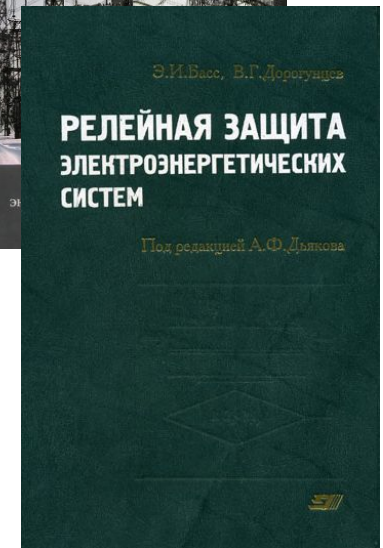
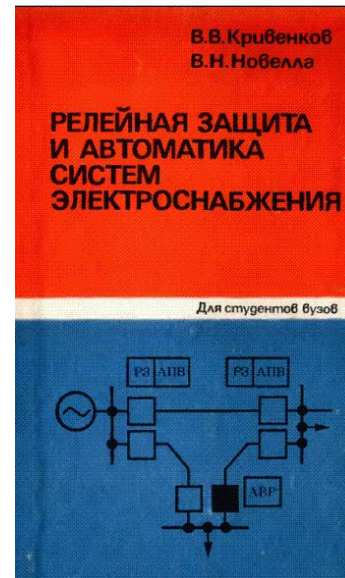
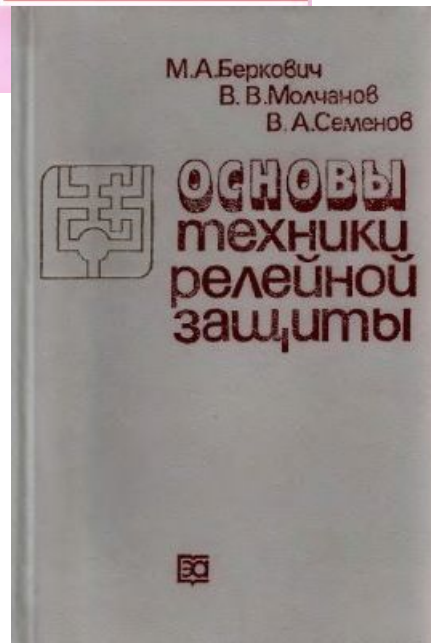
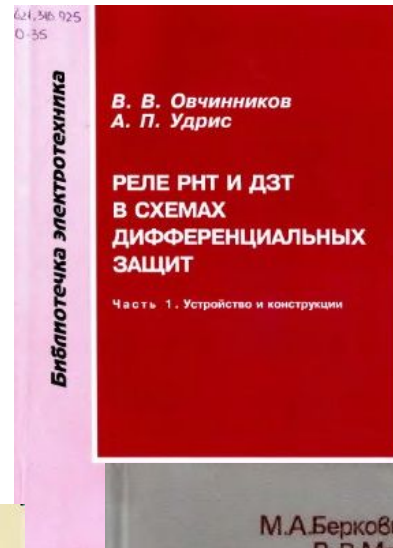
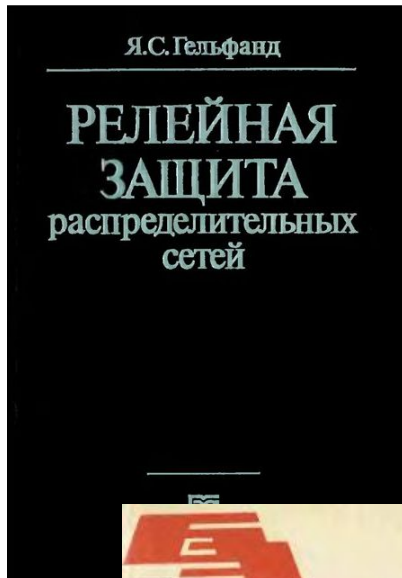


