



# Механотроника

ООО «НТЦ «Механотроника»  
Россия, 198206, г. Санкт-Петербург,  
ул. Пионерстроя, д. 23, лит. А

ИНН/КПП: 7808022632/780701001  
ОГРН: 1027804596544  
Info.mt@systeme.ru, www.mtrele.ru

Тел.: +7 (812) 654-35-82, Факс: +7 (812) 654-35-83  
Тел./факс: +7 (812) 244-70-15  
Центр поддержки клиентов: 8-800-250-63-60

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ПО РАСЧЁТУ УСТАВОК И ЗАДАНИЮ ПАРАМЕТРОВ  
ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ  
ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 110-220 кВ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2023

## Содержание

Список сокращений.....	3
Введение .....	4
1 Методические указания по расчету уставок токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на землю на линиях 110 - 220 кВ с односторонним питанием.....	5
1.1 Выбор уставки ТЗНП первой ступени.....	5
1.2 Выбор уставки ТЗНП второй ступени.....	7
1.3 Выбор уставки ТЗНП третьей ступени.....	9
1.4 Выбор уставки ТЗНП четвертой ступени.....	9
2 Методические указания по расчету уставок токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на землю на линиях 110 - 220 кВ с двухсторонним питанием.....	12
2.1 Выбор уставки ТЗНП первой ступени.....	12
2.2 Выбор уставки ТЗНП второй ступени.....	14
2.3 Выбор уставки ТЗНП третьей ступени.....	16
2.4 Выбор уставки ТЗНП четвертой ступени.....	17
Приложение А .....	20
Приложение Б.....	27
Приложение В.....	30
Приложение Г.....	33
Список использованной литературы .....	37

## Список сокращений

- БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты;
- БФПО – базовое функциональное программное обеспечение;
- ВЛ – воздушная линия;
- ДЗ – дистанционная защита;
- ДЗЛ – дифференциальная защита линии;
- ИПБ – информационный признак блокировки;
- КЗ - короткое замыкание;
- ЛЭП - линия электропередачи;
- ПС – подстанция;
- РЗА – релейная защита и автоматика;
- РНМ (БРНМ, РРНМ) - реле направления мощности (блокирующее РНМ, разрешающее РНМ);
- РНМ НП – реле направления мощности нулевой последовательности;
- ТН – трансформатор напряжения;
- ТЗНП– токовая защита нулевой последовательности;
- УРОВ - устройство резервирования при отказе выключателя.

## Введение

В настоящих методических указаниях рассматриваются расчетные условия выбора уставок функции токовой защиты нулевой последовательности линий электропередачи с односторонним питанием в сети 110 - 220 кВ реализованных, в блоках микропроцессорных релейной защиты с БФПО-ЛТ-51, БФПО-ЛТ-52, БФПО-ЛТ-54, БФПО-ЛТ-61, БФПО-ЛТ-62, БФПО-ДФЗ-51, БФПО-ДФЗ-61, БФПО-БНЗ-51, БФПО-БНЗ-61, БФПО-ДЗЛ2-51.

При оснащении указанных линий блоками (функциями) РЗА, прежде всего, следует учитывать требования руководящих документов. При выборе защит линий с односторонним питанием необходимо учитывать следующие положения п.3.2.101 - 3.2.116 ПУЭ [1] и Главы 5 Требования к оснащению и принципам функционирования релейной защиты и сетевой автоматики линий электропередачи классом напряжения 110 – 220 кВ [2].

От коротких замыканий на землю должна быть предусмотрена, как правило, ступенчатая токовая направленная или ненаправленная защита нулевой последовательности [1].

Данные Указания разработаны на основе «Руководящих указаний по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю линий 110-500 кВ», с целью учета особенностей реализации алгоритмов ТЗНП и выбора уставок ТЗНП, реализованных в БМРЗ.

В качестве решения, максимально учитывающего требования руководящих документов, в настоящих Указаниях для защиты линий 110 - 220 кВ, рассматривается применение микропроцессорного блока БМРЗ-ЛТ, содержащего функции токовых защит линий нулевой последовательности от коротких замыканий на землю [3].

### Примечания.

1. В связи с тем, что пофазное отключение совместно с однофазным автоматическим повторным включением при однофазных повреждениях на линиях электропередачи напряжением 110-220 кВ, применяется достаточно редко, в настоящих Указаниях рассматривается действие РЗА только на трехфазное отключение линий и последующее трехфазное автоматическое повторное включение их выключателей.

2. Во всех случаях, окончательное решение о применении или дублировании тех или других функций защиты должно приниматься при реальном проектировании, в соответствии с вышеуказанными требованиями руководящих документов и конфигурацией рассматриваемой электрической сети.

# 1 Методические указания по расчету уставок токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на землю на линиях 110 – 220 кВ с односторонним питанием

В блоках микропроцессорных релейной защиты БМРЗ для ликвидации замыканий на землю предусмотрена функция ступенчатой токовой защиты нулевой последовательности, с использованием пяти (шести) ступеней по току срабатывания. Ступени ТЗНП выполнены с независимыми выдержками времени.

В качестве измеряемых величин используются расчетные значения тока и напряжения нулевой последовательности.

Соответствие наименований уставок и программных ключей в настоящих методических указаниях и блоках БМРЗ приведены в приложении А.

## 1.1 Выбор уставки ТЗНП первой ступени

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю у шин противоположной ПС, А [4]:

$$I_{0 \text{ с.з.}}^I \geq k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0 \text{ макс}},$$

где  $k_{\text{отс}}^I = 1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $3I_{0 \text{ макс}}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю у шин противоположной ПС, 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.

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при кратковременном неполнофазном режиме [5], возникающем при одновременном включении фаз выключателя:

$$I_{0 \text{ с.з.}}^I \geq k_{\text{отс}} \cdot 3I_{0 \text{ неп}},$$

где  $k_{\text{отс}}^I = 1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $3I_{0 \text{ неп}}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при неполнофазном режиме, возникающем при одновременном включении фаз выключателя на защищаемой линии, А.

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

Отстройка от броска тока намагничивания (авто)трансформатора осуществляется с помощью введения блокировки с применением информационного признака блокировки (ИПБ), определяемого по значению отношения второй гармоники тока нулевой последовательности к первой гармонике. При превышении отношением значения, заданного уставкой (15 % обычно является достаточным) [6], осуществляется блокировка реле тока первой и второй ступеней ТЗНП. Для исключения излишней блокировки максимальное время действия блокировки ограничивается выдержкой времени, определяемой по максимальной длительности броска тока намагничивания силовых трансформаторов "отпаечных" подстанций. Для трансформаторов малой и средней мощности рекомендуется принимать время, равное 1 с, для (авто)трансформаторов большой мощности – 2 с. Значение уставки рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации.

По истечении заданного уставкой времени, блокировка будет выведена. Возврат в исходное состояние произойдет после возврата ИПБ.

В качестве уставки срабатывания первой ступени ТЗНП по току принимается наибольшее из полученных значений.

Проверка по коэффициенту чувствительности первой ступени ТЗНП:

$$k_{\text{чув}}^I = \frac{3I_{0 \text{ мин}}}{I_{0 \text{ с.з.}}^I} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0 \text{ мин}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю в начале защищаемой линии, А [5].

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 меньшее значение.

Минимально необходимый коэффициент чувствительности ТЗНП определяется согласно требований [1]:

- для органов тока ступени защиты, предназначенной для действия при КЗ в конце защищаемого участка, без учета резервного действия - около 1,5, а при наличии надежно действующей селективной резервной ступени - около 1,3; при наличии на противоположном конце линии отдельной защиты шин соответствующие коэффициенты чувствительности

(около 1,5 и около 1,3) для ступени защиты нулевой последовательности допускается обеспечивать в режиме каскадного отключения.

Выдержку времени срабатывания первой ступени ТЗНП рекомендуется принимать минимально возможной:

$$t_{с.з.}^I = (0 \div 0,1) \text{ с.}$$

## 1.2 Выбор уставки ТЗНП второй ступени

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю за предыдущим трансформатором (автотрансформатором) на стороне его смежного напряжения (примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью):

$$I_{0с.з.}^{II} \geq k_{отс}^{II} \cdot 3I_{0з},$$

где  $k_{отс}^{II} = 1,2$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $3I_{0з}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю за (авто)трансформатором на противоположном конце линии, на стороне его смежного напряжения (примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью), 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 установки защиты имеет большее значение.

