

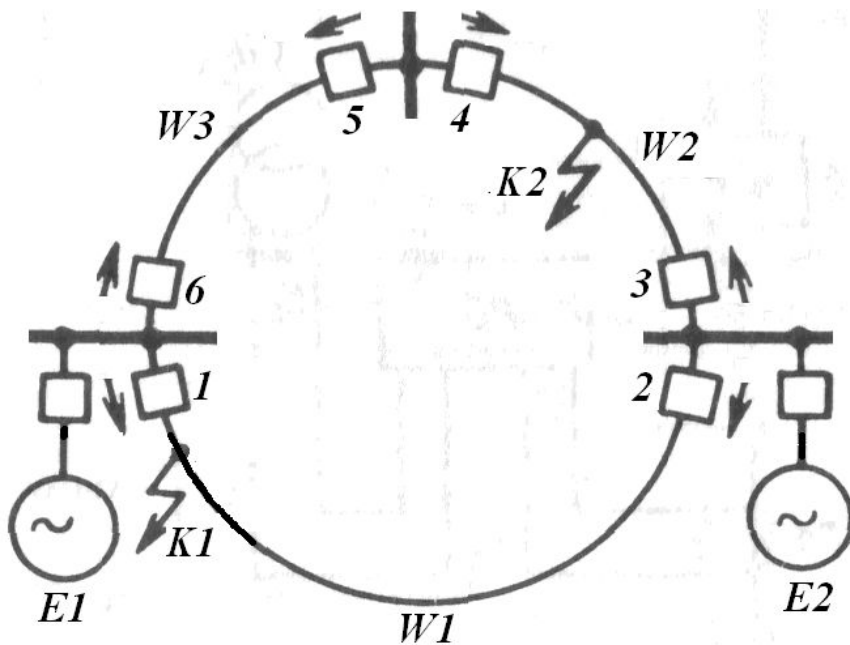
ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

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



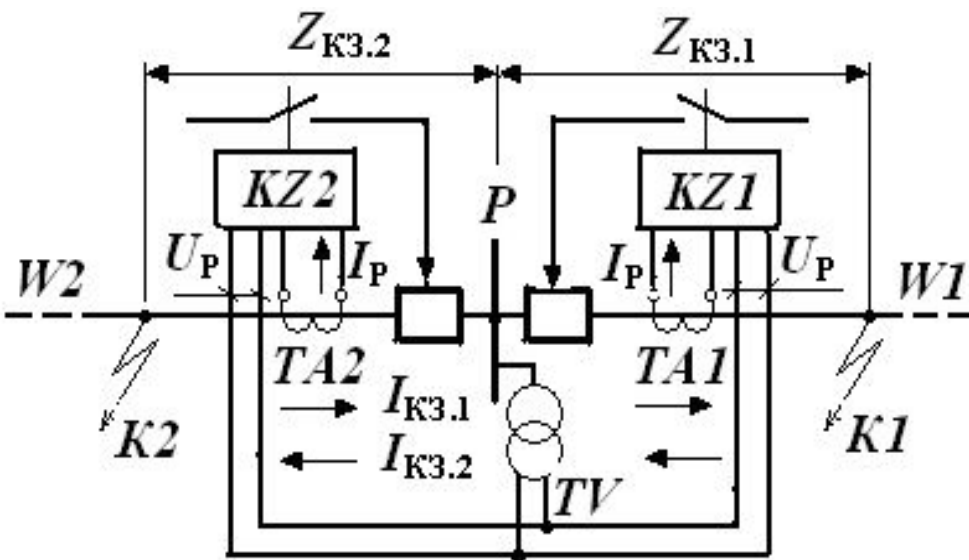
Необходимость применения ДЗ - невозможность обеспечения селективности в сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания направленными токовыми защитами.

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. $t_{сз.3} < t_{сз.1}$.

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.

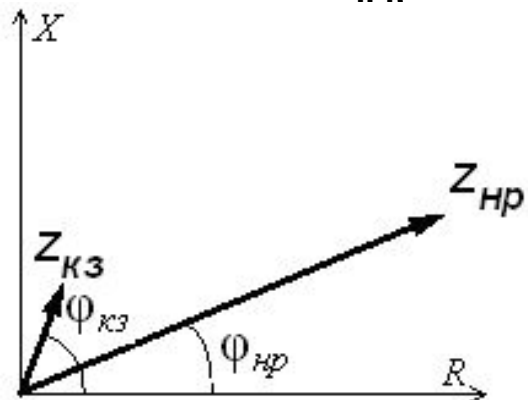
Оно замеряет сопротивлением Z как отношение U к I , т.е. $Z = U / I$.

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.*

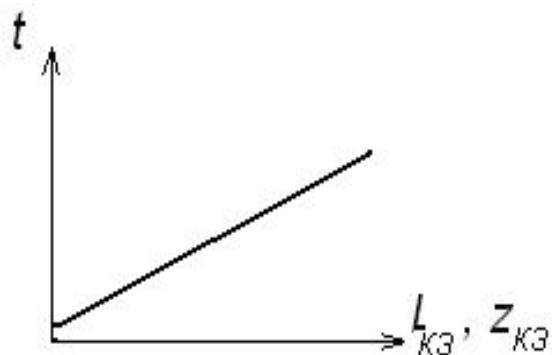
Дистанционная защита используется только как защита от КЗ.

Для обеспечения селективности:

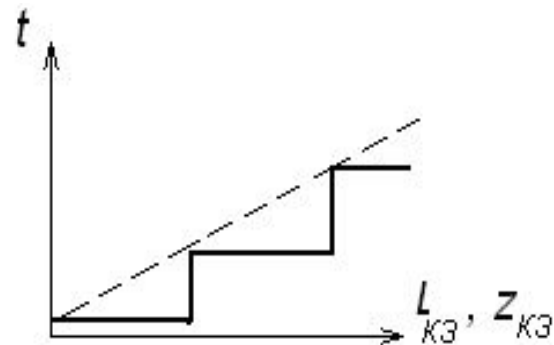
- ДЗ выполняются направленными, действующими при направлении мощности КЗ от шин в ЛЭП;
- выдержки времени у защит, работающих при одном направлении мощности, согласуются между собой.

