

## **7. ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ 110-220 КВ**

### **7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Сети напряжением 110 -220кВ работают в режиме с эффективно или глухозаземленной нейтралью. Поэтому замыкание на землю в таких сетях является коротким замыканием с током, иногда превышающим ток трехфазного КЗ, и подлежит отключению с минимально возможной выдержкой времени.

Воздушные и смешанные (кабельно-воздушные) линии оснащаются устройствами АПВ. В ряде случаев, если применяемый выключатель выполнен с пофазным управлением, применяется пофазное отключение и АПВ. Это позволяет отключить и включить поврежденную фазу без отключения нагрузки. Так как в таких сетях нейтраль питающего трансформатора заземлена, нагрузка практически не ощущает кратковременной работы в неполнофазном режиме.

На чисто кабельных линиях АПВ, как правило, не применяется.

Линии высокого напряжения работают с большими токами нагрузки, что требует применения защит со специальными характеристиками. На транзитных линиях, которые могут перегружаться, как правило, применяются дистанционные защиты, позволяющие эффективно отстроиться от токов нагрузки. На тупиковых линиях во многих случаях можно обойтись токовыми защитами. Как правило, не допускается, чтобы защиты срабатывали при перегрузках. Защита от перегрузки, при необходимости, выполняется на специальных устройствах.

Согласно ПУЭ, устройства предотвращения перегрузки должны применяться в случаях, если допустимая для оборудования длительность протекания тока составляет менее 10-20 мин. Защита от перегрузки должна действовать на разгрузку оборудования, разрыв транзита, отключение нагрузки, и только в последнюю очередь на отключение перегрузившегося оборудования.

Линии высокого напряжения, как правило, имеют значительную длину, что усложняет поиск места повреждения. Поэтому, линии должны оснащаться устройствами, определяющими расстояние до места повреждения. Согласно директивным материалам СНГ, средствами ОМП должны оснащаться линии длиной 20 км и более.

Задержка в отключении короткого замыкания может привести к нарушению устойчивости параллельной работы электростанций, из-за длительной посадки напряжения может остановиться оборудование и нарушиться технологический процесс производства, могут произойти дополнительные повреждения линии, на которой возникло короткое замыкание. Поэтому, на таких линиях очень часто применяются защиты, которые отключают короткие замыкания в любой точке без выдержки времени. Это могут быть дифференциальные защиты, установленные по концам линии и связанные высокочастотным, проводниковым или оптическим каналом. Это могут быть обычные защиты, ускоряемые при получении разрешающего, или снятии блокирующего сигнала с противоположной стороны.

Токовые и дистанционные защиты, как правило, выполняются ступенчатыми. Количество ступеней не менее 3, в ряде случаев бывает необходимо 4, или даже 5 ступеней.

Во многих случаях, все требуемые защиты можно выполнить на базе одного устройства. Однако выход со строя этого одного устройства оставляет оборудование без защиты, что недопустимо. Поэтому защиты линий высокого напряжения целесообразно выполнять из 2 комплектов. Второй комплект является резервным и может быть упрощен по сравнению с основным: не иметь АПВ, ОМП, иметь меньшее количество ступеней и т.д. Второй комплект должен питаться от другого автомата оперативного тока и комплекта трансформаторов тока. По возможности, питаться от другой аккумуляторной батареи и трансформатора напряжения, действовать на отдельный соленоид отключения выключателя.

Устройства защиты высоковольтных линий должны учитывать возможность отказа выключателя и иметь УРОВ, либо встроенное в само устройство, либо организованное отдельно.

Для анализа аварии и работы релейной защиты и автоматики требуется регистрация как аналоговых величин, так и дискретных сигналов при аварийных событиях.

Таким образом, для высоковольтных линий комплекты защиты и автоматики должны выполнять следующие функции:

- Защиту от междуфазных коротких замыканий и коротких замыканий на землю.
- Пофазное или трехфазное АПВ.
- Защиту от перегрузки.
- УРОВ.
- Определение места повреждения.
- Осциллографирование токов и напряжений, а также регистрация дискретных сигналов защиты и автоматики.
- Устройства защиты должны резервироваться или дублироваться.
- Для линий, имеющих выключатели с пофазным управлением, необходимо иметь защиту от неполнофазного режима, действующую на отключение своего и смежных выключателей, так как длительный неполнофазный режим в сетях СНГ не допускается.

## 7.2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Как указывалось в гл. 1, в сетях с заземленной нейтралью необходимо учитывать дополнительно два вида короткого замыкания: однофазного и двухфазного замыкания на землю.

Расчеты токов и напряжений при коротких замыканиях на землю ведутся методом симметричных составляющих см. гл. 1. Это важно, в том числе, и потому, что защиты используют симметричные составляющие, которые в симметричных режимах отсутствуют. Использование токов обратной и нулевой последовательности позволяет не отстраивать защиту от тока нагрузки, и иметь уставку по току меньшую тока нагрузки. Например, для защиты от замыканий на землю, главным образом используется токовая защита нулевой последовательности, включаемая в нулевой провод соединенных в звезду трех трансформаторов тока.

При использовании метода симметричных составляющих, схема замещения для каждой из них составляется отдельно, затем они соединяются вместе по месту КЗ. Например, составим схему замещения для схемы рис 7.1.

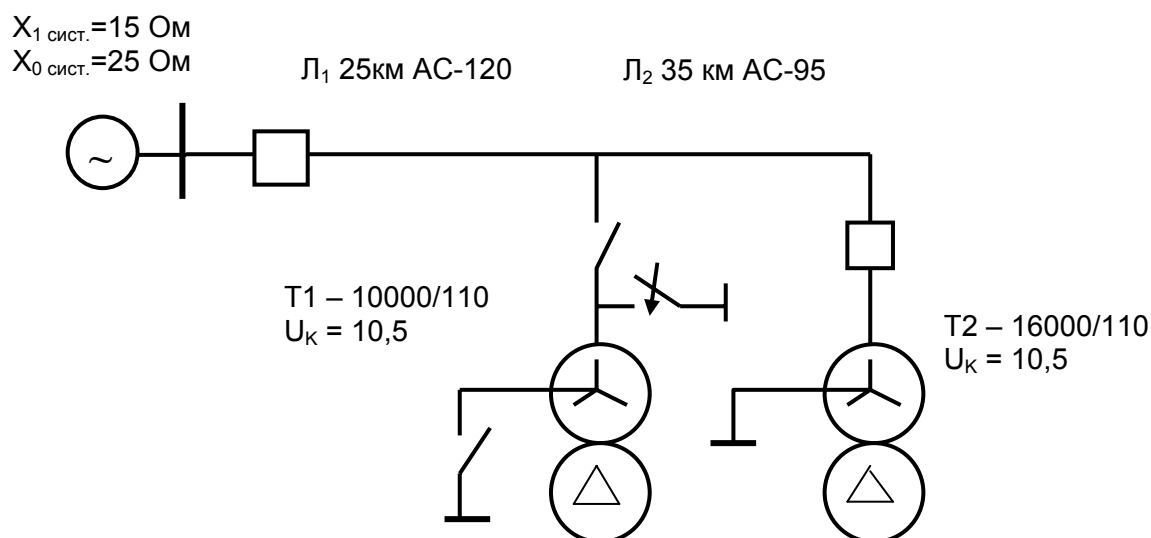


Рис. 7.1 Пример сети для составления схемы замещения в симметричных составляющих

При расчете параметров линии 110 кВ и выше для схемы замещения, обычно пренебрегают активным сопротивлением линии. Индуктивное сопротивление прямой последовательности ( $X_1$ ) линии по справочным данным равно: АС-95 – 0,429 Ом на км, АС-120 – 0,423 Ом на км. Сопротивление нулевой последовательности для линии со стальными тросами равно  $3X_1$  т.е. соответственно  $0,429 \cdot 3 = 1,287$  и  $0,423 \cdot 3 = 1,269$ .

Определим параметры линии:

$$X_{1Л1} = 25 \cdot 0,423 = 10,6 \text{ Ом}; \quad X_{0Л1} = 25 \cdot 1,269 = 31,7 \text{ Ом}$$

$$X_{1Л2} = 35 \cdot 0,423 = 15,02 \text{ Ом}; \quad X_{0Л2} = 35 \cdot 1,269 = 45,05 \text{ Ом}$$

Определим параметры трансформатора:

Т1 10000кВА.

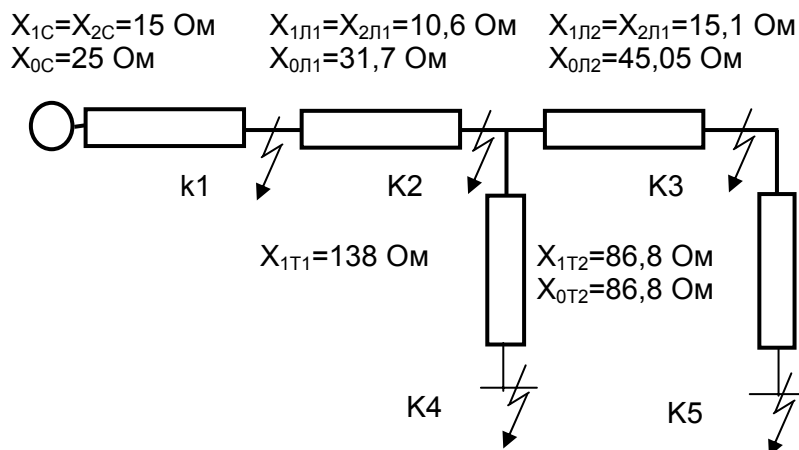
$$X_{1Т1} = 0,105 \cdot 115^2 / 10 = 138 \text{ Ом};$$

$$X_{1Т2} = 0,105 \cdot 115^2 / 16 = 86,8 \text{ Ом}; \quad X_{0Т2} = 86,8 \text{ Ом}$$

Сопротивление обратной последовательности в схеме замещения равно сопротивлению прямой последовательности.

Сопротивление нулевой последовательности трансформаторов обычно принимается равным сопротивлению прямой последовательности.  $X_{1Т} = X_{0Т}$ . Трансформатор Т1 не входит в схему замещения нулевой последовательности, так как его нейтраль разземлена.

Составляем схему замещения.



Расчет трехфазных и двухфазных КЗ производится обычным путем, см. таблицу 7.1.

Таблица 7.1

точка КЗ	сопротивление до места КЗ $X_{1\Sigma} = \sum X_1$	Ток КЗ трехфазный $I^{(3)} = (115/\sqrt{3})/X_1$	Ток КЗ двухфазный $I^{(2)} = 0,87 \cdot I^{(3)}$
к1	15 Ом	4,43 кА	3,85 кА
к2	15+10,6 = 25,6 Ом	2,59 кА	2,26 кА
к3	25,6+15,1 = 40,7 Ом	1,63 кА	1,42 кА
к4	25,6+ 138=163,6 Ом	0,406кА	0,35 кА
к5	40,7+86.8 =127,5 Ом	0,52 кА	0,45 кА

Для расчета токов замыкания на землю необходимо использовать метод симметричных составляющих. Согласно этому методу, эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности вычисляются относительно точки КЗ и включаются последовательно в схеме замещения для однофазных КЗ на землю рис.7.2, а и последовательно/параллельно для двухфазных на землю рис.7.2, б.

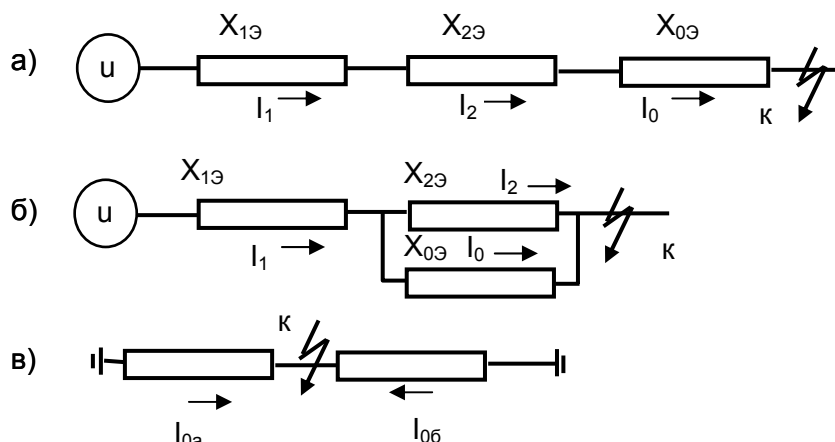


Рис. 7.2. Схема включения эквивалентных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности для расчета токов короткого замыкания на землю:

а) – однофазного; б) – двухфазного; в) – распределение токов нулевой последовательности между двумя точками заземления нейтрали.

Выполним расчет КЗ на землю см. таблицы 7.2, 7.3.

Схема прямой и обратной последовательности состоит из одной ветви: от источника питания до места короткого замыкания. В схеме нулевой последовательности 2 ветви от заземленных нейтралей, которые являются источниками тока КЗ и должны в схеме замещения соединяться параллельно. Сопротивление параллельно соединенных ветвей определяется по формуле:

$$X_3 = (X_a \cdot X_б) / (X_a + X_б) \quad (7.1)$$

Токораспределение по параллельным ветвям определяется по формулам:

$$I_a = I_3 \cdot X_3 / X_a ; I_б = I_3 \cdot X_3 / X_б \quad (7.2)$$

Таблица 7.2 Токи однофазного КЗ

Точка КЗ	$X_{1Э}$	$X_{2Э}$	$X_{0Э} = X_{0a} // X_{0б}^*$	$X_3$	$I_{КЗ1}$	$I_{КЗ2}$	$I_{КЗ0}$	$I_{КЗ0a}^*$	$I_{КЗ0б}^{**}$	$I_{КЗ} = I_1 + I_2 + I_0$
к1	15	15	$25 // 163,5 = 21,6$	51,6	1,29	1,29	1,29	1,11	0,18	3,87
к2	25,6	25,6	$56,7 // 131,8 = 39,6$	90,8	0,73	0,73	0,73	0,51	0,22	2,19
к3	40,7	40,7	$91,7 // 86,8 = 42,2$	123,6	0,53	0,53	0,53	0,24	0,29	1,59

\*Примечание. Определяется сопротивление параллельно соединенных двух участков схемы нулевой последовательности по формуле 7.1.

\*\*Примечание. Распределяется ток между двумя участками нулевой последовательности по формуле 7.2.

Таблица 7.3 Токи двухфазного КЗ на землю

Точка КЗ	$X_{1Э}$	$X_{2Э}$	$X_{0Э}^*$ таб.7.2	$X_{0-2Э}^{**} = X_{0Э} // X_2$	$X_3$	$I_{КЗ1}$	$I_{КЗ2}^{***}$	$I_{КЗ0}$	$I_{КЗ0a}^{****}$	$I_{КЗ0б}$	$I_{КЗ}^{*****} \approx I_1 + 1/2(I_2 + I_0)$
к1	15	15	21,6	8,85	23,85	2,78	1,64	1,14	0,98	0,16	4,17
к2	25,6	25,6	39,6	15,55	42,05	1,58	0,95	0,63	0,44	0,19	2,37
к3	40,7	40,7	42,2	20,71	61,41	1,08	0,55	0,53	0,24	0,29	1,62

\*Примечание. Определяется сопротивление параллельно соединенных двух участков схемы нулевой последовательности по формуле 7.1, расчет выполнен в таблице 7.2.

\*\*Примечание. Определяется сопротивление параллельно соединенных двух сопротивлений обратной и нулевой последовательности по формуле 7.1.

\*\*\*Примечание. Распределяется ток между двумя сопротивлениями обратной и нулевой последовательности по формуле 7.2.

\*\*\*\*Примечание. Распределяется ток между двумя участками нулевой последовательности по формуле 7.2.

\*\*\*\*\*Примечание. Ток двухфазного КЗ на землю указан по приближенной формуле, точное значение определяется геометрическим путем см. ниже.

### Определение фазных токов после расчета симметричных составляющих

При однофазном КЗ весь ток КЗ протекает в поврежденной фазе, в остальных фазах ток не протекает. Токи всех последовательностей равны между собой.

Для соблюдения таких условий симметричные составляющие располагаются следующим образом (рис.7.3):

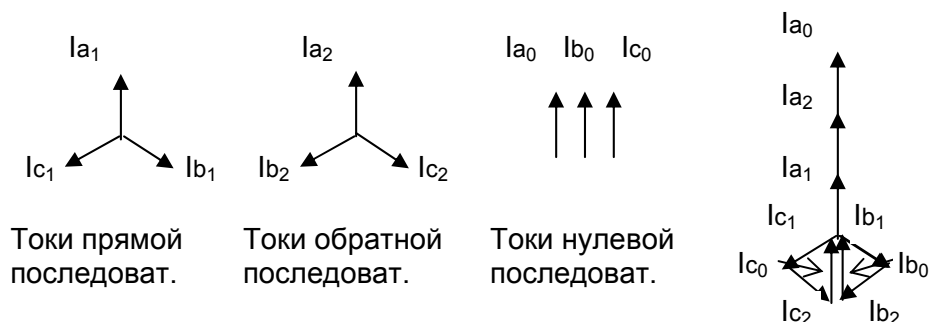


Рис.7.3. Векторные диаграммы для симметричных составляющих при однофазном КЗ

При однофазном КЗ токи  $I_1 = I_2 = I_0$ . В поврежденной фазе они равны по величине и совпадают по фазе. В неповрежденных фазах равные токи всех последовательностей образуют равносторонний треугольник и результирующая сумма всех токов равна 0.

При двухфазном коротком замыкании на землю ток в одной неповрежденной фазе равен нулю. Ток прямой последовательности равен сумме токов нулевой и обратной последовательности с обратным знаком. Исходя из таких положений, строим токи симметричных составляющих (рис. 7.4):

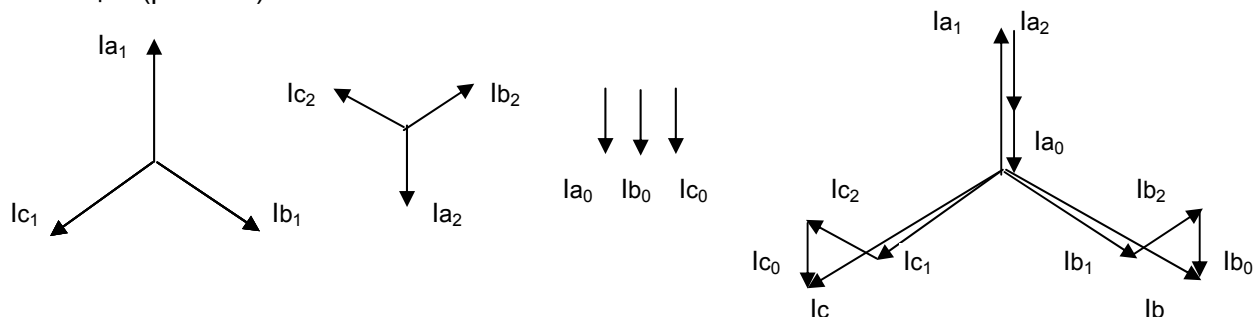


Рис. 7.4 Векторные диаграммы симметричных составляющих токов двухфазного КЗ на землю

Из построенной диаграммы видно, что фазные токи при замыканиях на землю построить довольно сложно, так как угол фазного тока отличается от угла симметричных составляющих. Его следует строить графически или использовать ортогональные проекции. Однако с достаточной для практики точностью величину тока можно определить по упрощенной формуле:

$$I_{\phi} = I_1 + \frac{1}{2}(I_2 + I_0) = 1,5I_1 \quad (7.3)$$

Токи в таблице 7.3 подсчитаны по этой формуле.

Если сравнить токи двухфазного КЗ на землю по таблице 7.3 с током двухфазного и трехфазного КЗ по таблице 7.1, можно сделать вывод, что токи двухфазного КЗ несколько ниже тока двухфазного КЗ на землю, поэтому чувствительность защиты следует определять по току двухфазного КЗ. Токи трехфазного КЗ соответственно выше тока двухфазного КЗ на

землю, поэтому определение максимального тока КЗ для отстройки защиты производится по трехфазному КЗ. Это значит, что для расчетов защиты не нужен ток двухфазного КЗ на землю, и его считать незачем. Ситуация несколько изменяется при расчете токов короткого замыкания на шинах мощных электростанций, где сопротивление обратной и нулевой последовательности меньше сопротивления прямой. Но к распределениям это не имеет отношения, а для электростанций токи считаются на ЭВМ по специальной программе.

### 7.3 ПРИМЕРЫ ВЫБОРА АППАРАТУРЫ ДЛЯ ТУПИКОВЫХ ВЛ 110-220 КВ

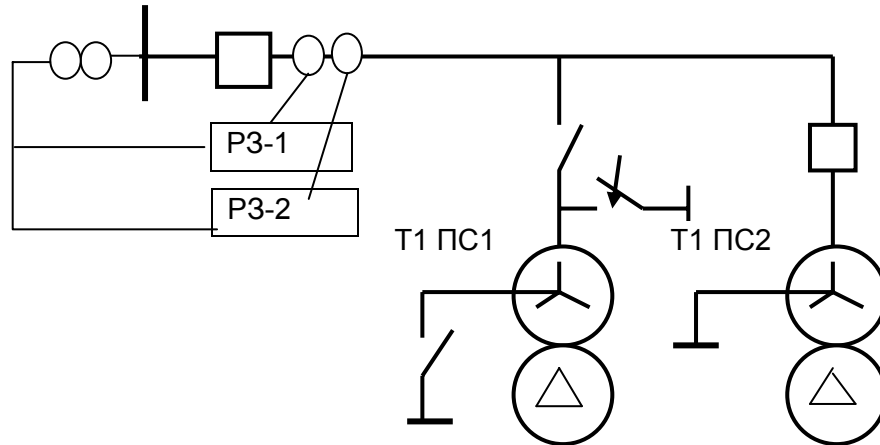


Схема 7.1. Тупиковая воздушная линия 110–220 кВ. Со стороны ПС1 и ПС2 питание отсутствует. Т1 ПС1 включен через отделитель и короткозамыкатель. Т1 ПС2 включен через выключатель. Нейтраль стороны ВН Т1 ПС2 заземлена, на ПС1 – изолирована. Минимальные требования к защите:

**Вариант 1.** Должна быть применена трехступенчатая защита от междуфазных коротких замыканий (первая ступень, без выдержки времени, отстроена от КЗ на шинах ВН ПС2, вторая, с малой выдержкой времени, от КЗ на шинах НН ПС1 и ПС2, третья ступень – максимальная защита). Защиты от замыканий на землю – 2 ступени (первая ступень, без выдержки времени отстроена от тока, посылаемого на шины заземленным трансформатором ПС2, вторая ступень с выдержкой времени, обеспечивающей ее согласование с защитами внешней сети, но не отстроенная от тока КЗ, посылаемого трансформатором ПС2). Должно быть применено двух или однократное АПВ. Чувствительные ступени должны ускоряться при АПВ. Защиты пускают УРОВ питающей подстанции. К дополнительным требованиям можно отнести защиту от обрыва фаз, определение места повреждения на ВЛ, контроль ресурса выключателя.

