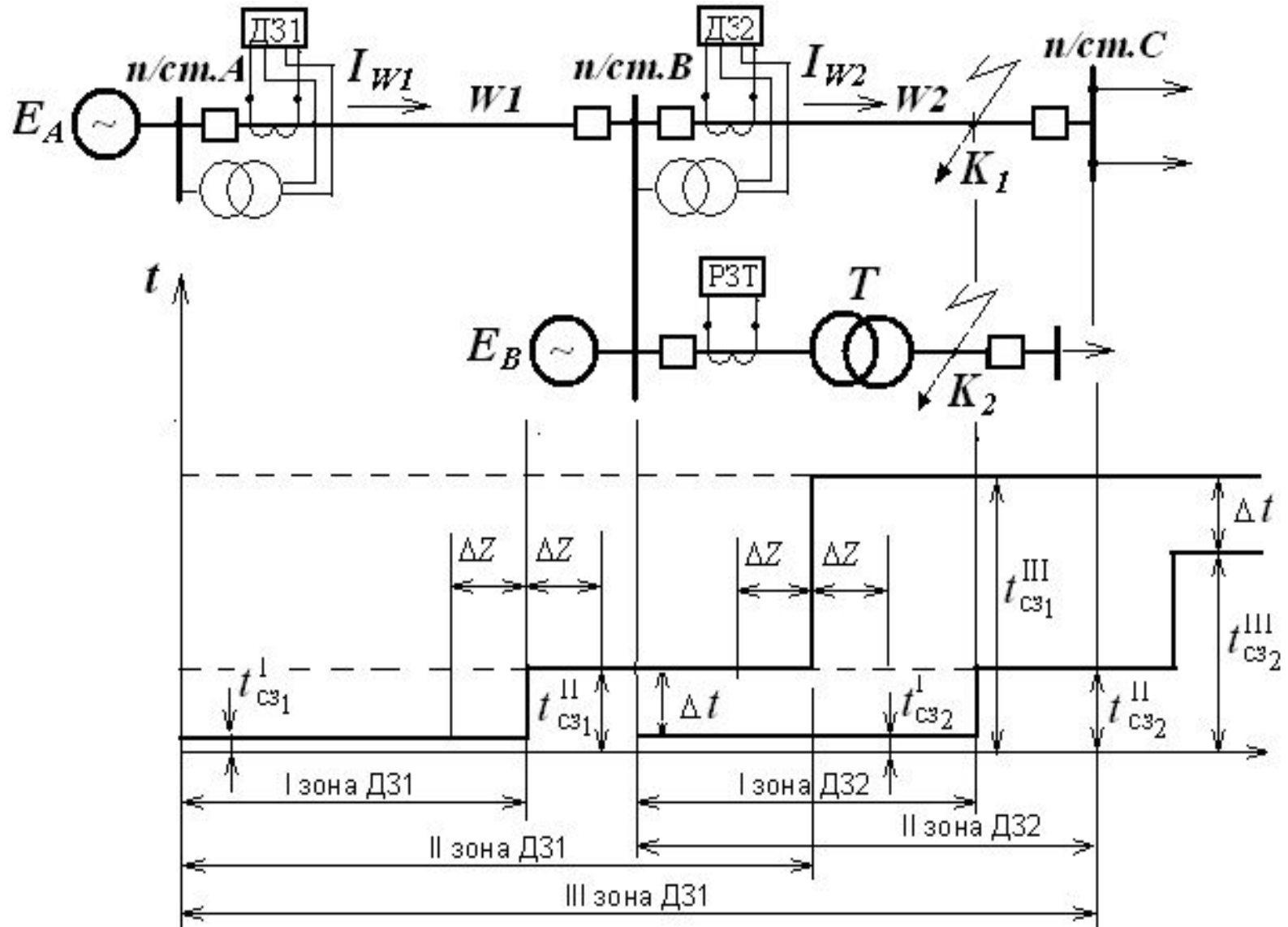
*Значение вторичного напряжения может заметно искажаться за счет падения напряжения в соединительных проводах, связывающих реле с ТН. Подбором сечения соединительных проводов эти искажения сводятся к минимуму.*

*Угловая погрешность ТН влияет на работу направленных РС так же, как и ТТ.*

*Искажение значений  $Z_p$  необходимо учитывать при выборе уставок и характеристик ДЗ во избежание нарушений селективности и недопустимого сокращения зон действия защиты.*

## Расчет параметров дистанционных защит

Расчет параметров трехступенчатой ДЗ на примере участка сети, показанного на рисунке.



Выбираются уставки ДЗ1, установленной на линии  $W1$  со стороны ПС  $A$ .

При выборе сопротивления срабатывания ДО необходимо учитывать погрешности, вызывающие отклонение  $Z_{сз}$  от принятой уставки  $Z_{уст}$ .

