



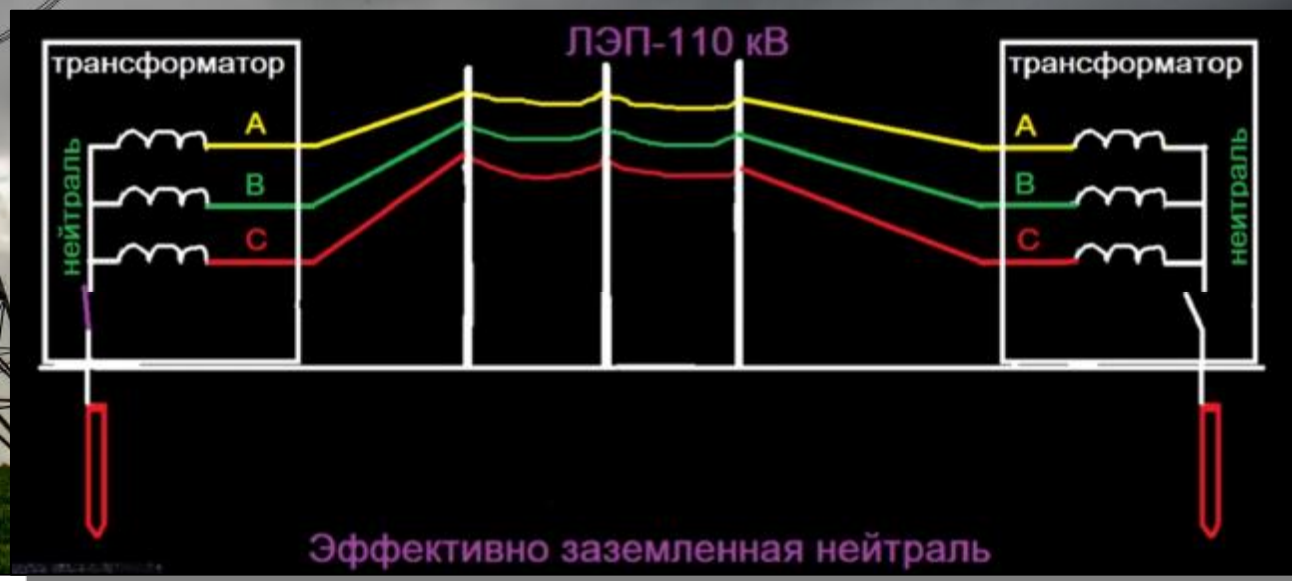
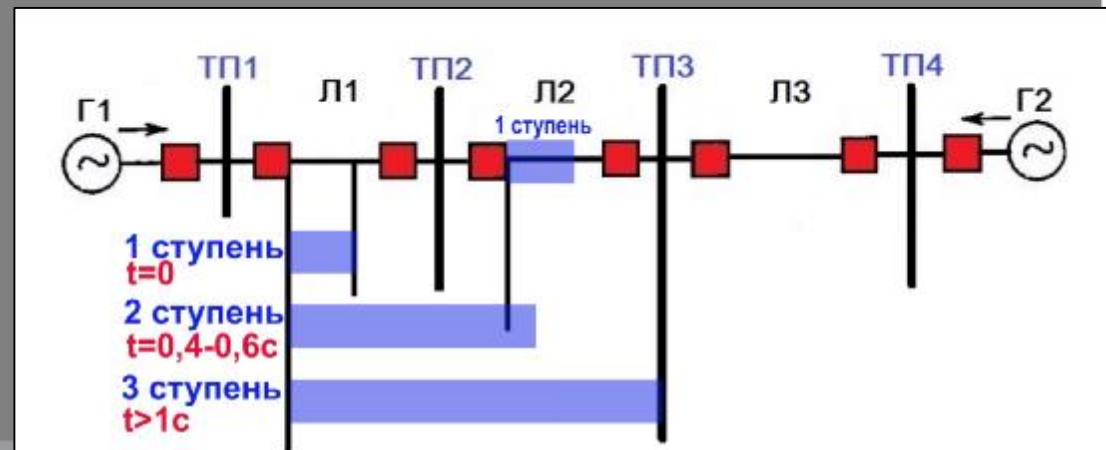
Институт энергетики,  
информационных технологий  
и управляющих систем

# Релейная защита и автоматика систем электрообеспечения

Лекция №\_\_

## Токовые защиты нулевой последовательности ВЛ 110 кВ

Составил: Кузнецов Д. Б.



## Токовая направленная защита нулевой последовательности ТНЗНП

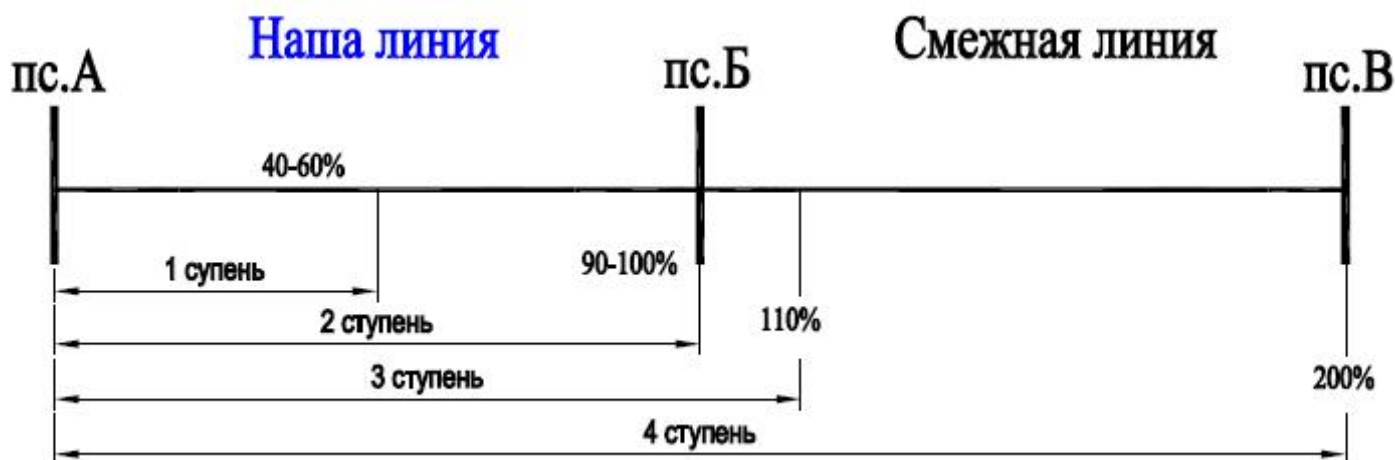
Самая надежная и в месте с тем простая защита линии. Это логическая цепочка из контакта токового реле, реле направления мощности и реле времени (начиная со второй ступени).