**Вариант 2.** В отличие от первого защита от замыканий на землю выполнена направленной, что позволяет не отстраивать ее от обратного тока КЗ и, таким образом, выполнить более чувствительную защиту без выдержки времени. Таким образом, удастся защитить всю линию без выдержки времени.

**Примечание.** В этом и последующих примерах не даются точные рекомендации по выбору уставок защиты, упоминания о настройке защит используются для обоснования выбора типов защиты. В реальных условиях может быть применена другая настройка защит, что и требуется определить при конкретном проектировании. Защиты могут быть заменены устройствами защиты других типов, имеющих подходящие характеристики.

Набор защит, как уже было сказано, должен состоять из 2 комплектов. Защита может быть реализована на 2х устройствах выбранных из производимых отечественных или импортных устройств:

- Сириус -2Л или 2В
- БЭ2607 xxx
- MiCOM P121, P122, P123, P126, P127 фирмы ALSTOM,
- F 60, F650 фирмы GE Multilin,

- двух реле REF 543 фирмы ABB – подбирается 2-е подходящие модификации,
- 7SJ 511, 512, 531, 551 SIEMENS– подбирается 2-е подходящие модификации,
- двух реле SEL 551 фирмы SEL.

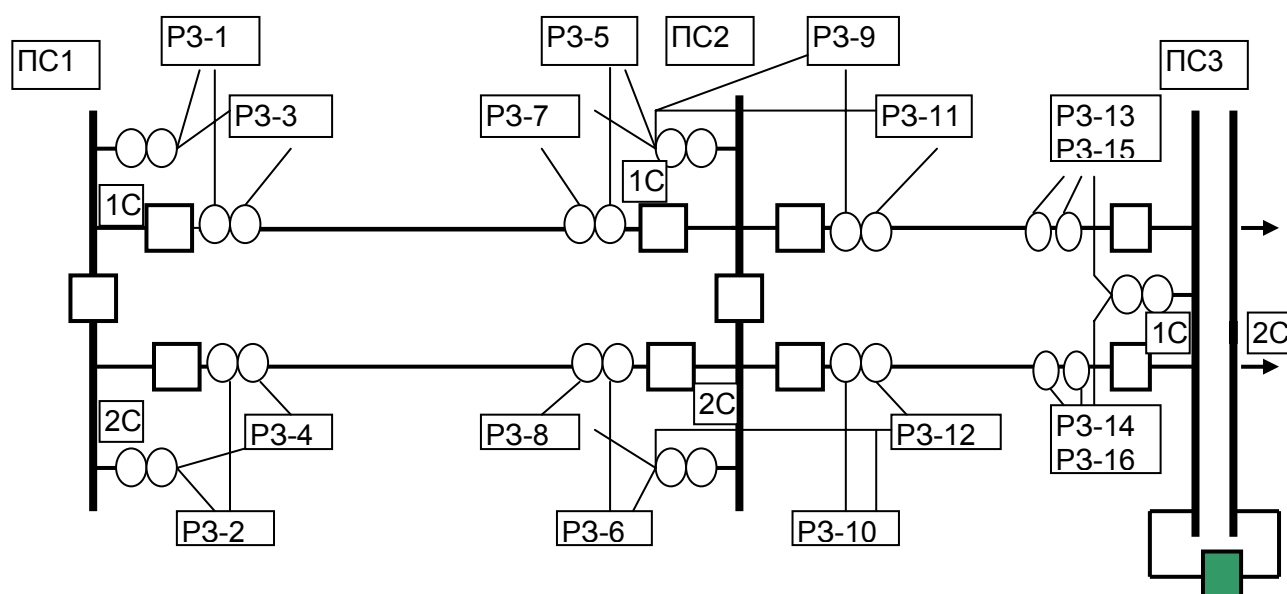


Схема 7.2. Разомкнутый транзит на подстанции 3.

Двухцепная воздушная линия заходит на подстанцию 2, секции которой работают параллельно. Предусматривается возможность переноса разреза на ПС2 в ремонтном режиме. В этом случае включается секционный выключатель на ПС3. Транзит замыкается только на время переключения и, при выборе защит, его замыкание не учитывается. На 1 секции ПС3 включен трансформатор с заземленной нейтралью. Источника тока для однофазного КЗ на подстанциях 2 и 3 нет. Поэтому защита на стороне без питания работает только в «каскаде», после отключения линии со стороны питания. Несмотря на отсутствие питания с противоположной стороны защита должна быть выполнена направленной как при замыканиях на землю, так и при междуфазных коротких замыканиях. Это позволяет на приемной стороне правильно определить поврежденную линию.

В общем случае для того, чтобы обеспечить селективную защиту с небольшими выдержками времени, особенно на коротких линиях, необходимо применить четырехступенчатую защиту, уставки которой выбираются следующим образом: 1 ступень отстраивается от КЗ в конце линии, 2 ступень согласовывается с первой ступенью параллельной линии в каскаде и первой ступенью смежной линии, 3 ступень согласовывается со вторыми ступенями этих ВЛ. При согласовании защит со смежной линией учитывается режим одна с двумя: на первом участке - 1 ВЛ, на втором участке – 2, что существенно загроубляет защиту. Эти три ступени защищают линию, а последняя, 4 ступень резервирует смежный участок. При согласовании защит по времени учитывается время действия УРОВ, что увеличивает выдержки времени согласуемых защит на время действия УРОВ. При выборе уставок защиты по току, они должны быть отстроены от суммарной нагрузки двух линий, так как одна из параллельных ВЛ может отключиться в любой момент, и вся нагрузка будет подключена к одной ВЛ.

В составе устройств защиты оба комплекта защит должны быть направленными. Можно применить следующие варианты защит:

- Сириус 2В фирмы Радиус,
- БЭ 2607 xxx фирмы ЭКРА,
- MiCOM, P127 и P142 фирмы ALSTOM,
- F60 и F650 фирмы GE,

- два реле REF 543 фирмы ABB – подбираются направленные модификации,
- реле 7SJ512 и 7SJ 531 фирмы SIEMENS,
- два реле SEL 351 фирмы SEL.

В ряде случаев, из соображений обеспечения чувствительности, отстройки от токов нагрузки или обеспечения селективной работы, может потребоваться применение дистанционной защиты. Для этой цели одна из защит заменяется на дистанционную. Может быть применена дистанционная защита:

- Сириус -3- ЛВ фирмы Радиус,
- БЭ2607 V11 фирмы ЭКРА,
- MiCOM P433, P439, P441 фирмы ALSTOM,
- D30 фирмы GE,
- REL 511 фирмы ABB – подбираются направленные модификации,
- реле 7SA 511 или 7SA 513 фирмы SIEMENS,
- реле SEL 311 фирмы SEL.

#### 7.4. ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

##### *Назначение и принцип действия*

Дистанционные защиты - это сложные направленные или ненаправленные защиты с относительной селективностью, выполненные с использованием минимальных реле сопротивления, реагирующих на сопротивление линии до места КЗ, которое пропорционально расстоянию, т.е. дистанции. Отсюда и происходит название дистанционной защиты (ДЗ). Дистанционные защиты реагируют на междуфазные КЗ (кроме микропроцессорных ДЗ). Для правильной работы дистанционной защиты необходимо наличие цепей тока от ТТ присоединения и цепей напряжения от ТН. При отсутствии или неисправности цепей напряжения возможна излишняя работа ДЗ при КЗ на смежных участках.

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания простые и направленные МТЗ (НТЗ) не могут обеспечить селективного отключения КЗ. Так, например, при КЗ на *W2* (рис. 7.5) НТЗ 3 должна действовать быстрее РЗ 1, а при КЗ на *W1*, наоборот, НТЗ 1 должна действовать быстрее РЗ 3. Эти противоречивые требования не могут быть выполнены с помощью НТЗ. Кроме того, МТЗ и НТЗ часто не удовлетворяют требованиям быстродействия и чувствительности. Селективное отключение КЗ в сложных кольцевых сетях может быть обеспечено с помощью дистанционной РЗ (ДЗ).

Выдержка времени ДЗ  $t_3$  зависит от расстояния (дистанции)  $t_3 = f(L_{PK})$  (рис. 7.5) между местом установки РЗ (точка Р) и точкой КЗ (К), т. е.  $L_{PK}$ , и нарастает с увеличением этого расстояния. Ближайшая к месту повреждения ДЗ имеет меньшую выдержку времени, чем более удаленные ДЗ.

Например, при КЗ в точке К1 (рис. 7.6) ДЗ2, расположенная ближе к месту повреждения, работает с меньшей выдержкой времени, чем более удаленная ДЗ1. Если же КЗ возникает и в точке К2, то время действия ДЗ2 увеличивается, и КЗ селективно отключается ближайшей к месту повреждения ДЗ3.

Основным элементом ДЗ является дистанционный измерительный орган (ДО), определяющий удаленность КЗ от места установки РЗ. В качестве ДО используются реле сопротивления (РС), реагирующие на полное, реактивное или активное сопротивление поврежденного участка ЛЭП ( $Z, X, R$ ).

Сопротивление фазы ЛЭП от места установки реле Р до места КЗ (точки К) пропорционально длине этого участка, так как величина сопротивления до места КЗ равна длине участка умноженному на удельное сопротивление линии:  $Z = L \cdot Z_{уд}$ .



Таким образом, поведение дистанционного органа, реагирующего на сопротивление линии, зависит от расстояния до места повреждения. В зависимости от вида сопротивления, на которое реагирует ДО ( $Z$ ,  $X$  или  $R$ ), ДЗ подразделяются на РЗ полного, реактивного и активного сопротивлений. Реле сопротивления, применяемые в ДЗ для определения сопротивления  $Z_{PK}$  до точки КЗ, контролируют напряжение и ток в месте установки ДЗ (рис. 7.7.).

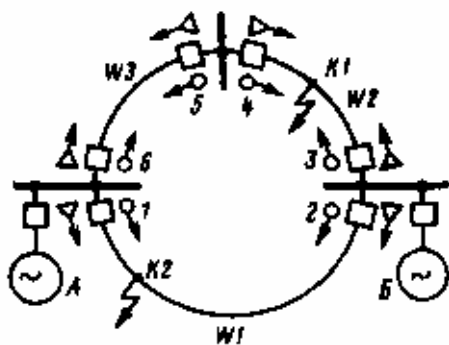


Рис. 7.5 Кольцевая сеть с двумя источниками питания

О – максимальная токовая направленная защита;  
Δ – дистанционная защита

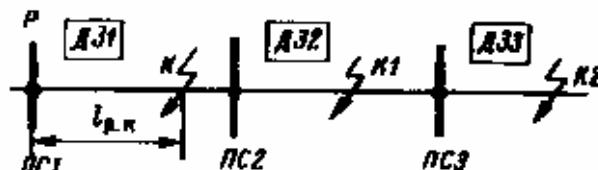


Рис.7.6 Зависимость выдержки времени дистанционной защиты от расстояния до места КЗ

К зажимам РС подводятся вторичные значения  $U_p$  и  $I_p$  от ТН и ТТ. Реле выполняется так, чтобы его поведение в общем случае зависело от отношения  $U_p$  к  $I_p$ . Это отношение является некоторым сопротивлением  $Z_p$ . При КЗ  $Z_p = Z_{PK}$ , и при определенных значениях  $Z_{PK}$ , РС срабатывает; оно реагирует на уменьшение  $Z_p$ , поскольку при КЗ  $U_p$  уменьшается, а  $I_p$  возрастает. *Наибольшее значение, при котором РС срабатывает, называется сопротивлением срабатывания реле  $Z_{cp}$ .*

$$Z_p = U_p / I_p \leq Z_{cp} \quad (7.4)$$

Для обеспечения селективности в сетях сложной конфигурации на ЛЭП с двухсторонним питанием ДЗ необходимо выполнять направленными, действующими при направлении мощности КЗ от шин в ЛЭП. Направленность действия ДЗ обеспечивается при помощи дополнительных РНМ или применением направленных РС, способных реагировать и на направление мощности КЗ.

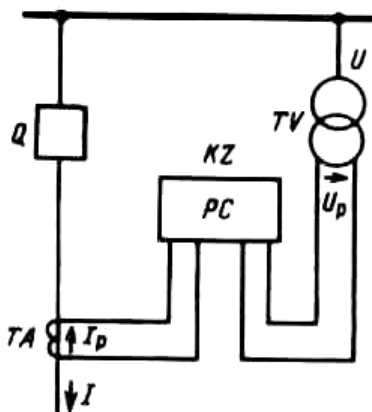


Рис. 7.7. Подключение цепей тока и напряжения реле сопротивления

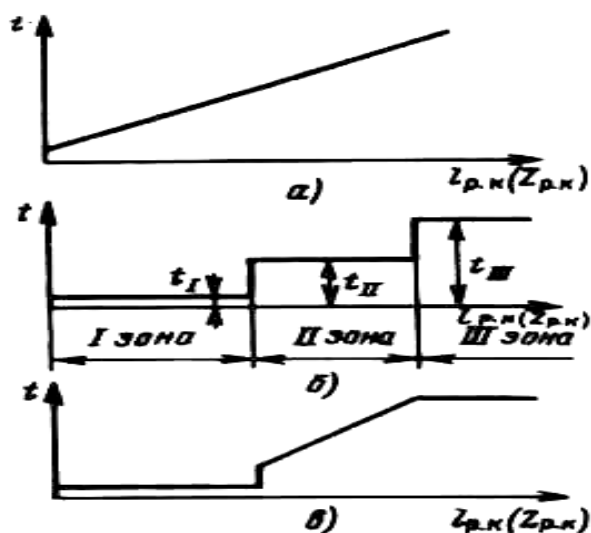


Рис. 7.8 Характеристики зависимости времени дистанционных защит  $t = f(L_{PK})$   
а – наклонная; б – ступенчатая; в – комбинированная

### Характеристики выдержки времени дистанционных защит

Зависимость времени действия ДЗ от расстояния или сопротивления до места КЗ  $t_3 = f(L_{PK})$  или  $t_3 = f(Z_{PK})$  называется характеристикой выдержки времени ДЗ. По характеру этой зависимости ДЗ делятся на три группы: с нарастающими (наклонными) характеристиками времени действия, ступенчатыми и комбинированными характеристиками (рис. 7.8). Ступенчатые ДЗ действуют быстрее, чем ДЗ с наклонной и комбинированной характеристиками и, как правило, получаются проще в конструктивном исполнении. ДЗ со ступенчатой характеристикой производства ЧЭАЗ выполнялись обычно с тремя ступенями времени, соответствующими трем зонам действия ДЗ (рис. 7.8, б). Современные микропроцессорные защиты имеют 4, 5 или 6 ступеней защиты. Реле с наклонной характеристикой разрабатывались специально для распределительных сетей (например ДЗ-10).

### Принципы выполнения селективной защиты сети с помощью устройств дистанционной защиты

На ЛЭП с двухсторонним питанием ДЗ устанавливаются с обеих сторон каждой ЛЭП и должны действовать при направлении мощности от шин в ЛЭП. Дистанционные РЗ, действующие при одном направлении мощности, необходимо согласовать между собой по времени и по зоне действия так, чтобы обеспечивалось селективное отключение КЗ. В рассматриваемой схеме (рис. 7.9.) согласуются между собой ДЗ1, ДЗ3, ДЗ5 и ДЗ6, ДЗ4, ДЗ2.

С учетом того, что первые ступени ДЗ не имеют выдержки времени ( $t_1 = 0$ ), по условию селективности они не должны действовать за пределами защищаемой ЛЭП. Исходя из этого протяженность первой ступени, не имеющей выдержки времени ( $t_1 = 0$ ), берется меньше протяженности защищаемой ЛЭП и обычно составляет 0,8–0,9 длины ЛЭП. Остальная часть защищаемой ЛЭП и шины противоположной подстанции охватываются второй ступенью ДЗ этой ЛЭП. Протяженность и выдержка времени второй ступени согласуются (обычно) с протяженностью и выдержкой первой ступени ДЗ следующего участка. Например, у второй ступени ДЗ1 зона действия отстраивается от конца первой ступени ДЗ3 (т.е.  $Z_{II(1)} < (Z_{L(1)} + Z_{I(2)})$ ), а время действия выбирается на ступень  $\Delta t$  больше  $t_{I(3)}$ :

$$t_{II(1)} = t_{I(3)} + \Delta t$$

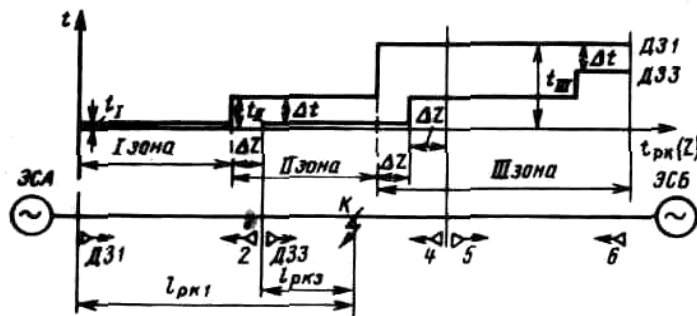


Рис.7.9 Согласование выдержек времени дистанционных РЗ со ступенчатой характеристикой:

$\Delta z$  – погрешность дистанционного реле;

$\Delta t$  – степень селективности

Последняя третья ступень ДЗ является резервной, ее протяженность выбирается из условия охвата следующего участка, на случай отказа его РЗ или выключателя. Выдержка времени принимается на  $\Delta t$  больше времени действия второй или третьей зоны ДЗ следующего участка. При этом зона действия третьей ступени должна быть отстроена от конца второй или третьей зоны следующего участка.

### Структура защиты линии с использованием дистанционной защиты

В отечественных энергосистемах ДЗ применяется для действия при междуфазных КЗ, а для действия при однофазных КЗ используется более простая ступенчатая МТЗ нулевой последовательности (НП). Большинство микропроцессорной аппаратуры имеет дистанционную защиту, действующую при всех видах повреждения, в том числе и при замыканиях на землю. Реле сопротивления (РС) включается через ТН и ТТ на первичные напряжения в начале защищаемой ЛЭП. Вторичное напряжение на зажимах РС:  $U_p = U_{pn} / K_{II}$ , а вторичный ток:  $I_p = I_{pn} / K_I$ .

Сопротивление на входных зажимах реле определяется по выражению:

$$Z_p = (K_I / K_{II}) Z_{pn} \quad (7.5)$$

где

$Z_{pn}$  – первичное значение сопротивления, подведенного к зажимам реле:

Первичное сопротивление  $Z_{сз} = Z_{ср} (K_{II} / K_I)$  называется сопротивлением срабатывания ДЗ.

Кроме измерительных органов в состав дистанционной защиты входят органы выдержки времени, а также ряд блокировок, предотвращающих неправильную работу защиты, в режимах, при которых защита может сработать при отсутствии повреждения на защищаемой ЛЭП. К таким режимам относятся качания в энергосистеме и повреждения в цепях ТН, питающих ДЗ.

Устройство блокировки при качаниях УБК блокирует неправильную работу при качаниях. При качаниях, дистанционная защита измеряет расстояние от места установки до электрического центра качаний и если этот центр качаний находится на защищаемой линии, измерительный орган защиты срабатывает (см. рис. 7.10).

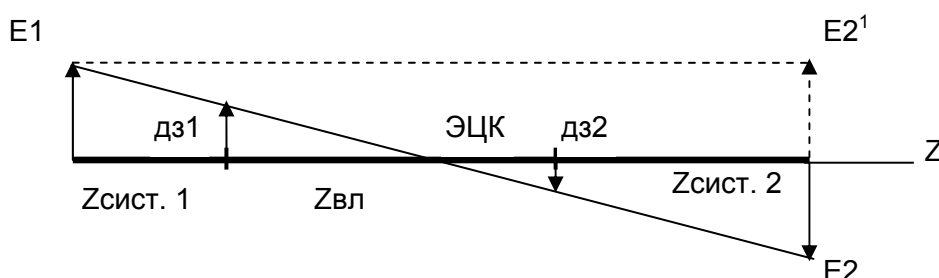


Рис. 7.10 Расположение электрического центра качаний на защищаемой линии

На диаграмме показаны напряжения вдоль линии при качаниях. В момент, показанный на рисунке ЭДС по концам связи, находятся в противофазе, а в электрическом центре, который находится примерно посередине линии, на которой в масштабе построены сопротивления системы 1, линии и системы 2, напряжение равно 0. Дистанционный орган защиты воспринимает центр качаний, как место короткого замыкания и срабатывает. Пунктиром показан момент, когда ЭДС E2 находится в фазе с E1. В этот момент напряжения во всех точках линии примерно одинаковы и ДО возвращается. Таким образом, при качаниях дистанционная защита то срабатывает, то возвращается. Если времени, пока ДО сработал, достаточно для срабатывания защиты, защита может отключить линию. Наверняка успеет сработать 1 ступень защиты и может сработать вторая, если время ее срабатывания менее 1–1,5 сек. Поэтому блокировка УБК, как правило, блокирует первую ступень, а в тех случаях, когда время действия второй ступени мало (менее 1 сек) – и вторую.

### **Распространены 2 принципа блокировки от качаний**

В электромеханических защитах прежних выпусков ЭПЗ-1636, ПЗ-5, ДЗ-501, блокируемые ступени защиты нормально выведены из работы и вводятся при появлении кратковременной несимметрии, которой сопровождается любое, даже трехфазное, короткое замыкание. Ступени вводятся на время, достаточное для срабатывания ДО (обычно на 0,3–0,4 с), после чего они из работы выводятся. При качаниях ДО срабатывают через некоторое время, после того, как разойдутся вектора напряжения по концам линии связи. К этому моменту защита из работы уже выведена.

В аналоговых защитах последних выпусков (ШДЭ-2802, ПДЭ-2003), а также в микропроцессорных защитах серии БЭ2607 и Сириус -3 ЛВ применяется блокировка по скорости изменения сопротивления. Для блокировки измеряется время между срабатываниями ДО с разными уставками. При КЗ они срабатывают одновременно, а при качаниях срабатывает сначала более чувствительное реле сопротивления, а затем, через некоторое время, более грубое. Наличие времени между срабатываниями двух ДО и является признаком качаний, при которых соответствующие ступени выводятся из работы.