Отстройка защиты 1 рассматриваемой ступени, от тока срабатывания первой ступени защиты 2 смежного элемента (рисунок 1):



Рисунок 1 - Расчетная схема для выбора уставок релейной защиты

$$I_{0с.з.}^{II} \geq k_{отс}^{II} \cdot 3I_{0расч},$$

где  $k_{отс}^{II} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $3I_{0расч}$  – расчетный ток, максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки

рассматриваемой защиты при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой первой ступенью смежного элемента, с которым производится согласование [7].

Выдержку времени срабатывания второй ступени ТЗНП рекомендуется отстроить на ступень селективности от выдержки времени первой ступени:

$$t_{с.з.}^{II} = t_{с.з.}^I + \Delta t,$$

где  $t_{с.з.}^I$  - время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с;  $\Delta t = (0,2 \div 0,5)$  – ступень селективности по времени, с.

Ступень селективности  $0,25 \div 0,3$  с применима в случаях согласования устройств микропроцессорных защит. В случаях согласования микропроцессорных защит с устройствами РЗА, выполненными на микроэлектронной или электромеханической элементной базе, следует принимать ступень селективности  $0,4 \div 0,5$  с [8].

Чувствительность второй ступени ТЗНП проверяется при КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{чув}^{II} = \frac{3I_{0\text{ мин}}}{I_{0с.з.}^{II}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю на шинах смежной ПС, А.

Выбранная уставка защиты должна удовлетворять требованиям чувствительности при металлических замыканиях на землю в расчетном режиме. При этом должны рассматриваться замыкания на землю на каждом из концов линии, противоположном месту установки защиты, как в режиме до отключения выключателя на этом конце, так и после отключения. Ступень защиты, имеющая ускорение при включении выключателя, должна удовлетворять требованию чувствительности к замыканию на землю на каждом конце защищаемой линии в режиме ее одностороннего включения.

Чувствительность защиты должна проверяться при замыкании на землю одной фазы. Однако, в ряде случаев должна также проверяться чувствительность защиты и при замыкании на землю двух фаз. Это необходимо, если при замыканиях на землю двух фаз защита от многофазных замыканий оказывается нечувствительной, например при КЗ в зоне резервирования, или возможно значительное ее замедление, например при переходе замыкания одной фазы в замыкание двух фаз на землю, если не предусмотрено действие второй ступени дистанционной защиты без блокировки при качаниях (поскольку ко времени перехода замыкания одной фазы в замыкание двух фаз на землю вторая ступень может быть выведена

блокировкой); обеспечение чувствительности защиты при замыкании двух фаз на землю в последнем случае может предотвратить замедление отключения КЗ.

### 1.3 Выбор уставки ТЗНП третьей ступени

Отстройка от тока срабатывания второй ступени защиты смежного элемента, выбираемый по условию согласования:

$$I_{0с.з.}^{III} \geq k_{отс}^{III} \cdot 3I_{0расч},$$

где  $k_{отс}^{III} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $3I_{0расч}$  – расчетный ток, максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой той ступенью (со второй ступенью защиты смежного элемента (линии)), с которой производится согласование.

Выдержку времени срабатывания третьей ступени ТЗНП рекомендуется отстроить на ступень селективности от выдержки времени второй ступени:

$$t_{с.з.}^{III} = t_{с.з.}^{II} + \Delta t,$$

где  $t_{с.з.}^{II}$  – время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с.

Чувствительность третьей ступени ТЗНП проверяется при металлическом КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{чув}^{III} = \frac{3I_{0\text{ мин}}}{I_{0с.з.}^{III}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю, на шинах смежной ПС, А.

### 1.4 Выбор уставки ТЗНП четвертой ступени

1.4.1 Ток срабатывания четвертой ступени должен быть отстроен от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних замыканиях между фазами.

Отстройка от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних

замыканиях между фазами:

$$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}}^{IV} \cdot I_{0\text{ нб}},$$

где  $k_{\text{отс}}^{IV} = 1,25$  - коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас.

Ток небаланса:

$$I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{расч}},$$

где  $k_{\text{нб}}$  – коэффициент небаланса;  $I_{\text{расч}}$  – максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при внешнем КЗ между тремя фазами. Как правило, указанное 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. Коэффициент небаланса принимается в зависимости от кратности  $I_{\text{расч}}$ :

а) при небольших кратностях, до  $(2 \div 3) \cdot I_{\text{ном тт}}$  (номинальный первичный ток трансформатора тока в соответствии с ГОСТ 7746-2015);  $k_{\text{нб}} = 0,05$ ;

б) при больших кратностях, но не превосходящих  $(0,7 \div 0,8) \cdot I_{\text{к10}}$  ( $I_{\text{к10}}$  – предельная кратность первичного тока трансформаторов тока при 10 %-ной погрешности, для обмотки класса точности 10Р, в соответствии с ГОСТ 7746-2015) [9],  $k_{\text{нб}} = (0,05 \div 0,1)$ .

1.4.2 Отстройка от тока срабатывания третьей ступеней защиты, выбираемый по условию согласования с защитой предыдущего элемента:

$$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} \geq k_{\text{отс}}^{IV} \cdot 3I_{0\text{ расч}},$$

где  $k_{\text{отс}}^{IV} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $3I_{0\text{ расч}}$  - расчетный ток – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой той ступенью с которой производится согласование.

В случае, когда при выборе тока срабатывания четвертой ступени указанным образом она не удовлетворяет требованию чувствительности (не обеспечивает дальнего резервирования), целесообразно выбирать ее ток срабатывания, исходя из обеспечения требуемой чувствительности при условии отстройки от тока небаланса в максимальном нагрузочном режиме. При этом ток срабатывания может быть принят  $(0,05 \div 0,1) \cdot I_{\text{ном тт}}$ , но, как правило, не менее 60 А (уменьшение последнего до 40 А допускается в отдельных случаях, например, на длинных линиях с малым коэффициентом трансформации трансформаторов тока защиты), а выдержка времени защиты дополнительно согласована с защитами, действующими при повреждениях за

трансформаторами (автотрансформаторами) подстанции данного и противоположного концов линии. Ток срабатывания рассматриваемой ступени защиты, в этом случае проверяется по условию отстройки от суммарного тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, протекающего в максимальном нагрузочном режиме:

$$I_{0с.з.}^{IV} \geq \frac{k_{отс}^{IV}}{k_B} \cdot (I_{0нб} + 3I_{0н.р.}),$$

где  $k_{отс}^{IV} = 1,25$  - коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $k_B = 0,95$  - коэффициент возврата;  $I_{0нб} = I_{нб}$  - первичный ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в рассматриваемом режиме;  $3I_{0н.р.}$  - утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, возникающей, например, при работе смежной линии с односторонним питанием в неполнофазном режиме. При отсутствии несимметрии в системе принимается равным 0, А;

$$3I_{0н.р.} \geq k_{0нс} \cdot I_{раб.макс},$$

где  $k_{0нс}$  - коэффициент несимметрии.

Выдержку времени срабатывания четвертой ступени ТЗНП рекомендуется отстроить на ступень селективности относительно третьей ступени:

$$t_{с.з.}^{IV} = t_{с.з.}^{III} + \Delta t,$$

где  $t_{с.з.}^{III}$  - время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с. Выдержка времени четвертой ступени защиты определяется по возможности по ступенчатому принципу. Для обеспечения селективного действия в сложных сетях ток срабатывания четвертой ступени отдельных защит может дополнительно согласовываться с третьими ступенями защит предыдущих линий.

Чувствительность четвертой ступени ТЗНП проверяется при металлическом КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{чув}^{IV} = \frac{3I_{0мин}}{I_{0с.з.}^{IV}} \geq 1,5,$$

где  $I_{0мин}$  - минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю в конце смежной линии, в наиболее удаленном от места установки защиты ее конце, А.

Пример выбора уставок для ЛЭП 110 - 220 кВ, с односторонним питанием приведен в приложении Б.

## 2 Методические указания по расчету уставок токовой защиты нулевой последовательности от замыканий на землю на линиях 110 - 220 кВ с двухсторонним питанием

### 2.1 Выбор уставки ТЗНП первой ступени

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю у шин противоположной ПС, А [4]:

$$I_{0 \text{ с.з.}}^I \geq k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0 \text{ макс}},$$

где  $k_{\text{отс}}^I = 1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $3I_{0 \text{ макс}}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю у шин противоположной ПС, 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.

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при кратковременном неполнофазном режиме [10], возникающем при одновременном включении фаз выключателя:

$$I_{0 \text{ с.з.}}^I \geq k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0 \text{ неп}},$$

где  $k_{\text{отс}}^I = 1,3$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $I_{0 \text{ неп}}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при неполнофазном режиме, возникающем при одновременном включении фаз выключателя на защищаемой линии, А [10].