Релейная защита энергетических систем

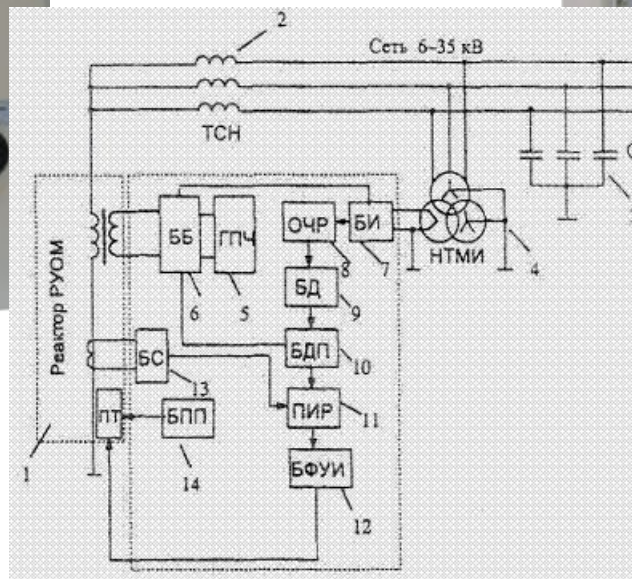
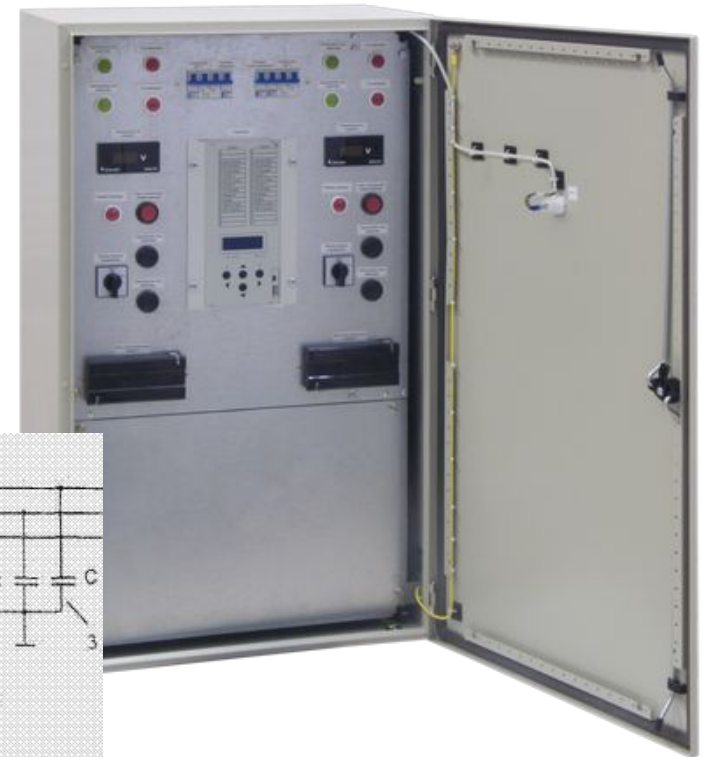