### **Устройства блокировки при неисправности цепей напряжения (УБН)**

При неисправностях в цепях напряжения ТН напряжение  $U_p$ , подводимое к РС, исчезает или резко понижается. В результате этого, реле сопротивления, включенные на это напряжение, фиксируют снижение сопротивления и приходят в действие, что приводит к неправильному срабатыванию ДЗ. При неисправном состоянии цепей напряжения дистанционная защита должна немедленно выводиться из работы. При этом блокировка должна опередить срабатывание реле сопротивления. Ниже приведены два принципа блокировки при неисправности цепей напряжения, применяющихся на электромеханических и аналоговых дистанционных защитах.

Блокирующие устройства, реагирующие на появление  $U_0$  при повреждениях в цепях напряжения, приведены на рис. 7.11.

В нормальных условиях напряжение на реле отсутствует. При обрыве одной или двух фаз цепи напряжения возникает  $U_0$ , под влиянием которого в реле KV появляется ток, и оно срабатывает, давая сигнал. Подобные устройства применяются в дистанционных РЗ, имеющих токовые пусковые органы, и которые не выводятся из работы автоматически. Блокировка, выполненная на таком принципе, не отличает  $U_0$ , появляющееся при перегорании предохранителя, от появления замыкания на землю в сети. Она также не срабатывает, при отключении используемого в цепях напряжения трехфазного автомата.



смотрено токовое реле КАО, которое срабатывает и, размыкая цепь обмотки реле KV0, препятствует его действию.

### **Блокирующее устройство на сравнении напряжений двух вторичных обмоток ТН**

Недостатком рассмотренных выше устройств блокировки типа КРБ-11 является то, что при КЗ в цепях фазных напряжений ТН они не действуют, а срабатывают лишь после отключения автоматических выключателей или предохранителей поврежденных фаз. Подобные блокировки не могут предотвратить ложного срабатывания первых ступеней быстродействующих дистанционных РЗ, применяемых в сетях сверхвысоких напряжений. Другим недостатком этих блокировок является то, что они не могут предотвратить ложного срабатывания дистанционных РЗ при отключении всех трех фаз напряжения общим автоматическим выключателем или ключом.

Этих недостатков лишена блокировка, схема которой приведена на рис. 7.13.

Четырехобмоточный промежуточный трансформатор  $TL$  устройства блокировки подключен через добавочные резисторы к измерительному трансформатору напряжения  $TV$  с соединением вторичных обмоток в звезду и разомкнутый треугольник. В цепях обмотки  $w_1$  сопротивление резистора в фазе А –  $R_a$  принято в два раза меньшим относительно сопротивлений  $R_b$  и  $R_c$ , равных между собой. К обмотке  $w_2$  с выводов  $H - K$  подано напряжение  $3U_0$ . Обмотка  $w_3$  (компенсационная) находится под воздействием напряжения фазы А. Ко вторичной обмотке  $w_4$  через выпрямительный мост VS присоединен реагирующий элемент - реле KV.

В нормальном режиме, при исправных вторичных цепях  $TV$  и соответствующих значениях сопротивлений резисторов, токи в обмотках  $w_1$  и  $w_3$  направлены встречно:

$I_0 = I_a + I_b + I_c = -I_{ad}$  (рис. 7.13, в, г). МДС в сердечнике взаимно уравновешены - реле KV не работает. При обрывах в цепях  $TV$  (одной или двух фаз) равновесие МДС нарушается, что вызывает срабатывание реле KV. В случае КЗ на землю в сети реле не сработает, так как МДС обмотки  $w_1$  будет скомпенсирована МДС обмотки  $w_2$ , включенной на  $3U_0$ .

При отключении всех трех фаз напряжения со стороны обмоток ТН, соединенных в звезду, блокировка срабатывает за счет тока в обмотке  $w_3$ . Блокировка без замедления срабатывает также при всех видах КЗ в цепях напряжения, за исключением КЗ между фазами В и С.

В последнем случае блокировка подействует только после отключения автоматического выключателя. Указанная блокировка не срабатывает при снятии напряжения с ТН т.е. исчезновении напряжения одновременно в схеме звезды и треугольника. Это возможно при переводе защиты на ТН другой системы шин и погашении последней – в этом случае ток в защите не исчезнет вместе с напряжением.

Микропроцессорные защиты осуществляют одновременный контроль за цепями напряжения и тока путем логического сопоставления изменений, происходящих в этих цепях, например: в случае КЗ при посадке напряжения одновременно должен увеличиться ток.

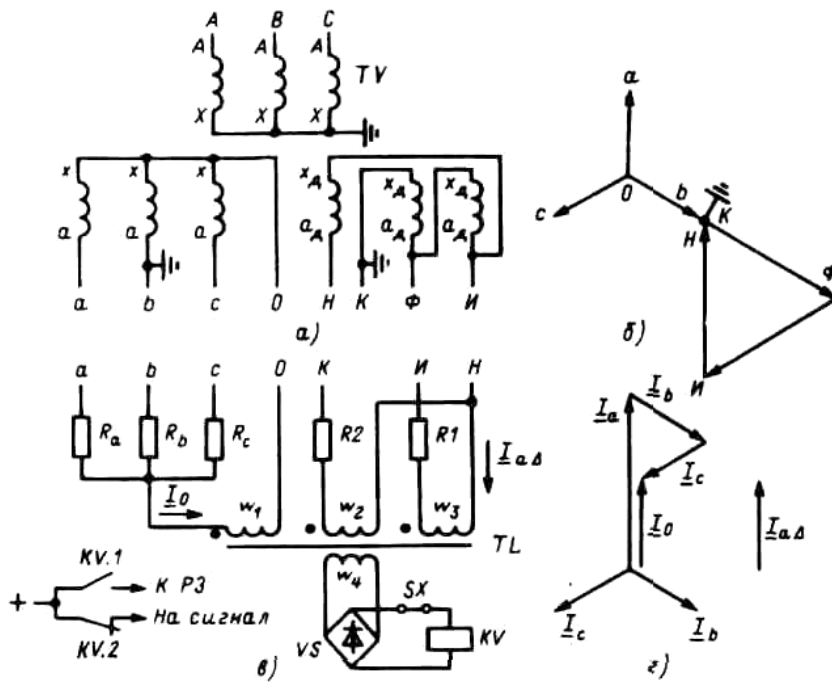


Рис. 7.13 Устройство блокировки для предотвращения ложных срабатываний дистанционных защит при нарушении цепей напряжения:

- а – схема соединения обмоток измерительного трансформатора TV;
- б – векторная диаграмма напряжений во вторичных обмотках TV;
- в – схема внутренних соединений устройства;
- г – векторная диаграмма, поясняющая работу устройства в нормальном режиме.

#### Схемы включения дистанционных органов на ток и напряжение

**Требования к схемам включения.** Измерительные ДО, выполняемые с помощью РС, должны включаться на такие напряжения и токи сети, при которых сопротивление на зажимах реле  $Z_p$ , во-первых, будет пропорционально расстоянию  $Z_{pk}$  до места повреждения и, во-вторых, будет иметь одинаковые значения (по модулю и углу) при всех видах КЗ в одной точке. Для соблюдения этих требований к ДО необходимо подводить напряжение в месте установки ДЗ, равное падению напряжения в сопротивлении  $Z_{pk}$  до точки К:  $U_p = I_K \cdot Z_{pk}$  (рис. 7.14). При этом для обеспечения одинакового  $Z_p$  при всех видах КЗ ток  $I_p$ , подводимый к РС, должен равняться току КЗ  $I_K$ , вызывающему падение напряжения в сопротивлении  $Z_{pk}$ :

$$Z_p = U_p / I_p = I_K \cdot Z_{pk} / I_K = Z_{pk}$$

С учетом сказанного ДО включаются на напряжение и ток петли КЗ. Схемы включения ДО, реагирующих на междуфазные КЗ и ДО, реагирующих на однофазные КЗ, должны быть разными.

#### Включение дистанционных органов, реагирующих на междуфазные КЗ.

Включение на междуфазные напряжения и разность фазных токов осуществляются согласно табл. 7.5. При трехфазных КЗ все три ДО находятся в одинаковых условиях, к каждому из них подводится междуфазное напряжение, равное  $\sqrt{3}U_\phi$ . Фазное напряжение равно падению напряжения в проводе от места установки РС до точки К. Отсюда напряжение  $U_p^{(3)} = \sqrt{3}I_K^{(3)}Z_{1K} = \sqrt{3}I_K^{(3)}Z_{1y} \cdot L_K$ , где  $I_K^{(3)}$  – ток трехфазного КЗ, проходящий по фазе;  $Z_{1K}$  – сопротивление прямой последовательности фазы от места установки реле до точки

К:  $L_K$  – расстояние до места КЗ;  $Z_{1y}$  – удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 км.

Таблица 7.5

Реле фаз	$U_p$	$I_p$
AB	$U_{ab}$	$I_a - I_b$
BC	$U_{bc}$	$I_b - I_c$
CA	$U_{ca}$	$I_c - I_a$

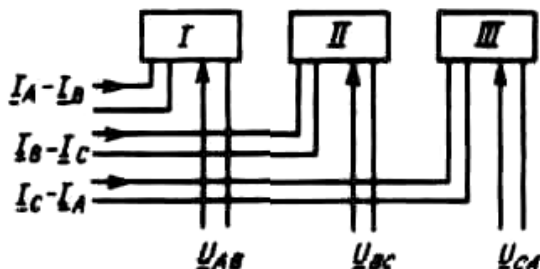


Рис. 7.14 Схема включения дистанционных органов от междуфазных КЗ

Ток в каждом реле равен геометрической разности токов двух фаз, т. е.  $I_p^{(3)} = \sqrt{3}I_K^{(3)}$  следовательно, сопротивление на зажимах каждого РС:

$$Z_p^{(3)} = U_p^{(3)} / I_p^{(3)} = \sqrt{3}U_K^{(3)} / \sqrt{3}I_K^{(3)} = Z_{1K} \quad (7.6)$$

При двухфазных КЗ, например между фазами В и С только один ДО, включенный на напряжение между поврежденными фазами В и С, получает напряжение, пропорциональное расстоянию  $L$ . Это напряжение равно падению напряжения в фазах В и С:  
 $U_p^{(2)} = U_{BC} = 2I_K Z_{1K}$ . Ток  $I_p = I_b - I_c = 2I_K$ . Отсюда находим:  
 $Z_p^{(2)} = U_p^{(2)} / I_p^{(2)} = 2I_K \cdot Z_{1K} / 2I_K = Z_{1K}$ .

Можно показать, что и при двухфазных КЗ на землю  $Z_p^{(1)} = Z_{1K}$ .

Таким образом, при всех видах междуфазных КЗ сопротивление на зажимах реле равно сопротивлению прямой последовательности фазы  $Z_{1K}$ .

### Включение дистанционных органов, реагирующих на однофазные КЗ

Дистанционные органы, предназначенные для определения удаленности мест однофазных КЗ, включаются по схеме с токовой компенсацией (рис. 7.15). Схема предусматривает три РС, каждое из которых включается согласно таблице 7.6 на напряжение  $U_\phi$  и ток  $I_\phi + k3I_0$ .

Таблица 7.6

Реле фаз	$U_p$	$I_p$
A	$U_a$	$I_a + k3I_0$
B	$U_b$	$I_b + k3I_0$
C	$U_c$	$I_c + k3I_0$



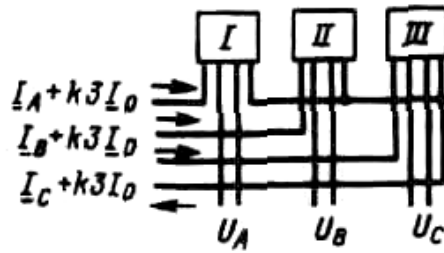


Рис. 7.15 Схемы включения дистанционных органов на ток  $I_\phi + 3I_0$

Коэффициент компенсации  $k = (Z_0 - Z_1)/3Z_1$ . 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  $Z_1$ . Следовательно, при включении по табл. 7.6 ИО реагирующего на однофазные КЗ, сопротивление  $Z$  на его зажимах получается таким же, как и у реле, реагирующих на междуфазные КЗ и включенных по табл. 7.5. В обоих случаях  $Z_p = Z_1$ .

Коэффициент компенсации задается постоянной величиной, однако его точное значение зависит от места КЗ и влияния смежных линий электропередачи.

Величина активного сопротивления задается отдельно для междуфазных и однофазных замыканий т.к. активное сопротивление в месте КЗ при однофазном замыкании существенно больше, чем при междуфазных КЗ.

Для одиночной линии без троса можно считать, что  $Z_0 = 3.5Z_1$  поэтому  $k = (3.5 - 1)/3 = 0.83$ .

Если данная линия находится в зоне влияния других линий, по которым протекает ток КЗ, то на поврежденной линии наводится напряжение, которое либо совпадает по фазе и при этом увеличивается напряжение на поврежденной линии, а значит и замер сопротивления; либо в противофазе и напряжение, а также сопротивление уменьшается. Сопротивление связи между ВЛ называется сопротивлением взаимной индукции, оно зависит от расстояния между проводами 2 ВЛ а также длиной участка на котором линии взаимодействуют. Напряжение нулевой последовательности рассчитываемой линии будет равно  $U_{0Л} = I_0 X_0 + I_{01} X_{M1} + I_{02} X_{M2} + \dots$

К напряжению нулевой последовательности собственной линии добавляется напряжение влияющих линий равное падению напряжения от тока нулевой последовательности в сопротивлении взаимной индукции между рассчитываемой и влияющей линией. При приближенном расчете необходимо учитывать направление тока в этой влияющей линии. Если ток совпадает по направлению, напряжение складывается, если нет – то вычитается. Точный расчет требует учитывать фазу тока влияющей линии по сравнению с фазой рассчитываемой, т. е. влияющее напряжение нужно складывать геометрически. Разделив полученное напряжение  $U_{0Л}$  на ток  $I_0$  рассчитываемой линии, получим  $Z_{0Э}$  – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности. Коэффициент компенсации с учетом влияния определяется по формуле:

$$k = (Z_{0Э} - Z_1)/3Z_1 \quad (7.7)$$

где

$Z_{0Э}$  – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности, с учетом влияния смежных линий, влияющих на расчет.

При нескольких влияющих линиях расчет коэффициента компенсации представляет сложную задачу. Его можно рассчитать на ЭВМ, используя упоминавшийся выше в п.1.6.1. «Комплекс программ расчета аварийных режимов в сложной электрической сети объемом до 3000 узлов V-VI-50» института Электродинамики НАН Украины или любой другой аналогичный.

Во всех случаях уставки коэффициентов компенсации рассчитываются по приведенной ниже формуле при однофазном металлическом ( $R_{nep} = 0$ ) КЗ в конце защищаемой ВЛ без учета нагрузочного режима.

$$k = (U_\phi - Z_{1\phi}) / Z_{1L} 3I_0 \quad (7.8)$$

Указанные данные берутся непосредственно из расчета на ПЭВМ.

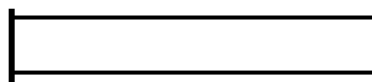
Ниже приводится пример расчета коэффициента компенсации для часто встречающегося случая – одной цепи двухцепной линии, в зависимости от состояния другой цепи.

Как видно из примера, коэффициент компенсации меняется по величине в зависимости от режима параллельной линии. В ряде защит, например: MiCOM P435, можно учесть ток параллельной линии, введя его в комплект защиты.

2 цепи включены параллельно:

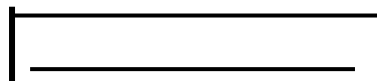
$$Z_{0Э} = Z_{0Л} + Z_M$$

$$k = (Z_{0Л} + Z_M - Z_1) / 3Z_1$$



2 цепь отключена:

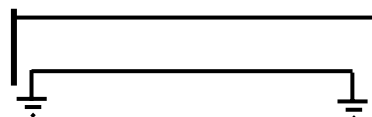
$$Z_{0Э} = Z_{0Л} \quad k = (Z_{0Л} - Z_1) / 3Z_1$$



2 цепь отключена и заземлена:

$$Z_{0Э} = Z_{0Л} - Z_M^2 / Z_{0Л}$$

$$k = (Z_{0Л} - Z_M^2 / Z_{0Л} - Z_1) / 3Z_1$$



Зависимость величины коэффициента компенсации от режима параллельной линии.

Наличие в общем коридоре нескольких линий сильно усложняет расчеты. Учитывая отсутствие в настоящее время автоматизированных программ для таких расчетов, повидимому, целесообразно частично отказаться от применения ступеней дистанционной защиты от замыканий на землю. Предлагается такой вариант:

Контур замыкания на землю вводится на 1 и 2 ступенях, в остальных ступенях он не вводится, и применяются ступени токовой защиты от замыканий на землю, которые имеются в любом устройстве дистанционной защиты, расчет уставок этих защит с учетом влияния уже освоен. Таким образом, остается выбор 1 ступени и 2, для которых определить расчетный режим значительно проще.

### **Характеристики срабатывания дистанционной защиты и их изображение на комплексной плоскости**

Сопротивление является комплексной величиной, поэтому характеристики срабатывания РС  $Z_{cp}(z_p, \varphi_p)$  и сопротивления на их зажимах  $Z_p$  удобно изображать на комплексной плоскости в осях  $R, jX$  (рис. 7.17). В этом случае по оси вещественных величин откладываются активные сопротивления  $R$ , а по оси мнимых величин – реактивные сопротивления  $X$ . Полное сопротивление на зажимах реле  $Z_p = U_p / I_p$  может быть выражено через активные и реактивные составляющие в виде комплексного числа  $Z_p = R_p + jX_p = Z_p e^{-j\varphi_p}$  и изображено в осях  $R, jX$  вектором с координатами  $R_p$  и  $jX_p$  (рис. 7.17, а). Величина этого вектора характеризуется модулем  $|Z_p| = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}$ , а его направление – углом  $\varphi_p$ , который определяется соотношением  $X_p$  и  $R_p$ , поскольку  $\operatorname{tg} \varphi_p = X_p / R_p$ . На рис. 7.17, б видно, что угол  $\varphi_p$  равен углу сдвига фаз между векторами тока  $I$  и напряжения  $U$ , следовательно, можно считать, что на комплексной плоскости

вектор  $I_p$  совпадает с осью положительных сопротивлений  $R$ , а напряжение  $U_p$  – с вектором  $Z_p$ .

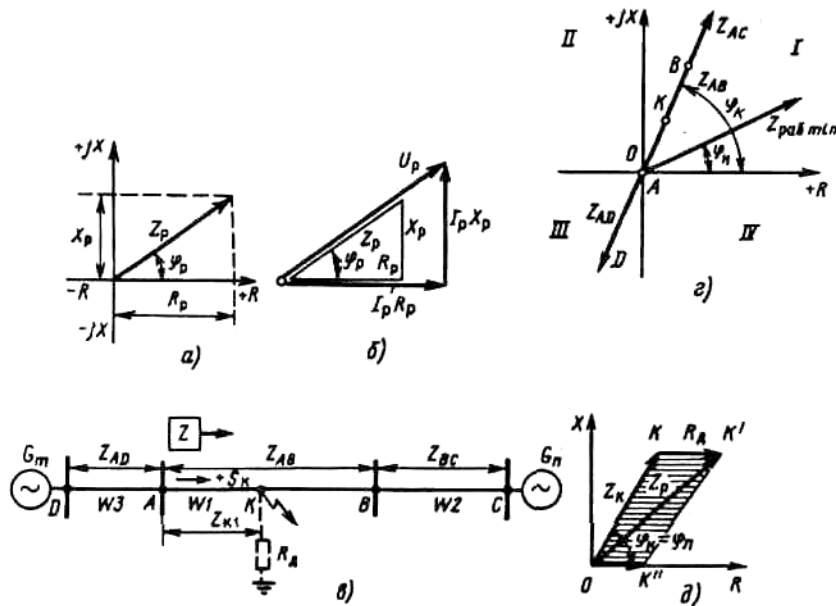


Рис. 7.17 Построение характеристик реле сопротивления на комплексной плоскости  $R, JX$ :

- а – изображение вектора  $Z_p$ ;
- б – треугольник сопротивлений;
- в, г – участок сети и его изображение в осях  $R, JX$ ;
- д – область сопротивлений  $Z_p$  при КЗ через сопротивление электрической дуги  $R_0$

Любой участок сети, например  $WI$  (рис. 7.17, в) можно представить в осях  $R, JX$  вектором  $Z_{AB} = Z_{w1}$ , имея в виду, что каждая точка ЛЭП характеризуется определенными сопротивлениями  $R_{w1}$  и  $X_{w1}$ .

Если сопротивление всех участков сети имеет один и тот же угол  $\varphi_L = \arctg X_L / R_L$ , то их геометрическое место на комплексной плоскости изображается в виде прямой, смещенной относительно оси  $R$  на угол  $\varphi_L$  (рис. 7.17, г). Начало защищаемой ЛЭП, где установлена рассматриваемая ДЗ А, совмещается с началом координат (рис. 7.17, в, г). Координаты всех участков сети, попадающих в зону ДЗ А, считаются положительными и располагаются в I квадранте комплексной плоскости (рис. 7.17, г). Координаты участков сети, расположенные на рис. 7.17, в слева от точки А, считаются отрицательными и располагаются в III квадранте. Сопротивление линии  $W_1$  показано на диаграмме отрезком АВ,  $W_2$  – отрезком ВС и  $W_3$  – отрезком АО. Сопротивление  $Z_K$  от места установки ДЗ до точки К изображено отрезком АК под углом  $\varphi_K = \varphi_L$  к оси  $R$  (рис. 7.17, в, г). Если КЗ произошло через электрическую дугу, имеющую активное сопротивление  $R_0$ , то сопротивление до места КЗ будет изображаться вектором  $AK'$  равным геометрической сумме векторов  $Z_K$  и  $R_0$  (рис. 7.17, д):

$$AK' = Z_K + R_0$$

Исследования показали, что значение  $R$  пропорционально длине дуги  $L_0$ , м, и тем меньше, чем больше ток КЗ:

$$R_0 = KL_0 / I_0$$

где  $K$  – постоянная величина, равная 1200–1500.

**Графическое изображение характеристик срабатывания реле**

Характеристики срабатывания РС выпуска ЧЭАЗ, изображенные на рис. 7.18, представляют собой геометрическое место точек, удовлетворяющих условию  $Z_p = Z_{cp}$ . Заштрихованная часть характеристики, где  $Z_p < Z_{cp}$ , соответствует области действия реле. При  $Z_p$ , выходящих за пределы заштрихованной части, т. е. при  $Z_p > Z_{cp}$ , реле не работает.