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

Отстройка от броска тока намагничивания (авто)трансформатора осуществляется с помощью введения блокировки с применением информационного признака блокировки (ИПБ), определяемого по значению отношения второй гармоники тока нулевой последовательности к первой гармонике. При превышении отношением значения, заданного уставкой (15 % обычно является достаточным), осуществляется блокировка реле тока первой и второй ступеней ТЗНП. Для исключения излишней блокировки максимальное время

действия блокировки ограничивается выдержкой времени, определяемой по максимальной длительности броска тока намагничивания силовых трансформаторов "отпаечных" подстанций. Для трансформаторов малой и средней мощности рекомендуется принимать время равное 1 с, для (авто)трансформаторов большой мощности – 2 с. Значение уставки рекомендуется уточнить по опыту эксплуатации.

По истечении заданного уставкой времени блокировка будет выведена. Возврат в исходное состояние произойдет после возврата ИПБ.

В качестве уставки срабатывания первой ступени ТЗНП по току принимается наибольшее из полученных значений.

Проверка по коэффициенту чувствительности первой ступени ТЗНП:

$$k_{\text{чув}}^I = \frac{3I_{0\text{ мин}}}{I_{0\text{ с.з.}}^I} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю в начале защищаемой линии, 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 меньшее значение.

Минимально необходимый коэффициент чувствительности ТЗНП определяется согласно требованиям [1]:

- для органов тока ступени защиты, предназначенной для действия при КЗ в конце защищаемого участка, без учета резервного действия - около 1,5, а при наличии надежно действующей селективной резервной ступени - около 1,3; при наличии на противоположном конце линии отдельной защиты шин соответствующие коэффициенты чувствительности (около 1,5 и около 1,3) для ступени защиты нулевой последовательности допускается обеспечивать в режиме каскадного отключения.

Выдержку времени срабатывания первой ступени ТЗНП рекомендуется принимать равной минимально возможной:

$$t_{\text{с.з.}}^I = (0 \div 0,1) \text{ с.}$$

Дополнительные пояснения.

1. Для быстрого отключения КЗ в начале линии с двухсторонним питанием, может дополнительно вводиться направленная ступень ТЗНП без выдержки времени (токовая отсечка), которая обеспечивает быстрое отключение при КЗ в первой половине защищаемой

линии, тогда вторая ступень ТЗНП отстраивается от первой ступени ТЗНП смежной линии [11].

2. По требованиям эксплуатации, может быть дополнительно задано блокирование действия ТЗНП [3] при пуске ступеней дистанционной защиты или ДЗЛ линии. В таком случае, если повреждение обнаруживается ДЗ, ДЗЛ и т.д., ТЗНП не формирует сигнал отключения, и таким образом, обеспечивается приоритет действия дистанционной защиты на отключение КЗ.

Применение блокировки отключающего действия ТЗНП может быть целесообразным в целях обеспечения селективного действия ДЗ при повреждениях с замыканием на землю, например, в случаях вероятности опережающего (неселективного) срабатывания отдельных ступеней ТЗНП по отношению к ДЗ:

- в режимах сети, обусловленных значительными отклонениями первичной схемы от большинства расчетных рабочих режимов работы сети;
- в результате неполноценного согласования (только по времени) ступеней ТЗНП защищаемой линии и элементов предыдущего участка сети.

3. Блокировка первой ступени, а также других, используемых ступеней ТЗНП может быть реализована подачей назначаемого сигнала для каждой ступени соответственно.

## 2.2 Выбор уставки ТЗНП второй ступени

Отстройка от утроенного тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю за предыдущим трансформатором (автотрансформатором) т.е. смежным элементом (рисунок 1), на стороне его смежного напряжения (примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью):

$$I_{0с.з.}^{II} \geq k_{отс}^{II} \cdot 3I_{0з},$$

где  $k_{отс}^{II} = 1,2$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле, ошибки расчетов, влияние апериодической составляющей и необходимый запас;  $3I_{0з}$  – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю за (авто)трансформатором на противоположном конце линии, на стороне его смежного напряжения (примыкающей к сети с глухозаземленной нейтралью), 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 установки защиты имеет большее значение.

Отстройка рассматриваемой ступени от тока срабатывания первой ступени защиты смежного элемента, выбираемый по условию согласования:

$$I_{0\text{с.з.}}^{II} \geq k_{\text{отс}}^{II} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{с.з.}}^I,$$

где  $k_{\text{отс}}^{II} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $k_{\text{ток}}$  – максимальный коэффициент токораспределения (в схеме замещения нулевой последовательности) для защищаемой линии при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой первой ступени защиты смежного элемента, с которым производится согласование, равен отношению токов в месте установки рассматриваемой защиты и защиты, с которой производится согласование;  $I_{0\text{с.з.}}^I$  – ток срабатывания ступени защиты предыдущего элемента, с которым производится согласование, А.

Для выбора тока срабатывания второй ступени защиты, установленной на одиночной линии, при наличии параллельной линии на предыдущем участке сети (рисунок 2) расчётным может быть режим работы как обеих параллельных линий, так и одной из них. Режим работы одной параллельной линии является расчетным, если в режиме работы двух параллельных линий при замыкании в конце зоны, защищаемой первой ступенью защиты 2, ток нулевой последовательности в неповрежденной параллельной линии направлен к шинам ПС Б; при направлении указанного тока от шин ПС Б в линию расчетным является режим работы обеих параллельных линий.

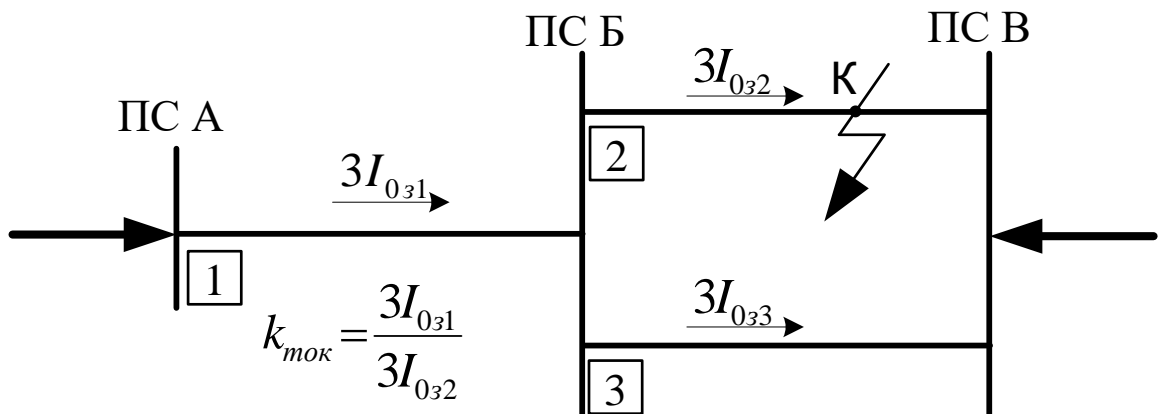


Рисунок 2 - Определение коэффициента токораспределения для выбора вторых ступеней защит

Выдержку времени срабатывания второй ступени ТЗНП рекомендуется отстроить от выдержки времени срабатывания первой ступени:

$$t_{\text{с.з.}}^{II} = t_{\text{с.з.}}^I + \Delta t + t_{\text{уров}},$$

где  $t_{\text{с.з.}}^I$  - время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с;  $\Delta t = (0,2 \div 0,5)$  – степень селективности по времени, с. Степень

селективности  $0,25 \div 0,3$  с применима в случаях согласования устройств микропроцессорных защит. В случаях согласования микропроцессорных защит с устройствами РЗА, выполненными на микроэлектронной или электромеханической элементной базе, следует принимать ступень селективности  $0,4 \div 0,5$  с [8].

Время срабатывания УРОВ:

$$t_{\text{уров}} = t_{\text{выкл.}} + t_{\text{в.защ.}} + t_{\text{зап.}} = 0,08 + 0,035 + 0,1 = 0,215 \approx 0,25 \text{ с,}$$

где  $t_{\text{выкл.}} = 0,08$  с - время отключения выключателя;  $t_{\text{в.защ.}} = 0,035$  с - время возврата блока микропроцессорного релейной защиты БМРЗ;  $t_{\text{зап.}} = 0,1$  с - время запаса. Время срабатывания УРОВ должно выбираться не менее  $0,25$  с.