Первая ступень действует без выдержки времени, охватывает 40-60% длины линии, остальные ступени имеют выдержки времени.

Вторая ступень охватывает 90-100% длины линии.

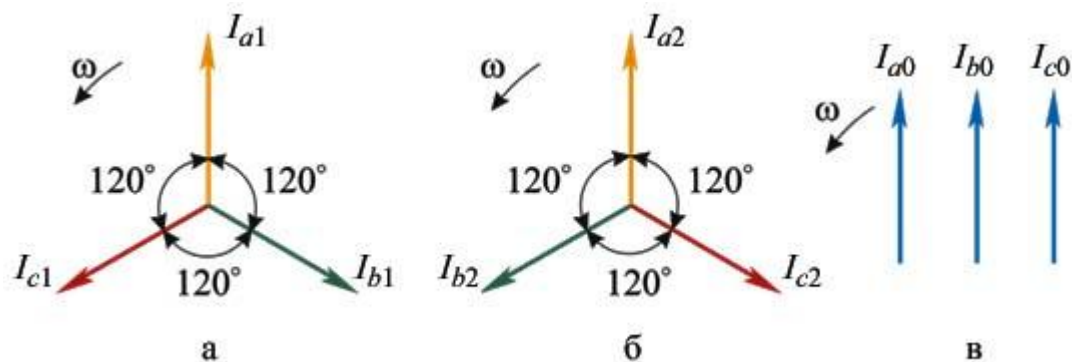
Третья ступень надежно охватывает линию до шин противоположной подстанции.

Четвертая (пятая ступень) применяется для обеспечения дальнего резервирования.



Земляная защита (ЗЗ) предназначена для защиты ВЛ в сетях с заземленной нейтралью от КЗ на землю. Полное правильное название защиты - токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП).

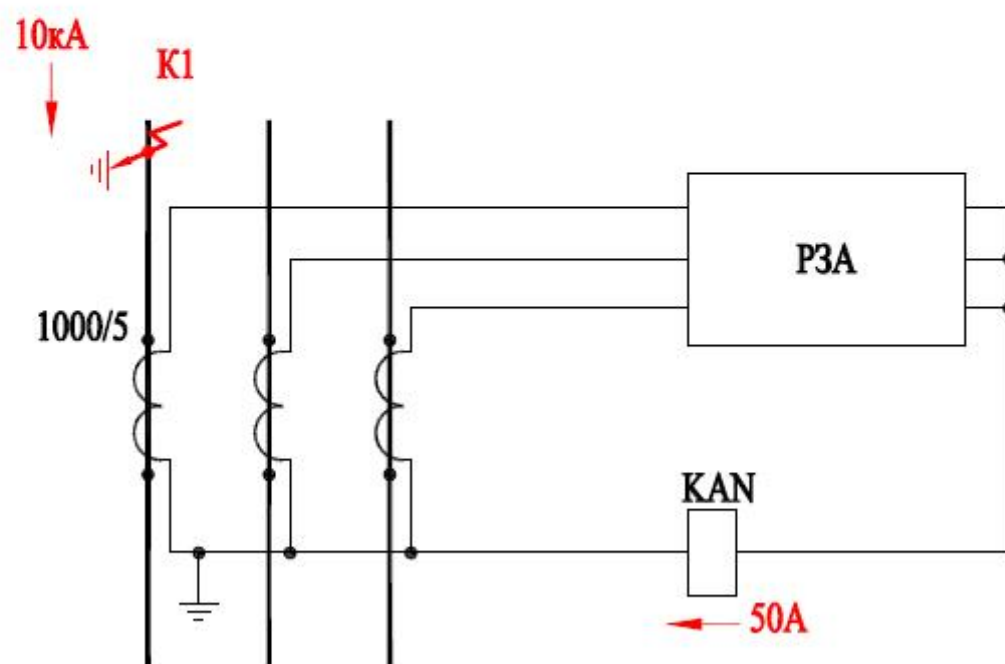
ЗЗ реагирует на ток нулевой последовательности защищаемой ВЛ: если величина тока нулевой последовательности превышает уставку, ЗЗ срабатывает и отключает защищаемую ВЛ. То есть, по принципу действия ЗЗ является максимальной токовой защитой, включенной не на полные фазные токи, а на ток нулевой последовательности.



Реле тока ЗЗ включаются в обратный провод трансформаторов тока (ТТ), соединенных в полную звезду. Ток в реле ЗЗ равен сумме токов трех фаз и равен утроенному току нулевой последовательности:

$$I_3 = I_A + I_B + I_C = 3I_0$$

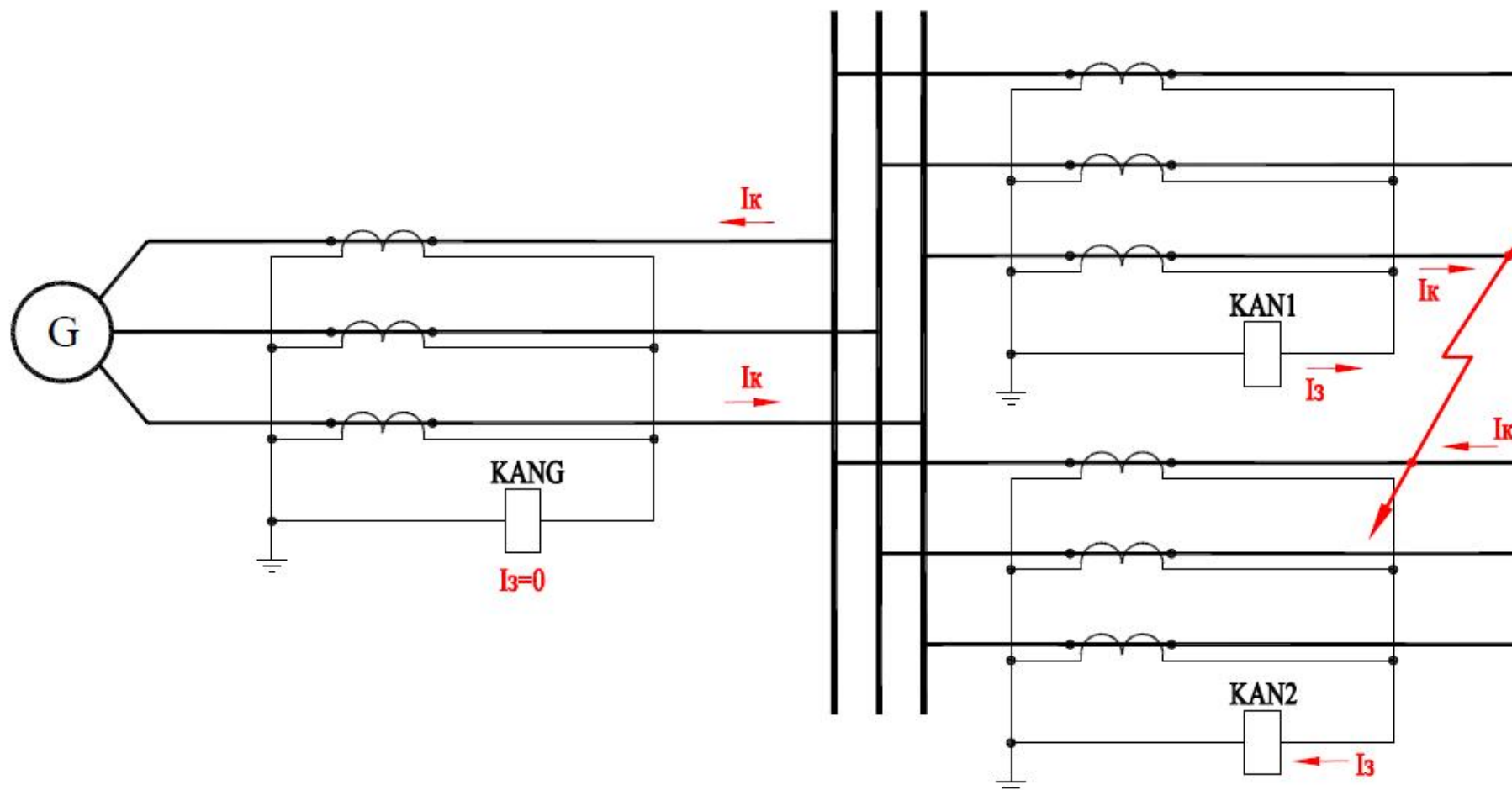
## Включение реле 33 в нулевой провод



В нормальном режиме работы ток в реле тока ЗЗ равен нулю, так как сумма токов трех фаз в трехфазном симметричном режиме работы равна нулю. Ток в реле тока ЗЗ может появиться только в четырех случаях:

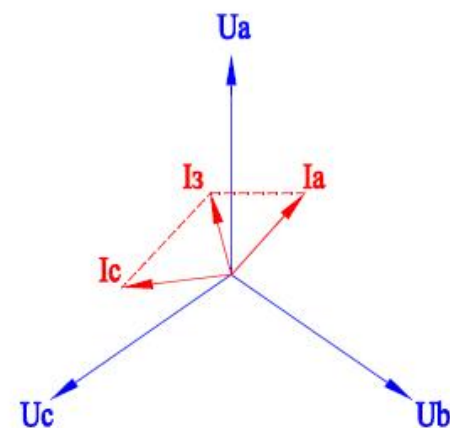
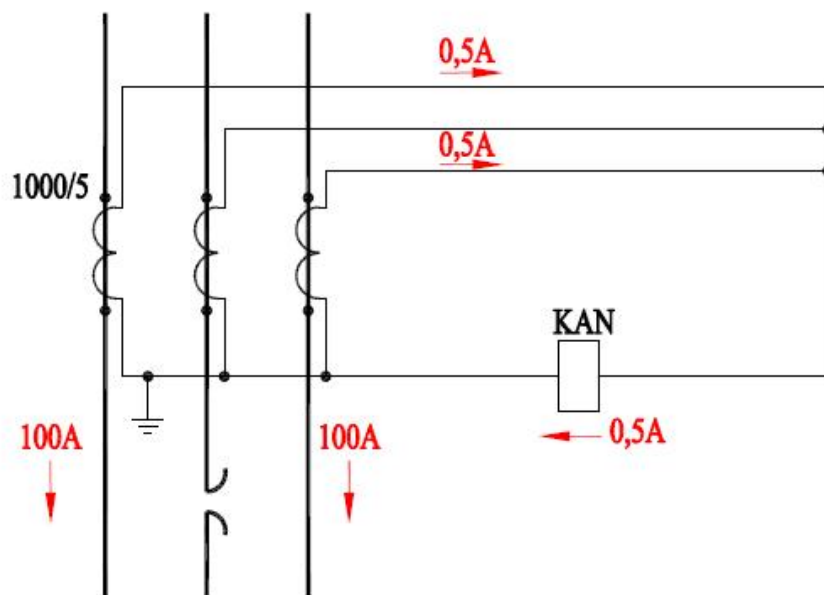
1. При КЗ на землю (однофазных и двухфазных). При однофазных КЗ ток в ЗЗ равен току КЗ (рис. 2.1.2). При КЗ на землю ЗЗ срабатывает правильно - она для этого и предназначена.
2. На двухцепных ВЛ при замыкании двух фаз двух соседних ВЛ между собой без земли. С точки зрения питающей энергосистемы это двухфазное КЗ, и ЗЗ энергосистемы при этом не работают.