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

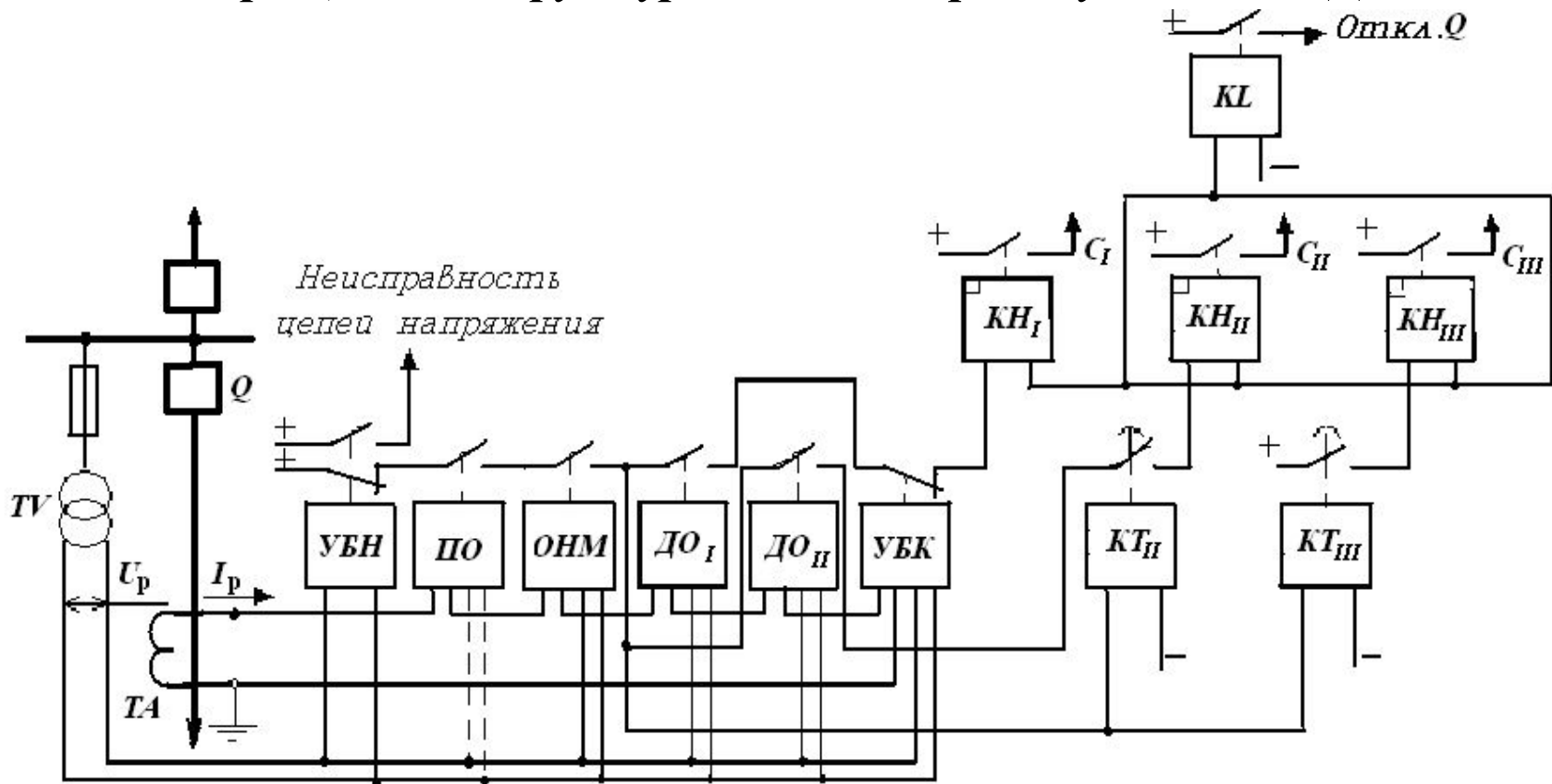


Схема содержит следующие элементы:

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

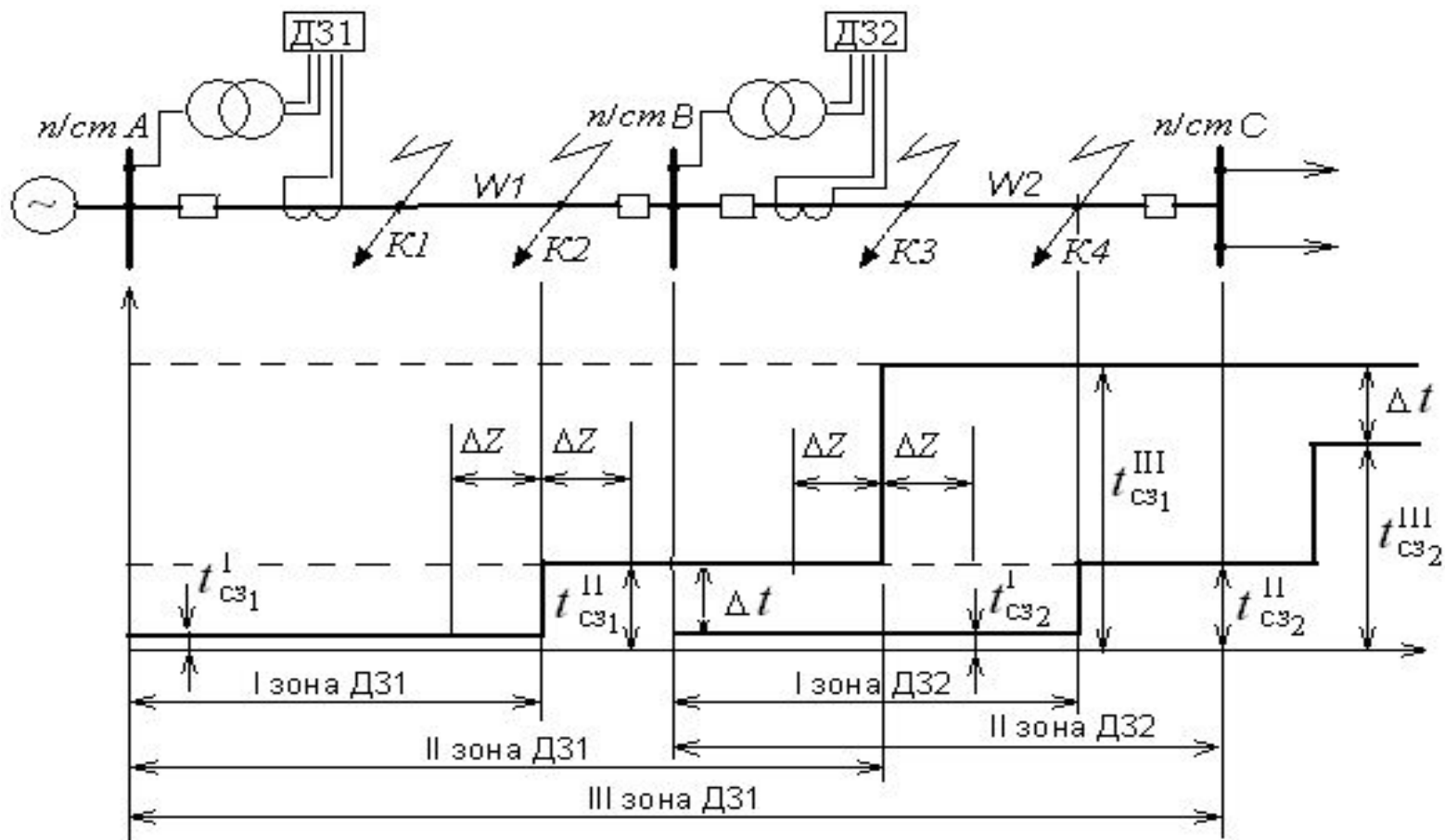
ОНМ - орган направления мощности; **УБК** - устройство блокировки от качаний;

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



ΔZ - погрешность дистанционного реле; Δt - степень селективности

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

II ступень ДЗ защищает остальная 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 $k_{\text{в}} = Z_{\text{в}} / Z_{\text{ср}} = 1,05 - 1,1$.

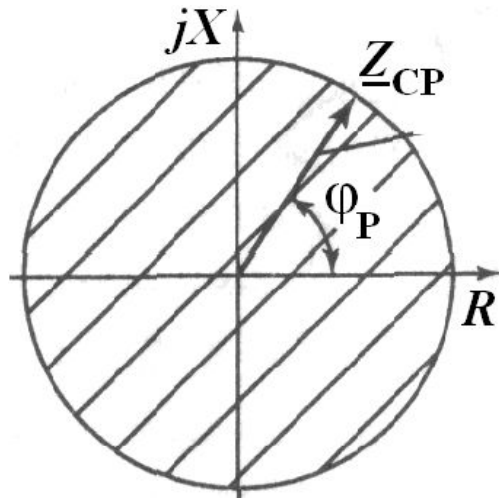
Элементные базы изготовления реле сопротивления

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 φ_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 φ_p .

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

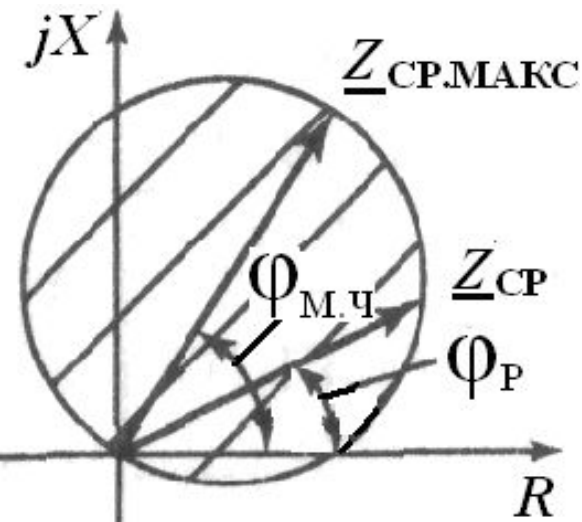
Направленное реле полного сопротивления

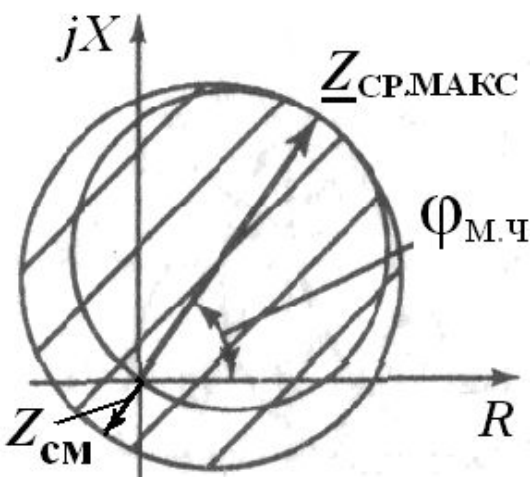
имеет $Z_{ср}$, зависящее от угла φ_p .

Зависимость сопротивления срабатывания этого реле от угла φ_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.