Релейная защита электроэнергетических систем

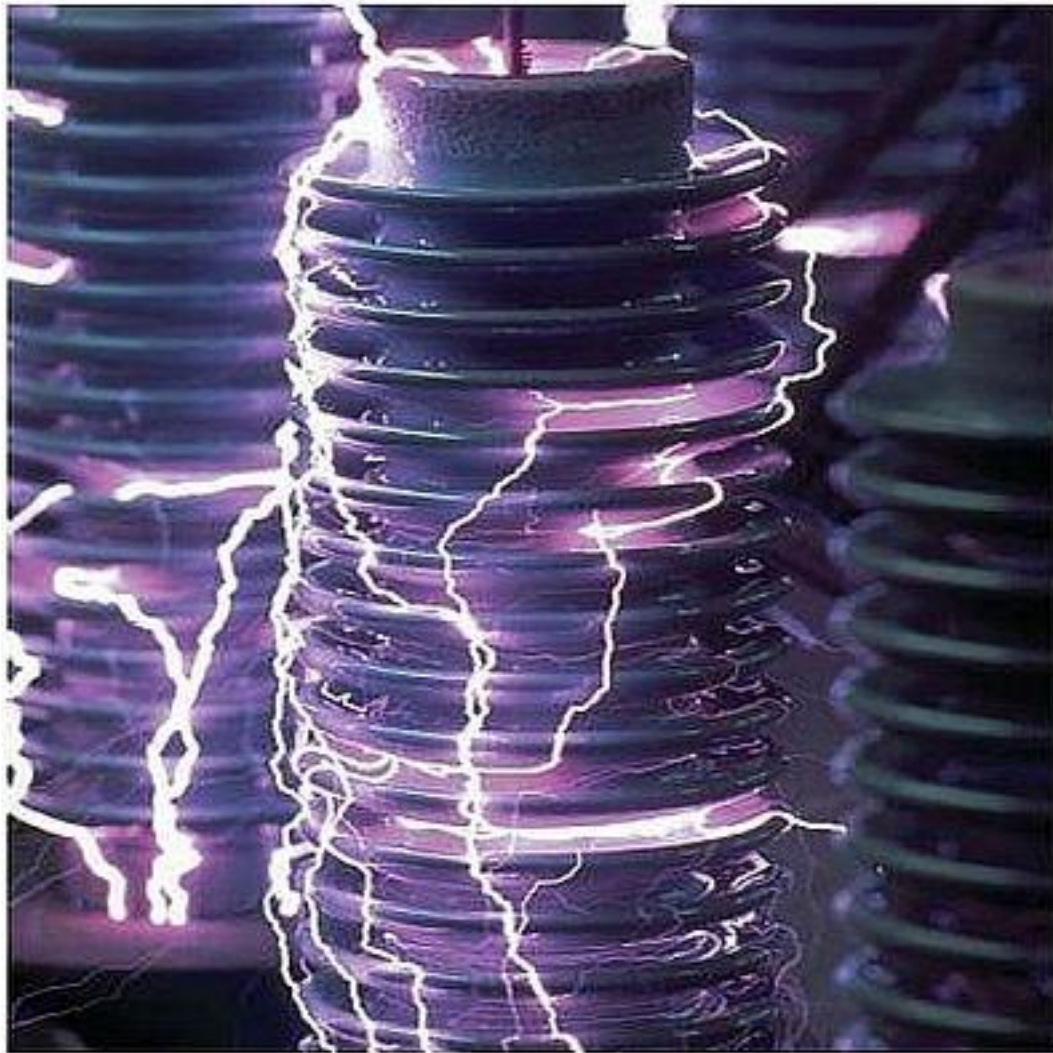


**ЗАЩИТА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ С МАЛЫМИ
ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ
НА ЗЕМЛЮ**

Блок управления дугогасящим реактором



Защищаемые объекты



Дугогасящие реакторы

elec.ru



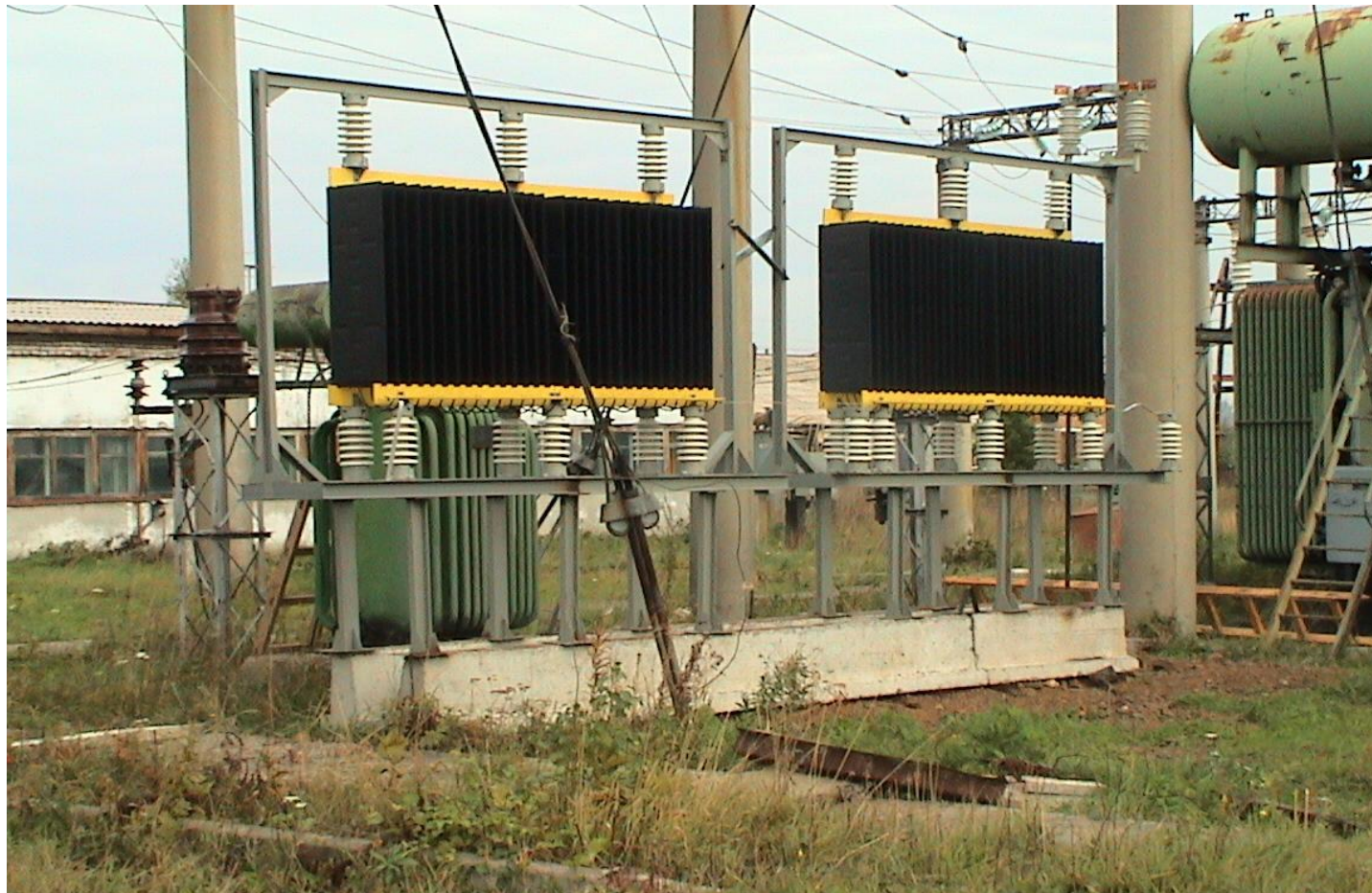
Дугогасящие реакторы



Дугогасящие реакторы



Резистор для сети 35 кВ ПС Тисульская ВЭС «Кузбассэнерго»



ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В отличие от сети с глухо заземлённой нейтралью, **однофазное замыкание** в сети с изолированной нейтралью **не сопровождается появлением больших токов КЗ** поскольку ток повреждения замыкается на землю через очень большие сопротивления емкостей фаз сети. **Поэтому применительно к данным сетям говорят о замыкании на землю, а не о коротком замыкании на землю!**

Рассмотрим характер изменения напряжения и токов в сети и их векторные диаграммы в нормальных условиях и при однофазном замыкании на землю ($K_3^{(1)}$) в режиме когда нейтраль сети изолирована, замкнута через дугогасящий реактор или через активный резистор. Для упрощения принимаем, что нагрузка сети отсутствует. Это позволяет считать фазные напряжения во всех точках сети неизменными и равными ЭДС фаз источника питания. На рис, 11.1 приведена радиальная сеть с изолированной нейтралью с источником питания (генератором или понижающим трансформатором) и одной эквивалентной ПЭП условно

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Распределенная емкость фаз относительно земли заменена эквивалентной сосредоточенной емкостью C_0 . Сопротивления R и X ЛЭП не учитываются. Емкость источника питания также не учитывается вследствие ее малого значения.

В нормальном режиме напряжения проводов А, В и С по отношению к земле равны соответствующим фазным напряжениям $\underline{U}_{A'}$, $\underline{U}_{B'}$, $\underline{U}_{C'}$, которые при отсутствии нагрузки равны ЭДС источника питания $\underline{E}_{A'}$, $\underline{E}_{B'}$, $\underline{E}_{C'}$. Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду (рис. 11.2, а), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжение в нейтрали N отсутствует: $UN = 0$. Под действием фазных напряжений через емкости фаз относительно земли $C_{a'}$, $C_{b'}$, $C_{c'}$ проходят токи, опережающие фазные напряжения на 90° .