# КЗ двух фаз соседних ВЛ



3. При обрывах фаз в сети. При этом ток в защите примерно равен току нагрузки и 3З может сработать (если ток нагрузки больше тока срабатывания защиты), а может, и нет. В любом случае поведение защиты считается правильным.

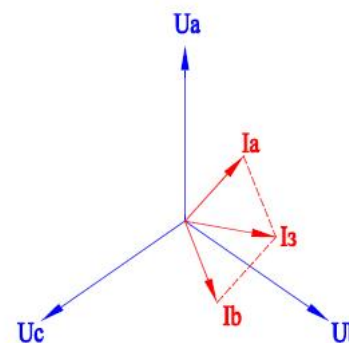
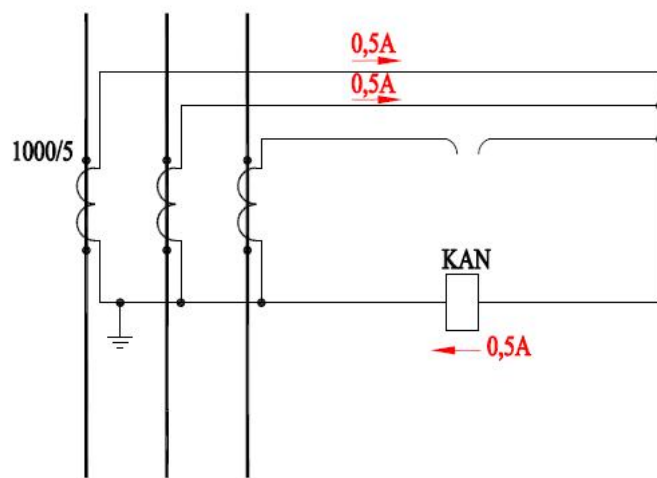
Обрыв фазы защищаемой ВЛ

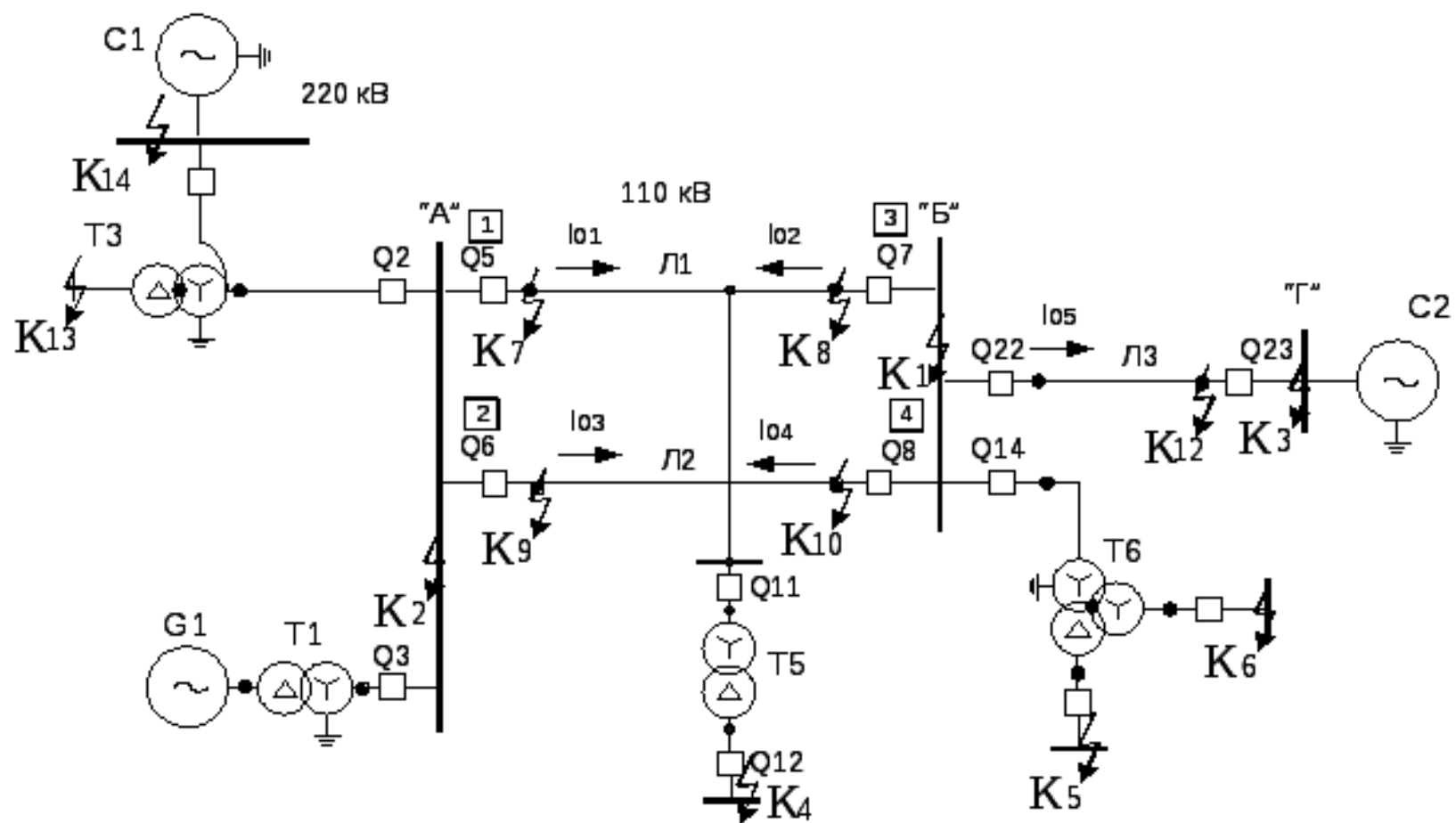




4. При неисправности токовых цепей: обрыв или закорачивание одной или двух фаз токовых цепей. При этом ток в защите равен току нагрузки и ЗЗ может сработать ложно (если ток нагрузки больше тока срабатывания защиты), без повреждения в сети.