Чувствительность второй ступени ТЗНП проверяется при КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{\text{чув}}^{\text{II}} = \frac{3I_{0\text{ мин}}^{\text{II}}}{I_{0\text{ с.з.}}^{\text{II}}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}^{\text{II}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю на шинах смежной ПС, Б.

### 2.3 Выбор уставки ТЗНП третьей ступени

Отстройка от тока срабатывания второй ступени защиты смежного элемента, выбираемый по условию согласования:

$$I_{0\text{ с.з.}}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}}^{\text{III}} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ расч.}}^{\text{II}},$$

где  $k_{\text{отс}}^{\text{III}} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $k_{\text{ток}}$  – 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;  $I_{0\text{ расч.}}^{\text{II}}$  – ток срабатывания ступени защиты предыдущего элемента, с которым производится согласование, А.

Выдержку времени срабатывания третьей ступени ТЗНП рекомендуется отстроить на ступень селективности от времени срабатывания второй ступени:

$$t_{\text{с.з.}}^{\text{III}} = t_{\text{с.з.}}^{\text{II}} + \Delta t,$$

где  $t_{\text{с.з.}}^{\text{II}}$  - время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с.

Чувствительность третьей ступени ТЗНП проверяется при металлическом КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{\text{чув}}^{\text{III}} = \frac{3I_{0\text{ мин}}^{\text{III}}}{I_{0\text{ с.з.}}^{\text{III}}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}^{\text{III}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю, на шинах смежной ПС, Б.

## 2.4 Выбор уставки ТЗНП четвертой ступени

Отстройка от тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока при внешних замыканиях между фазами:

$$I_{0\text{ с.з.}}^{\text{IV}} = k_{\text{отс}}^{\text{IV}} \cdot I_{0\text{ нб}},$$

где  $k_{\text{отс}}^{\text{IV}} = 1,25$  - коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас.

Ток небаланса:

$$I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{расч}},$$

где  $k_{\text{нб}}$  – коэффициент небаланса;  $I_{\text{расч}}$  – максимальное значение фазного тока, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при внешнем КЗ между тремя фазами. Коэффициент небаланса принимается в зависимости от кратности  $I_{\text{расч}}$ :

а) при небольших кратностях, до  $(2 \div 3) \cdot I_{\text{ном ТТ}}$  (номинальный первичный ток трансформатора тока в соответствии с ГОСТ 7746-2015),  $k_{\text{нб}} = 0,05$ ;

б) при больших кратностях, но не превосходящих  $(0,7 \div 0,8) \cdot I_{\text{к10}}$  ( $I_{\text{к10}}$  – предельная кратность первичного тока трансформаторов тока при 10 %-ной погрешности, для обмотки класса точности 10Р, в соответствии с ГОСТ 7746-2015) [9],  $k_{\text{нб}} = (0,05 \div 0,1)$ .

Отстройка от тока срабатывания четвертой ступени защиты смежного элемента, выбираемая по условию согласования:

$$I_{0\text{ с.з.}}^{\text{IV}} \geq k_{\text{отс}}^{\text{IV}} \cdot 3I_{0\text{ расч}},$$

где  $k_{\text{отс}}^{\text{IV}} = 1,1$  – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $3I_{0\text{ расч}}$  - расчетный ток – максимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, проходящего в месте установки рассматриваемой защиты при замыкании на землю в конце зоны, защищаемой той ступенью с которой производится согласование.

В случае, когда при выборе тока срабатывания четвертой ступени указанным образом

она не удовлетворяет требованию чувствительности (не обеспечивает дальнего резервирования), целесообразно выбирать ее ток срабатывания, исходя из обеспечения требуемой чувствительности при условии отстройки от тока небаланса в максимальном нагрузочном режиме. При этом ток срабатывания может быть принят  $(0,05 \div 0,1) \cdot I_{\text{ном ТТ}}$ , но, как правило, не менее 60 А (уменьшение последнего до 40 А допускается в отдельных случаях, например, на длинных линиях с малым коэффициентом трансформации трансформаторов тока защиты), а выдержка времени защиты дополнительно согласована с защитами, действующими при повреждениях за трансформаторами (автотрансформаторами) подстанции данного и противоположного концов линии. Ток срабатывания рассматриваемой ступени защиты проверяется по условию отстройки от суммарного тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, протекающего в максимальном нагрузочном режиме:

$$I_{\text{0с.з.}}^{IV} \geq \frac{k_{\text{отс}}^{IV}}{k_{\text{в}}} \cdot (I_{\text{0нб}} + 3I_{\text{0 н.р.}}),$$

где  $k_{\text{отс}}^{IV} = 1,25$  - коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле и необходимый запас;  $k_{\text{в}} = 0,95$  - коэффициент возврата;  $I_{\text{0нб}} = I_{\text{нб}}$  - первичный ток небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока в рассматриваемом режиме;  $3I_{\text{0 н.р.}}$  - утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией в системе, возникающей, например, при работе смежной линии с односторонним питанием в неполнофазном режиме. При отсутствии несимметрии в системе принимается равным 0, А;

$$I_{\text{0 н.р.}} \geq k_{\text{0нс}} \cdot I_{\text{раб.макс}}$$

где  $k_{\text{0нс}}$  - коэффициент несимметрии.

Выдержку времени срабатывания четвертой ступени ТЗНП рекомендуется отстроить на ступень селективности от времени срабатывания третьей ступени:

$$t_{\text{с.з.}}^{IV} = t_{\text{с.з.}}^{III} + \Delta t,$$

где  $t_{\text{с.з.}}^{III}$  - время срабатывания защиты, с которой производится согласование по времени срабатывания, с. Выдержка времени четвертой ступени защиты определяется по возможности по ступенчатому принципу. Для обеспечения селективного действия в сложных сетях ток срабатывания четвертой ступени отдельных защит может дополнительно согласовываться с третьими ступенями защит предыдущих линий.

Чувствительность четвертой ступени ТЗНП проверяется при металлическом КЗ на землю, в конце защищаемой линии в минимальном режиме:

$$k_{\text{чув}}^{IV} = \frac{3I_{\text{0 мин}}}{I_{\text{0с.з.}}^{IV}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{0\text{ мин}}$  – минимальное значение периодической составляющей утроенного начального тока нулевой последовательности, протекающего в месте установки защиты, при КЗ на землю в конце смежной линии, в наиболее удаленном от места установки защиты ее конце, А.

Пример выбора уставок для ЛЭП 110 – 220 кВ, с двухсторонним питанием приведен в приложении В.

Последовательность выбора уставок для блокирующего реле направления мощности РНМ (БРНМ) или разрешающего РНМ (РРНМ) токовой защиты нулевой последовательности, приведена в приложении Г.