Характеристика срабатывания реле должна обеспечивать работу реле при КЗ в пределах принятой зоны действия ( $Z'$ ). С учетом сопротивления электрической дуги вектор  $Z_p = Z_K + R_d$  может располагаться при КЗ на защищаемом участке ЛЭП в пределах площади четырехугольника  $ОКК'K''$  показанного на рис. 7.18, д. Действие реле при КЗ будет обеспечено, если характеристики срабатывания реле, показанные на рис. 7.18, будут охватывать область комплексной плоскости, в которой может находиться вектор сопротивления  $Z_p$  при КЗ на ЛЭП (площадь  $ОКК'K''$  на рис. 7.18, д). Однако область срабатывания РС имеет ограничения: реле не должно действовать при сопротивлении нагрузки (при  $Z_{p\text{набmin}}$ ) и при качаниях. Для этого векторы  $Z_{p\text{набmin}}$  и  $Z_{\text{кач}}$  должны располагаться за пределами области срабатывания реле, т. е. должно соблюдаться условие  $Z_{cp} < Z_{p\text{набmin}}$  и по возможности  $Z_{cp} < Z_{\text{кач}}$ .

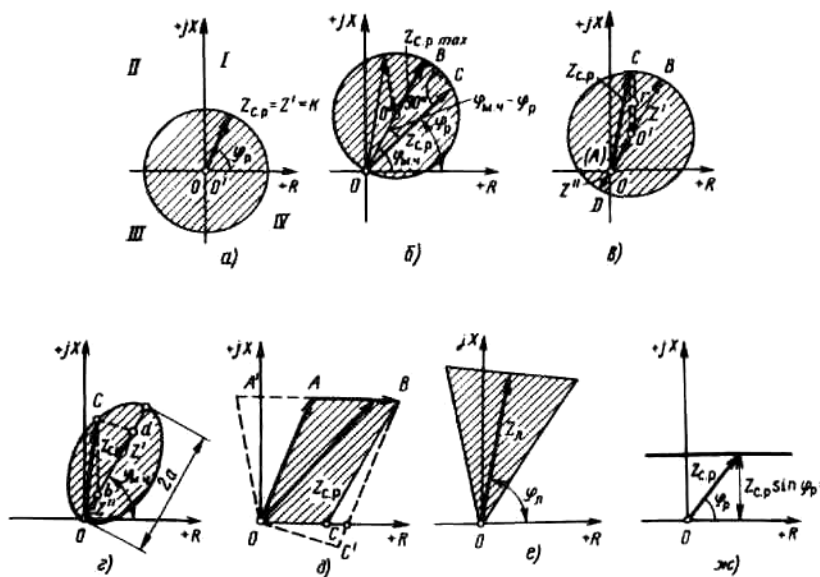


Рис. 7.18 Характеристики срабатывания реле сопротивления

**Ненаправленное реле полного сопротивления** (рис. 7.18, а). Характеристика этого реле имеет вид окружности с центром в начале координат и радиусом, равным  $K$ . Реле работает при  $Z_p \leq K$  при любых углах  $\varphi_p$  между вектором  $Z_p$  и осью  $R$ . Характеристика срабатывания РС выражается уравнением

$$Z_{cp} = K \quad \text{где } K - \text{постоянная величина.}$$

Зона действия реле расположена в четырех квадрантах, в том числе в I и III. Реле с характеристикой, изображенной на рис. 7.17, а, работает как ненаправленное РС.

**Направленное реле полного сопротивления** имеет  $Z_{cp}$ , зависящее от угла  $\varphi_p$  (рис. 7.18, б). Его характеристика срабатывания изображается окружностью, проходящей через начало координат. Сопротивление срабатывания имеет максимальное значение при  $\varphi_p = \varphi_{mc}$ , где  $\varphi_{mc}$  - угол максимальной чувствительности реле, при котором  $Z_{cp} = Z_{cp\text{max}}$ , т. е. равен диаметру окружности  $ОВ$ .

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

$$Z_{cp} = Z_{cp\text{max}} \cdot \cos(\varphi_{mc} - \varphi_p)$$

Реле не работает при  $Z_p$ , расположенных в III квадранте. Это означает, что оно не может действовать, если мощность направлена к шинам подстанции. Следовательно, рассмот-

ренное реле является направленным. Направленное РС имеет "мертвую зону" при повреждениях в начале защищаемой ЛЭП.

*Реле с круговой характеристикой, смещенной относительно начала координат.* На рис. 7.18, в показана характеристика, смещенная в III квадрант на расстояние  $Z''$ . Такое реле рассчитано на работу при КЗ на защищаемой линии  $W_1$  (рис. 7.17, в) и включает в зону своего действия питающие эту ЛЭП шины и часть длины (пропорциональную  $Z''$ ) других отходящих от шин ЛЭП (на рис. 7.17, в это шины А и часть ЛЭП  $W_3$ ). Уравнение смещенной характеристики в векторной форме имеет вид

$$(Z' - Z'')/2 = Z_{cp} - (Z' - Z'')/2 = 0$$

Для дистанционных органов второй и третьей ступеней находят применение реле с характеристикой, смещенной в сторону I квадранта. Такая характеристика позволяет увеличить зону действия и улучшить отстройку от нагрузки.

*Реле с эллиптической характеристикой.* На рис. 7.18, г изображена характеристика направленного реле, имеющая вид эллипса. Сопротивление срабатывания такого реле  $Z_{cp}$  зависит от угла  $\varphi_p$  и имеет наибольшее значение при  $\varphi_p = \varphi_{мч}$ . Угол  $\varphi_{мч}$ , как и в предыдущем случае, равен  $\varphi_d$ . Сопротивление  $Z_{cp\max}$  равно большой оси эллипса  $2a$ . Как известно, эллипс является геометрическим местом точек, сумма расстояний которых до фокусов  $b$  и  $d$  постоянна и равна большой оси  $2a$ . На основании этого, обозначая координаты фокусов  $b$  и  $d$ ,  $Z'$  и  $Z''$ , а координаты любой точки  $C$  эллипса  $Z_{cp}$ , получаем уравнение эллиптической характеристики

$$|Z_{cp} - Z'| + |Z_{cp} - Z''| = 2a$$

По сравнению с круговой характеристикой эллиптическая характеристика имеет меньшую рабочую область. Это дает возможность лучше отстроить реле от качаний и перегрузок, но ухудшает чувствительность при КЗ через переходное сопротивление  $R_{пер}$ .

*Реле с характеристикой в виде многоугольника.* Подобная характеристика направленных РС, имеющая форму четырехугольника, показана на рис. 7.18, д. Сопоставляя эту характеристику с площадью  $OKK'K''$  на рис. 7.18, д. можно установить, что четырехугольная характеристика реле в большей мере, чем другие характеристики, совпадает с контуром области расположения векторов  $Z_p$  при КЗ и является с этой точки зрения наиболее рациональной.

Пунктиром показан вариант характеристики  $OA'$  и  $BC'$ , предусматривающий расширение зоны реле для обеспечения его действия при двустороннем питании КЗ через переходное сопротивление.

На рис. 7.18, е показана характеристика, имеющая форму треугольника, применяемая для третьей зоны ДЗ. Она позволяет отстроиться от  $Z_p$  при больших значениях тока нагрузки  $I_{раб\max}$ , чему соответствует минимальное значение  $Z_{раб\min} = 0,9U_{ном} / I_{раб\max}$ , и допускает срабатывание РС при значительном переходном сопротивлении  $R_{пер}$  в случае удаленных КЗ.

*Реле реактивного сопротивления* срабатывает при  $X_{cp} = -Z_{cp} \cdot \sin \varphi_p$ ,  $X_{cp} = K$ , где  $K$  – постоянная величина. Характеристика таких РС изображается прямой линией, параллельной оси  $X$  (рис. 7.18, ж), отстоящей от нее на расстоянии  $X_{cp} = K$ .

### **Характеристики микропроцессорных дистанционных защит**

Микропроцессорная дистанционная защита работает при всех видах повреждения, измеряя при междуфазных коротких замыканиях разность фазных токов и линейное напряжение. При однофазном коротком замыкании реле измеряет фазный ток и фазное напряжение. Сопротивление при однофазном замыкании значительно больше, чем при междуфазном  $X_0 = 3,5X_1$ . Кроме этого, в проводе, в котором возникло короткое замыкание, наводится напряжение от тока, протекающего в других линиях, находящихся в зоне влияния. В защите все это учитывается коэффициентом компенсации. При однофазном замыкании



$\alpha_n$  – угол характеристики (угол максимальной чувствительности;

$\sigma_n$  – угол, показанный на рисунке.

Активные сопротивления для петель «фаза – фаза» ( $R_n$ , PP) и «фаза – земля» ( $R_n$ , PG) задаются отдельно для каждой зоны. Ширина характеристики самой чувствительной ступени ( $R_n$ ) определяется условиями отстройки от активной нагрузки линии.

Выбирается направленность защиты.

Расчет уставок для случая КЗ на землю производится с применением коэффициента  $K_g$ , который учитывает большую величину сопротивления дуги и переходного сопротивления при замыканиях на землю

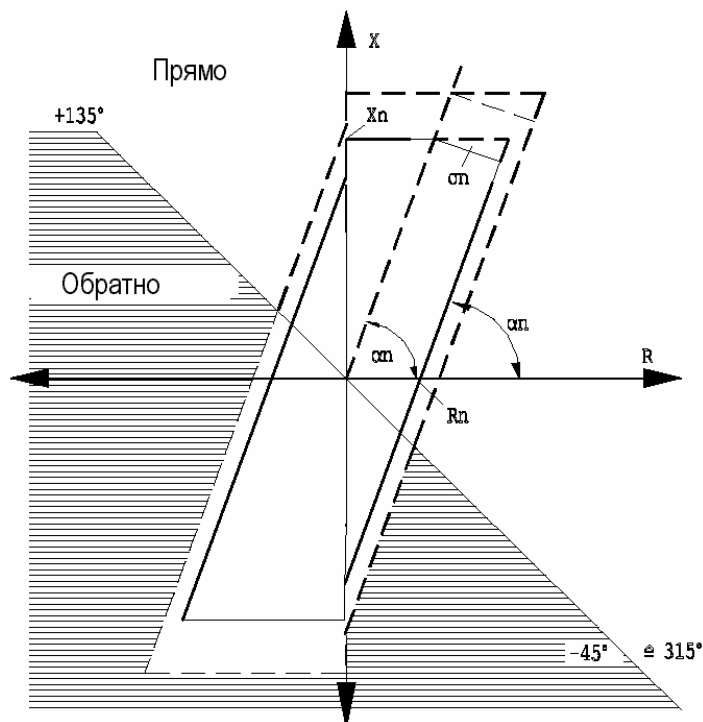


Рис. 7.20 Пример прямоугольной характеристики для PD 532, MiCOM серии P430

Пример:  $X_n = 6,5 \, \Omega$ ;  $R_n = 2,0 \, \Omega$ ;  $\alpha_n = 70^\circ$ ;  $\sigma_n = -20^\circ$ ;  $n = 1 \div 4$

Зона расширения:  $k_{ze}=1,2$  (расширение 1-ой зоны)

В отличие от реле серии MiCOM P440 и реле PD 532, MiCOM серии P430 имеют отдельный пусковой орган. Он может быть выполнен по току и напряжению, или по сопротивлению, в последнем случае имеется возможность улучшить отстройку защиты от нагрузки за счет выреза характеристики защиты в зоне нагрузки (рис. 7.21).

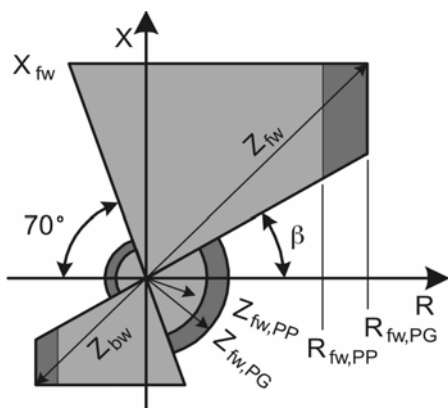


Рис.7.21 Характеристика пускового органа сопротивления защиты серии MiCOM P433 – P439

**Устанавливаемые параметры:**

Реактивное сопротивление  $X_{fw}$   $fw$  = в сторону линии  
 Активное сопротивление  $R_{fw,PP}$  и  $R_{fw,PG}$   $bw$  = в сторону шин  
 Полное сопротивление  $Z_{fw,PP}$  и  $Z_{fw,PG}$   $PP$  = контур фаза-фаза  
 Угол нагрузки  $\beta$   $PG$  = контур фаза-земля  
 Коэффициент границы зоны  $Z_{bw}/Z_{fw}$   $fw$  = в сторону линии  
 Базисный ток линии  $I>$

### Характеристики дистанционной защиты MiCOM P 440

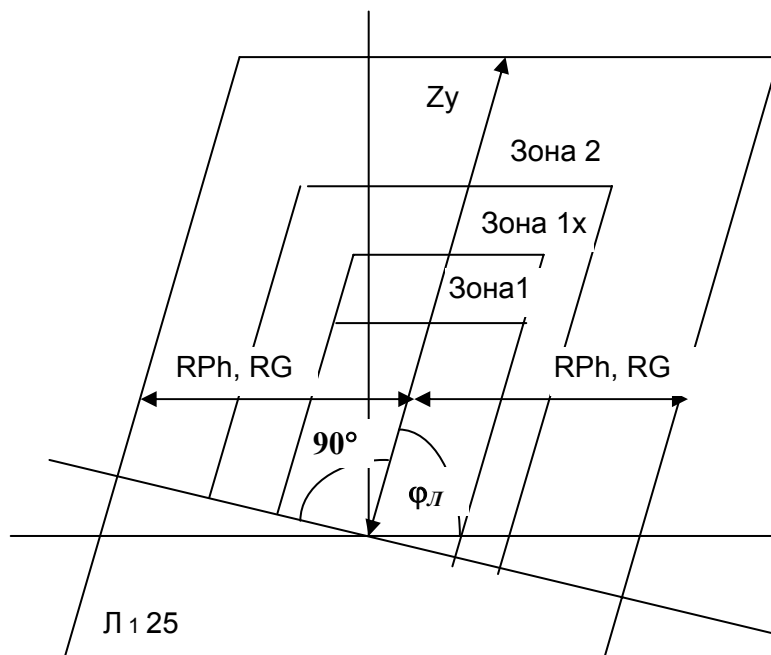


Рис. 7.22 Характеристики дистанционной защиты серии MiCOM P440

Кроме изображенных на рисунке зон, имеется еще одна 5, программируемая зона "Р", которая может быть направлена либо вперед либо назад.

Для каждой ступени защиты должны быть заданы: угол линии –  $\phi_L$ , полное сопротивление срабатывания –  $Z$ , активное сопротивление при междуфазных КЗ –  $R_{Ph}$ , активное сопротивление при замыканиях на землю –  $R_G$ , коэффициент компенсации при замыканиях на землю КЗ – величина и фаза.

### УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ДЛЯ ВЛ 110-220 кВ

#### Устройства защиты фирмы ALSTOM

Дистанционная защита MiCOM P433 - P439 имеет 6 ступеней. Устройство имеет также четырехступенчатую защиту от замыканий на землю и четырехступенчатую токовую защиту обратной последовательности. Они могут быть выполнены направленными. MiCOM P433, P439, может быть использована схема ускорения защиты по ВЧ каналу. Среди возможных способов ускорения по ВЧ каналу, имеется способ ускорения для режима слабого питания (тупиковый режим).

Устройство MiCOM P439 имеет жидкокристаллический графический дисплей, на котором может быть изображена мнемосхема ячейки с разъединителями и заземляющими ножами, и может управлять до 6 аппаратами. Поэтому, область применения такой защиты - ячейки с дистанционным управлением разъединителями и заземляющими ножем, например КРУЭ.



Защита MiCOM P441 работает при междуфазных коротких замыканиях и при замыканиях на землю и имеет 5 ступеней. Устройство имеет также трехступенчатую защиту от замыканий на землю и четырехступенчатую максимальную токовую защиту от междуфазных коротких замыканий. Она может быть выполнена направленной и применена, в каких то режимах, взамен дистанционной защиты. Может быть также использована схема ускорения защиты по ВЧ каналу. Среди возможных способов ускорения по ВЧ каналу, имеется способ ускорения для режима слабого питания.

В серии MiCOM имеется набор дифференциальных защит линии MiCOM P540. Может быть применено устройство MiCOM P541, если не нужно АПВ, или если выполнить АПВ на резервной дистанционной защите, MiCOM P542 имеет четырехкратное АПВ. Перечисленные защиты могут работать по проводному или оптоволоконному каналу. Имеется также дифференциально-фазная защита MiCOM P547 которая работает по ВЧ каналу, принцип ее действия похож на широко применяемые в СНГ защиты ДФЗ-201 и они работают со стандартными ВЧ приемопередатчиками ПВЗ. Все эти устройства могут быть применены в качестве основной защиты, а в качестве резервной применяются вышеупомянутые дистанционные защиты P433- P439, P441.

Как и ранее, на воздушных линиях должно быть предусмотрено АПВ. В данном случае, АПВ обычно выполняется однократным, чтобы не увеличивать объем повреждения на линии, так как даже при однократном включении линия включается от АПВ два раза (с двух сторон).

Для того чтобы обеспечить селективную защиту с небольшими выдержками времени, особенно на коротких линиях, необходимо применить четырехступенчатую защиту, уставки которой выбираются следующим образом: 1 ступень отстраивается от КЗ в конце линии, 2 ступень согласовывается с первой ступенью параллельной линии в каскаде и первой ступенью смежной линии. 3 ступень согласовывается со вторыми ступенями этих ВЛ. При согласовании защит со смежной линией, учитывается режим одна с двумя: на первом участке – 1 ВЛ на втором участке – 2, что существенно загрубляет защиту. Эти три ступени защищают линию, а 4 ступень резервирует смежный участок. Имеющуюся пятая ступень направлена к шинам и может обеспечить защиту шин, или резервирование смежных участков линии. При согласовании защит по времени учитывается время действия УРОВ, что увеличивает выдержки времени согласуемых защит на время действия УРОВ. При выборе уставок защиты они должны быть отстроены от суммарной нагрузки двух линий, так как одна из параллельных ВЛ может отключиться в любой момент, и вся нагрузка будет подключена к одной ВЛ. Кроме этого, возможен наброс нагрузки на линию при размыкании транзита в удаленной точке, или отключении генерации.

Устройство дистанционной защиты MiCOM P433-P435 работает при междуфазных коротких замыканиях и при замыканиях на землю и имеет 6 ступеней. В состав защиты входят четырехступенчатые защиты от замыканий на землю и междуфазных коротких замыканий.

На воздушных линиях должно быть предусмотрено АПВ. В данном случае, АПВ обычно выполняется однократным, чтобы не увеличивать объем повреждения на линии, так как даже при однократном включении линия включается от АПВ два раза (с двух сторон). Устройство АПВ может быть выполнено с контролем синхронизма с какой то стороны, для чего на линии должен быть установлен ТН.

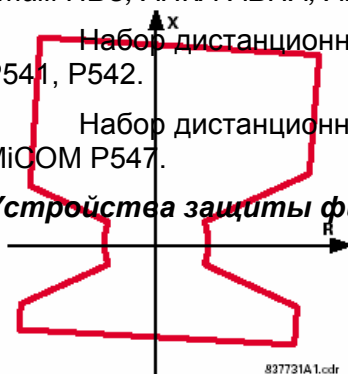
Рекомендуется применять следующие устройства защиты:

1. Набор из двух дистанционных защит MiCOM P441, или P435 с ВЧ каналом.

*Примечание:* аппаратура для передачи сигнала отключения по ВЧ или другому каналу может быть использована любой фирмы, в том числе и выпускаемые на Украине ВЧ постам ПВЗ, АНКА-АВПА, АКПА.

2. Набор дистанционной защиты MiCOM P435, P441 и продольной дифзащиты MiCOM P541, P542.
3. Набор дистанционной защиты MiCOM P435, P441 и продольной диффазной защиты MiCOM P547.

**Устройства защиты фирмы GE**



вырез в характеристике.

Предлагаются 2 дистанционных защиты: более простая D30 и D60. Защита D30 имеет 3 ступени а D60 - 4 ступени дистанционной защиты от междуфазных замыканий и замыканий на землю.

Обе защиты имеют дополнительно 4 ступени направленной токовой защиты по фазному току, току обратной и нулевой последовательности. Имеется блокировка при качаниях и АПВ. Защита может иметь круговую, эллиптическую или прямоугольную характеристику. Четырехугольная характеристика может иметь вырез при углах нагрузки (см. рис.7.23) , что позволяет ей отстроится от тока нагрузки и иметь высокую чувствительность к коротким замыканиям. Защита может ускоряться с использованием стандартной ВЧ аппаратуры, например: ПВЗ или АКПА.

В качестве основной защиты для транзитных линий предлагается продольная дифференциальная защита линии L90 и дифференциально - фазная защита L60. Обе защиты могут работать по проводному и оптоволоконному каналу. Защита L60 может работать по высокочастотному каналу, с использованием стандартных для СНГ высокочастотных приемопередатчиков, например: ПВЗ.

### **Устройства фирмы ABB**

Для линий 110-220В предлагаются устройства защиты типа REL 500. Аппаратура ABB отличается значительным объемом функций, которые в принципе не уместятся в устройстве. Поэтому необходимые функции определяются при заказе. Предоставляется широкие возможности по разработке логики защиты (ранжированию). REL 521 является более совершенной модификацией защиты REL 511 с примерно одинаковым набором функций, но расширенными возможностями.

Защиты включают:

Дистанционную защиту от всех видов замыканий с общим критерием повреждения и пятью независимыми ступенями для отключения многофазных замыканий и замыканий на землю. Защиты имеют четырехугольную характеристику с вырезом в зоне наибольших нагрузок.

Четырехступенчатую токовую направленную защиту нулевой последовательности для отключения замыканий на землю,

Библиотеку дополнительных базовых функций защиты, автоматики, блокировок и конфигурируемых логических схем

Наличие функции определения места повреждения

Набор функций управления.

Возможность заказа дополнительных функций, (в том числе функций АПВ и контроля синхронизма для схем с двумя выключателями, УРОВ)

Возможность ускорения защиты по проводному, оптоволоконному или высокочастотному каналу.