Повреждение токовых цепей ЗЗ





## Выбор параметров срабатывания I ступени

Ток срабатывания первой ступени ТНЗНП при выполнении ее без выдержки времени выбирается по условиям отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты:

- а. при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции:

$$I_{0с.з}^I \geq k_{отс} 3I_{0макс} , \quad (0.1)$$

где  $k_{отс} = 1.1 \div 1.3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, о.е;

$3I_{0макс}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального первичного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции, А.

В качестве расчетного замыкания принимается замыкание на землю одной или двух фаз в зависимости от того, при каком виде КЗ ток нулевой последовательности в месте повреждения имеет большее значение.

б. в кратковременном неполнофазном режиме, возникающем при неодновременном включении фаз выключателя:

$$I_{0с.з}^I \geq k_{отс} 3I_{0неп} , (0.2)$$

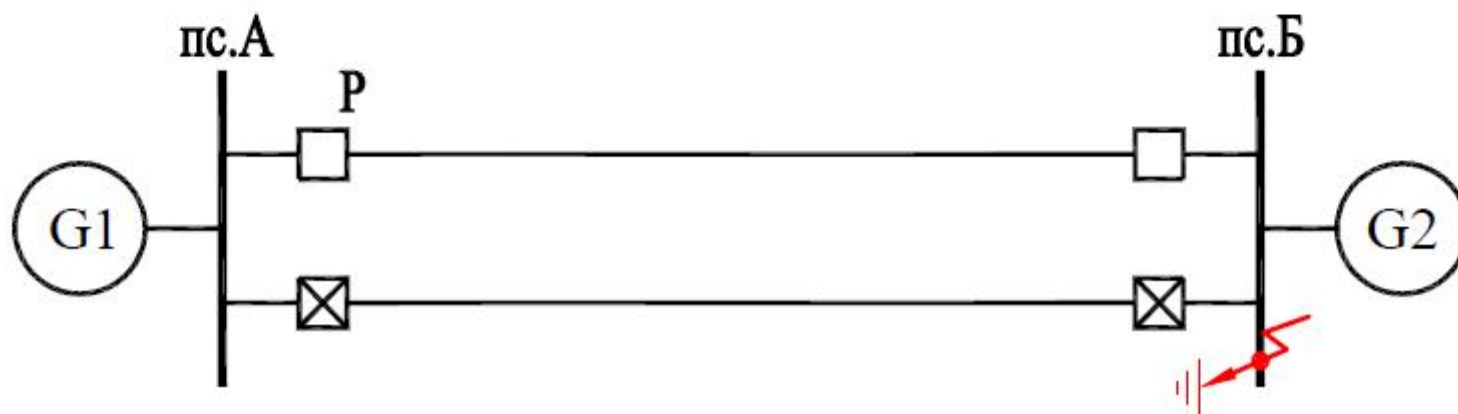
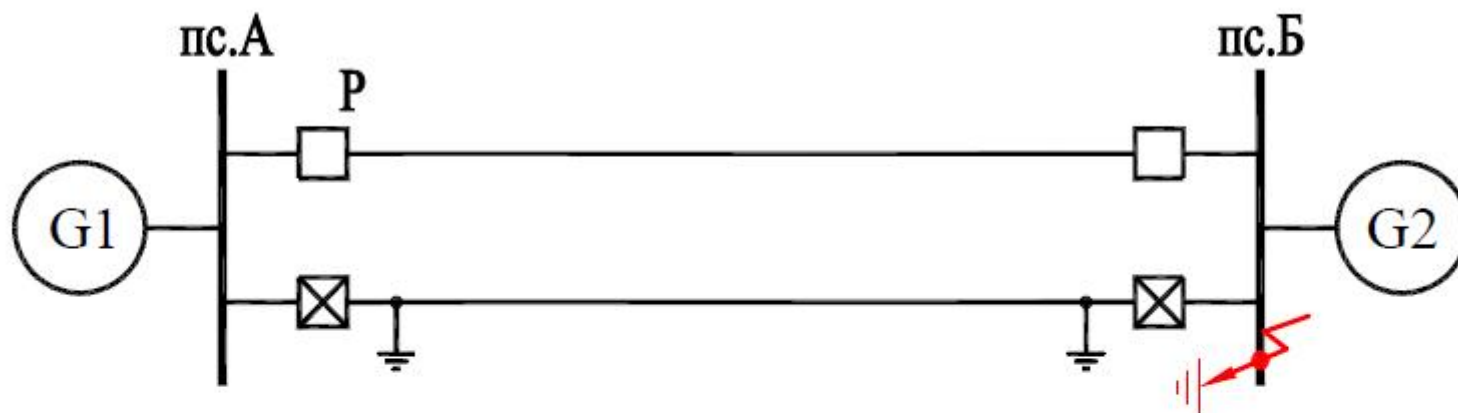
где  $k_{отс} = 1.1 \div 1.3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, о.е;

$3I_{0неп}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного первичного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты в неполнофазном режиме, возникающем при неодновременном включении фаз выключателя, А.

Данное условие не рассматривается, если защита отстроена по времени от неполнофазного режима, возникающего при неодновременном включении фаз выключателя.

в. при замыкании на землю на шинах противоположной подстанции, если вторая параллельная отключена и заземлена на обоих концах и взаимоиндукцией между линиями пренебречь нельзя (рассчитывается только в случае двухцепной линии. Расчет производится по формуле (0.1).

# Режимы для выбора тока срабатывания защиты параллельных ЛЭП



г. при замыканиях на землю на шинах противоположной подстанции в случае, когда вторая параллельная линия отключена, если взаимоиндукцией между линиями можно пренебречь вследствие ее малости (рассчитывается только в случае двухцепной линии дополнительно к пункту 0 и 0. Расчет производится по формуле (0.1).