Таблица А.1 - Соответствие наименований уставок и программных ключей

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-51	Примечание
1.	Ввод первой ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S211	S211	
2.	Ввод второй ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S212	S212	
3.	Ввод третьей ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S213	S213	
4.	Ввод четвертой ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S214	S214	
5.	Ввод пятой ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S215	S215	
6.	Ввод шестой ступени ТЗНП осуществляется программным ключом	S216	-	
7.	Ток срабатывания ТЗНП 1 $I_{0\text{ с.з.}}^I$	ТЗНП РТ1	ТЗНП РТ1	
8.	Выдержка времени ТЗНП 1 $t_{\text{с.з.}}^I$	ТЗНП Т1	ТЗНП Т1	
9.	Ток срабатывания ТЗНП 2 $I_{0\text{ с.з.}}^{II}$	ТЗНП РТ2	ТЗНП РТ2	
10.	Выдержка времени ТЗНП 2 $t_{\text{с.з.}}^{II}$	ТЗНП Т2	ТЗНП Т2	
11.	Ток срабатывания ТЗНП 3 $I_{0\text{ с.з.}}^{III}$	ТЗНП РТ3	ТЗНП РТ3	
12.	Выдержка времени ТЗНП 3 $t_{\text{с.з.}}^{III}$	ТЗНП Т3	ТЗНП Т3	
13.	Ток срабатывания ТЗНП 5 $I_{0\text{ с.з.}}^{IV}$	ТЗНП РТ4	ТЗНП РТ4	
14.	Выдержка времени ТЗНП 4 $t_{\text{с.з.}}^{IV}$	ТЗНП Т4	ТЗНП Т4	
15.	Ток срабатывания ТЗНП 5 $I_{0\text{ с.з.}}^V$	ТЗНП РТ5	ТЗНП РТ5	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-51	Примечание
16.	Выдержка времени ТЗНП 5 $t_{с.з.}^V$	ТЗНП Т5	ТЗНП Т5	
17.	Ток срабатывания ТЗНП 6 $I_{0\text{ с.з.}}^{VI}$	ТЗНП РТ6	-	
18.	Выдержка времени ТЗНП 6 $t_{с.з.}^{VI}$	ТЗНП Т6	-	
19.	Ввод блокировки по БТН первой ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S211-2	S211-1	
20.	Ввод блокировки по БТН второй ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S212-2	S212-1	
21.	Ввод блокировки по БТН третьей ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S213-2	S213-1	
22.	Ввод блокировки по БТН четвертой ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S214-2	S214-1	
23.	Ввод блокировки по БТН пятой ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S215-2	S215-1	
24.	Ввод блокировки по БТН шестой ступени ТЗНП, осуществляется программным ключом	S216-2	-	
25.	Коэффициент блокировки ТЗНП по ИПБ	ТЗНП 2г К	ТЗНП ИПБ К	
26.	Максимальная длительность блокировки ТЗНП по ИПБ, с	ТЗНП 2г Т	ТЗНП ИПБ Т	
27.	Ввод действия второй ступени ТЗНП на отключение	-	S212-3	
28.	Ввод действия третьей ступени ТЗНП на отключение	-	S213-3	
29.	Ввод действия четвертой ступени ТЗНП на отключение	S214-3	S214-3	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМР3-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМР3-ЛТ-51	Примечание
30.	Ввод действия пятой ступени ТЗНП на отключение	S215-3	S215-3	
31.	Ввод действия шестой ступени ТЗНП на отключение	S216-3	-	
32.	Направленность ТЗНП первой ступени: 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от разрешающего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	-	ТЗНП 1 РНМ	
33.	Направленность ТЗНП второй ступени: 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от разрешающего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	-	ТЗНП 2 РНМ	
34.	Направленность ТЗНП третьей ступени: 0 - ненаправленная;	-	ТЗНП 3 РНМ	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-51	Примечание
	<p>1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ;</p> <p>2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ;</p> <p>3 - направленная "к шинам", от разрешающего РНМ;</p> <p>4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ</p>			
35.	<p>Направленность ТЗНП четвертой ступени: 0 - ненаправленная;</p> <p>1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ;</p> <p>2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ;</p> <p>3 - направленная "к шинам", от разрешающего РНМ;</p> <p>4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ</p>	-	ТЗНП 4 РНМ	
36.	<p>Направленность ТЗНП пятой ступени: 0 - ненаправленная;</p> <p>1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ;</p> <p>2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ;</p> <p>3 - направленная "к шинам", от разрешающего РНМ;</p>	-	ТЗНП 5 РНМ	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-51	Примечание
	4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ			
37.	Направленность ТЗНП первой ступени 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	S211-1	-	
38.	Направленность ТЗНП второй ступени 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	S212-1	-	
39.	Направленность ТЗНП третьей ступени 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ;	S213-1	-	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМР3-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМР3-ЛТ-51	Примечание
	2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ			
40.	Направленность ТЗНП четвертой ступени 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	S214-1	-	
41.	Направленность ТЗНП пятой ступени 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ;	S215-1	-	

	Название в методических указаниях	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-52	Название в РЭ1 БМРЗ-ЛТ-51	Примечание
	4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ			
42.	Направленность ТЗНП шестой ступени: 0 - ненаправленная; 1 - направленная "в линию", от разрешающего РНМ; 2 - направленная "в линию", от блокирующего или разрешающего РНМ; 3 - направленная "к шинам", от блокирующего РНМ; 4 - направленная "к шинам", от блокирующего или разрешающего РНМ	S216-1	-	
43.	Угол максимальной чувствительности РНМ нулевой последовательности $\varphi_{\text{нп м.ч.}}$	ТЗНП Фмч	ТЗНП Фмч	
44.	Чувствительность по напряжению для РРНМ $3U_{0c. \text{ раз.рнм вт}}$	Utr РРНМ	Utr РРНМ	
45.	Чувствительность по току для РРНМ $3I_{0c. \text{ раз.рнм вт}}$	Itr РРНМ	0,2 А	
46.	Чувствительность по напряжению для БРНМ $3U_{0c. \text{ бл.рнм вт}}$	Utr БРНМ	Utr БРНМ	
47.	Чувствительность по току для БРНМ $3I_{0c. \text{ бл.рнм вт}}$	Itr БРНМ	0,2 А	
48.	Способ расчета напряжения $3U_0$	без возможности выбора, только по $U_{abc}$	S220 (0 - $U_{abc}$ ; 1 - Уни, ик)	

## Приложение Б

Ниже приведен расчет токовых ненаправленных защит нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой выдержки времени, установленных в сети 110 кВ одностороннего питания.

Исходная схема сети одностороннего питания приведена на рисунке Б.1.

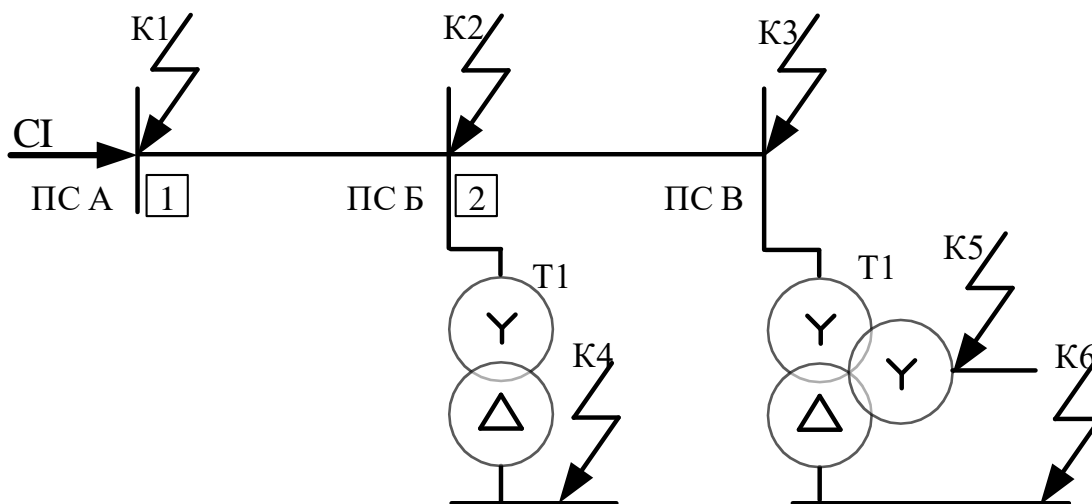


Рисунок Б1 - Расчетная схема

В примере рассмотрена сеть 110 кВ, с трехфазным управлением выключателями, поэтому выбор уставок и их проверка для неполнофазного режима не производился. Последовательность расчета и пример приведен в таблице Б.1.

Таблица Б.1 - Выбор параметров срабатывания и проверка чувствительности защиты сети

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Степень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты					Проверка чувствительности реле тока			
					Условие выбора тока срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания	Принятый ток срабатывания, А	Условие выбора выдержки времени	Выдержка времени, с	Условие проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности
ПС А – ПС Б	ПС А	1	I	токовая	Отстройка от $3I_0$ при замыкании на землю на шинах ПС Б	I	$I_{0\text{ с.з.}}^I = k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0\text{ макс К2}}^{(1)}$ $= 1,3 \cdot 1,4 \cdot 10^3 =$ $= 1818,7 \text{ А}$	1818,6	-	Без выдержки	Замыкание на землю у шин ПС А	II	$k_{\text{чув}}^I = \frac{3I_{0\text{ мин К1}}^{(1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^I} =$ $= \frac{3,05 \cdot 10^3}{1818,6} = 1,68$
ПС А – ПС Б	ПС А	1	II	токовая	Согласование с I степенью защиты 2	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{II} = k_{\text{отс}}^{II} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^I = 1,1 \cdot 753 =$ $= 828,3 \text{ А}$	828,6	Согласование с I степенью защиты 2 с учетом времени срабатывания УРОВ	0,7	Замыкание на землю на шинах ПС Б	II	$k_{\text{чув}}^{II} = \frac{3I_{0\text{ мин К2}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{II}} =$ $= \frac{1,2 \cdot 10^3}{828,6} = 1,35$
ПС А – ПС Б	ПС А	1	III	токовая	*-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС А – ПС Б	ПС А	1	IV	токовая	Отстройка от $I_{\text{нб}}$ в нулевом проводе ТТ при КЗ между тремя фазами за (авто)трансформатором на шинах ПС В	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}}^{IV} \cdot I_{0\text{ нб}} = 1,25 \cdot 34 =$ $= 41,2 \text{ А}$ $I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{кз К4}}^{(3)} =$ $= 0,1 \cdot 0,34 \cdot 10^3 = 34 \text{ А}$	41,4		2,9		II	$k_{\text{чув}}^{IV} = \frac{3I_{0\text{ мин К5}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{IV}} =$ $= \frac{0,621 \cdot 10^3}{41,4} = 15$
					Согласование с III степенью защиты 2		$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}}^{IV} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^{III} = 1,1 \cdot 27,5 =$ $= 30,25 \text{ А}$						
ПС Б – ПС В	ПС А	2	I	токовая	Отстройка от $3I_0$ при замыкании на землю на шинах ПС В	I	$I_{0\text{ с.з.}}^I = k_{\text{отс}}^I \cdot I_{0\text{ макс К2}}^{(1)} =$ $= 1,3 \cdot 0,579 \cdot 10^3 =$ $= 753 \text{ А}$	753	-	Без выдержки	Замыкание на землю у шин ПС Б	II	$k_{\text{чув}}^I = \frac{3I_{0\text{ мин К2}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^I} =$ $= \frac{1,2 \cdot 10^3}{753} = 1,59$