Действительное значение  $Z_{сз} = Z_{уст} \pm \Delta Z$ .

На значение  $\Delta Z$  влияют погрешности ТТ, ТН и реле сопротивления ДО.

В расчетах принимается  $\Delta_{ТТ} = 0,1$ ;  $\Delta_{ТН} = \pm 0,05$ ;  $\Delta_{ДО} = \pm 0,1$ .

Помимо этих погрешностей вводится запас, учитывающий погрешности расчета и регулирования уставок.

### Первая ступень защиты ДЗ1

Сопротивление срабатывания  $Z^I_{сз.1}$  выбирается из условия, чтобы ДО этой ступени не могли сработать за пределами защищаемой ЛЭП ( $W1$ ):

$$Z^I_{сз.1} = k_1 Z_{W1}$$

где  $Z_{W1}$  - первичное сопротивление прямой последовательности защищаемой ЛЭП  $W1$ ;  $k_1 = 0,85-0,9$  - коэффициент, учитывающий погрешности  $\Delta_{ТН}$  и  $\Delta_{ДО}$ , могущие вызвать увеличение  $Z^I_{сз.1}$ .

**Время срабатывания I ступени  $t^I_{сз.1}$**  определяется собственным временем действия ИО и элементов ЛЧ защиты ( $t^I_{сз.1} = 0,02-0,1$  с).

Длина зоны I ступени составляет  $(0,85-0,9)l_{W1}$ .

## **Вторая ступень защиты ДЗ1**

Сопrotивление срабатывания  $Z_{сз.1}^{II}$  и выдержку времени  $t_{сз.1}^{II}$  отстраивают от быстродействующих РЗ трансформаторов и ЛЭП, отходящих от шин ПС **B**.

**По согласованию с РЗ линий:**  $Z_{сз.1}^{II} = k_1(Z_{W1} + k_2 k_T Z_{сз.2}^I)$ ,

где  $Z_{W1}$  - первичное сопротивление прямой последовательности защищаемой ЛЭП;  
 $Z_{сз.2}^I$  - наименьшее из сопротивлений срабатывания I ступеней ДЗ смежных ЛЭП;

$k_2 = 0,9$  - коэффициент, учитывающий сокращение  $Z_{сз.2}^I$  на  $\Delta Z$ ;

$k_1 = 0,85-0,9$  - коэффициент, учитывающий возможное увеличение  $Z_{сз.1}^{II}$  в результате погрешностей ДО II ступени ДЗ1;

$k_T$  - коэффициент токораспределения (принимается равным  $I_{W2}/I_{W2}$  при КЗ в точке **K1**).

**По отстройке от КЗ за трансформаторами ПС B:**  $Z_{сз.1}^{II} = k_1(Z_{W1} + k_T Z_{T \text{ мин}})$ ,

где  $Z_{T \text{ мин}}$  - сопротивление наиболее мощного трансформатора на ПС **B** с учетом его изменения при регулировании напряжения;  $k_1 = 0,85-0,9$ ;

$k_T$  - коэффициент токораспределения при КЗ за трансформатором ПС **B**.

**За окончательное значение  $Z_{сз.1}^{II}$  принимается меньшее из них.**

Выбранное  $Z_{сз.1}^{II}$  проверяется по условию надежного действия II ступени ДЗ1 при КЗ на шинах ПС **B**. Согласно ПУЭ:  $k_{ч} = Z_{сз.1}^{II} / Z_{W1} \geq 1,15$ .

**Выдержка времени II ступени** принимается равной:  $t_{сз.1}^{II} = t_{сз.2}^I + \Delta t$ ,  
где  $t_{сз.2}^I$  - максимальное время действия быстродействующих РЗ следующего участка.

Если считать  $t_{сз.2}^I = 0,1$  с, а  $\Delta t = 0,3-0,5$  с, то  $t_{сз.1}^{II} = 0,4-0,6$  с.

### Третья ступень защиты ДЗ1

Измерительные органы III ступени могут выполняться с помощью токовых реле или реле сопротивления.

**Ток срабатывания токовых ПО**, применяемых в ДЗ сети 35 кВ, выбирается так же, как и у МТЗ, по условию отстройки от тока нагрузки:

$$I_{сз1}^{III} = k_{отс} k_{сзп} I_{нагр. макс} / k_{в},$$

где  $k_{отс} = 1,2$ ;  $k_{в} = 0,8$ ;  $k_{сзп}$  и  $I_{нагр. макс}$  - определяются расчетом.

**Чувствительность** токовых ПО проверяется по  $I_{кз.мин}$ :

- при КЗ в конце защищаемой ЛЭП  $k_{ч} \geq 1,5$ ;
- при КЗ в конце зоны резервирования  $k_{ч} \geq 1,2$ .