д. от броска намагничивающего тока трансформаторов, присоединенных к ответвлениям от защищаемой линии и имеющих глухозаземленные нейтрали, в условиях каскадного включения защищаемой линии (рассчитывается дополнительно к пункту 0 и 0 только в случае линии с ответвлениями или для одиночной линии, если в защищаемой сети возможно включение трансформаторов под напряжение через рассматриваемую линию:

$$I_{0\text{с.з}}^I \geq \frac{C_6^{(к)} U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} x_{\text{расч}}}, \quad (0.3)$$

где  $C_6^{(к)}$  – коэффициент броска, учитывающий зависимость действующего значения тока от изменения при затухании, а также зависимость от сорта стали и вида затухания, о.е. Значение определяется по кривым зависимости  $C_6^{(к)}$  от соотношения  $t/\tau$  согласно рекомендациям, изложенным в приложении V «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12».

$U_{\text{ном}}$  – первичное номинальное напряжение сети, В;

$x_{\text{расч}} = x_{\text{сист}} + x_{\text{л}} + x_{\text{т}}^{(1)}$  – расчетное сопротивление контура включения трансформатора, приведенное к напряжению сети, Ом.

Уставка принимается равной наибольшему значению из получившихся значений.

Чувствительность токовой защиты первой ступени проверяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{0\text{min}}}{I_{\text{сз}}^{\text{I}}} \geq 1,2 \quad (0.4)$$

где  $3I_{0\text{min}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при однофазном КЗ (в ряде случаев должно проверяться двухфазное КЗ) в начале защищаемой линии, А;

$I_{\text{сз}}^{\text{I}}$  – первичный ток срабатывания первой ступени защиты, А.

## Выбор параметров срабатывания II ступени

Ток срабатывания второй ступени защиты выбирается по условиям:

- а. отстройки от утроенного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю за предыдущим автотрансформатором на стороне его смежного напряжения (примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью):

$$I_{0\text{с.з}}^{\text{II}} \geq k_{\text{отс}} 3 I_{0\text{з}}, \quad (0.5)$$

где  $k_{\text{отс}} = 1.1 \div 1.3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, о.е;

$3I_{0\text{з}}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального первичного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки защиты при замыкании на землю за автотрансформатором противоположной подстанции на стороне его, примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью, А.

В целях повышения чувствительности иногда вторую ступень согласовывают не с первой ступенью защиты предыдущей линии, а со второй ступенью.



Если рассматриваемая линия – параллельная, согласование производится в режиме, когда вторая параллельная линия рассматриваемого участка отключена и заземлена на обоих концах.

б. согласование с первой ступенью защиты предыдущей линии или защиты от замыканий на землю предыдущего автотрансформатора, установленной на стороне смежного напряжения:

$$I_{0\text{с.з}}^{\text{II}} \geq k_{\text{отс}} 3I_{0\text{расч}}, \quad (0.6)$$

где  $k_{\text{отс}} = 1.1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, о.е;

$3I_{0\text{расч}}$  – расчетный ток – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального первичного тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой той ступенью защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование, А.

Если рассматриваемая линия – параллельная, согласование производится в режиме, когда вторая параллельная линия рассматриваемого участка отключена и заземлена на обоих концах. Если линия представляет собой цепочку параллельных линий, согласование необходимо производить при работе обеих параллельных линий на предыдущем участке.

Для сетей радиальной конфигурации и кольцевых сетей с одиночными линиями выражение примет вид:

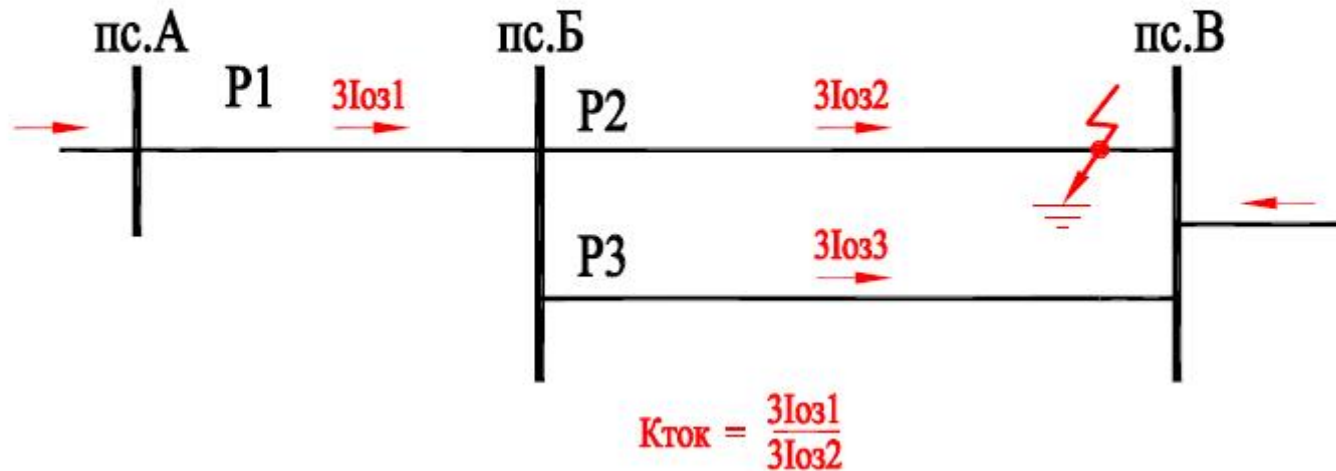
$$I_{0с.з}^{\Pi} \geq k_{отс} k_{ток} 3I_{0с.з.пред} \quad (0.7)$$

где  $k_{отс} = 1.1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас, о.е;

$k_{ток}$  – максимальный коэффициент токораспределения (в схеме замещения нулевой последовательности) для защищаемой линии при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой той ступенью защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование, равен отношению токов в месте установки рассматриваемой защиты и защиты, с которой производится согласование, о.е;

$I_{0с.з.пред}$  – ток срабатывания ступени защиты предыдущего элемента, с которой производится согласование, А.