### **Защиты фирмы SIEMENS**

Дистанционные защиты 7SA511, 513 имеют 5 ступеней дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю с прямоугольными характеристиками срабатывания см. рис.7.24. Устройство 7SA513 реализует различные дополнительные функции, обычно требуемые для выполнения защиты и автоматики присоединения (ступенчатая токовая защита от междуфазных КЗ и замыканий на землю, АПВ, ОМП, защита от перенапряжения и т. д.), функцию определения места повреждения на линии электропередачи. Имеется:

- компенсация токов параллельной линии при выполнении дистанционных измерительных органов и определении расстояния до места повреждения, логика приема/передачи теле-сигналов по каналу связи (нормально-присутствующих / отсутствующих, блокирующих / разрешающих);
- блокировка от качаний и/или отключение электропередачи при потере устойчивости (два органа полного сопротивления: “чувствительный” и “грубый” для идентификации качаний, измерение и контроль скорости изменения сопротивления);
- защита от повышения /понижения напряжения;
- однофазное и/или трехфазное автоматическое повторное включение (АПВ), одно- или многократное, свободно программируемое. Контроль синхронизма при АПВ и включении линии под нагрузку;
- защита от повреждения выключателя (УРОВ);

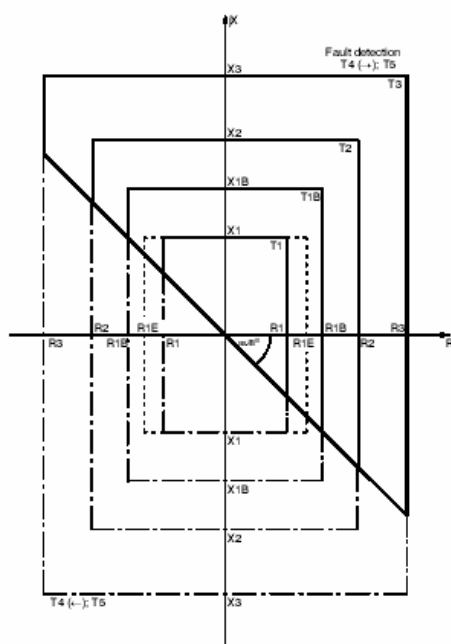


Рис. 7.24. Прямоугольная характеристика дистанционной защиты 7SA511

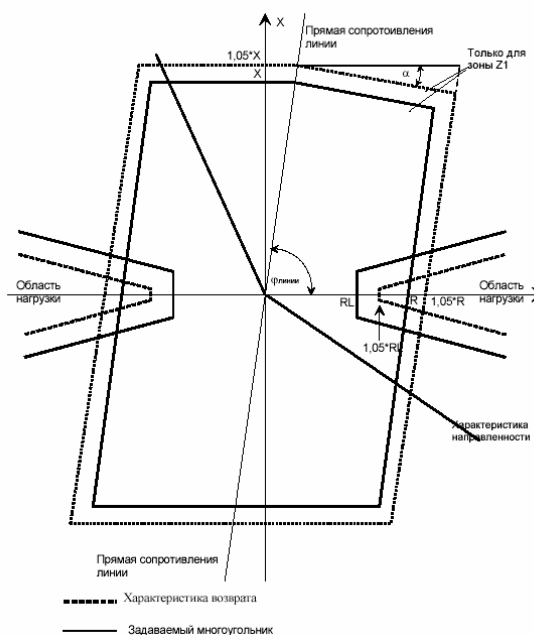


Рис. 7.25. Многоугольная характеристика дистанционной защиты 7SA522

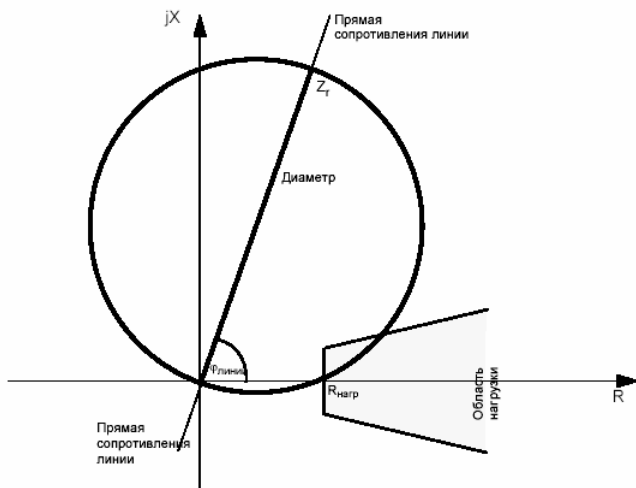


Рис. 7.26. Круговая характеристика дистанционной защиты 7SA522

Дистанционная защита 7SA522 имеет по заказу либо многоугольные (рис. 7.25) либо круговые (рис. 7.26) характеристики. Имеется вырез характеристики в зоне максимальных нагрузок.

Используются

- шестисистемные дистанционные измерительные органы;

- 6 дистанционных ступеней, направленных “вперед” или “назад”, одна из ступеней используется в качестве управляемой ступени;
- 9 ступеней выдержки времени для дистанционных ступеней;
- обнаружение качаний с помощью контроля скорости изменения ( $dZ/dt$ ) и анализа годографа сопротивления;
- максимальная токовая направленная ступенчатая защита от замыканий на землю имеет 3 независимые ступени и одну зависимую.
- автоматическое повторное многократное включение (АПВ) после однофазного отключения (ОАПВ), трехфазного отключения (ТАПВ), одно-трехфазного отключения (ОАПВ/ТАПВ);

Семейство дистанционных защит серии 7SA600 отличается друг от друга количеством входов выходов и соответственно размерами: последняя цифра 0 размер 1/3: 1 - размер 1/2, 2 – 1/1 – полный размер 19". Вторая цифра определяет тип дисплея: 1 - четырехстрочный буквенно-цифровой, 2 – графический, 3 - графический и возможность местного управления разъединителями и заземляющими ножами. Электрические характеристики всех устройств одинаковые. Наиболее существенными отличиями этой защиты от предыдущих, является широкие возможности программирования логики защиты, управления несколькими аппаратами в ячейке, программирование графической схемы присоединения. Электрические характеристики всех устройств одинаковые:

- 6 зон дистанционной защиты, одна из них является управляемой, полигональные характеристики защиты показаны на рис.7.27;

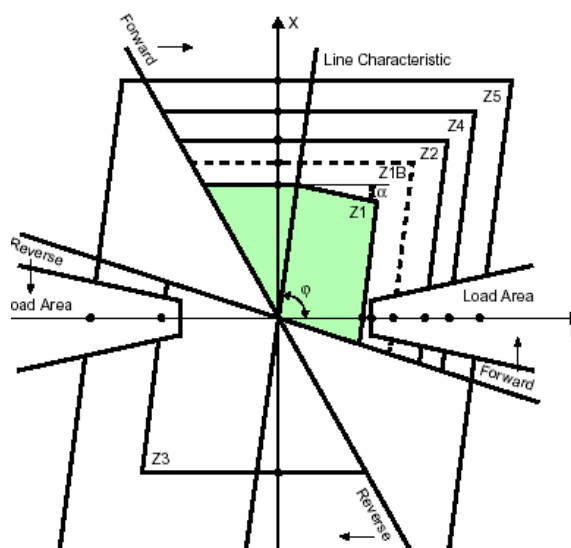


Рис. 7.27. Полигональная характеристика дистанционной защиты 7SA6\_ \_

- блокировка от качаний путем измерения скорости изменения вектора полного сопротивления и анализа годографа;
- резервная максимальная токовая защита: 2 ступени с независимой временной характеристикой / 1 ступень с инверсной временной характеристикой от междуфазных КЗ и замыканий на землю;
- максимальная токовая защита с независимой и зависимой временной характеристикой;
- токовая отсечка при включении на повреждение;
- защита от повышения напряжения 2 ступени;
- защита от понижения напряжения 2 ступени;
- защита при отказе выключателя УРОВ:
- автоматическое повторное многократное включение (АПВ) после однофазного отключения (ОАПВ), трехфазного отключения (ТАПВ), одно-трехфазного отключения (ОАПВ/ТАПВ);

### **Дистанционные защиты фирмы SEL**

Фирма SEL предлагает 3 модификации дистанционной защиты разной степени сложности:

SEL 311A имеет 2 ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ и замыканий на землю с круговыми характеристиками направленными вперед;

SEL 311B имеет еще одну реверсивную ступень дистанционной защиты;

SEL 311C имеет 2 ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ и замыканий на землю с четырехугольными и круговыми характеристиками направленными вперед 2 реверсивных ступени с такими же характеристиками.

Защиты имеют также дополнительные ступени токовой направленной защиты от междуфазных КЗ и замыканий на землю – соответственно по 1, 3 и 4.

Защиты модификации В и С имеют четырехкратное АПВ.

### **Ускорение защиты по ВЧ каналу**

Уставка 1 зоны обычно устанавливается ниже 100 % длины линии, чтобы избежать срабатывания на ВЛ, отходящих от смежных подстанций. Защитное телеускорение расширяет область влияния защиты до 100%, посредством сигнала, переданного с другой подстанции (другого конца линии).

Защитное отключение может работать, используя одну из следующих схем:

- Прямая передача команды отключения (прямое отдаленное отключение).
- Разрешение срабатывания ступени с выдержкой времени со стороны, где не сработала 1 ступень
- Расширение 1 зоны на всю длину линии.

Имеется значительное количество разновидностей этих принципов.

С помощью указанных способов можно обеспечить отключение коротких замыканий на всем протяжении линии без выдержки времени.

Имеется 2 главных принципа взаимодействия защит между собой: разрешающий и блокирующий. Для срабатывания защиты с разрешающим импульсом требуется приход команды по каналу с противоположной стороны. Пример: ускорение защиты по ВЧ каналу на аппаратуре АКПА. При применении такого принципа с ВЧ каналом по защищаемой линии следует учитывать, что разрешающий сигнал может проходить через место короткого замыкания, вносящее большое затухание сигнала. Поэтому должен иметься большой запас по затуханию ВЧ сигнала (для аппаратуры АКПА – 23-28 дБ). Должно быть 2 канала для передачи сигнала с каждого конца на противоположный. Аналог такой защиты: широко применяемое в СНГ в качестве второй быстродействующей защиты телеускорение резервных защиты на аппаратуре АНКА, АКПА. Защита, работающая на блокирующем принципе, срабатывает, если отсутствует блокирующий сигнал. Блокирующий сигнал создает полуконтакт, для которого короткое замыкание является внешним (используется направленный к шинам пусковой орган). При отсутствии такого сигнала на каждом конце, защита срабатывает, если срабатывает пусковой орган, направленный в линию. ВЧ сигнал передается только при внешнем КЗ, а значит он не передается через место повреждения. Поэтому запас по затуханию канала может быть меньшим (12-18 дБ). Все передатчики и приемники подсоединяются к одному каналу. Аналог такой защиты в СНГ – защита с ВЧ блокировкой, например: ПДЭ-2802.

Такие возможности предоставляет дистанционная защита любой из перечисленных фирм, совместно с которой можно применить кроме проводного (оптоволоконного) канала ВЧ аппаратуру, применяемую в СНГ: ВЧ посты ПВЗ и аппаратуру АКПА.

## **7.5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ**

### **Общие сведения**

Для обеспечения быстродействующей защиты по всей длине линии широко применяются дифференциальные защиты. Как уже говорилось, зона действия дифзащиты расположена между трансформаторами тока, входящими в схему дифзащиты. Обычный принцип: соединение трансформаторов тока проводами с включением одного реле на сумму токов не годится так как длина линии, а следовательно и расстояние между трансформаторами тока очень большое. Поэтому применение проводов рассчитанных на полный вторичный ток КЗ не годится как по соображениям высокой стоимости, так и большого сопротивления проводов, приводящего к большой погрешности трансформаторов тока. Если используется одно реле дифзащиты, то необходимо организовать отключение противоположного конца, а это опять длинный кабель для передачи отключающего импульса.

Для того, чтобы избежать указанных недостатков применяются 2 или более устройств с каждого конца линии связанных между собой каналом связи. По каналу связи не передается непосредственно ток короткого замыкания, а информация о величине и фазе тока короткого замыкания или только о фазе тока с противоположной стороны линии. Для связи между концами может использоваться проводной, оптоволоконный, мультиплексорный или высокочастотный канал связи. Для каждого из таких каналов разработаны специальные виды защиты.

### 7.5.1. Дифференциальная защита с проводным каналом связи

В нашей энергетике широко применяется продольная дифференциальная защита типа ДЗЛ.

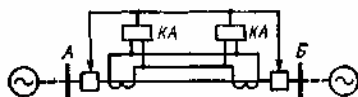


Рис. 7.28. Общий принцип выполнения продольной дифзащиты линии.

С каждой стороны линии устанавливается отдельный полукомплект защиты. Трансформаторы тока с обеих сторон должны иметь одинаковый коэффициент трансформации. Если они отличаются, то вторичные токи выравниваются с помощью промежуточных трансформаторов тока. Реле с 2 сторон соединяются по току параллельно. Если предположить, что сопротивление соединительных проводов между полукомплектами пренебрежимо мало, а сами полукомплекты имеют одинаковое сопротивление, то по каждому из них протекает половина тока. Наличие сопротивления соединительных проводов приводит к тому, что на удаленный комплект попадает меньшая часть тока, а в свой - большая. Это приводит к появлению тока небаланса, от которого должна быть отстроена защита при внешних КЗ. Ток небаланса зависит от соотношения между сопротивлением реле и соединительных проводов. Поэтому длина и сечение этих проводов ограничивает длину линии, на которой может быть применена защита. Для уменьшения влияния этих проводов в защите ДЗЛ используются разделительные трансформаторы с коэффициентом трансформации равным 25, см. рис. 7.29, трансформаторы TAL. Соответственно сопротивление проводов уменьшается в 625 раз. Допустимая величина сопротивления соединительных проводов для этой защиты равна 300 Ом, что позволяет использовать защиту на линиях длиной 10-12 км при использовании кабеля связи с сечением жил 0.5-0.75 мм<sup>2</sup>. Обычно используются отдельные жилы в общем кабеле с другими защитами, каналами связи и телемеханики. Для уменьшения влияния между каналами а также влияния тока КЗ протекающего по линии электропередачи, вдоль которой проложен кабель, обе жилы должны быть скручены отдельно (витая пара).

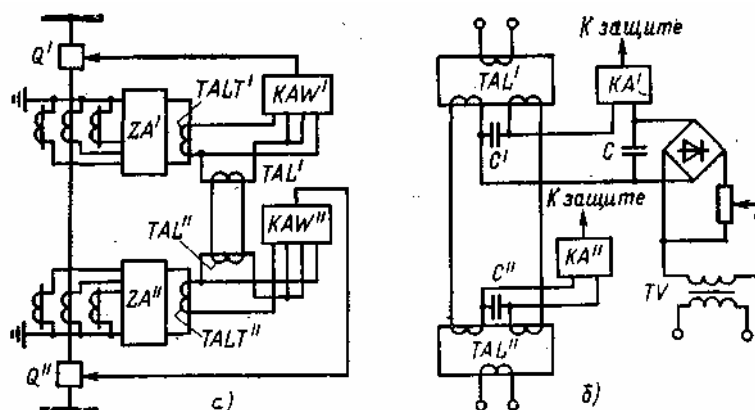


Рис. 7.29. Структурная схема продольной дифференциальной токовой защиты линий (а) и упрощенная схема контроля исправности вспомогательных проводов (б).

Предусматриваются два дифференциальных реле тока с торможением KAW и KAW" (рабочие обмотки которых включаются параллельно друг другу), по одному на каждой подстанции. Через выходные промежуточные реле они действуют на отключение соответственно выключателей Q' и Q".

Промежуточные трансформаторы ТАУТ выполняются насыщающимися. Это не только обеспечивает дальнейшее снижение нагрузки на ТА, но при глубоком насыщении TAL превращает защиту в сравнивающую не мгновенные токи, а их-фазы.

Повреждение вспомогательных проводов может приводить к отказам или излишним срабатываниям защиты. Поэтому она снабжается специальным контролем исправности вспомогательных проводов. К устройству контроля, автоматически выводящему защиту без

выдержки времени, предъявляются очень жесткие требования по быстродействию. При работе устройства на сигнал приходится выбирать /сз>/раб, что загрубляет защиту. Устройство контроля использует наложение постоянного тока от постороннего источника тока. На рис. 7.29.б приведена упрощенная схема устройства контроля. Схема выполнена с циркуляцией постоянного тока по вспомогательным проводам при их исправном состоянии. Вторичные обмотки ТАЛ выполняются в виде двух секций, соединенных разделительным конденсатором С'1С"), представляющим собой бесконечно большое сопротивление для постоянного и малое для переменного тока. К зажимам конденсатора С присоединяется источник выпрямленного тока, получающий питание от измерительного ТН. Минимальные быстродействующие реле тока контроля КА' и КА" включаются последовательно в цепь циркуляции тока соответственно со стороны источника питания и приемной стороны. Замыкающие контакты этих реле контролируют цепи выходных реле защиты. При обрыве вспомогательных проводов реле контроля КА срабатывают, выводят защиту из работы и действуют на сигнал. При замыкании между вспомогательными проводами срабатывает только реле контроля с приемной стороны КА". Для предотвращения выведения защиты из работы при КЗ на защищаемой линии, когда напряжение питания устройства контроля может снижаться до нуля, предусматривается подпитка в течение 1—3с реле КА от конденсатора С.

Для сокращения числа жил вспомогательных проводов (до двух), обеспечения большей чувствительности при несимметричных КЗ, упрощения защиты в целом она выполняется односистемной, включаемой через комбинированные фильтры тока ЗА' и ЗА". Лучшими считаются фильтры  $I_1 + kI_2$ , Коэффициент  $k$  не может выбираться равным единице, так как в случае, например, К(2)вс в защищаемой зоне и маркировке фильтра на фазу А как «особую» ток на его выходе равнялся бы нулю  $+kI_2$  ( $I_1 = -I_2$ ). Коэффициент  $k$  выбирается таким образом, чтобы при несимметричных КЗ в защищаемой зоне соблюдалось соотношение  $kI_2 > I_1$ . При этом обеспечивается преобладающее значение токов  $I_2$ , которые всегда имеют примерно одинаковые с обеих сторон участка фазы. Коэффициент  $k$  желательно выбирать достаточно большим. Практически для применяемых конструкций фильтров значение  $k$  ограничивают величиной 8—10. В сетях с изолированной нейтралью, имеющих двухфазное исполнение защит, фильтры на токи двух фаз (Л и С) и ток в обратном проводе.

#### **7.5.2. Микропроцессорная дифференциальная защита линии с оптоволоконным каналом связи**

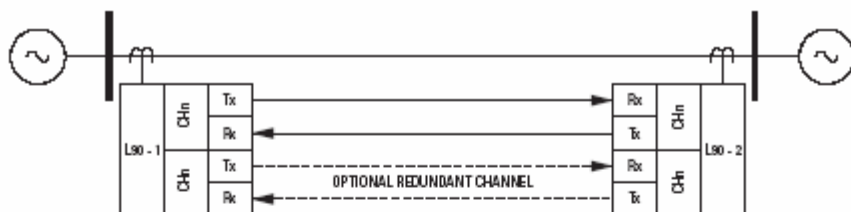
За рубежом широкое применение находят микропроцессорные защиты с оптоволоконными каналами связи. К ним относятся L90 фирмы GE, P540 - ALSTOM, 7SD522 и 610 SIEMENS, REL561 ABB. Все эти защиты могут работать по проводному каналу, однако длина кабеля ограничена расстоянием в единицы километров, по мультиплексорному каналу (в состав канала входит дополнительная аппаратура преобразования сигнала). При использовании оптоволоконных каналов, длина кабеля, а значит и защищаемой линии может быть более 100км без применения дополнительной аппаратуры.

Сигнал по каналу передается в цифровом виде, причем ток передается пофазно, с сохранением величины и фазы тока. По этому же каналу передается команда отключения выключателя с противоположной стороны. В каждую сторону должен быть выполнен отдельный канал, для передачи и приема сигнала. Обычно может быть подключено до 2х пар оптоволоконных каналов. Второй канал может быть резервным либо использоваться для подключения третьего комплекта защиты для трехконцевой линии. Некоторые типы защиты могут применяться и для 6 концевой линии.

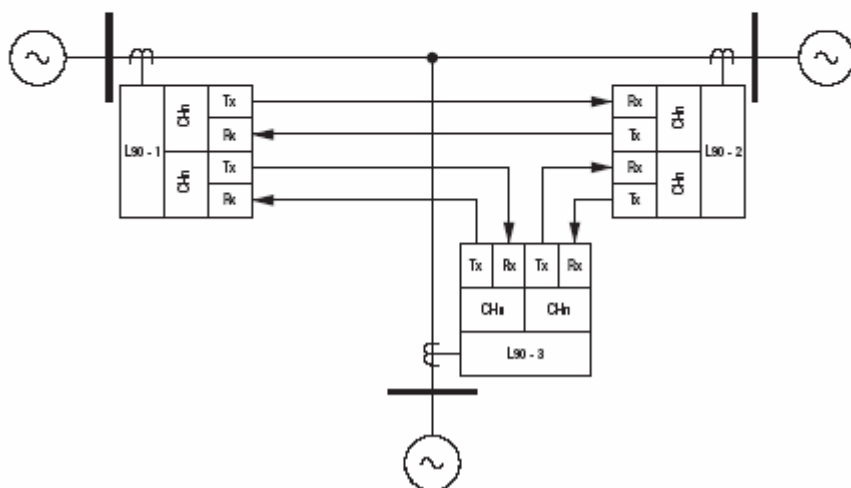
Защиты снабжаются автоматической блокировкой для предотвращения ложной работы при потере связи между полуконтактами. Кроме самой защиты в комплект входят дополнительные защиты: токовые направленные и ненаправленные, дистанционные, может быть выполнено пофазное и трехфазное отключение и АПВ.

Для примера рассмотрим более подробно защиту L90 фирмы GE.

Основной функцией защиты является дифференциальная защита линии с передачей сигнала по оптоволокну или витой паре (RS422 или G.703). Защита имеет непрерывный контроль исправности канала связи. На рис. 7.30 показано подключение каналов связи.



Двухконцевая схема подключения терминалов.



Трехконцевая схема подключения терминалов.

Рис. 7.30. Схема подключения оптоволоконных кабелей при 2 и 3 концевой схеме линии.

Допустимая длина оптоволоконного кабеля зависит от его типа и типа излучателя см. таблицу:

Допустимая длина проводного канала с интерфейсом RS-422 1200м.

В том же канале проходит команда дистанционного отключения противоположного конца.