**Сопротивление срабатывания III ступени ненаправленного реле сопротивления** выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления  $Z_{раб.мин}$ , появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего КЗ.

Наименьшее значение  $Z_{раб.мин}$  имеет место при  $I_{нагр. макс}$  и

$$U_{раб. мин} = (0,9-0,95)U_{раб.норм}:$$
$$Z_{раб.мин} = U_{раб. мин} / (k_{сзп} I_{нагр. макс}).$$

Для обеспечения надежного возврата реле после отключения внешнего КЗ,  $Z_{сз.1}^{III}$  определяется по выражению:

$$Z_{сз.1}^{III} = Z_{раб.мин} / (k_{отс} k_{в}),$$

где  $k_{отс} = 1,1-1,2$ ;  $k_{в} = 1,15$ .



**Чувствительность** реле сопротивления III ступени проверяется при КЗ в конце защищаемой ЛЭП и в конце зоны резервирования и оценивается коэффициентом  $k_{\text{ч}} = Z_{\text{сз.1}}^{\text{III}} / Z_{\text{кз. макс}}$ , где  $Z_{\text{кз. макс}}$  – наибольшее сопротивление на зажимах реле при КЗ в расчетных точках.

Согласно ПУЭ  $k_{\text{ч}}$  в первом случае должен быть не меньше 1,5, а во втором - 1,2.

**Сопротивление срабатывания III ступени направленного реле сопротив – ления** имеет  $Z_{\text{сз}}$ , зависящее от  $\varphi_{\text{р}}$  по уравнению  $Z_{\text{сз}} = Z_{\text{сз макс}} \cos(\varphi_{\text{м.ч}} - \varphi_{\text{р}})$ .

С учетом этого для отстройки от нагрузки  $Z_{\text{сз.1}}^{\text{III}}$  определяется по выражению:

$$Z_{\text{сз.1}}^{\text{III}} = Z_{\text{раб.мин}} / (k_{\text{отс}} k_{\text{в}} \cos(\varphi_{\text{м.ч}} - \varphi_{\text{нагр. макс}})).$$

**Выдержка времени III ступени ДЗ1** выбирается по условию селективности с III ступенью ДЗ2:

$$t_{\text{сз.1}}^{\text{III}} = t_{\text{сз.2}}^{\text{II}} + \Delta t.$$

В некоторых случаях для уменьшения  $t_{\text{сз.1}}^{\text{III}}$  сопротивление срабатывания  $Z_{\text{сз.1}}^{\text{III}}$  согласуется с концом зоны действия второй ступени  $Z_{\text{сз.2}}^{\text{II}}$  следующего участка.

**Проверка  $Z_{\text{сз}}$  ДО по току точной работы  $I_{\text{т.р}}$ .** Проверяется, чтобы минимальное значение тока КЗ в конце зоны действия каждой ступени ДЗ было больше тока точной работы ДО этой ступени (при выбранной уставке) не менее чем в 1,3 раза:  $I_{\text{кз. мин}} \geq 1,3 I'_{\text{т.р}}$ .

**Вторичные сопротивления срабатывания реле.** Для пересчета первичных сопротивлений на вторичную сторону ТТ и ТН используется выражение

$$Z_{\text{ср}} = Z_{\text{сз}} K_I / K_U.$$

## **Разновидности находящихся в эксплуатации дистанционных защит**

**Для защиты ЛЭП 500-750 кВ** применяется ДЗ типа **ПДЭ-2001**.

**Для защиты ЛЭП 110-330 кВ** - трехступенчатая ДЗ, размещенная на панели защиты типа **ЭПЗ-1636**.

Аналогичное назначение имеет дистанционная защита типа **ШДЭ-2801**.

Помимо ДЗ **ШДЭ-2801** существует ДЗ типа **ШДЭ-2802**.

**Для сетей 35 кВ** с изолированной нейтралью выпускается односистемная трехступенчатая ДЗ типа **ШДЭ-2701** с токовыми ПО.

**Для ЛЭП напряжением 6-20 кВ** выпускается односистемная ДЗ типа **ДЗ-10** с зависимой характеристикой выдержки времени..

### **Оценка дистанционных защит**

*Основными достоинствами дистанционного принципа являются:*

- селективность действия защиты в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания: малые выдержки времени при КЗ в начале защищаемого участка;
- значительно большая чувствительность при КЗ и лучшая отстройка от нагрузки и качаний по сравнению с МТЗ.

*К числу недостатков ДЗ следует отнести:*

- невозможность обеспечения мгновенного отключения КЗ в пределах всей защищаемой ЛЭП;
- реагирование на качания и нагрузку;
- возможность ложной работы при неисправностям в цепях напряжения;
- сложность схем ДЗ и ДО.