Определение коэффициента токораспределения для выбора вторых ступеней защит



в. проверка по условию отстройки от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока:

$$I_{0с.з}^{\Pi} \geq k_{отс} k_{пер} 3I_{0нб, у} \quad (0.8)$$

где  $k_{отс} = 1.25$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчета и необходимый запас, о.е;

$k_{\text{пер}} = 1 \div 2$  – коэффициент, учитывающий увеличение тока небаланса в переходном режиме, о.е;

$3I_{0\text{нб},y} = k_{\text{нб}}I_{\text{расч}}$  – ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в установившемся режиме при рассматриваемых внешних КЗ между тремя фазами, А;

$I_{\text{расч}}$  – максимальное значение первичного фазного тока, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при внешнем КЗ между тремя фазами, А;

$k_{\text{нб}} = 0.05 \div 0.1$  – коэффициент небаланса, о.е.

Уставка принимается равной наибольшему значению из получившихся значений.

Чувствительность реле тока второй ступени проверяется при металлическом однофазном КЗ в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{0\text{min}}}{I_{0\text{сз}}^{\text{II}}} \quad (0.9)$$

где  $3I_{0\text{min}}$  – ток при металлическом однофазном КЗ в конце защищаемой линии в минимальном режиме, А;

$I_{0\text{сз}}^{\text{II}}$  – первичный ток срабатывания второй ступени защиты, А.

Должно обеспечиваться минимальное значение коэффициента чувствительности: при замыкании на землю в конце защищаемой линии без учета резервного действия – около 1,5, а при наличии надежно

действующей резервной ступени – около 1,3; при наличии на противоположной подстанции отдельной защиты шин допускается обеспечивать коэффициент чувствительности в режиме каскадного отключения около 1,5.

Выдержка времени второй ступени защиты согласовывается с выдержками времени ступеней защит предыдущих элементов, с которыми производится согласование: линий или автотрансформаторов – с учетом выдержки времени устройства резервирования при отказе выключателей (УРОВ):

$$t_{сз} = t_{сз.пред} + t_{УРОВ} + \Delta t \quad (0.10)$$

где  $t_{сз.пред}$  – выдержка времени ступени защиты, с которой производится согласование, мс;

$t_{УРОВ}$  – время действия УРОВ на предыдущей линии, мс;

$\Delta t = 300 \div 500$  – степень селективности, мс.

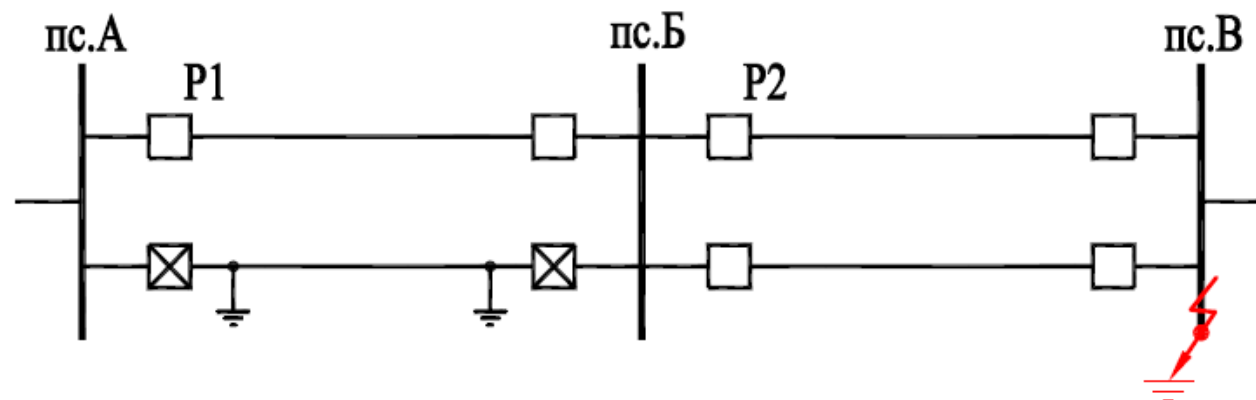
### Выбор параметров срабатывания III ступени

Ток срабатывания третьей ступени выбирается по условиям:

а. согласования с защитой предыдущей линии (со второй или третьей ступенью) или защитой от замыканий на землю предыдущего автотрансформатора, установленной на стороне смежного напряжения (с первой ее ступенью, если вторая ступень рассматриваемой защиты отстроена от замыкания на землю на шинах этого напряжения, или со второй ее ступенью, если вторая ступень рассматриваемой защиты согласована с первой ступенью защиты автотрансформатора).

Расчет производится по выражению 0.7, при этом  $k_{\text{ток}}$  определяется при замыкании на землю на шинах предыдущего элемента.

Если рассматриваемая линия – параллельная, согласование производится в режиме, когда вторая параллельная линия рассматриваемого участка отключена и заземлена на обоих концах. При необходимости повышения чувствительности следует производить указанное согласование в режиме работы обеих параллельных линий на рассматриваемом участке. Если линия представляет собой цепочку параллельных линий, согласование необходимо производить при работе обеих параллельных линий на предыдущем участке.



б. проверка по условию отстройки (выражение 0.8)) от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока:

- при КЗ между тремя фазами за трансформаторами (автотрансформаторами) подстанций данного и противоположного концов линий;
- при качаниях или асинхронном ходе, если выдержка времени рассматриваемой ступени не превышает 1.5 с, а также и при больших выдержках времени – в случае, когда период качаний превышает выдержку времени рассматриваемой ступени (на межсистемных транзитных связях).

Уставка принимается равной наибольшему значению из получившихся значений.