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

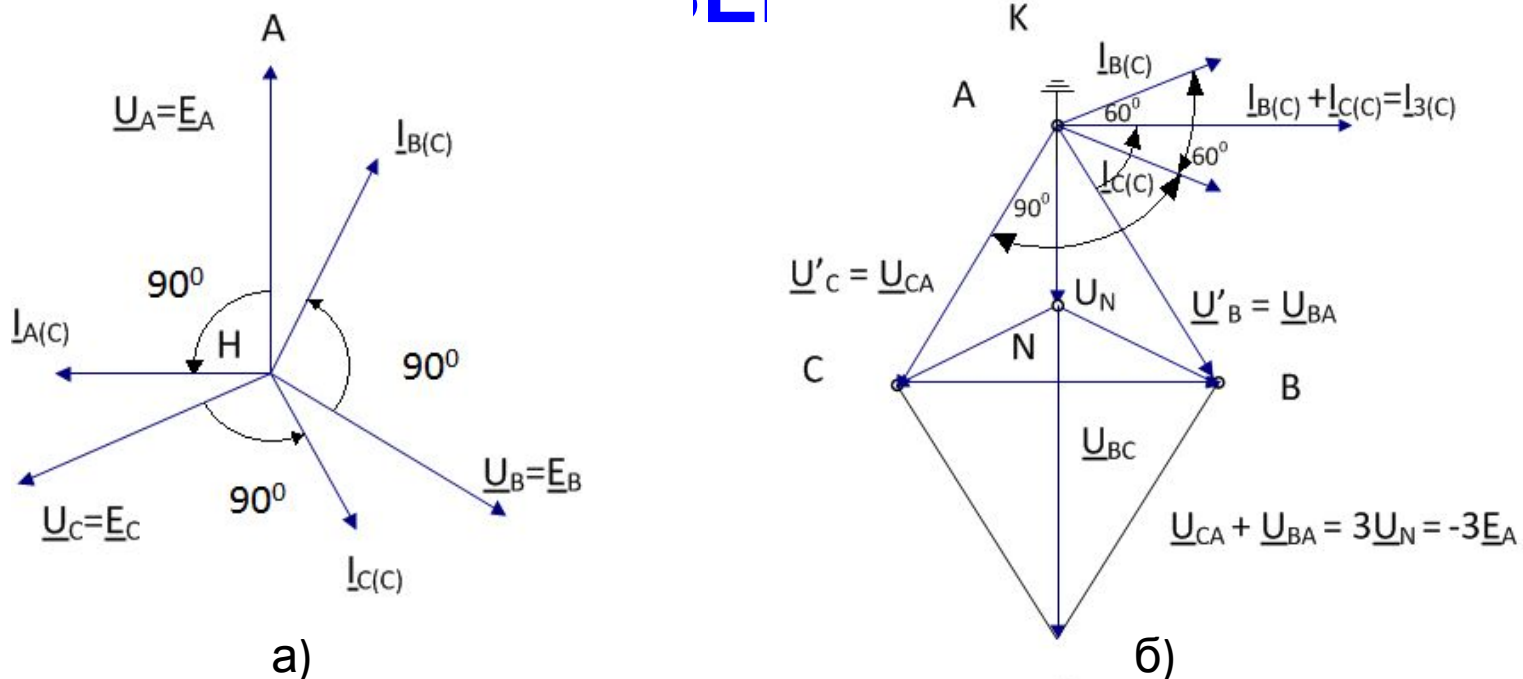


Рис. 11.2. Векторные диаграммы фазных токов и напряжений:
а - в нормальном, симметричном режиме; б - при замыкании одной фазы на землю

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / -jX_C; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B / -jX_C; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C / -jX_C \quad (11.1)$$

где $X_C = 1/\omega C_0$.

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому $3I_0$ отсутствует (рис. 11.2, а).

Металлическое замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью. Допустим, что повредилась фаза А (см. рис. 11.1), тогда ее фазное напряжение относительно земли снижается до нуля ($\underline{U}_a = 0$). Напряжение нейтрали $U_N^{(t)}$ по отношению к земле становится равным $\underline{U}_N = \underline{U}_{KN}$ (рис. 11.1 и 11.2,б), т. е. напряжению, равному по значению и обратному по знаку заземлившейся фазы:

$$\underline{U}_N = \underline{U}_{KN} = -\underline{E}_A \quad (11.2)$$

Напряжение неповрежденных фаз относительно земли повышаются до между фазных значений $\underline{U}_B = \underline{U}_{BA}$ и $\underline{U}_C = \underline{U}_{CA}$. Междупазные напряжения остаются неизменными, что видно из рис. 11.1 и 11.2.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

На рис. 11.2,б построена векторная диаграмма напряжений фаз и нейтрали сети по отношению к земле ($U_{B(1)}$, $U_{C(1)}$, U_N); точки А, В, С представляют потенциалы проводов, точка N соответствует нейтрали источника питания, точка А связана с землей и имеет нулевой потенциал.

Токи при замыкании на землю. В месте повреждения К проходят токи, замыкающиеся через емкости неповрежденных фаз сети (11.1). Поскольку $U_A = 0$, то $I_{A(C)} = 0$. В двух других фазах под действием напряжений U'_B и U'_C появляются токи, опережающие на 90 эл. град. эти напряжения:

$$I_{B(C)} = -jU_{BA}/X_C \text{ и } I_{C(C)} = -jU_{CA}/X_C \quad (11.3)$$

Ток $I_{з(C)}$ в месте повреждения равен сумме токов о фазах В и С (рис. 11.1):
 $I_{з(C)} = (I_{B(C)} + I_{C(C)})$ с учетом (11.3)

$$I_{з(C)} = j\left(\frac{U_{BA}}{X_C} + \frac{U_{CA}}{X_C}\right) = \left(\frac{U_{BA} + U_{CA}}{X_C}\right)$$

Поскольку $U_{BA} + U_{CA} = -3E_A$ (рис. 11.2, б):

$$I_{з(C)} = -3E_A/X_C = -j3U_{A\phi}/X_C \quad (11.4)$$

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Таким образом, ток $I_{3(C)}$ равен утроенному значению нормального емкостного тока фазы $I_{\phi(C)} = U_{\phi}/X_C$. Из рис. 11.2,6 видно, что ток $I_{3(C)}$ опережает от U_N на 90° . Ток $I_{3(C)}$ может быть определен по формуле $I_{3(C)} = 3I_{C\phi} = 3U_{\phi}/X_C = 3U_{\phi} \omega LC_{уд}/10^{-6}$ где L - общая протяженность одной фазы сети; $C_{уд}$ - емкость 1 км фазы относительно земли.

В воздушных сетях $I_{3(C)}$ находится в пределах от долей до нескольких десятков ампер; в кабельных - от нескольких ампер до 200-400 А в сетях больших городов.