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Ступень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты						Проверка чувствительности реле тока			
					Условие выбора тока срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания	Принятый ток срабатывания, А	Условие выбора выдержки времени	Выдержка времени, с	Условие проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности	
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	II	токовая	**_	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	III	токовая	**_	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	IV	токовая	Отстройка от $I_{нб}$ в нулевом проводе ТТ при КЗ между тремя фазами за (авто)трансформатором на шинах ПС В	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{отс} \cdot I_{0\text{ нб}} = 1,25 \cdot 27,5 = 41,2 \text{ А}$ $I_{0\text{ нб}} = k_{нб} \cdot I_{кз\text{ К5}}^{(3)} = 0,1 \cdot 0,22 \cdot 10^3 = 22 \text{ А}$	27,5		2,5	Замыкание на землю на шинах ПС В	II	$k_{чув}^{IV} = \frac{3I_{0\text{ мин К5}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{IV}} = \frac{0,621 \cdot 10^3}{27,5} = 22,6$	

\*- для схемы, указанной на рисунке Б.1, применение третьей ступени ТЗНП ВЛ А – Б не требуется, так как ее не нужно согласовывать со второй ступенью ТЗНП ВЛ Б – В из-за ее отсутствия в данном примере.

\*\* - для схемы, указанной на рисунке Б.1, применение второй и третьей ступени ТЗНП ВЛ Б – В не требуется, так как ее не нужно согласовывать с ступенями защит ТЗНП смежных элементов в связи с их отсутствием в данном примере.

## Приложение В

Ниже приведен расчет токовых направленных и ненаправленных защит нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой выдержки времени, установленных в сети 220 кВ с двухсторонним питанием, с учетом возможности наличия на параллельной линии.

Исходная схема сети приведена на рисунке В.1, на рисунке В.2 представлен вариант схемы для двух смежных линий при каскадном отключении.

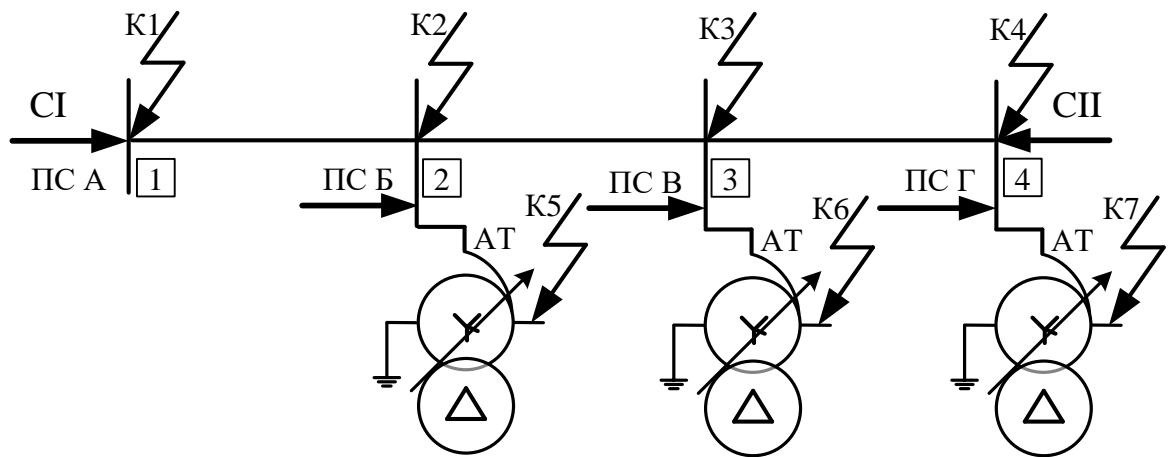


Рисунок В.1 - Расчетная схема

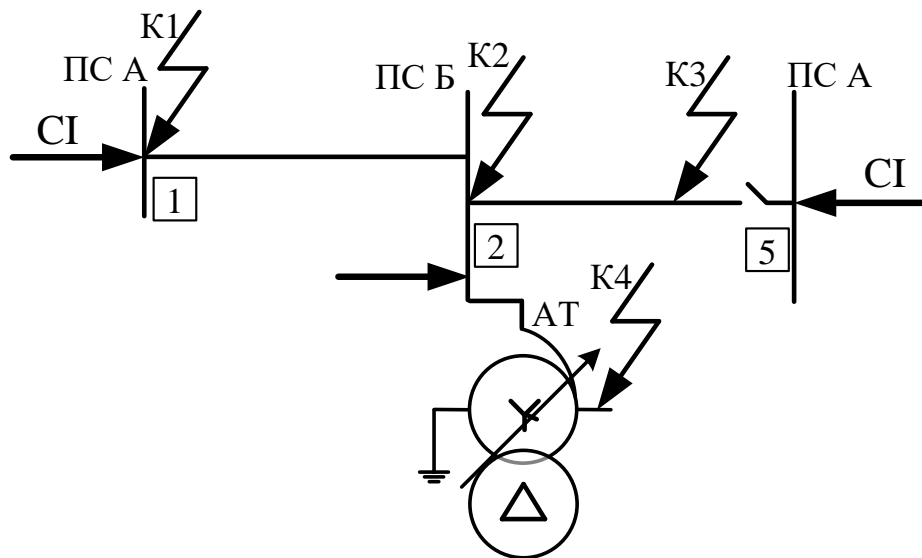


Рисунок В.2 - Расчетная схема для режима каскадного отключения

В примере рассмотрена сеть 110-220 кВ, с трехфазным управлением выключателями, поэтому выбор уставок и их проверка для неполнофазного режима не производился. Последовательность расчета и пример приведен в таблице В.1

Таблица В.1 - Выбор параметров срабатывания и проверка чувствительности защиты сети

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Степень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты					Проверка чувствительности реле тока			
					Условие выбора тока срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания	Принятый ток срабатывания, А	Условие выбора выдержки времени	Выдержка времени, с	Условие проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности
ПС А – ПС Б	ПС А	1	I	токовая	Отстройка от $3I_0$ при замыкании на землю на шинах ПС Б*	I	$I_{0\text{ с.з.}}^I = k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0\text{ макс К2}}^{(1)}$ $= 1,3 \cdot 2,18 \cdot 10^3 =$ $= 2834 \text{ А}$	2836	-	0	-	-	-
ПС А – ПС Б	ПС А	1	II	токовая	Согласование с I степенью защиты 2	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{II} = k_{\text{отс}}^{II} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^I$ $= 1,1 \cdot 0,111 \cdot 10200$ $= 1234,2 \text{ А}$	1234	Согласование с I степенью защиты 2 с учетом времени срабатывания УРОВ	0,5	Замыкание на землю на шинах ПС Б	II	$k_{\text{чув}}^{II} = \frac{3I_{0\text{ мин К2}}^{(1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{II}} =$ $= \frac{1,6 \cdot 10^3}{1234} = 1,3.$
ПС А – ПС Б	ПС А	1	III	токовая	Согласование с II степенью защиты 2	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{III} = k_{\text{отс}}^{III} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^{II}$ $= 1,1 \cdot 0,271 \cdot 3000 =$ $= 895 \text{ А}$	896	Согласование с II степенью защиты 2 с учетом времени срабатывания УРОВ	1,2	Замыкание на землю на шинах ПС В	II	$k_{\text{чув}}^{III} = \frac{3I_{0\text{ мин К2}}^{(1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{III}} =$ $= \frac{1,6 \cdot 10^3}{896} = 1,79.$
ПС А – ПС Б	ПС А	1	IV	токовая	Отстройка от $I_{\text{нб}}$ в нулевом проводе ТТ при КЗ между тремя фазами за (авто)трансформатором на шинах ПС Б	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}}^{IV} \cdot I_{0\text{ нб}} = 1,25 \cdot 158,2 =$ $= 197,5 \text{ А}$ $I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{кз К5}}^{(3)} =$ $= 0,1 \cdot 1,58 \cdot 10^3 = 158,2 \text{ А}$	198		2,5	Замыкание на землю у шин ПС В при каскадном отключении (одностороннем включении линии)	II-к	$k_{\text{чув}}^{IV} = \frac{3I_{0\text{ мин К3}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{IV}} =$ $= \frac{0,29 \cdot 10^3}{198} = 1,5.$
					Согласование с III степенью защиты 2		$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}}^{IV} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^{III}$ $= 1,1 \cdot 0,174 \cdot 860 =$ $= 164,6 \text{ А}$						