Чувствительность реле тока третьей ступени проверяется при металлическом однофазном КЗ на землю в конце смежного объекта:

$$K_4 = \frac{I_{0\min}}{I_{0сз}^{III}} \geq 1,3 \quad (0.11)$$

где  $3I_{0\min}$  – минимальное значение утроенного тока нулевой последовательности при металлическом однофазном КЗ в конце смежной линии, А;

$I_{0сз}^{III}$  – первичный ток срабатывания третьей ступени защиты, А.

Выдержка времени третьей ступени защиты должна быть согласована с выдержками времени соответствующих ступеней защит предыдущих элементов (выражение (0.)). При этом выдержка времени УРОВ учитывается, если ступень защиты, предыдущая по отношению к той, с которой производится согласование, охватывает защищаемый участок с коэффициентом чувствительности менее 1.3.

### **Выбор параметров срабатывания IV ступени**

Ток срабатывания четвертой ступени выбирается по следующим условиям:

а. отстройка от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних замыканиях между фазами, если рассматриваемая ступень защиты нулевой последовательности имеет выдержку времени, равную или меньшую, чем защита от замыканий между фазами на поврежденном элементе (как правило, эта отстройка соответствует условию отстройки от токов



небаланса при КЗ между тремя фазами за трансформаторами и на стороне низшего напряжения автотрансформаторов подстанций данного и противоположного концов линии).

б. отстройка от суммарного тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, протекающего в максимальном нагрузочном режиме:

$$I_{сз}^{IV} \geq \frac{K_{отс}}{K_B} (I_{0нб} + 3I_{0нр}) \quad (0.12)$$

где  $K_{отс} = 1.25$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчета и необходимый запас, о.е;

$K_B = 0.9$  – коэффициент возврата, о.е;

$I_{0нб} = k_{нб} I_{расч}$  – первичный ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в рассматриваемом режиме, А;

$I_{расч}$  – расчетный ток нагрузочного режима, А;

$k_{нб} = 0.05 \div 0.1$  – коэффициент небаланса, о.е.

$3I_{0нр}$  – утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, А.

б. отстройка от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при трехфазном КЗ за трансформаторами, присоединенными к ответвлениям от защищаемой линии (производится только в случае линии с ответвлениями).

Параметр срабатывания	Задаваемая функция	Расчетное условие
$I_{0C3}^I$	Несрабатывания при внешних КЗ на землю	1. Отстройка от КЗ на землю на шинах подстанции, примыкающей к дальнему концу ЛЭП
		2. Отстройка от КЗ, при каскадном отключении КЗ на землю на параллельной линии вблизи шин подстанции, на которой установлена рассматриваемая защита.
$t_{C3}^{II}$	Несрабатывания при внешних КЗ на землю в зоне действия быстродействующих защит смежных элементов	3. Отстройка от времени срабатывания быстродействующих защит смежных элементов, с учетом действия УРОВ.
$I_{0C3}^{II}$	Несрабатывания при внешних КЗ на землю за пределами зон действия быстродействующих защит смежных элементов	4. Отстройка от внешнего КЗ на землю в конце зоны действия первой ступени защиты смежной ЛЭП
		5. Отстройка от КЗ на землю на шинах ВН автотрансформатора, отключаемого ТЗНП автотрансформатора с временем, большим или равным времени срабатывания данной ступени
		6. Отстройка от внешнего КЗ на землю в конце зоны действия или за зоной действия первой ступени защиты ЛЭП, параллельной данной, при ее каскадном отключении.
	Срабатывания при внутренних КЗ	7. Обеспечение требуемой чувствительности при каскадном отключении КЗ на землю в конце защищаемой ЛЭП

Параметр срабатывания	Задаваемая функция	Расчетное условие
$t_{C3}^{III}$	Несрабатывания при внешних КЗ на землю в зонах действия второй ступени защиты смежной ЛЭП и первой ступени ТЗНП автотрансформатора	8. Отстройка от времени срабатывания второй ступени ТЗНП смежной ЛЭП
		9. Отстройка от времени срабатывания первой ступени ТЗНП автотрансформатора
$I_{0C3}^{III}$	Несрабатывания при внешних КЗ на землю за пределами зон действия вторых ступеней защит смежных ЛЭП и первых ступеней ТЗНП автотрансформаторов, с которыми производится согласование по времени	10. Отстройка от внешнего КЗ в конце зоны действия второй ступени защиты смежной ЛЭП
		11. Отстройка от внешнего КЗ на землю в конце зоны действия или за зоной действия второй ступени защиты ЛЭП, параллельной данной, при ее каскадном отключении
		12. Отстройка от КЗ на землю в конце первой ступени защиты АТ

Параметр срабатывания	Задаваемая функция	Расчетное условие
$I_{0C3}^{III}$	Несрабатывания в режимах без замыканий на землю	13. Отстройка от тока небаланса при внешних трёхфазных КЗ за трансформаторами и на стороне низшего напряжения автотрансформаторов, а также за трансформаторами, присоединёнными к ответвлениям защищаемой линии, отключаемых защитами трансформаторов с временем, большим или равным времени срабатывания третьей ступени
		14. Устойчивый возврат в исходное состояние после отключения внешнего КЗ в режиме качаний или асинхронного хода
$t_{C3}^{IV}$	Несрабатывание при внешних КЗ на землю в зонах действия резервных защит смежных элементов	15. Отстройка от времени срабатывания последней ступени защиты смежной ЛЭП
		16. Отстройка от времени срабатывания последней ступени ТЗНП автотрансформатора

Параметр срабатывания	Задаваемая функция	Расчетное условие
$I_{0C3}^{IV}$	Несрабатывания в режимах без замыканий на землю	17. Отстройка от тока небаланса при внешних трёхфазных КЗ за трансформаторами и на стороне низшего напряжения автотрансформаторов, а также за трансформаторами, присоединёнными к ответвлениям защищаемой линии, отключаемых защитами трансформаторов с временем, большим или равным времени срабатывания четвёртой ступени
		18. Устойчивый возврат в исходное состояние после отключения внешнего КЗ в нагрузочном режиме