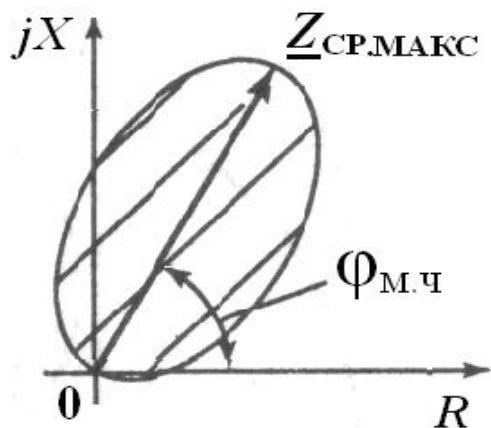




Реле с круговой характеристикой, смещенной относительно начала координат.

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

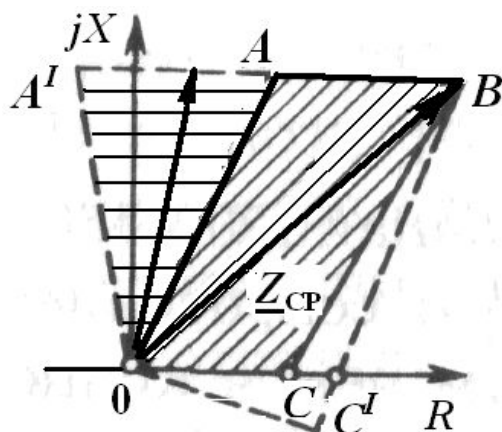
Возможно смещение характеристики срабатывания реле в сторону I квадранта.



Реле с эллиптической характеристикой.

Сопротивление срабатывания такого реле Z_{CP} зависит от угла φ_p и имеет наибольшее значение при $\varphi_p = \varphi_{M.C}$.

Сопротивление $Z_{CP.MAKC}$ 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:

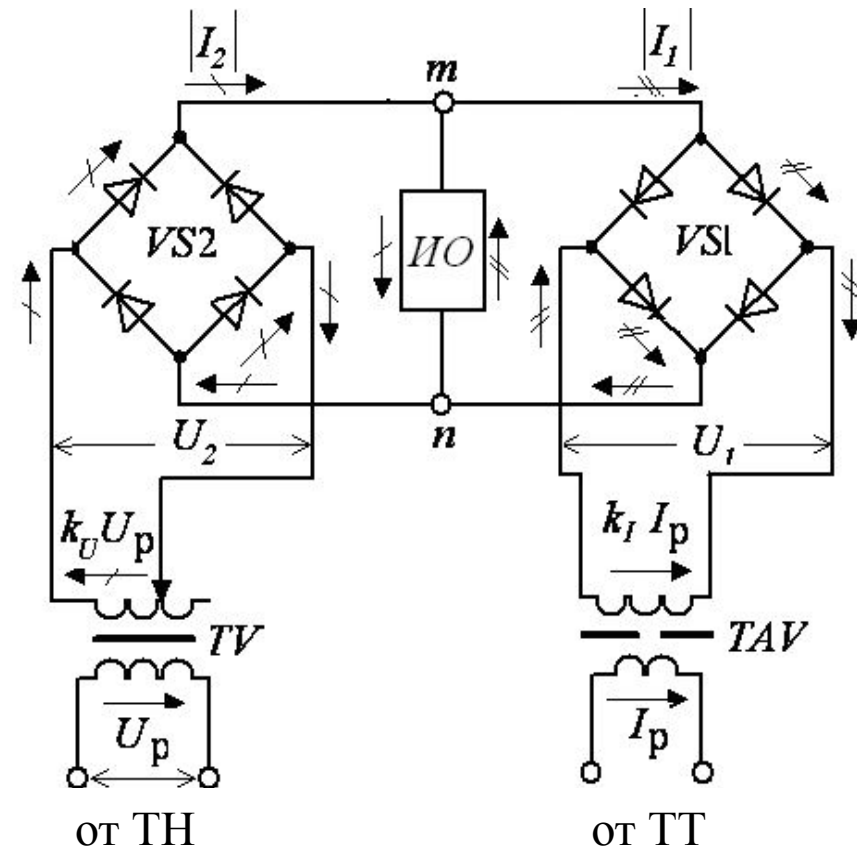
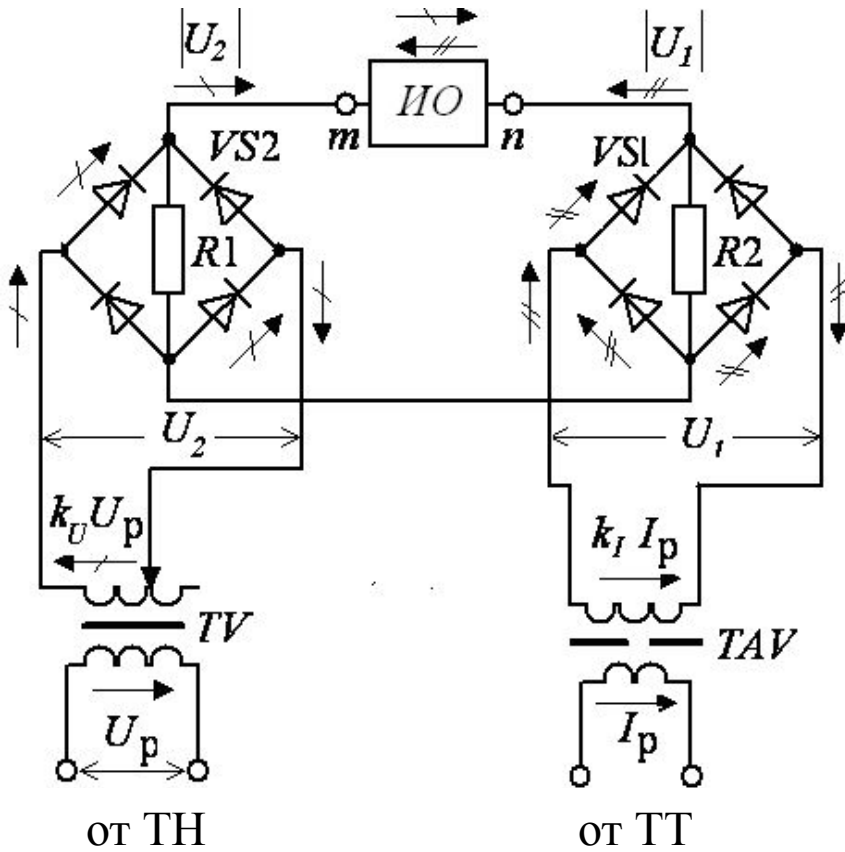
- на балансе напряжений;
- на балансе токов.