Наименование линии	Место установки защиты	№ защиты	Степень защиты	Тип защиты	Выбор параметров срабатывания защиты					Проверка чувствительности реле тока			
					Условие выбора тока срабатывания	Расчетный режим	Расчетный ток срабатывания	Принятый ток срабатывания, А	Условие выбора выдержки времени	Выдержка времени, с	Условие проверки чувствительности	Расчетный режим	Коэффициент чувствительности
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	I	токовая	Отстройка от $3I_0$ при замыкании на землю на шинах ПС В*	I	$I_{0\text{ с.з.}}^I = k_{\text{отс}}^I \cdot 3I_{0\text{ макс КЗ}}^{(1)} =$ $= 1,3 \cdot 7,85 \cdot 10^3 =$ $= 10200 \text{ А}$	10200	-	0			
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	II	токовая	Согласование с I степенью защиты 3**	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{II} = k_{\text{отс}}^{II} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^I =$ $= 1,1 \cdot 0,648 \cdot 4200 =$ $= 3000 \text{ А}$	3000	Согласование с I степенью защиты 2 с учетом времени срабатывания УРОВ	0,5	Замыкание на землю на шинах ПС В	II	$k_{\text{чув}}^{II} = \frac{3I_{0\text{ мин КЗ}}^{(1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{II}} =$ $= \frac{4,9 \cdot 10^3}{3000} = 1,63.$
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	III	токовая	Согласование с II степенью защиты 3**	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{III} = k_{\text{отс}}^{III} \cdot k_{\text{ток}} \cdot I_{0\text{ с.з.}}^{II} =$ $= 1,1 \cdot 0,358 \cdot 2185 =$ $= 860 \text{ А}$	860		1,2	Замыкание на землю у шин ПС В при одностороннем включении линии	II	$k_{\text{чув}}^{III} = \frac{3I_{0\text{ мин К4}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{III}} =$ $= \frac{1,18 \cdot 10^3}{860} = 1,37.$
ПС Б – ПС В	ПС Б	2	IV	токовая	Отстройка от $I_{\text{нб}}$ в нулевом проводе ТТ при КЗ между тремя фазами за (авто)трансформатором на шинах ПС В	I	$I_{0\text{ с.з.}}^{IV} = k_{\text{отс}} \cdot I_{0\text{ нб}} = 1,25 \cdot 208 =$ $= 260 \text{ А}$ $I_{0\text{ нб}} = k_{\text{нб}} \cdot I_{\text{кз К6}}^{(3)} =$ $= 0,1 \cdot 2,08 \cdot 10^3 = 208 \text{ А}$	260		4,5	Замыкание на землю у шин ПС В при одностороннем включении линии	II	$k_{\text{чув}}^{IV} = \frac{3I_{0\text{ мин К4}}^{(1,1)}}{I_{0\text{ с.з.}}^{IV}} =$ $= \frac{0,35 \cdot 10^3}{260} = 1,34.$

\* - в соответствии с рекомендациями приведенными в [11] для быстрого отключения КЗ в начале линии с двухсторонним питанием, дополнительно вводится направленная степень ТЗНП без выдержки времени (токовая отсечка), которая обеспечивает быстрое отключение при КЗ в первой половине защищаемой линии, тогда вторая степень ТЗНП отстраивается от первой степени ТЗНП смежной линии.

\*\* - выбор уставок для защиты 3 в настоящем примере не рассмотрен, так как будет аналогичен рассмотренному примеру выбора уставок защит 1 и 2.

## Приложение Г

Для любой из ступеней ТЗНП могут быть заданы следующие параметры:

- любая из ступеней ТЗНП может быть выполнена ненаправленной, направленной в линию или к шинам, с пуском от блокирующего реле направления мощности РНМ (БРНМ) нулевой последовательности или разрешающего РНМ (РРНМ) нулевой последовательности;
  - задание режима направленности для каждой ступени осуществляется уставками.
- Реле направления мощности ТЗНП включены на напряжение и ток нулевой последовательности.

Контроль направленности быстродействующих ступеней ТЗНП рекомендуется выполнять от РРНМ, так как при близких КЗ «за спиной», с большими кратностями тока к току уставки, БРНМ нулевой последовательности может не успеть сработать и заблокировать эту ступень. Для ступеней, реагирующих на удаленные замыкания, рекомендуется применять пуск с контролем от БРНМ нулевой последовательности или РРНМ нулевой последовательности, так как при недостаточном напряжении нулевой последовательности РРНМ нулевой последовательности может не сработать. При этом РРНМ нулевой последовательности будет дублировать БРНМ нулевой последовательности в пределах своей чувствительности.

Диаграммы срабатывания ТЗНП, направленных "в линию", при работе от РРНМ нулевой последовательности и БРНМ нулевой последовательности представлены на рисунке Г.1.

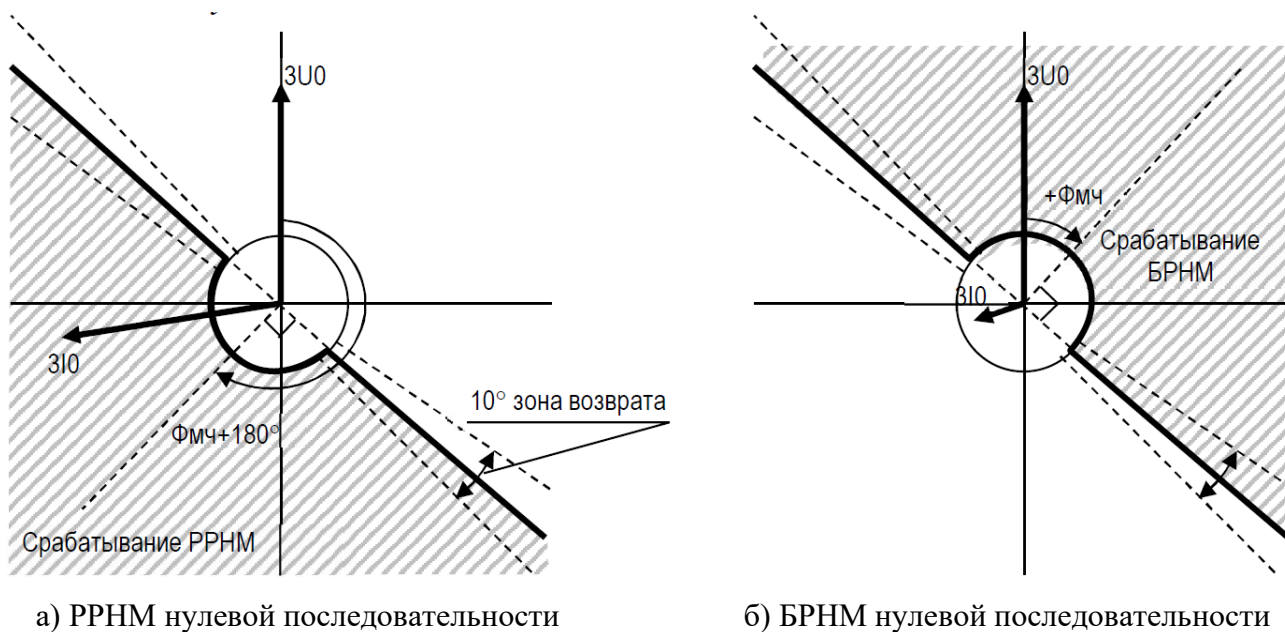


Рисунок Г.1 - Диаграммы срабатывания ТЗНП, направленных "в линию"

Угол максимальной чувствительности РНМ нулевой последовательности задается уставкой:

$$\varphi_{\text{нп м.ч.}} = \arctg\left(\frac{X_0}{R_0}\right),$$

где  $X_0$  - реактивная составляющая сопротивления прямой последовательности защищаемого присоединения;  $R_0$  - активная составляющая сопротивления прямой последовательности защищаемого присоединения.