Токи и напряжения нулевой последовательности при замыканиях на землю. При замыкании на землю в фазных напряжениях и токах появляются составляющие НП;

$$\underline{U}_{0K} = \frac{1}{3} (\underline{U}'_A + \underline{U}'_B + \underline{U}'_C); \quad (11.5)$$

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3} (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C); \quad (11.6)$$

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

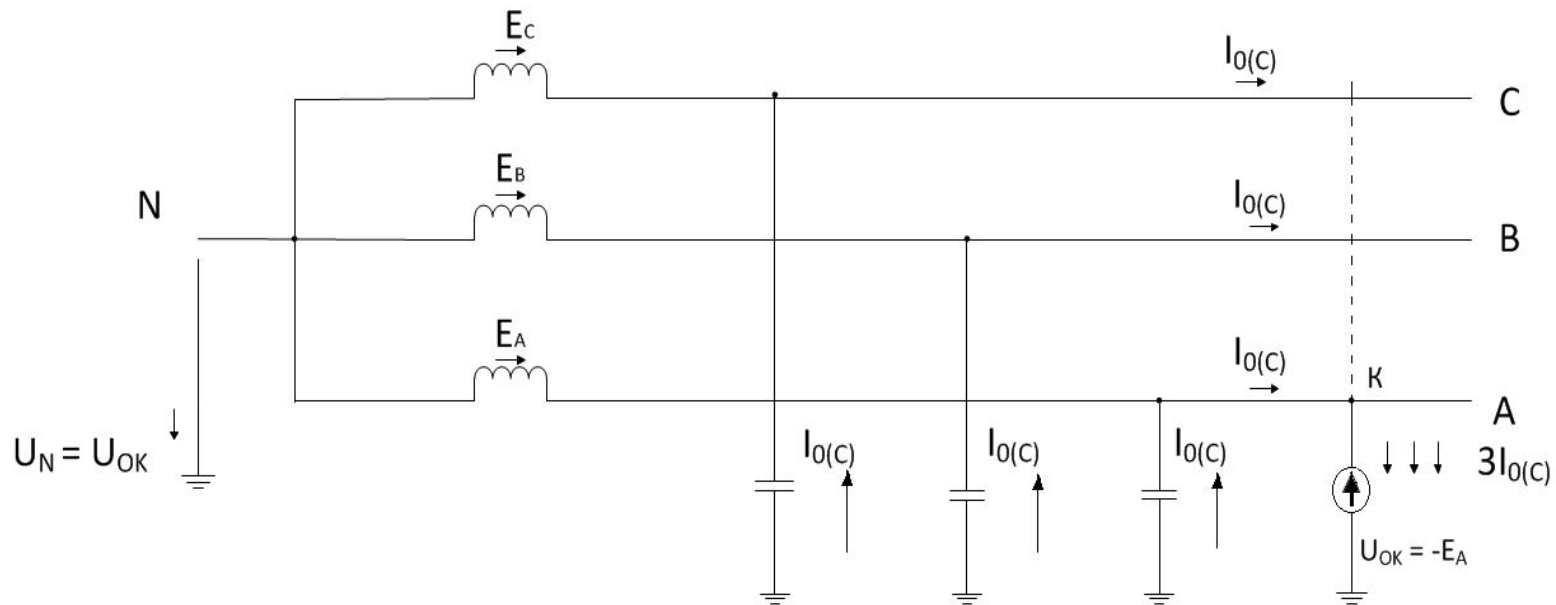


Рис. 11.3. Протекание токов нулевой последовательности при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Подставляя в (11.5) значения \underline{U}_B и \underline{U}_C получаем

$$U_{OK} = \frac{1}{3} (U_{BA} + U_{CA}) = -E_A = U_N. \quad (11.7)$$

Поскольку сопротивление проводов значительно меньше X_C во всех точках сети $U_0 = U_{OK}$. Токи I_0 возникающие под действием U_{OK} замыкаются через емкость фаз и заземленные нулевые точки генераторов и трансформаторов, если такие заземления имеются. Из распределения токов I_0 , показанного на рис. 11.3, следует:

$$I_{0(C)} = -jU_{OK}/X_C = -jE_A/X_C = -jU_\Phi/X_C, \quad (11.8)$$

где U_Φ - нормальное напряжение поврежденной фазы.

Из приведенного рассмотрения можно сделать вывод, что емкостный ток в месте замыкания