РС на диодных схемах сравнения абсолютных значений двух напряжений

Ненаправленное реле сопротивления с круговой характеристикой

На балансе напряжений

На балансе токов



Для получения характеристики в виде окружности с центром в начале координат, к схеме сравнения реле подводятся два напряжения $U_1 = k_I I_p$ и $U_2 = k_U U_p$,

где k_I – коэффициент пропорциональности между ЭДС трансреактора TAV и его первичным током I_p , а k_U – коэффициент трансформации трансформатора напряжения TV .

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 .

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 φ_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 φ_p

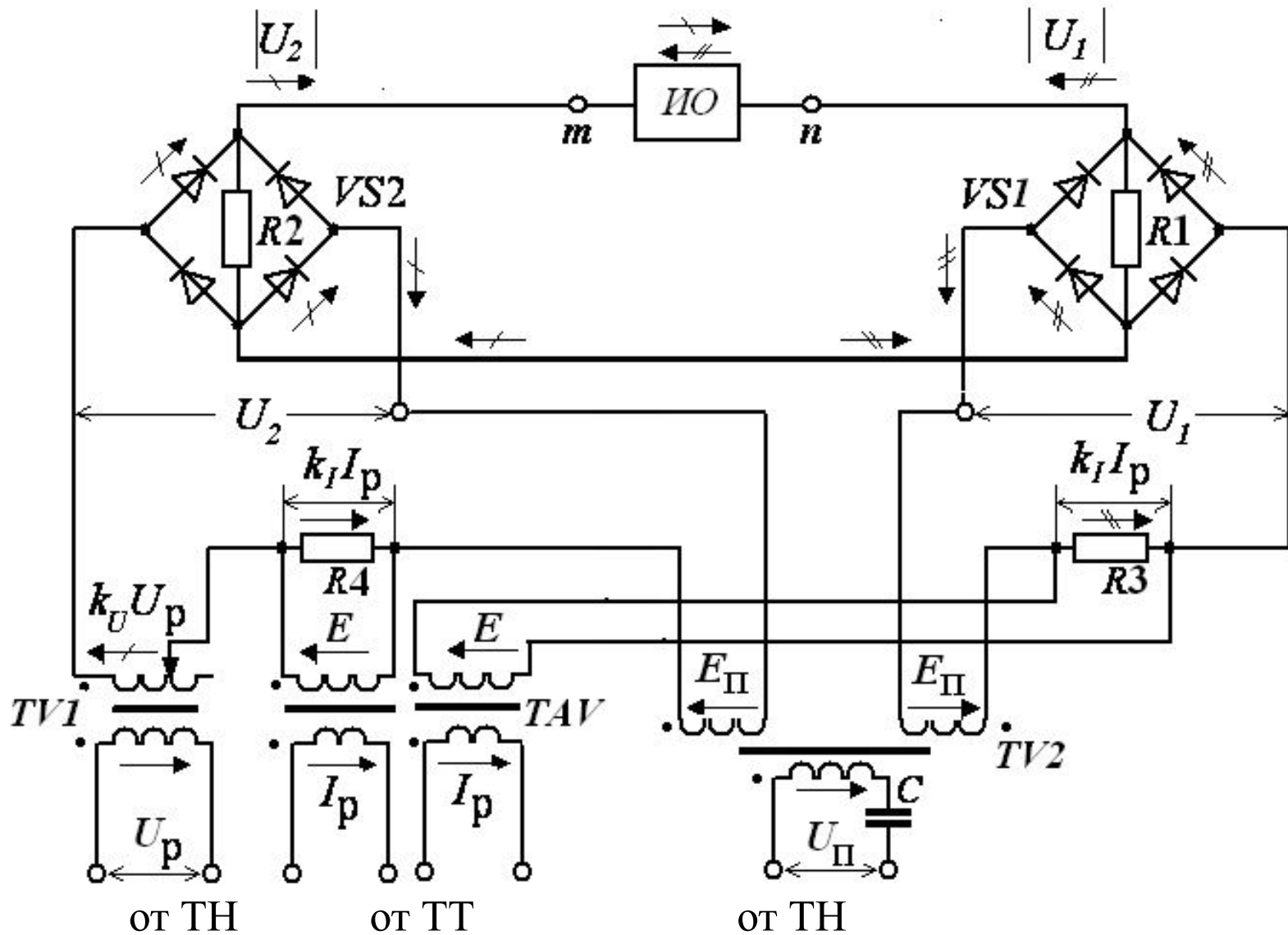
$$Z_{cp} = Z_{cp.max} \cos(\varphi_{m.ч} - \varphi_p) = 2(k_I/k_U) \cos(\varphi_{m.ч} - \varphi_p).$$

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

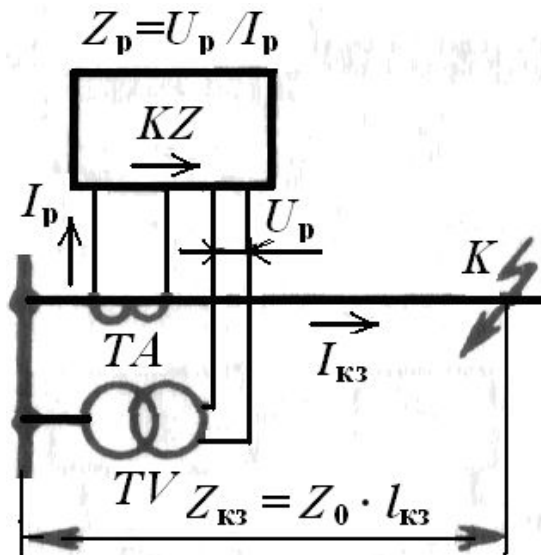
Требования к схемам включения

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).