Emitter Type	Typical (km)
820 nm LED	1.65
1300 nm LED	3.8
1300 nm ELED	11.4
1300 nm LASER	64.0
1550 nm LASER	105.0

При наличии отпайки на линии без питания, применять полукомплект на отпайке не обязательно, можно отстроится от КЗ за отпайкой по току или выполнить блокировку входящим состав устройства дистанционным органом, так же отстроенным от КЗ на шинах низкого напряжения отпайки. Понятно, что, в этом случае, дифзащита линии будет работать при КЗ в трансформаторе отпайки. Если это недопустимо, придется устанавливать полукомплект на отпайке и прокладывать туда оптоволоконные кабели от 2 других концов. Защита предусматривает трехфазное и однофазное отключение и АПВ.

Дифференциальная защита имеет тормозную характеристику изображенную на рис. 7.31. Дифференциальная характеристика в основном определяется четырьмя уставками: **CURRENT DIFF PICKUP**, **CURRENT DIFF RESTRAINT 1**, **CURRENT DIFF RESTRAINT 2** и **CURRENT DIFF BREAK PT** (Точка излома кривой). Это означает соответственно: **НАЧАЛЬНЫЙ ТОК СРАБАТЫВАНИЯ**, **КОЭФФИЦИЕНТ ТОРМОЖЕНИЯ НА 1 УЧАСТКЕ**, **КОЭФФИЦИЕНТ ТОРМОЖЕНИЯ НА 2 УЧАСТКЕ**, **ТОЧКА ИЗЛОМА ХАРАКТЕРИСТИКИ (ТОЧКА ПЕРЕХОДА С 1 ТОРМОЗНОГО УЧАСТКА НА ВТОРОЙ)**.

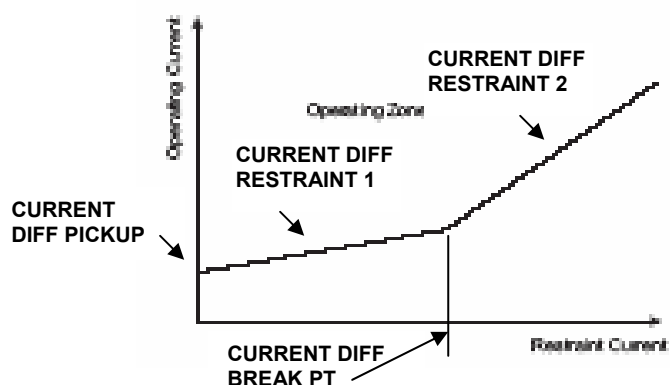


Рис. 7.31. Тормозная характеристика дифференциальной защиты устройства L90.



Фирма изготовитель рекомендует следующие уставки для этой защиты:

#### 1. УСТАВКА **CURRENT DIFF PICKUP**

Эта уставка устанавливает чувствительность элемента к КЗ с высоким полным сопротивлением, и поэтому желательно выбирать низкий уровень, но это может вызвать ложную работу при внешних КЗ, вызывающих насыщение ТТ. На выбор этой уставки влияет решение использовать компенсацию зарядного тока. Если компенсация зарядного тока Введена (Enabled), то срабатывание следует установить на минимум 150% зарядного тока линии в установившемся режиме при нижнем пределе 10% от номинального тока ТТ. Если компенсация зарядного тока Выведена (Disabled), то срабатывание следует установить на минимум 250% зарядного тока линии в установившемся режиме при нижнем пределе 10% от номинального тока ТТ.

Если ТТ на одном терминале может быть насыщен, когда ТТ на других терминалах не насыщен, эту уставку следует повысить на приблизительно от 20 до 50% (в зависимости от того, как сильно насыщен один ТТ, когда другие ТТ не насыщены) от номинала ТТ для предотвращения работы при близких внешних КЗ

#### 2. УСТАВКА **CURRENT DIFF RESTRAINT 1**

Эта уставка управляет характеристикой элемента, когда ток ниже точки излома, где не ожидаются значительные погрешности ТТ и явления насыщения. Уставка используется для обеспечения чувствительности к внутренним к.з с высоким полным сопротивлением, или когда конфигурация системы ограничивает ток КЗ до низких значений. Приемлемой в большинстве случаев является уставка от 10 до 20%, но она может быть повышена до 30%, если ТТ могут работать совершенно иначе при КЗ

#### 3. УСТАВКА **CURRENT DIFF RESTRAINT 2**

Эта уставка управляет характеристикой элемента, когда ток выше точки излома, где ожидаются значительные погрешности ТТ и явления насыщения. Уставка используется для обеспечения надежности при внешних КЗ с большими токами. Приемлемой в большинстве случаев является уставка от 30 до 40%, но она может быть повышена до 50%, если ТТ могут работать совершенно иначе при КЗ

Примечание: уставки **RESTRAINT 1** и **RESTRAINT 2** на одном уровне превращают тормозную характеристику с двумя наклонами в тормозную характеристику с одним наклоном.

#### 4. УСТАВКА **CURRENT DIFF BREAK PT**

Эта уставка управляет порогом, при котором реле заменяет использование характеристики Restraint 1 на Restraint 2, и является очень важной. Можно рассмотреть два метода

1. Уставка от 150 до 200% максимального тока нагрузки линии при допущении, что ток выше этого уровня – это КЗ
2. Уставка ниже уровня тока, при котором могут ожидать насыщение ТТ и паразитные дифференциальные токи переходных процессов.

Первый метод дает сравнительно большую надежность и меньшую чувствительность, второй – меньшую надежность при большей чувствительности.

Защита позволяет выравнивать различные коэффициенты трансформации трансформаторов по концам линии. Для этого вторичный ток, поступающий от дальнего комплекта умножается на отношение первичных токов трансформаторов тока и вводится в каждый полупакет в виде уставки.

Если коэффициенты трансформации ТТ на терминалах линии неодинаковы, то необходимо использовать уставку **CURRENT DIFF CT TAP 1(2)** для приведения Ктт к общей базе. В этом случае пользователь должен изменить уставку **CURRENT DIFF BREAK PT** и **CURRENT DIFF PICKUP**, потому что локальный вектор тока используется как опорный для определения того, какое дифференциальное уравнение необходимо использовать, на основании значений локального и удаленного токов. Если уставка не изменена, реакции от-

дельных реле, особенно при внешних КЗ, могут быть несимметричными, поскольку одно реле может быть ниже точки излома, а другое – выше точки излома. Существует два метода избежания этой потенциальной проблемы:

I. Установите RESTRAINT 1 и RESTRAINT 2 на один и тот же уровень (скажем, 40% или 50%). Это превратит характеристику реле из двухнаклонной в однонаклонную, и точка излома не будет иметь значения. Затем отрегулируйте уставку дифференциального срабатывания на всех терминалах в соответствии с коэффициентами трансформации ТТ, относя желаемое срабатывание к первичному току линии (см. пример ниже).

II. Установите точки излома на каждом реле отдельно в соответствии с локальными коэффициентами трансформации ТТ и уставкой **СТ ТАР**. Затем отрегулируйте уставку дифференциального срабатывания на всех терминалах в соответствии с коэффициентами трансформации ТТ терминала. Значение наклона должно быть идентично на всех терминалах.

Например 2-Терминальная конфигурация:

**СТ РЕЛЕ1 = 1000/5 СТ РЕЛЕ2 = 2000/5**

Следовательно:

**СТ ТАР 1РЕЛЕ1 = 2 СТ ТАР 1РЕЛЕ2 = 0,5.**

Для достижения максимальной дифференциальной чувствительности, минимальное срабатывание устанавливается на 0,2 о.е. на терминале с наивысшим первичным током ТТ, в этом случае 2000:5. Срабатывание на других терминалах регулируется соответственно.

**PICKUP РЕЛЕ1 = 0,4 PICKUP РЕЛЕ2 = 0,2**

При выборе РЕЛЕ1 за опорное с точкой излома BREAK РТ РЕЛЕ1 = 5,0, точка излома на РЕЛЕ2 должна быть выбрана как  $BREAK\ РТ\ РЕЛЕ2 = BREAK\ РТ\ РЕЛЕ1 \times СТ\ РЕЛЕ1 / СТ\ РЕЛЕ2 = 2,5$ . Проста проверка этого такова:

$BREAK\ РТ\ РЕЛЕ1 \times СТ\ РЕЛЕ1$  должно быть равно  $BREAK\ РТ\ РЕЛЕ2 \times СТ\ РЕЛЕ2$ . По существу,

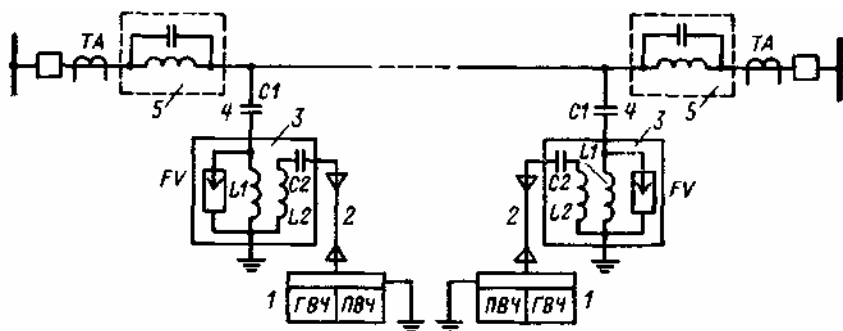
**BREAK РТ РЕЛЕ1 = 5.0 BREAK РТ РЕЛЕ2 = 2,5**

### 7.5.3. Дифференциально-фазная высокочастотная защита

На линиях в качестве быстродействующих защит, обеспечивающих отключение без замедления повреждений на всем протяжении линии сколько ни будь большой протяженности, используются высокочастотные защиты. В этих защитах обмен информацией между комплектами, установленными по концам защищаемой линии, осуществляется с помощью организованного по ней специального высокочастотного канала.

На рис. 7.32 показана схема организации высокочастотного канала по линии электропередачи. Ток высокой частоты в этой схеме передается по одной из фаз линии и возвращается через землю. На каждом конце линии устанавливается высокочастотный аппарат (ВЧА) /, состоящий из передатчика (генератора) сигналов высокой частоты ГВЧ и принимающего их приемника ПВЧ. Выходные цепи ВЧА подключаются одним зажимом к земле, а вторым — к линии электропередачи через кабель 2, фильтр присоединения 3 и конденсатор связи 4.

Соппротивление конденсатора связи, через который ВЧА подключается к линии электропередачи, зависит от частоты проходящего через него тока. Для токов промышленной частоты 50 Гц оно велико (больше 1 МОм) и поэтому ток утечки весьма мал. При высоких частотах (больших 10 кГц) сопротивление конденсатора резко уменьшается. В результате ток высокой частоты, проходящий по линии электропередачи, будет ответвляться в конденсатор и дальше через фильтр присоединения проходить в ВЧА.



Для того чтобы токи высокой частоты не выходили за пределы защищаемой линии, по концам ее устанавливаются специальные заградители 5. Заградитель представляет собой резонансный контур состоящий из силовой индуктивной катушки  $L$  и элемента настройки (регулируемой емкости  $C_k$ ). Значение емкости  $C_k$  подбирается так, чтобы контур заградителя был настроен в резонанс (тока) на частоту настройки ВЧА. Такой заградитель называется резонансным, или одночастотным. При резонансной частоте сопротивление контура имеет максимальное значение, благодаря чему предотвращается растекание тока высокой частоты; сопротивление заградителя должно быть не меньше 1000 Ом. Для защиты конденсатора  $C_k$  от грозовых и коммутационных перенапряжений предусматривается разрядник  $FV$ .

Кроме резонансных применяются и широкополосные заградители, запирающие токи в довольно широком диапазоне частот; такие заградители нужны для каналов, по которым передается несколько сигналов с разными частотами. В качестве высокочастотного кабеля 2 используется высокочастотный кабель типа ФКБ, входное сопротивление которого близко к 100 Ом.

С помощью фильтра присоединения согласовывается (уравнивается) входное сопротивление высокочастотного кабеля и линии. Фильтр присоединения образует замкнутый контур для токов высокой частоты и компенсирует емкость конденсатора связи, что позволяет уменьшить до минимума сопротивление конденсатора для токов высокой частоты. Фильтр присоединения представляет собой воздушный трансформатор с отпайками, позволяющими менять самоиндукцию его обмоток и взаимную индуктивность между ними. В цепи обмотки  $L1$  включен конденсатор связи  $C1$ , а в цепи обмотки  $L2$  — конденсатор фильтра  $C2$ . Фильтр присоединения свободно пропускает токи только в определенном рабочем диапазоне частот. При этих частотах затухание фильтра относительно мало (порядка 0,15-0,25 Нп), а за пределами рабочих частот резко возрастает. Параллельно обмотке  $L1$  фильтра подключен разрядник  $FV$ , который срабатывает при перенапряжениях, закорачивая вход приемника.

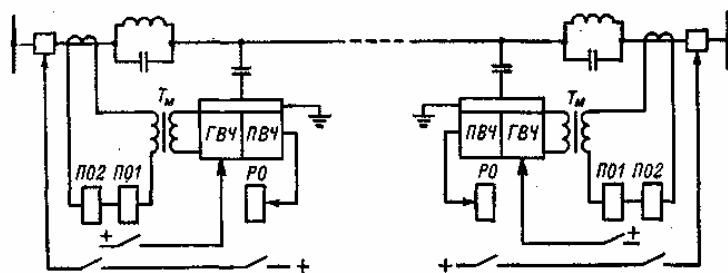


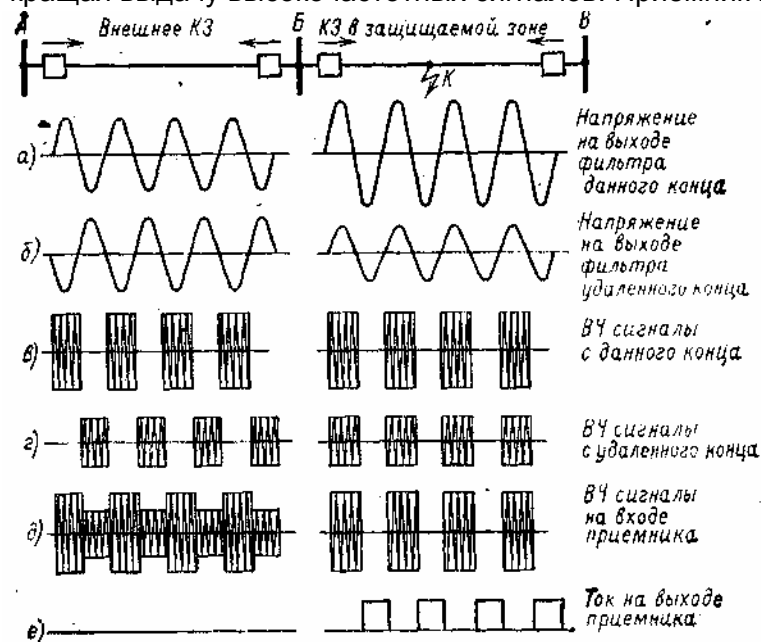
Рис. 7.33. Структурная схема дифференциально-фазной защиты.

Принцип действия защиты. Дифференциально-фазная высокочастотная защита (ДФЗ) основана на сравнении фаз токов по концам защищаемой линии. Считая положительными токи, направленные от шин в линию, можно сказать, что при внешнем КЗ токи на противоположных сторонах сдвинуты на  $180^\circ$  (имеют противоположные знаки), а при КЗ в зоне — совпадают. Последнее утверждение справедливо, если пренебречь сдвигом по фазе между векторами ЭДС по концам электропередачи и различием углов полных сопротивлений с противоположных сторон линии.

Таким образом, сравнивая фазы токов по концам защищаемой линии, можно определить место повреждения. В отличие от обычных дифференциальных защит, в которых значения токов сравниваются непосредственно в реле, в дифференциально-фазной защите для передачи информации о фазе токов, проходящих по концам защищаемой линии, используется канал высокой частоты.

Структурная схема защиты показана на рис. 7.33. Защита состоит из высокочастотного аппарата ВЧА, включающего в себя генератор высокой частоты ГВЧ и приемник ПВЧ, реле отключения РО, питающегося током приемника, и пусковых реле П01 и П02, первое из которых пускает ГВЧ, а второе замыкает цепь отключения.

Особенность ДФЗ как высокочастотной защиты состоит в том, что ГВЧ управляется (манипулируется) непосредственно током промышленной частоты. Генератор высокочастотных колебаний включен так, что при положительной полуволне промышленного тока он работает, посылая в канал ток высокой частоты, а при отрицательной — запирается, прекращая выдачу высокочастотных сигналов. Приемник ВЧА выполнен таким образом, что



при наличии токов высокой частоты, поступающих в его входной контур, выходной ток, питающий реле РО, равен нулю, а при отсутствии высокочастотного сигнала появляется выходной ток, поступающим в реле РО.

Рис. 7.34. Действие защиты по рис. при внешних КЗ и КЗ в защищаемой зоне

При внешнем КЗ (участок АВ рис. 7.34), когда фазы первичных токов по концам линии противоположны, ГВЧ на конце А линии работает в течение первого полупериода промышленного тока, а на конце В — в течение следующего

полупериода. В результате по линии непрерывно проходит ток высокой частоты, питающий приемники, установленные на обеих сторонах защищаемой линии. При этом в выходных цепях ПВЧ ток отсутствует, реле РО не работает и защита на отключение не действует. При КЗ в зоне (участок ВС рис. 7.34) ГВЧ на обоих концах линии работают одновременно, поскольку фазы токов промышленной частоты совпадают. Высокочастотный ток, поступающий при этом в приемники, будет иметь прерывистый характер с интервалами, равными полупериоду промышленного тока. В этом случае приемник работает в промежутки времени, когда ток высокой частоты отсутствует и заперт (не работает) во время его прохождения. В выходной цепи приемника появляется прерывистый ток, который сглаживается и поступает в реле РО, последнее срабатывает и замыкает цепь отключения. Таким образом, сдвиг фаз токов промышленной частоты, проходящих по обоим концам защищаемой линии, определяется по характеру высокочастотных сигналов, принимаемых ПВЧ (сплошные или прерывистые). По принципу действия ДФЗ не реагирует на нагрузку и качания, так как в этих режимах фазы сравниваемых токов по концам защищаемой линии противоположны.

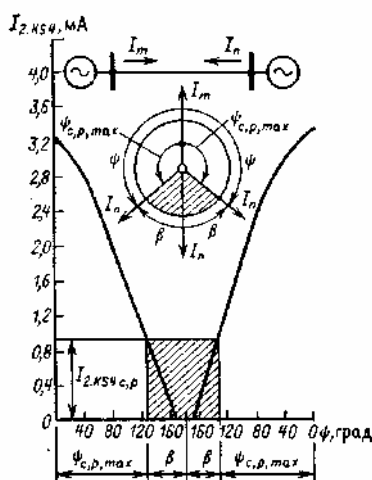
Из сказанного выше очевидно, что правильное поведение защиты при внешних КЗ будет обеспечено лишь в случае работы ГВЧ на обоих концах защищаемой линии. Если один из ГВЧ не будет запущен или окажется неисправным, защита подействует неправильно и отключит неповрежденную линию, так как ПВЧ будут принимать прерывистый ток только одного передатчика. Для предотвращения этого в схеме ДФЗ (см. рис. 7.33) имеются два пусковых органа разной чувствительности: П01 — более чувствительный, осуществляющий пуск ГВЧ, и П02 — более грубый, замыкающий цепь отключения.

У нас широко распространены электромеханические защиты ДФЗ 201 или ее более ранний аналог ДФЗ-2. Особенности этих защит следующие:

Защита выполняется для действия при всех видах КЗ в сетях с глухозаземленными нейтралью, в том числе и при трехфазных. Однако основные ПО защиты включаются на составляющие токов обратной последовательности  $I_2$  или сумму абсолютных значений  $|I_2| + k'|I_0|$ . Действие при трехфазных КЗ обеспечивается за счет хотя бы кратковременно появляющейся в начальный момент несимметрии; при этом кратковременное срабатывание указанных органов фиксируется дополнительным ПО сопротивления, включаемым, как это принято в дистанционных защитах, на междуфазные токи и напряжения. В защите предусматриваются также дополнительные органы токовые органы, включаемые на фазные токи и отстраиваемые от рабочего тока линии.

Орган манипуляции передатчика инвертирует управляющий сигнал таким образом, что передатчик запущен, если величина сигнала меньше заданной величины напряжения манипуляции. Таким образом, передатчик работает, если сигнал отсутствует, или он отрицательный, или его величина меньше напряжения манипуляции. Поэтому ширина импульса всегда больше половины периода промышленной частоты, а при отсутствии тока достаточной величины идет сплошной сигнал. Передатчик управляется величиной  $I_1 + kI_2$  получаемой с помощью специального фильтра. Этот сигнал есть при любом виде короткого замыкания. Коэффициент  $k$  увеличивает влияние тока обратной последовательности при несимметричных КЗ обеспечивая, как и в случае с защитой ДЗЛ (см. п.7.5.1) более четкую работу защиты. Величина коэффициента  $K$  выбирается такой чтобы в условиях короткого замыкания влияние тока нагрузки, который дает дополнительный сдвиг токов по фазе (ток нагрузки находится в противофазе по концам линии)  $kI_2 > I_1$ .

Орган сравнения фаз представляет собой трансформатор включенный на ток приемника. Н выходе трансформатора при КЗ в зоне появляется пульсирующий ток, который выпрям-



ляется и поступает на измерительный орган: поляризованное реле. Величина этого тока зависит от соотношения импульс / пауза на входе приемника. Эта величина максимальна при совпадении фаз, по мере сдвига фаз эта величина уменьшается и становится равной нулю при работе передатчиков в противофазе (внешнее КЗ), когда работа защиты должна блокироваться. Угол, при котором блокируется защита (угол блокировки) зависит от уставки этого реле чем грубее уставка, тем больше угол, при котором блокируется защита. На рис. 7.35 показана фазная характеристика защиты:

Рис. 7.35 фазная характеристика дифференциально-фазной защиты.

Заштрихованный участок показывает зону, в которой работа защиты блокируется. Ширина зоны определяется сдвигом фаз по концам линии, временем распространения сигнала, временем задержки в цепях передатчика и приемника, угловой погрешностью органа манипуляции и трансформаторов тока. Сдвиг фаз по концам линии и время прихода сигнала на противоположный конец зависят от длины линии. Они составляют 120 на 100км длины линии. Обычная уставка органа сравнения фаз равна 600. Вне этой зоны работа защиты разрешается.

Для линий повышенного напряжения 330 -500кВ на которых существенное влияние оказывает емкостной ток линии, находящийся в зоне дифзащиты, выпускается защита ДФЗ 503 имеющая компенсацию емкостного тока.