$$I_{з(С)} = 3 I_{0(С)} \quad (11.9)$$

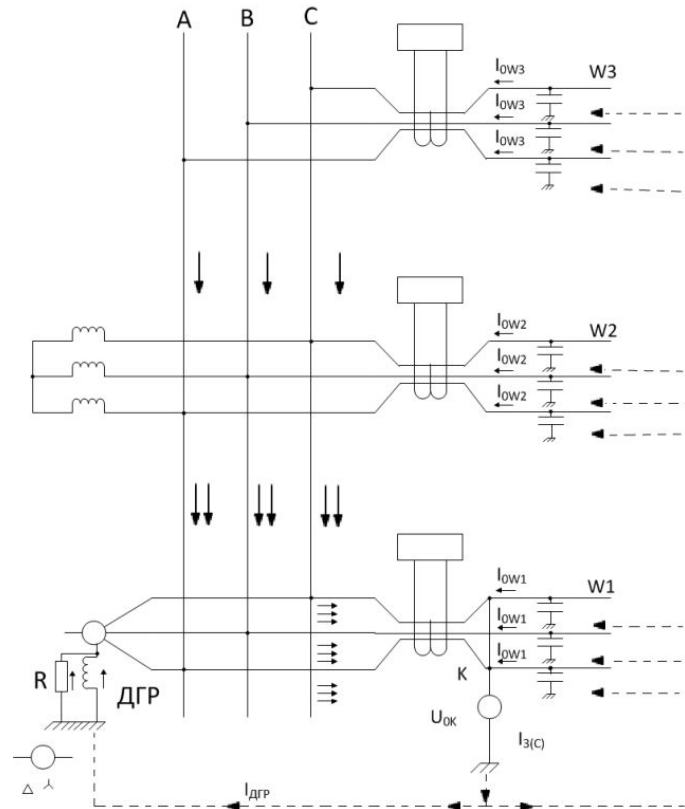
Токи $3 I_{0(С)}$ и $I_{з(С)}$ совпадают по фазе и опережают вектор напряжения.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

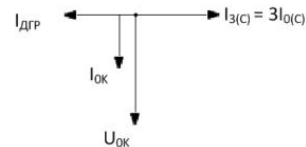
Компенсированная сеть. Рассмотрим сеть, нейтраль которой заземлена через дугогасящий реактор *ДГР*, предназначенный для компенсации емкостных токов в месте повреждения (рис. 11.4). При замыкании на землю напряжения во всех точках такой сети имеют те же значения, что и в сети с изолированной нейтралью. При наличии *ДГР* под действием напряжения $U_{OK} = U_N = -E_A$ возникает индуктивный ток $I_{ДГР}$, который проходит по замкнувшейся на землю фазе *A* поврежденной ЛЭП *W1* к месту замыкания *K* и по земле возвращается в *ДГР*:

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Рис. 11.4. Токи нулевой последовательности при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью или заземленной через ДГР или активное сопротивление:
а – распределение токов
б – векторная диаграмма



а)



ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

$I_{\text{ДГР}} = -E_A / X_{\text{ДГР}}$. Этот ток накладывается на емкостный ток $I_{3(C)}$.
Являясь индуктивным, $I_{\text{ДГР}}$ противоположен по фазе $I_{3(C)}$. Результирующий ток

$$I_3 = I_{\text{ДГР}} + I_{3(C)} = \frac{E_A}{X_{\text{ДГР}}} + 3E_A \omega C_0.$$

При полной компенсации, которую обычно стремятся обеспечить, $I_{\text{ДГР}} = I_{3(C)} = 3E_A \omega C_0$, и тогда результирующий ток $I_3 = 0$.
Емкостный ток НП $I_{0(C)}$ (рис.11.4, а) проходит по всем неповрежденным и поврежденной ЛЭП. Ток $I_{\text{ДГР}}$ проходит только по поврежденному присоединению $W1$. Ток I_0 в обмотках генератора отсутствует, поскольку нулевая точка его изолирована. В неповрежденных ЛЭП (w_n) сумма фазных емкостных токов при замыканиях на землю всегда отлична от нуля и равна $3I_{0(C)Wn}$. Токи $I_{0(C)Wn}$ направлены к шинам, их значения определяются емкостями C_0 ЛЭП:

$$\sum_n I_{\phi Wn} = \sum_n 3I_{0Wn} = \sum_n 3U_{0K} \omega C_{0Wn} \quad (11.10)$$

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В поврежденной ЛЭП W1 на участке от шин подстанции до точки замыкания К ток $3I_{0\text{ п.л.}}$ равен суммарному току $\sum 3I_{0(c)\Sigma} = I_{3(c)}$ в месте повреждения за вычетом тока

$$3I_{0(c)\text{ п.л.}} = 3U_{0к} \omega (C_{0\Sigma} - C_{0\text{ нп.л.}}). \quad (11.11)$$

Ток $3I_{0(c)\text{ п.л.}}$ направлен от шин подстанции к месту замыкания, он всегда противоположен токам $3I_{0(c)}$ в неповрежденных ЛЭП.

При наличии ДГР ток в начале поврежденной ЛЭП $3I_{0\text{ п.л.}}$ равен разности токов $I_{\text{ДГР}}$ дугогасящего реактора и суммарного емкостного тока неповрежденных ЛЭП:

$$3I_{0\text{ п.л.}} = I_{\text{ДГР}} - \sum 3I_{0(c)\text{ нп.л.}} = \frac{3U_{0к}}{X_{\text{ДГР}}} - (3U_{0к} \omega C_{0\Sigma} - 3U_{0к} \omega C_{0\text{ W1}}). \quad (11.12)$$

При полной компенсации $I_{\text{ДГР}} = \sum 3I_{0(c)\text{ нп.л.}}$ и тогда

$$3I_{0\text{ п.л.}} = 3U_{0к} \omega C_{0\text{ W1}}. \quad (11.13)$$

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Следовательно, в компенсированной сети в начале поврежденной ЛЭП (между шинами и точкой К) проходит остаточный индуктивный ток ДГР, численно равный емкостному току поврежденной ЛЭП ($W1$ на рис. 11.4). Направление этого тока при полной компенсации будет совпадать с направлением тока в неповрежденных ЛЭП. Распределение токов I_0 , показанное на рис. 11.4, справедливо для любых значений i , т. е. для всех гармоник (кроме кратных трем) токов I_0 и I_ϕ .