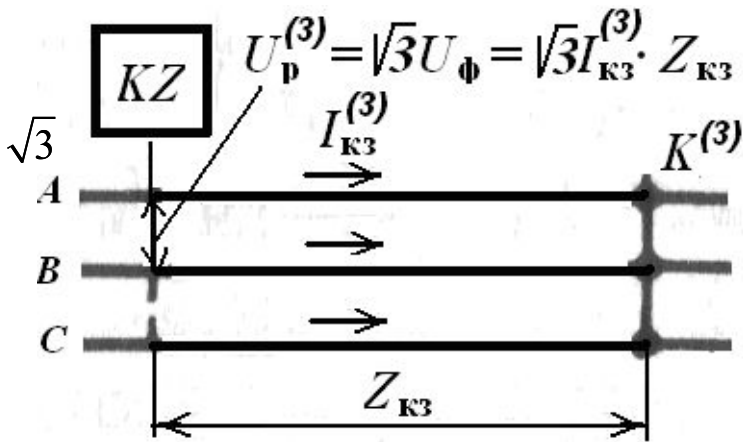
1. Включение реле сопротивления на междуфазные напряжения и разность фазных токов (схема 1)

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-

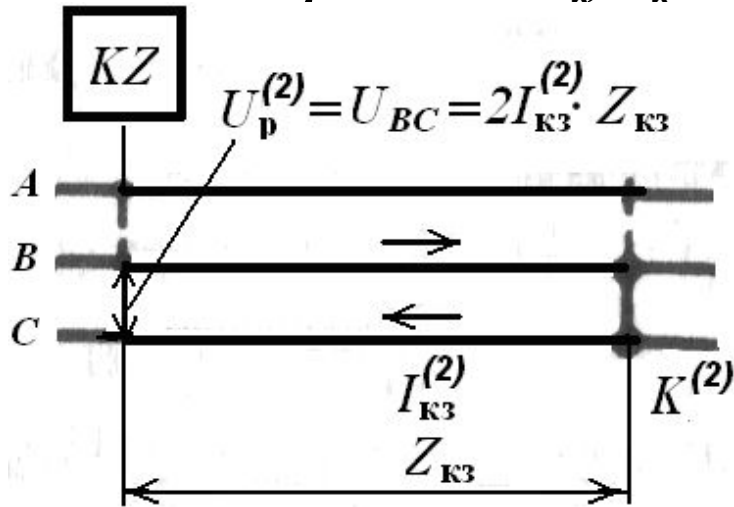
тельности фазы от места установки реле до точки КЗ; Z_0 - удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 км; l_{K3} - расстояние до места КЗ.

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_{ϕ} и ток $I_p = I_{\phi} + k3I_0$, где I_{ϕ} – ток той же фазы, что и напряжение U_{ϕ} ; $k3I_0$ – 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).

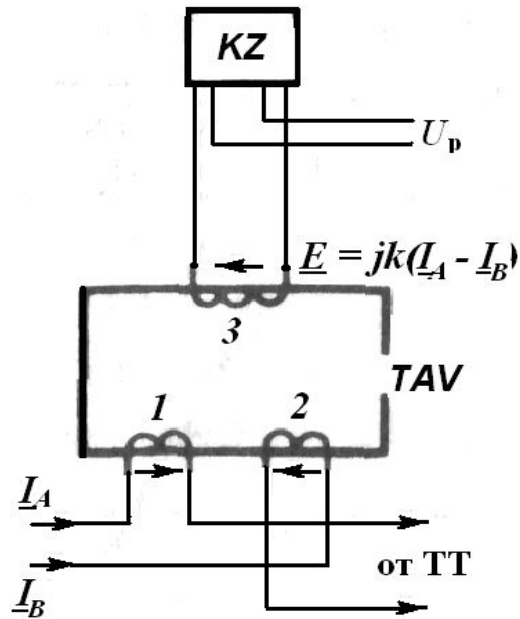
При появлении тока НП, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю $K1$ и $K2$, ДО защит, установленные на этом участке, автоматически переключаются на напряжение фазы U_{ϕ} и ток $I_{\phi} + k3I_0$.

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

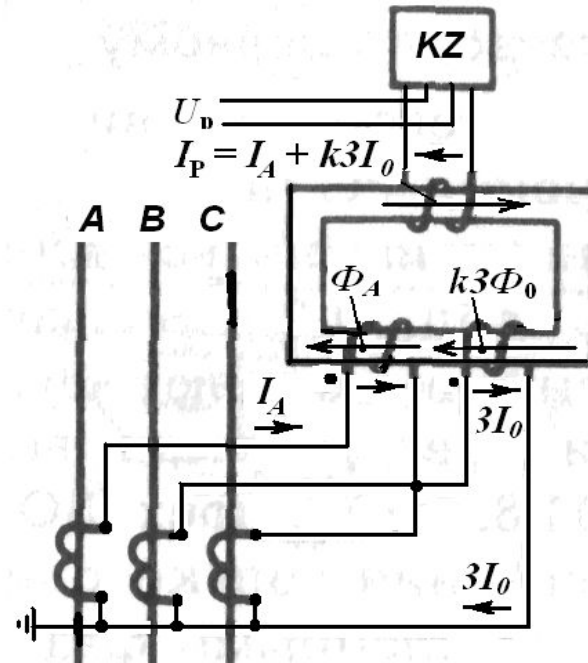
Наличие двух первичных обмоток у трансреакторов реле позволяет включать их на фазный ток и ток $3I_0$, необходимый для получения токовой компенсации. При этом ток вторичной обмотки трансреактора будет пропорционален $I_p + k3I_0$.