#### 7.5.4. Микропроцессорные дифференциально-фазные защиты

Зарубежные фирмы предлагают на рынке Украины 2 варианта микропроцессорных защит. Это устройство MiCOM P547 фирмы ALSTOM и L60 фирмы GE. Оба устройства могут работать со стандартными высокочастотными приемопередатчиками. Для сопряжения устройства L60 с приемопередатчиком ПВЗ требуется некоторая доработка приемопередатчика. Способ доработки приемопередатчика разработан в Укрэнерго с участием компании «Энергомашин» и согласован с заводом изготовителем. Аналогичным образом могут быть доработаны приемопередатчики других фирм. Кроме основной дифференциально-фазной защиты в состав устройства входят дополнительные устройства защиты у MiCOM

P547 только токовые, так как оно не имеет цепей напряжения, L60 цепи напряжения имеет и поэтому в состав его входят дистанционные и направленные защиты. Само собой разумеется что в состав устройств входят средства измерения, регистрации, осциллограф, Работа с локальной сетью и выносным компьютером и т.д.

Ниже в качестве примера рассмотрено устройство MiCOM P547.

Устройство работает с высокочастотным каналом связи по линии электропередачи, что обеспечивает совместно с автоматикой проверки канала его высокую надежность. По каналу связи передаются сигналы пуск-пауза. (В цифровой дифференциальной защите сигнал включает в себя еще и оцифрованную величину токов).

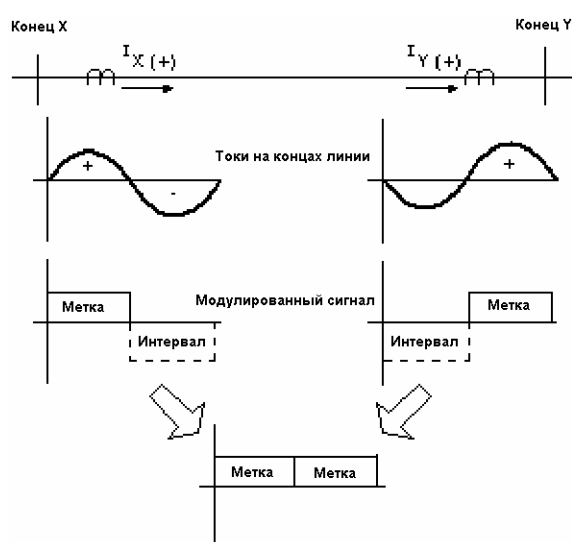


Рис. 7.36. Транзит мощности или внешнее КЗ

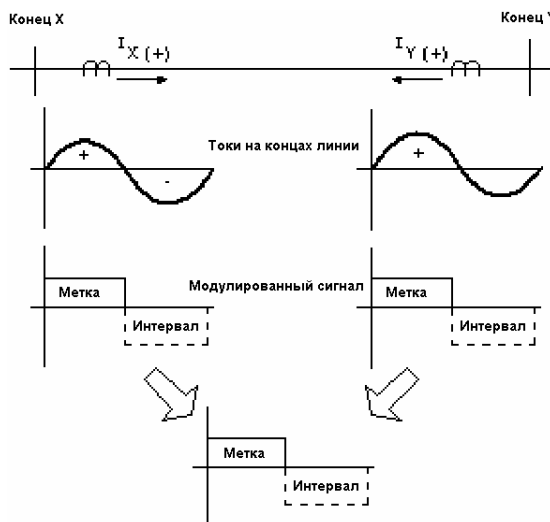


Рис. 7.37. КЗ в защищаемой зоне.

Рис. 7.36 показывает два конца линии X-Y с нагрузкой или с КЗ за пределами защищаемой линии. Как в первом, так и во втором случае, ток протекает за пределы ЛЭП, а следовательно, устройство не должно реагировать на этот режим. Трансформаторы тока должны быть согласованы между собой. Полярность тока нагрузки или КЗ на конце Y, будет обратной полярности тока на конце X, т.к. ток будет течь от конца X к концу Y, а от конца Y к шинам каждый положительный полупериод конца X будет совпадать с отрицательным полупериодом конца Y и, наоборот, на каждый отрицательный полупериод на конце X будет накладываться положительный полупериод на конце Y.. Каждое устройство P547 конвертирует положительный полупериод тока в логическую единицу (метка), отрицательный полупериод в логический ноль (интервал). Таким способом устройство кодирует каждый полупериод в сигналы «пуск» или «пауза» с длиной импульса в зависимости от частоты энергосистемы (10мс при частоте 50Гц). Для транзита мощности или внешнего КЗ при сложении сигналов через логический оператор ИЛИ на выходе мы получим постоянную единицу. Таким образом, дифференциально-фазная защита обеспечивает селективность при перетоке мощности или внешнем КЗ при отсутствии пауз. Паузы будут наблюдаться в случае, когда будет внутреннее КЗ.

Теперь рассмотрим случай КЗ на защищаемой ЛЭП. Этот случай показан на рис. 7.37.

Если КЗ произошло на защищаемой ЛЭП (в защищаемой зоне), то токи будут течь от концов линии к месту КЗ и будут иметь одинаковую фазу. Каждый положительный полупериод тока конца X будет совпадать с положительным полупериодом на конце Y, и также будут совпадать и отрицательные полупериоды. Таким образом, смодулированные интервалы пуск/пауза на обоих концах ЛЭП, также будут находиться в фазе. После логического сложения X и Y на выходе мы получаем чередование пусков с паузами, до тех пор, пока будет присутствовать КЗ на линии. Наличие пауз в суммарном сигнале, говорит о том, что имеется КЗ в защищаемой зоне, что, следовательно, должно вызвать срабатывание защиты на отключение ЛЭП.

Дифференциально-фазная защита эффективно действует, как блокирующая схема при внешнем КЗ, и на отключение, при наличии внутреннего КЗ, и в случае если дальний ввод не имеет питания. В этом случае питающий конец не получает сигнала с противоположной стороны.

Для того, чтобы обеспечить передачу сигнала, при любом виде короткого замыкания применяется смешивание сигнала. На вход передатчика подается величина

$$I_{mixed} = -I_1 + (K \cdot I_2)$$

Где **K** является коэффициентом, устанавливаемым пользователем. Этот коэффициент используется для увеличения чувствительности к несимметричным КЗ и уменьшению влияния тока нагрузки.

Для этого коэффициента в устройстве допустим следующий диапазон уставок: от 3 до 30 (по умолчанию, рекомендовано K=5).

Устройство имеет интеллектуальный режим, в котором пользователю не надо вводить коэффициент K. В этом режиме устройство автоматически подстраивается к условиям системы.

Как показано на рисунке 7.38 устройство MiCOM P547 имеет возможность автоматической подстройки. В этом режиме коэффициент K жестко не задается, он устанавливается в зависимости от предаварийного режима тока нагрузки и чувствительности к замыканиям на землю (Delta I2):



Рис. 7.38. автоматическая подстройка коэффициента K

В случае если в предаварийном состоянии был большой ток нагрузки, то коэффициент K, используемый для получения смешанного тока, должен быть увеличен, для того, чтобы избежать преобладания тока прямой последовательности и необнаружения малых токов замыкания на землю. В этом случае устройство само меняет коэффициент K от минимального к максимальному.

В случае если в предаварийном состоянии был небольшой ток нагрузки, то коэффициент K увеличиваться не будет, что-бы обеспечить чувствительность защиты к обнаружению трехфазного замыкания.

Интеллектуальный режим рекомендуется применять для упрощения включения устройства P547 в работу, при этом отпадает необходимость считать требуемый коэффициент K.

Пусковые органы (ПО) – токовые:

- I1 Ступень прямой последовательности тока (Start I1)
- I2 Ступень обратной последовательности тока (Start I2)
- ΔI1 Датчик приращения тока прямой последовательности (Delta I1)
- ΔI2 Датчик приращения тока обратной последовательности (Delta I2)

Ступени датчиков устанавливаются в действующих значениях от номинального тока.

Датчики приращения тока измеряют изменение действующего значения тока относительно предыдущего периода тока нагрузки:

$$I \Delta = I_{K3}(t = 0) - I_{K3}(t - 1 \text{ cycle})$$

Измерение прироста тока получают от векторной разницы токов за один период.

Уставки ПО по приросту тока могут быть выполнены значительно более чувствительными, например: меньше тока нагрузки. Это позволяет обеспечить необходимую чувствительность ко всем коротким замыканиям. То что ПО пустит защиту еще не означает неселективной работы так как отключение происходит после подтверждения, что короткое замыкание в защищаемой зоне от органа сравнения фаз.

Поскольку дифференциально-фазная защита работает по блокирующей схеме, то устройство Р547 находящееся ближе всего к КЗ (например, конец Y Рис.1) может быть более чувствительным, чем устройство на другом конце линии.

Поэтому блокирующий элемент должен быть более чувствительным, чем отключающий элемент.

В устройстве Р547 это достигается установкой двух уровней уставок (чувствительной и грубой) для каждого датчика КЗ.

- Чувствительная уставка используется при обнаружении внешнего КЗ, после чего посылается блокирующий сигнал на другой конец. В этом случае гарантируется, что отключение не произойдет, так как на другом конце будет получен блокирующий сигнал, а на этом конце устройство не будет запускать в работу алгоритм дифференциально-фазной защиты.

- Грубая уставка используется при обнаружении внутреннего КЗ, при этом, если на любом из концов линии ток в устройстве превзойдет грубую уставку, то это автоматически запустит алгоритм дифференциально-фазной защиты.

Полная функциональная схема работы дифференциально-фазной защиты показана на рис.7.39.

Так как датчики прироста тока пускаются в течение двух циклов, важно, чтобы их выход удерживался определенный период времени после их естественного сброса. Раздельные таймеры "Reset Highset" и "Reset Lowset" установлены для использования датчиками прироста тока, для обеспечения правильной передачи в период времени, необходимый устройству защит и выключателям для отключения внутреннего или внешнего КЗ. Время удержания элемента с чувствительной уставкой должно быть больше, чем время удержания отключающего элемента, что должно обеспечивать селективность при внешних КЗ.

Примечание: При отключении выключателя на любом конце линии останавливается передача сигналов на другой конец линии. Это гарантирует снятие блокировки на втором конце линии, что обеспечит отключение второго конца.



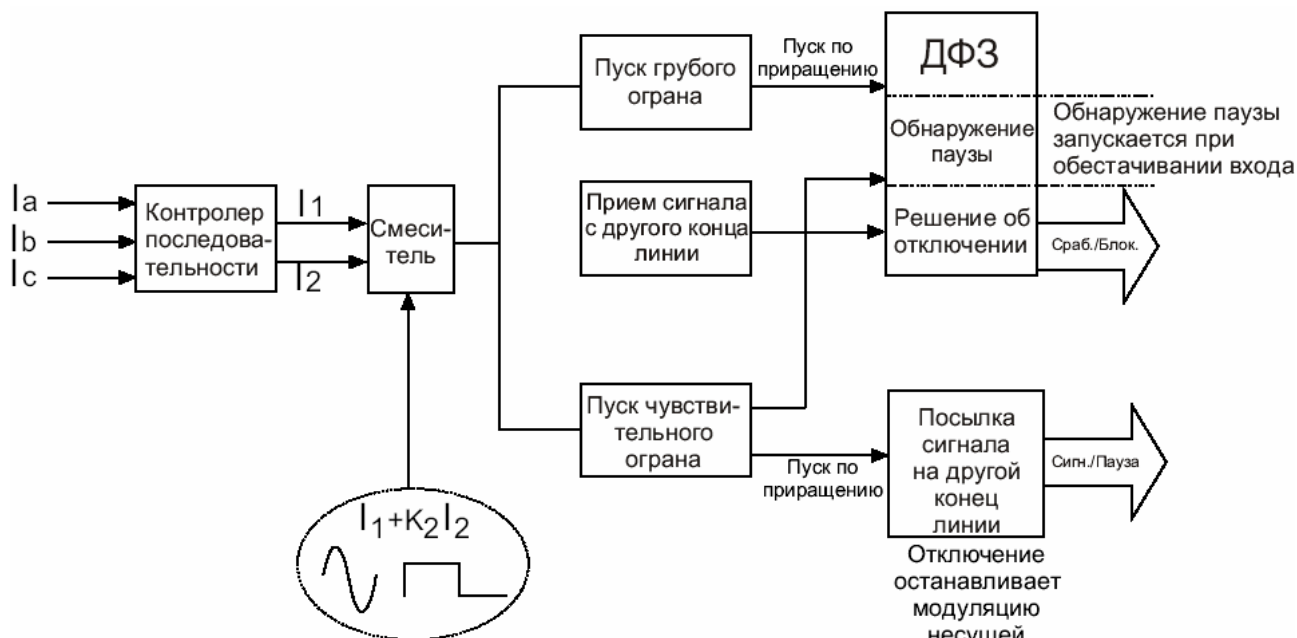


Рис. 7.39. Структурная схема дифференциально-фазной защиты.

Между моментом, когда MiCOM P547 послал сигнал ВКЛ/ВЫКЛ метка/интервал и когда этот сигнал будет принят другим устройством на другом конце линии, всегда есть небольшая задержка. Эту задержку составляют: срабатывание быстродействующего выхода P547, задержка в аппаратуре ВЧ приемо-передатчика и быстродействие быстрого оптохода P547 на другом конце линии. Суть чувствительной к углу сдвига фаз защиты, состоит в том, что бы сравнения углов фаз на дальнем и ближнем концах линии происходили в один момент времени. Это требует, что бы было учтено время необходимое на передачу сигнала, только тогда можно запустить алгоритм дифференциально-фазной защиты.

Устройство P547 позволяет периодически измерять задержку прохождения сигнала во время проверки канала. Периодичность проверки канала передачи сигнала можно установить в пределах от 30мин до 24ч. Частую проверку рекомендуется производить при ожидании резких изменений температуры и погоды. По умолчанию проверка производится 1 раз в 8 часов.

Для определения времени задержки при передаче сигнала, одно устройство должно быть сконфигурировано как ВЕДУЩЕЕ, а второе как ВЕДОМОЕ.



Процесс проверки происходит следующим образом:

- ВЕДУЩЕЕ устройство посылает импульс ВКЛ длиной 10мс, показанный как время запуска  $T_{x1ON}$  время окончания  $T_{x1OFF}$ .
- После получения импульса на удаленном конце линии, устройство, которое определено как ВЕДОМОЕ записывает полученный импульс, делает выдержку и посылает полученный сигнал назад.
- Время выдержки дает возможность перейти ВЧ аппаратуре обратно в режим готовности.
- ВЕДУЩЕЕ устройство записывает время отправки первого импульса  $R_{x2ON}$  и время прихода ответа с другого конца линии  $R_{x2OFF}$ .
- После приема ответа от ВЕДОМОГО, ВЕДУЩЕЕ устройство делает задержку 20 мс и снова посылает импульс на другой конец линии, что дает возможность ВЕДОМОМУ устройству, также измерить время задержки при передаче сигнала.

$$\text{Задержка передачи} = (R_{x2ON} - T_{x1ON} - 20)/2 \text{ мс}$$

Время задержки при передаче вычисляется следующим образом: от полного времени между посылкой первого сигнала и получением ответа от другого конца линии вычитаем длину импульса и задержку на другом конце линии (20мс) и полученный результат делим на 2 (так как сигнал проходит один и тот же путь 2 раза).

На рис. 7.40 также показано, как устройство P547 компенсирует эффект задержки импульса ВЧ аппаратурой. Любая ВЧ аппаратура вносит свою погрешность на передачу сигнала при передаче по ВЧ каналу. Устройство P547 позволяет измерить и учесть эту погрешность при передаче по ВЧ каналу сигнала «пуск».

При посылке импульса длиной 10 мс, устройство P547 почти мгновенно получит свой сигнал на свой быстрый оптовход, так как используется симплексный канал связи.

Задержка при получении своего импульса будет обусловлена скоростью срабатывания быстрого оптовхода, временем работы ВЧ аппаратуры и временем срабатывания своего быстрого оптовхода.

$$\text{Местная задержка} = (R_{x1OFF} - R_{x1ON}) - 10 \text{ мс}$$

Измерение полной величины задержки между отправленным и принятым сигналом выполняется симметричным дистанционным измерением:

$$\text{Удаленная задержка} = (R_{x2OFF} - R_{x2ON}) - 10 \text{ мс}$$

Использование схемы периодической проверки задержки передачи, устройство MiCOM P547 позволяет использовать полученные результаты для компенсации вносимых погрешностей, что позволяет пользователю не проводить расчет времени задержки передачи сигнала. Также это устройство позволяет избежать проблем связанных с изменением времени передачи сигнала, так как это время сильно зависит от окружающей температуры и погодных условий. Периодическая проверка позволяет дополнительно контролировать исправность ВЧ канала, при отсутствии ответа от удаленного устройства работает сигнализация.

Если в течение 5 минут, после наступления времени следующей проверки задержки, ВЕДОМОЕ устройство не получило от ВЕДУЩЕГО сигнала проверки, то в этом случае также сработает сигнализация.

### **Учет погрешностей сдвига фаз**

Как уже говорилось, погрешности сдвига фаз происходят по следующим причинам:

- Погрешности в углах сдвига фаз на линейных ТТ на каждом конце схемы
- Насыщение линейных ТТ или наличие эффекта смещения тока на одном или более линейных ТТ.
- ВЧ аппаратура не обеспечивает 100% повторяемость во времени задержки при передаче.

- С момента последнего измерения задержки передачи изменилась температура, что, следовательно, внесет изменения во времени задержки при передаче
- Измерительная погрешность в ответе другого устройства
- Наличие емкостного тока в линии, который будет замечен дифференциальной защитой.

Устройство P547 компенсирует все эти погрешности путем установки минимального промежутка интервала, в пределах которого отключения не будет. Это показано на Рис.7.41.

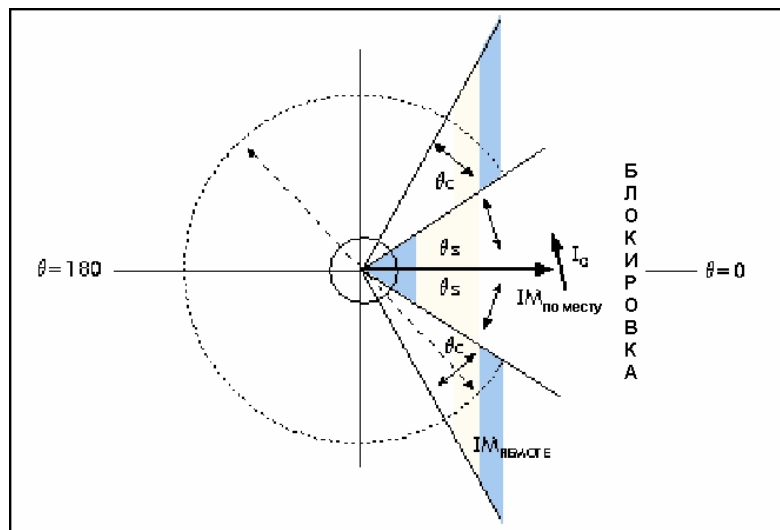


Рис. 7.41: Фазная характеристика защиты.

На Рис. 7.41, показан один период электрической системы, так  $360^\circ$  для системы 50Гц составляет 20мс. Затемненная область справа лежит в пределах клина, установленного углом блокировки. Клин стабильности начинается от  $-\theta_s$  и до  $+\theta_s$  (знак указывает на то, отстает ли или опережает дистанционный ток местный ток).

За счет емкостного тока защищаемой линии этот угол увеличивается на величину  $\theta_c$ .

Для этого вводят уставку по величине емкостного тока.

После пуска датчика грубой уставки начинается измерение интервала зоны блокировки. Защита складывает свой выходной сигнал с сигналом, полученным с другого конца линии через быстрый оптовход и определяет, в зависимости от измеренного интервала, необходимость отключения.

Если во время короткого замыкания устройство P547 получает сигнал, то оно будет ждать до тех пор, пока не будет получена пауза и начнется синхронизация. При начале новой выборки «измеренный интервал»  $\theta_d$  будет сравнен с уставкой. Если измеренный промежуток превышает уставку ( $\theta_s + \theta_c$ ), то устройство подает сигнал на отключение.

### Рекомендации фирмы по выбору основных уставок диффазной защиты

**1) Коэффициент k** должен обеспечить превосходство тока короткого замыкания над током нагрузки. Расчетный режим однофазное короткое замыкание. Минимальная величина коэффициента  $k$ , рассчитывается по формуле:

$$K > 3 \times (I_{FLC} / I_F) + 1$$

Где:

$I_{FLC}$  = Максимально возможный ток нагрузки

$I_F$  = Минимальный фазный ток, однофазного КЗ на другом конце линии.

### 2) Датчик прироста тока обратной последовательности

Рекомендуется, что бы уставка **Delta I2** была Enabled, поскольку датчики устройства P547 довольно эффективно определяет КЗ на землю.

Уставка **Delta I2 High** должна обнаруживать КЗ на землю на дальнем конце линии, как показано на Рис. 9. Составляющая обратной последовательности составляет третью часть от фазного тока КЗ -  $I_F$ :

$$\text{Delta I2 High} < I_F / 3$$

**Delta I2 Low** является блокирующим элементом при внешнем КЗ связанный с упомянутой раньше ступенью "trip" (отключение), также должен быть более чувствительным.

Обычно устанавливают: **Delta I2 Low** = от 50% до 80% от грубой уставки.

Обратите внимание, что по умолчанию программируемая схемная логика блокирует пуск обратной последовательности при включении линии, что бы избежать ложного отключения выключателя.

### 3) Датчики прироста КЗ тока прямой последовательности

Рекомендуется уставку **Delta I1** ставить Enabled, поскольку датчики устройства P547 довольно эффективно определяют трехфазное КЗ. Датчики прироста тока прямой последовательности нужны, в случае, если ток КЗ прямой последовательности А-В-С на удаленном конце линии может быть меньше, чем полный ток нагрузки и ступень I1 может при этом не сработать.

Уставка **Delta I1 High** обеспечивать определение трехфазного КЗ на удаленном конце линии, и должна соответствовать следующей формуле:

$$\text{Delta I1 High} < I_F \quad (I_F = \text{трехфазный ток КЗ})$$

**Уставка Delta I1 Low** является блокирующим уровнем при внешнем КЗ связанная со ступенью "trip" (отключение) описанной выше, и, следовательно, должна быть более чувствительной.

Типичная уставка: **Delta I1 Low** = от 50% до 80% от грубой уставки.

### 4) Датчики величины тока обратной последовательности

Рекомендуется уставку Start I2 все время ставить Enabled, что позволяет увеличить надежность системы, используя второй метод обнаружения несимметричных КЗ дополнительно по Delta I2.