Уставки по току срабатывания  $3I_{\text{ос. рнм вт}}$  и напряжению срабатывания  $3U_{\text{ос. рнм вт}}$  реле направления мощности нулевой последовательности независимы и отстраиваются от небалансов на выходе соответствующих фильтров нулевой последовательности в рабочем режиме.

Первичный утроенный ток срабатывания БРНМ нулевой последовательности выбирается по условию отстройки от суммарного тока небаланса нулевой последовательности в максимальном нагрузочном режиме, и определяется формулой:

$$3I_{\text{ос. бл.рнм}} = \frac{I_{\text{ос.з.}}^n}{k_{\text{отс}}},$$

где  $k_{\text{отс}} = 1,2$  – коэффициент отстройки;  $I_{\text{ос.з.}}^n$  - ток срабатывания наиболее чувствительной направленной ступени ТЗНП, А.

Чувствительность РНМ нулевой последовательности по току и напряжению задается уставками для РРНМ нулевой последовательности и БРНМ нулевой последовательности соответственно (для БФПО-ЛТ-51 чувствительность по току задана на уровне 0,2 А).

Минимально необходимый коэффициент чувствительности ТЗНП определяется согласно требований [1]:

- для органов направления мощности нулевой и обратной последовательности - около 2,0 по мощности и около 1,5 по току и напряжению;
- для органа направления мощности, включенного на полные ток и напряжение, не нормируется по мощности и около 1,5 по току.

Проверка по коэффициенту чувствительности БРНМ нулевой последовательности, по току:

$$k_{\text{чув бл.рнм I}} = \frac{3I_{\text{кз мин}}}{3I_{\text{ос. бл. рнм}}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{\text{кз мин}}$  – минимальный утроенный ток нулевой последовательности, протекающий при КЗ «за спиной».

Вторичное напряжение срабатывания БРНМ нулевой последовательности

отстраивается от суммарного напряжения небаланса и напряжения, обусловленного несимметрией в нормальном нагрузочном режиме:

$$3U_{0c. \text{ бл.рнм вт}} = k_{отс} \cdot \frac{3U_{0нб \text{ вт}} + 3U_{0нр}}{k_{в}},$$

где  $k_{отс} = 1,25$  – коэффициент отстройки учитывающий погрешность реле, ошибки расчета и необходимый запас;  $3U_{0нб \text{ вт}} = 6,0 \text{ В}$  – утроенное вторичное напряжение небаланса БРНМ (при работе по измеренным значениям  $3U_0$ , так как дополнительная вторичная обмотка ТН, как правило, имеет погрешность измерения фазы  $\pm 3 \%$ .) [12];  $3U_{0нр}$  – утроенное напряжение нулевой последовательности, обусловленное несимметрией;  $k_{тн}$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения;  $k_{в} = 0,95$  – коэффициент возврата.

Проверка по коэффициенту чувствительности БРНМ нулевой последовательности, по напряжению:

$$k_{чув \text{ бл.рнм } U} = \frac{3U_{0\text{мин}}}{3U_{0c. \text{ бл.рнм вт}} \cdot k_{тн}} \geq 1,5,$$

где  $3U_{0\text{мин}}$  – минимальное напряжение нулевой последовательности, в месте установки реле при КЗ в зоне резервирования защит смежных участков;  $k_{тн}$  – коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Первичный утроенный ток срабатывания РРНМ нулевой последовательности выбирается по условию отстройки от суммарного тока небаланса нулевой последовательности в максимальном нагрузочном режиме, и определяется формулой:

$$3I_{0c. \text{ р.рнм}} = k_{отс} \cdot \frac{3I_{0нб} + 3I_{0нр}}{k_{в}}$$

где  $k_{отс} = 1,25$  – коэффициент отстройки;  $k_{в} = 0,95$  – коэффициент возврата реле.

Ток небаланса в нулевом проводе трансформатора тока в максимальном нагрузочном режиме, А:

$$3I_{0нб} = k_{0нб} \cdot I_{\text{раб.макс}},$$

где  $k_{0нб} = (0,02 \div 0,05)$  – коэффициент небаланса;  $I_{\text{раб.макс}}$  – максимальный нагрузочный ток защищаемой линии, А.

Утроенный ток нулевой последовательности, обусловленный несимметрией нормального режима, при отсутствии несимметрии в системе принимается равным 0, А:

$$3I_{0нр} \geq k_{0нс} \cdot I_{\text{раб.макс}},$$

где  $k_{0нс}$  – коэффициент несимметрии.

При этом необходимо согласоваться с током срабатывания наиболее чувствительной направленной ступени ТЗНП:

$$3I_{0с. р.рнм вт} = k_{согл} \cdot I_{0с.з.}^n,$$

где  $I_{0с.з.}^n$  – ток срабатывания наиболее чувствительной направленной ступени ТЗНП, А;  $k_{согл} = (0,8 \div 0,9)$  – коэффициент согласования.

В качестве уставки срабатывания по минимальному току РРНМ нулевой последовательности принимается максимальное значение из полученных.

Проверка по коэффициенту чувствительности РРНМ НП, по току:

$$k_{чув р.рнм I} = \frac{3I_{кз мин}}{3I_{0с. р.рнм} \cdot k_{тт}} \geq 1,5,$$

где  $3I_{кз мин}$  – минимальный утроенный ток нулевой последовательности, протекающий при КЗ в зоне резервирования защит смежных участков.

Вторичное напряжение срабатывания РРНМ нулевой последовательности выбирается вначале без учёта возможности смещения по условию отстройки от напряжения небаланса и напряжения, обусловленного несимметрией в нормальном нагрузочном режиме:

$$3U_{0с. р.рнм вт} = k_{отс} \cdot \frac{3U_{0нб} + 3U_{0нр}}{k_{в}}.$$

Для селективной работы РРНМ НП с блокирующим реле:

$$3U_{0с. р.рнм вт} = k_{отс} \cdot 3U_{0с. бл.рнм вт},$$

где  $k_{отс} = 2$  – коэффициент отстройки. Из двух предварительно выбранных значений выбирается большее  $3U_{0с. раз.рнм вт}$ .

Проверка по коэффициенту чувствительности:

$$k_{чув р.рнм U} = \frac{3U_{0мин}}{3U_{0с. р.рнм вт} \cdot k_{тт}} \geq 1,5,$$

где  $3U_{0мин}$  – минимальное напряжение нулевой последовательности, при КЗ в зоне резервирования защит смежных участков.

При обнаружении неисправности измерительных цепей напряжения все направленные ступени ТЗНП переводятся в ненаправленный режим.

### Список использованной литературы

1. Правила устройства электроустановок (7-е изд.). - М.: ЗАО «Энергосервис», 2008.
2. Приложение к приказу Минэнерго России от «13» февраля 2019 г. № 101 Требования к оснащению линий электропередачи и оборудования объектов электроэнергетики классом напряжения 110 кВ и выше устройствами и комплексами релейной защиты и автоматики, а также к принципам функционирования устройств и комплексов релейной защиты и автоматики.
3. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ЛТ-51. Руководство по эксплуатации. Часть 2. ДИВГ.648228.080-02.06 РЭ1.  
Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ЛТ-52. Руководство по эксплуатации. Часть 2. ДИВГ.648228.080-02.08 РЭ1.
4. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 12. Токовая защита от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчеты. - М.: Энергия, 1980.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. - М.: Энергия, 1979.
6. СТО ДИВГ-055-2013 Трансформаторы и автотрансформаторы 35-220 кВ. Дифференциальная токовая защита. Расчет уставок. Методические указания.
7. СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.120.70.200-2015 Методические указания по расчёту и выбору параметров настройки (уставок) микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики производства ООО НПП «Экра», «ABB», «GE Multilin» и «Alstom Grid»/«AREVA» для воздушных и кабельных линий с односторонним питанием напряжением 110 - 330 кВ.
8. Разработка рекомендаций по расчёту и выбору параметров срабатывания защит на микроэлектронной элементной базе ВЛ 110-750 кВ. Том 1. Рекомендации по расчёту защит ВЛ 110-220 (330) кВ. №11735ТМ-Т1. - М.: Энергосетьпроект, 1985.
9. Трансформаторы тока. Общие технические условия: ГОСТ 7746-2015. - М.: Изд-во стандартов, 2016.
10. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. - М.: Энергия, 1976.
11. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1998.
12. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия: ГОСТ 1983-2015. - М.: Стандартинформ, 2016.