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

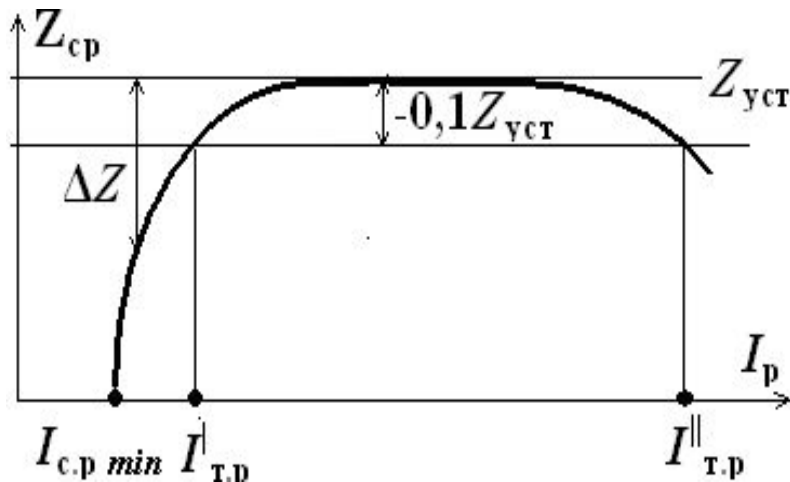
Погрешности реле сопротивления, обусловленные током I_p

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 ΔZ 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 **0,9 $Z_{уст}$** .

Погрешность ΔZ 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.

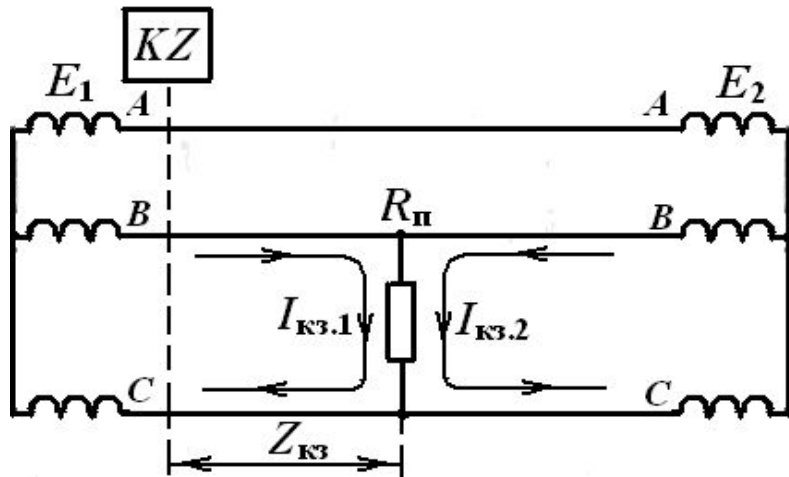
Если замыкание происходит через $R_{п}$, то сопротивление контура КЗ состоит из сопротивления $Z_{кз} \equiv l_{кз}$ поврежденного участка ЛЭП и переходного сопротивления $R_{п}$.

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

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

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 ;

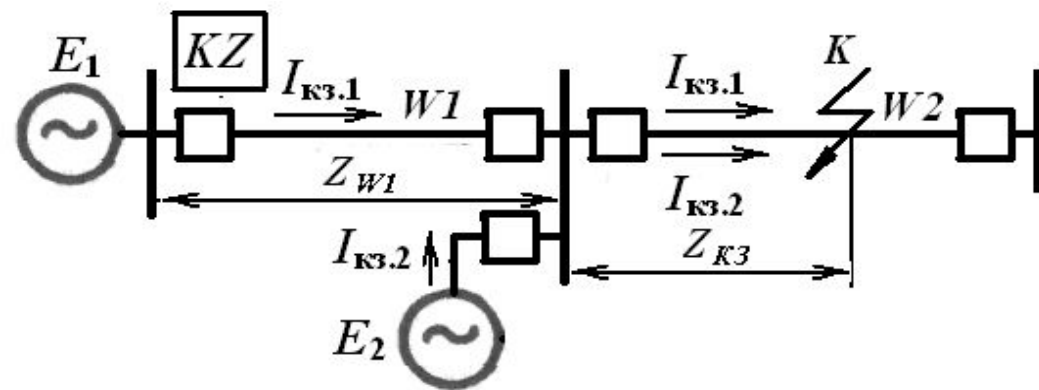
$I_{K3.Σ}$ – суммарный ток КЗ, проходящий через R_{II} от источников E_1 и E_2 ;

$\Delta Z = (I_{K3.Σ} \cdot R_{II}) / 2I_{K3.1}$ 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