Уставка Start I2 High должна гарантировано обнаруживать КЗ на землю на дальнем конце линии, как показано на Рис. 9.

Часть тока обратной последовательности составляет одну третью от  $I_F$ :  $\text{Start I2 High} < I_F/3$

Однако Start I2 не может охватить весь диапазон КЗ, некоторые КЗ на землю резистивного характера определяются более чувствительными датчиками прироста тока КЗ. Причина заключается в том, что большая несимметричная нагрузка не должна провоцировать пуск Start I2 Low. Если Start I2 Low активировано во время сигнализации продолжающейся передачи, то устройство MiCOM P547 выдаст сигнал повреждения схемы, и блокирует продолжающуюся работу ВЧ канала. Наименьшая уставка для Start I2 Low:

$$\text{Start I2 Low Max Load} \times (\text{Max \% Несимметрии}/100\%) \times K \text{ запаса}$$

Например:

$$\text{Max \% Несимметрия} = \text{Кратко-срочная железнодорожная нагрузка}/(\text{полезная нагрузка} \times 100\%)$$

K запаса = от 125 до 150%, увеличено для безопасности.

Даже если система передачи возможно симметрична, все равно рекомендуется установить несимметрию 5% или в два раза больше, чем I2, которое читается в столбике MEASUREMENTS1 устройства, во время проверки при вводе в эксплуатацию – при наибольшей нагрузке.

Уставка Start I2 Low, являющаяся блокирующим уровнем при внешнем КЗ, связана со ступенью "trip" (на отключение) Delta I2 High, и, следовательно, должна быть более чувствительной.

Типичная уставка: Start I2 Low = от 50% до 80% от грубой уставки.

Обратите внимание, что программируемая схемная логика блокирует пуски по току обратной последовательности при включении линии, чтобы избежать ложного отключения из-за тока, который будет протекать в момент включения выключателя. При этом нужно проверить, что величина тока прямой последовательности будет достаточна для пуска функций защиты Switch on to Fault (Включения на КЗ), которые, при необходимости, дополняются другими токовыми защитами (МТЗ, ЗНЗ или МТЗ I2> с независимыми характеристиками срабатывания).

#### **5) Датчики величины тока прямой последовательности**

Рекомендуется уставку Start I1 все время ставить Enabled, что позволяет увеличить надежность системы, используя второй метод обнаружения несимметричных КЗ дополнительно по Delta I1.

Уставка Start I1 High должна гарантировано обнаруживать трехфазное КЗ на дальнем конце линии.

Start I1 Low должна быть отстроена от максимального тока нагрузки или медленных качаний мощности х К запаса

#### **6) Угол блокировки и емкостной зарядный ток**

- Угол блокировки – рекомендуемое значение уставки для угла устойчивости  $\theta_s$  - 30 градусов. Уменьшение этого значения не рекомендуется без выполнения динамического моделирования короткого замыкания, которое направленного на определение необходимости увеличения напряжения точки изгиба характеристики ТТ. Увеличение угла грозит загромождением защиты.

- Емкостной зарядный ток - Эта уставка должна быть установлена равной половине полного зарядного тока всей линии. Устанавливая половину установившегося зарядного тока, подразумеваем, что с каждого конца линии компенсируется половина зарядного тока, равняясь при суммировании полной компенсации. Уставка рассчитывается в относительных единицах, как кратность к номинальной нагрузке.

### **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ЗАЩИТА L60 ФИРМЫ GE**

Дифференциально-фазная защита L60 выполнена по похожим принципам, но в то же время она имеет особенности, которые будут описаны ниже.

Орган управления передатчиком и пусковой орган используют один и тот же фильтр  $I_2-KI_1$ . Как видно коэффициент  $k$  поставлен перед током прямой последовательности. Для того, чтобы обеспечить преимущество тока обратной последовательности перед током прямой последовательности, что обеспечивает селективную работу защиты, этот коэффициент должен быть меньше 1. В защите он регулируется от 0.0 до 0.25. Возможно переключение защиты на ток  $3I_0$ .

Защита имеет чувствительный орган, пускающий передатчик и грубый орган, действующий на отключение.

Угол сдвига фаз, который как мы отмечали должен быть равен примерно  $60^\circ$ , определяется по длительности паузы в высокочастотном сигнале. Соответствующая длительность паузы при частоте 50Гц и соответствующей длительности периода переменного тока 20мс должна составить  $t_p = 20 \cdot 60 / 360 = 3.3\text{мс}$ .

Структурная схема защиты показана на рис. 7.42.

Как видно из рис.7.42 И1 (орган сравнения) на каждом конце линии сравнивает совпадение по времени положительной полуволны тока с отсутствием получаемого сигнала. Это происходит, когда выход FDH (грубый пусковой орган) фиксирует КЗ. Этот орган настраивается так, чтобы он не реагировал на токи нагрузки но реагировал на КЗ в зоне защиты линии. Таким образом, если при возникновении КЗ грубый пусковой орган реагирует, а сигнал на выходе приемника отсутствует 3,3 мс или более в течение прохождения положительной полуволны тока, то на выходе будет получен сигнал отключения.

Передатчики всех терминалов линии получают сигнал «1» от выходного сигнала FDL (чувствительный пусковой орган) и сигнал «0» от усилителя-формирователя прямоугольных импульсов SQ AMP через И2 во время положительной полуволны тока. Функция FDL необходима на всех терминалах во всех схемах блокировки дифференциально-фазной защиты для создания сигнала блокировки от соответствующих передатчиков. Этот сигнал поступает на удаленный приемник и блокирует отключение через орган сравнения при внешних КЗ. FDL имеет более чувствительную уставку, и поэтому действует раньше, чем удаленный FDH. Очевидно, что если при возникновении внешнего КЗ FDL не будет срабатывать, по крайней мере, также быстро, как удаленный FDH, то будет иметь место ложное отключение из-за отсутствия сигнала на выходе приемника. В основном FDL отстроены от токов нагрузки и имеют уставку меньше, чем FDH, чтобы срабатывать раньше FDH. При внутреннем КЗ токи, входящие в оба конца линии, совпадают по фазе. В этом случае при положительном сигнале на протяжении полупериода «1» от SQ AMP И1, от приемника поступает пауза на инвертирующий вход (опять «1»), а от грубого пускового органа также «1» орган «И1» выдает сигнала на отключение.

При внешнем КЗ ток, входящий в один терминал линии, смещен на  $180^\circ$  по отношению к току, входящему в другой терминал линии. При этих условиях в течение полупериодов, когда SQ AMP выдает выходные сигналы «1», соответствующий приемник также выдает выходной сигнал на инвертирующий вход «0», выходного сигнала от И1 отсутствует и срабатывание не произойдет.

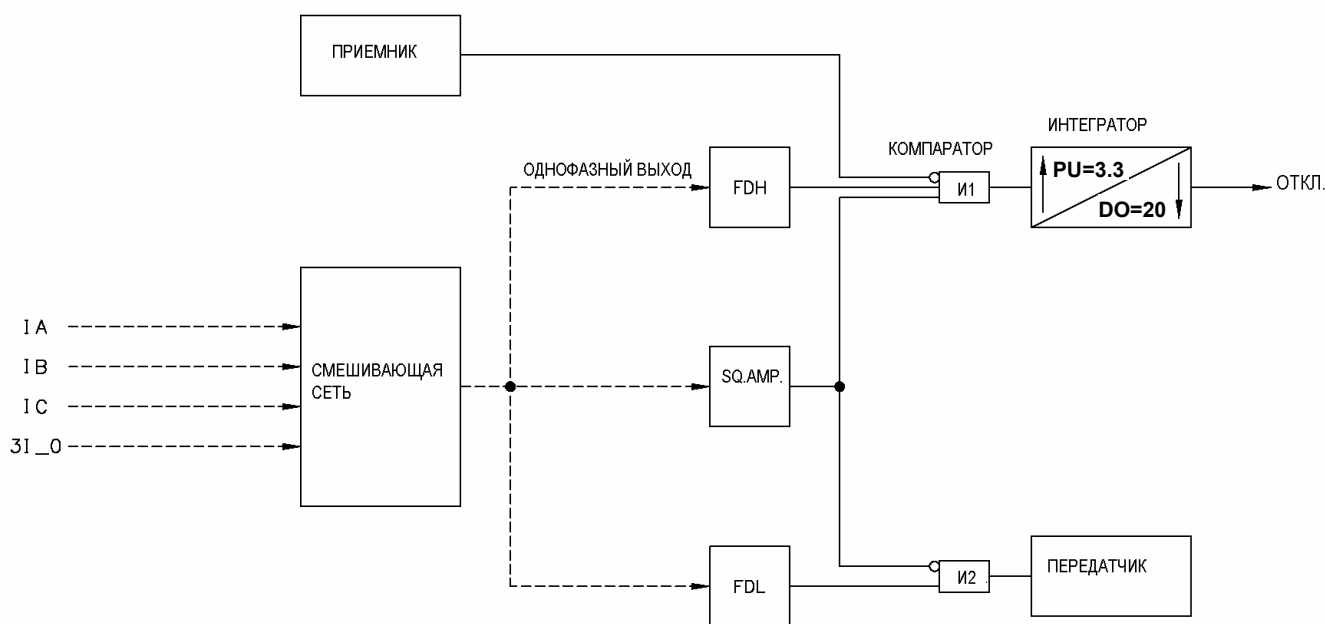


Рис. 7.42. Структурная схема дифференциально-фазной защиты L60.

### Регулировка симметрии

Выходной сигнал удаленного приемника должен точно совпадать с переключающим сигналом. Однако реально это не получается из-за задержки в выходных цепях. Поэтому, если передатчик был включен полпериода и потом отключен полпериода, выходной сигнал удаленного приемника будет присутствовать более, чем полпериода и отсутствовать менее, чем полпериода. Это явление главным образом обусловлено характеристикой фильтра в приемнике и самой аппаратурой передачи сигнала. Эта величина не постоянна, и зависит как от рабочих частот, так и уровня рабочего сигнала. Таким образом, эта асимметрия может меняться в эксплуатации от устройства к устройству и от одного момента времени до другого (со сменой атмосферных условий).

Регулировка симметрии находится во входной цепи приемника как показано на рис. 7.43. Она выполняется с задержкой срабатывания или с возврата в зависимости от того, задерживает или ускоряет приемник полученный сигнал. Уставка по времени устанавливается после того, как передатчики, приемники и аппаратура связи настроены и отрегулированы с нужной чувствительностью. Нужная уставка достигается путем сравнения моментов срабатывания приемника с моментами включения и отключения передатчика симметричным выходным сигналом органа управления. После приемник выдает симметричный выходной сигнал.

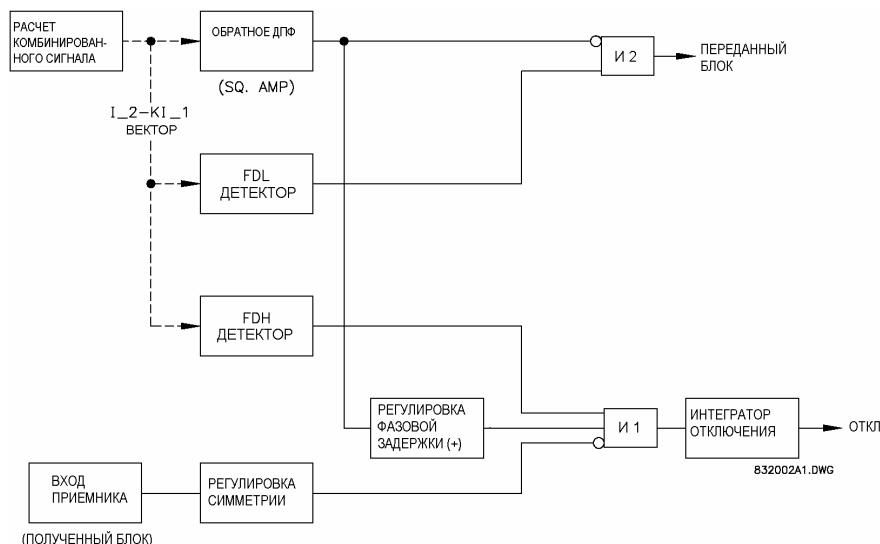


Рис.7.43. Схема блокировки с регулировкой симметрии и запаздывания сигнала приемника.

FDN –грубый ПО

FDL – чувствительный ПО SQ. AMP. – формирователь прямоугольных импульсов

Теперь выходной сигнал приемника симметричен, но возможен сдвиг по фазе в сторону запаздывания от фактически передаваемого сигнала на удаленном терминале. Для этого выходной сигнал может быть смещен по фазе относительно тока на удаленном конце линии.

Эта компенсация осуществляется с помощью задержки по времени во входной цепи компаратора.

Выходной сигнал корректировщика фазовой задержки по форме такой же, как у формирователя прямоугольных импульсов, но он отстает на время уставки. Эта выдержка времени устанавливается равной сумме трех выдержек (регулировки симметрии, передачи сигнала и приемника), описанных выше. Таким образом, внешнее КЗ будет вызывать выходной сигнал от регулятора симметрии, точно совпадающий по фазе и симметричный с выходным сигналом устройства фазовой задержки. Уставка реле времени фазовой задержки зависит от времени действия канала, а общее время отключения схемы зависит от уставки этого реле времени.

### Рекомендации фирмы по выбору основных уставок

#### 1) Выбор схемы управления

Для того чтобы защита работала при всех видах короткого замыкания необходимо принять для управления сигнал  $I_2-kI_1$ ; Для того чтобы защита работала только при замыканиях на землю выбирается управление по  $3I_0$ . При этом отключение при междупазных коротких замыканиях без замыкания на землю возлагается на дистанционную защиту, входящую в комплект. Вполне очевидно, что для наших условий целесообразно выбрать сигнал  $I_2-kI_1$ .

2) Коэффициент  $k$  уменьшающий влияние составляющей прямой последовательности по сравнению с составляющей обратной последовательности, как правило, выбирается равным 0.2 для обычных условий. Однако в случае, если токи короткого замыкания недостаточно велики по сравнению с током нагрузки, приходится уменьшать величину до 0.15 или 0.1. Необходимость этого определяется при выборе уставок пусковых органов.

3) Уставка чувствительного пускового органа **FDL** выбирается по формуле:

$$FDL = 1.1 \times k \times I_{1L}$$

Где  $I_{1L}$  максимальный ток нагрузки, а коэффициент  $k$  выбран ранее в п.2).

Если при этом чувствительность защиты к несимметричным КЗ оказывается недостаточной, то величину **k** нужно уменьшить и затем снова проверить чувствительность. Минимальная величина **k** должна быть не менее 0.05.

4) Уставка грубого пускового органа **FDH** выбирается по формуле:

$$FDH = 4/3 FDL + 0.375 I_{1c}$$

Где  $I_{1c}$  - зарядный ток прямой последовательности линии электропередачи.

Проверяется чувствительность пусковых органов к несимметричным КЗ, при необходимости опять уменьшается величина **k**. Если чувствительность к трехфазным КЗ оказывается недостаточной, отключение трехфазных КЗ возлагается на дистанционную защиту.

5) Уставка симметрирования (**SUMMETRY CH 1(2)**) выходного сигнала выполняется после анализа осциллограммы. Определяется длительность импульса и паузы и сравнивается между собой и определяется длительность необходимого изменения импульса. Так, например, если импульс длиннее паузы на 4мс, вводится уставка равной: **-2мс**. Если пауза длиннее импульса на 3мс водится уставка: **+1.5мс**.

5) Уставка компенсации времени сдвига импульсов по концам линии электропередачи (**PHASE DELAY CH1(2)**).

При выборе уставки необходимо суммировать три составляющих: задержка сигнала в оборудовании, сдвиг фазы тока по концам линии, время передачи сигнала на противоположный конец линии. Указанные величины вводятся в оба реле автоматически. Пользователь с помощью осциллографа может проконтролировать результат и внести корректировку.

6) Угол блокировки (**STABILITY ANGLE**)

Угол блокировки определяется следующими составляющими

$$\varphi_s = \varphi_{load} + \varphi_{capac} + \varphi_{ct}$$

где:  $\varphi_{load}$  сдвиг фаз тока между концами линии от тока нагрузки;

$\varphi_{capac}$  сдвиг фаз от емкостного тока линии. Может быть определен по формуле

$$\varphi_{capac} = \arctan (i_{capac} / I_{FDH})$$

где:  $i_{capac}$  – емкостной ток **линии**,  $I_{FDH}$  – уставка грубого пускового органа.

$\varphi_{ct}$  - угловая погрешность трансформаторов тока и схемы компенсации сдвига фаз. Может быть принята равной 10-20°.

Как правило, принимается угол  $\varphi_s$  равным 60°, или соответственная ширина паузы равна

#### 7.5.5. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Для параллельных линий, присоединяемых к шинам через самостоятельные выключатели, нужна защита, которая могла бы выбирать и отключать только одну поврежденную линию. Таким свойством обладает направленная поперечная дифференциальная защита.

Защита в сети 6-35 кВ где необходимо отключать только междуфазные короткие замыкания включается на фазы А и С как и остальные защиты в этой сети. В сети 110-220 кВ, к этим двум реле добавляется третий элемент, включаемый на разность токов  $3I_0$ .



Упрощенная принципиальная схема направленной поперечной дифференциальной защиты приведена на рис. 7.44. Защита состоит из пускового органа  $KA$ , обычно осуществляемого токовыми реле, включаемыми так же, как в токовой поперечной дифференциальной защите, и органа направления мощности  $KW$ , включенного на разность токов защищаемых линий и на напряжение шин подстанции. Оперативный ток подается на реле защиты через последовательно соединенные вспомогательные контакты выключателей защищаемых линий, для того чтобы защита автоматически выводилась из действия при отключении одной из линий во избежание ее неселективного действия при внешнем КЗ.

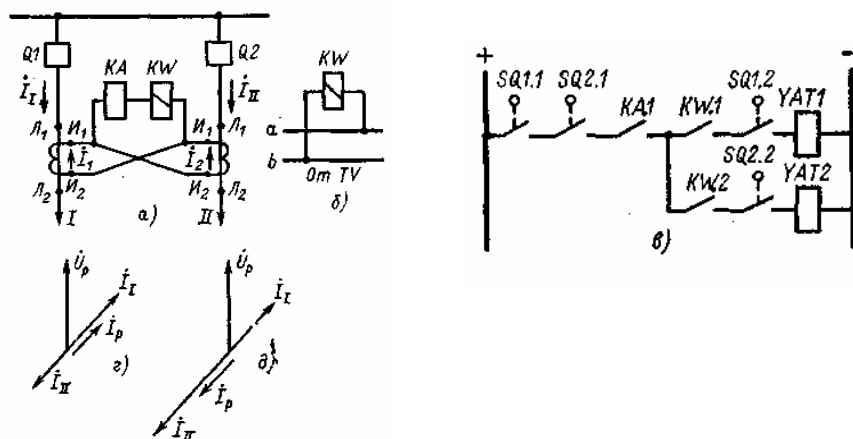


Рис. 7.44. Упрощенная схема направленной поперечной дифференциальной защиты параллельных линий и поясняющие векторные диаграммы:  
а — токовые цепи; б — цепи напряжения; в — цепи оперативного тока; г — векторная диаграмма токов при КЗ на линии I; д — то же на линии II.

В качестве органа направления мощности используются те же реле направления мощности, что и в схемах максимальных направленных защит. Как известно, значение и знак вращающего момента у реле направления мощности зависят от значения тока, напряжения и угла между ними. Напряжение, подводимое к реле, меняется только по значению в зависимости от удаленности места КЗ от шин подстанции, где установлена защита.

В то же время ток, подводимый к реле, изменяется не только по значению. В зависимости от того, на какой из линий произошло повреждение, изменяется также и направление прохождения тока через реле направления мощности (см. рис. 7.45 г и д).

Так, при повреждении на линии I ток в линии I будет больше тока в линии II, и поэтому их разность, т. е. ток в реле, будет иметь такое же направление, как и ток в линии I. В результате реле направления мощности замкнет контакт  $KW.1$  и защита отключит поврежденную линию I.

При повреждении на линии II ток КЗ в линии II будет больше тока в линии I, следовательно, их разность, т. е. ток в реле, изменит направление на противоположное. При этом знак вращающего момента реле направления мощности также изменится на противоположный и реле, замкнув контакт  $KW.2$ , обеспечит действие защиты на отключение поврежденной линии II.

Ток срабатывания пусковых токовых реле выбирается по двум условиям:

- 1) защита не должна действовать ложно от токов небаланса нормального режима и при внешнем КЗ;
- 2) защита не должна действовать ложно от максимального тока нагрузки в режиме, когда на одном конце включены выключатели обеих линий, а на другом — только одной линии, что имеет место при операциях по включению и отключению линий.

Направленная поперечная дифференциальная защита имеет «мертвую зону» при повреждениях вблизи шин противоположной подстанции. При возникновении КЗ в этой зоне направленная поперечная дифференциальная защита не отказывает в действии, как токовая, а действует каскадно.

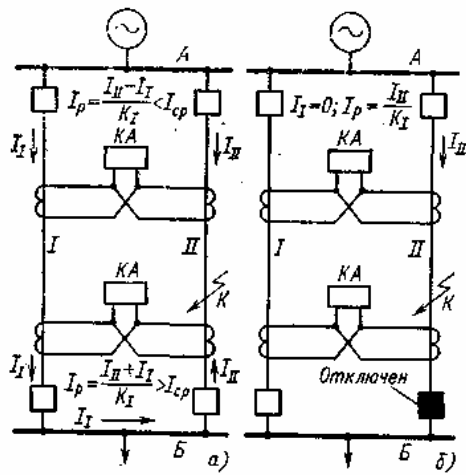


Рис. 7.45. Каскадное действие направленной поперечной дифференциальной защиты; а — действует защита со стороны приемной подстанции; б — после отключения выключателя на приемной подстанции действует защита на питающей подстанции

Так, при повреждении в точке К на линии II вблизи шин подстанции Б (рис. 7.45 токи  $I_I$  и  $I_{II}$  будут близки по величине и токораспределение будет таким, как показано на рис. 7.45 а. В результате защита на подстанции А действовать не будет, а на подстанции Б

подействует и отключит выключатель поврежденной линии II. После отключения выключателя линии II со стороны подстанции Б токораспределение изменится и станет таким, как показано на рис. 7.14, б. Прохождение тока КЗ по линии I прекращается, вследствие чего ток в реле защиты подстанции А становится равным полному току КЗ, проходящему по линии II. Защита при этом сработает и отключит выключатель линии II, чем будет полностью ликвидировано КЗ на этой линии.