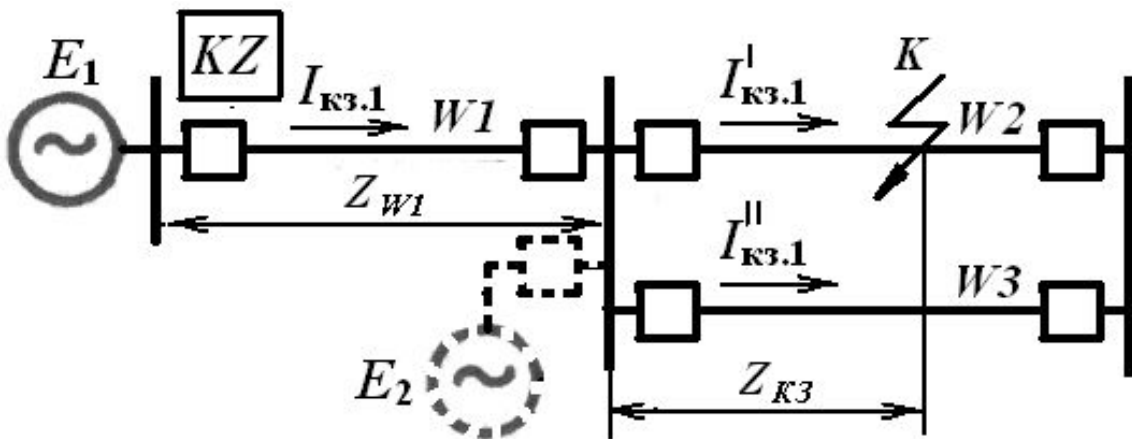
$$Z_p = U_p / I_p = Z_{W1} + \frac{I_{K3.1} + I_{K3.2}}{I_{K3.1}} \cdot Z_{K3} = Z_{W1} + K_{\Pi} Z_{K3}.$$

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

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

$$Z_p = U_p / I_p = Z_{W1} + \frac{I_{K3.1}^I}{I_{K3.1}} \cdot Z_{K3} = Z_{W1} + K_p Z_{K3}.$$

Коэффициент $K_p = \frac{I_{K3.1}^I}{I_{K3.1}} < 1$ 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 φ_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.

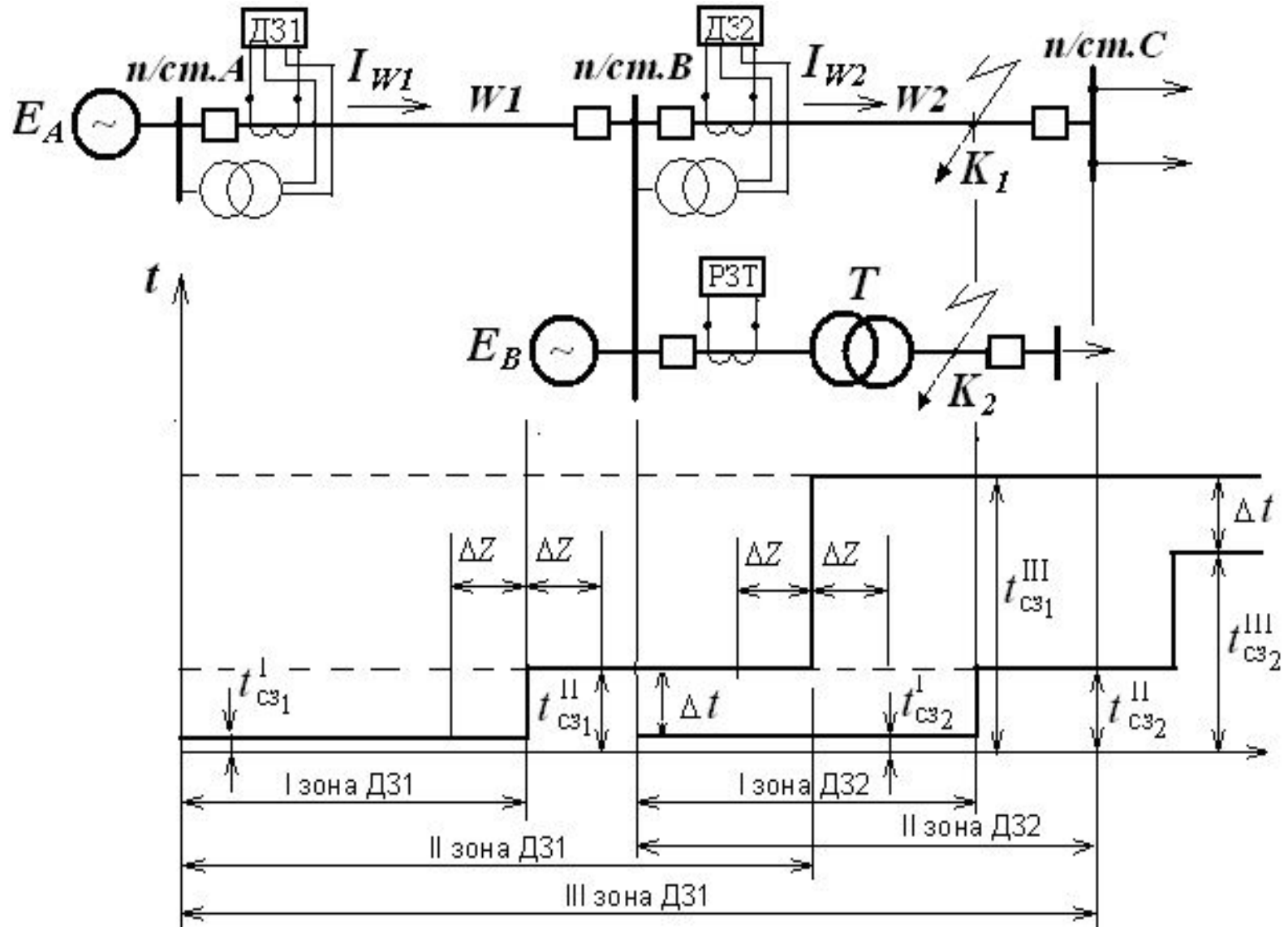
Значение вторичного напряжения может заметно искажаться за счет падения напряжения в соединительных проводах, связывающих реле с ТН. Подбором сечения соединительных проводов эти искажения сводятся к минимуму.

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 ΔZ 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 ΔZ ;

$k_1 = 0,85-0,9$ - 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.