Токи в сети с активным сопротивлением. Иногда параллельно дугогасящему реактору включается резистор R (показано пунктиром на рис. 11.4). Тогда, кроме токов $I_{0(C)}$ и $I_{ДГР}$, появляется третий ток $I_R = U_{OK}/R$, совпадающий по фазе с U_{OK} и сдвинутый на 90° по отношению к токам $I_{0(C)}$ и $I_{ДГР}$. Таким образом, при наличии резистора R ток в месте повреждения

$$I_3 = \sqrt{(I_{ДГР} - 3I_{0(C)})^2 + I_R^2} \quad (11.14)$$

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

При замыкании на землю через переходное сопротивление R_{Π} напряжение поврежденной фазы $U_A = I_3 R_{\Pi} = U_{OK}$, а напряжение в нейтрали $\underline{U}_N = -\underline{E}_A + \underline{U}_K$, т. е. оно оказывается меньшим, чем при металлическом замыкании. Соответственно уменьшаются напряжения неповрежденных фазы относительно земли, а также токи I_0 и I_3 . В емкости поврежденной фазы появляется ток $\underline{I}_A = \frac{U_K}{-jX_C}$.

В расчетах снижение тока и напряжения НП, обусловленное сопротивлением R_{Π} учитывается коэффициентом полноты замыкания $\beta = U_{OK}/U_{\Phi}$. При металлическом замыкании $\beta = 1$, так как $U_{OK} = U_{\Phi}$. При неполном замыкании на землю $U_{OK} = \beta U_{\Phi}$, ток $I_0 = \beta U_{\Phi}/X_C$, а ток $I_3 = 3I_0 = 3\beta U_{\Phi}/X_C$. (11.15)

11.2 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Поскольку замыкания на землю не вызывают появления сверхтоков и не искажают значения междуфазных напряжений, то они не отражаются на питании потребителей и не сопровождаются перегрузкой оборудования опасными токами. Поэтому в отличие от КЗ замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью не требуют немедленной ликвидации.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Однако отключение замыканий на землю является все же необходимым, так как в результате теплового воздействия тока замыкания на землю и электрической дуги в месте повреждения возможно повреждение изоляции между фазами на кабельных ЛЭП и переход однофазного замыкания в между, фазное КЗ. Помимо этого, из-за перенапряжений, вызываемых замыканием на землю, возможен пробой или перекрытие изоляции на неповрежденных фазах, что приводит к образованию двойных замыканий на землю в разных точках сети.

В России принято выполнять РЗ от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью с действием на сигнал. Дежурный персонал принимает меры к переводу нагрузки поврежденной ЛЭП на другой источник питания, разгружая поврежденную ЛЭП, и затем отключает ее. В современных разветвленных городских сетях 6-10 кВ эти операции требуют значительных переключений, затягивающих ликвидацию повреждений. Поэтому в автоматизированных сетях целесообразно применять селективную защиту с действием на отключение повреждения.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Защиты от замыканий на землю независимо от режима компенсации должны быть селективными, иметь высокую чувствительность; последнее вызывается тем, что токи, на которые реагирует РЗ, очень малы.

Особые требования предъявляются к РЗ от замыканий на землю в сетях, питающих электродвигатели шахт, торфоразработок, карьеров и передвижных установок. Здесь представляет опасность "напряжение прикосновения" и переход замыкания на землю одной фазы в двойное замыкание. При двойном замыкании на землю "шаговое напряжение" и "напряжение прикосновения" достигают значений, опасных для людей, обслуживающих установки. Поэтому для безопасности персонала, ведущего добычу торфа, РЗ от замыкания на землю в таких сетях должна при появлении "земли" немедленно отключить поврежденный участок. Эти РЗ должны отличаться особенно высокой чувствительностью, так как емкостные токи в сетях, питающих торфоразработки, обычно не превышают 0,5-1 А. Замыкания на землю в воздушных сетях, особенно в населенных районах, также целесообразно отключать от РЗ для обеспечения безопасности населения. Защита должна надежно действовать как при металлическом, так и при неполном

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

замыкании через переходное сопротивление R_{Γ} . Чувствительность РЗ считается достаточной, если она действует с k_{γ} более 1.25 для кабельных и 1.5 для воздушных ЛЭП.

11.3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

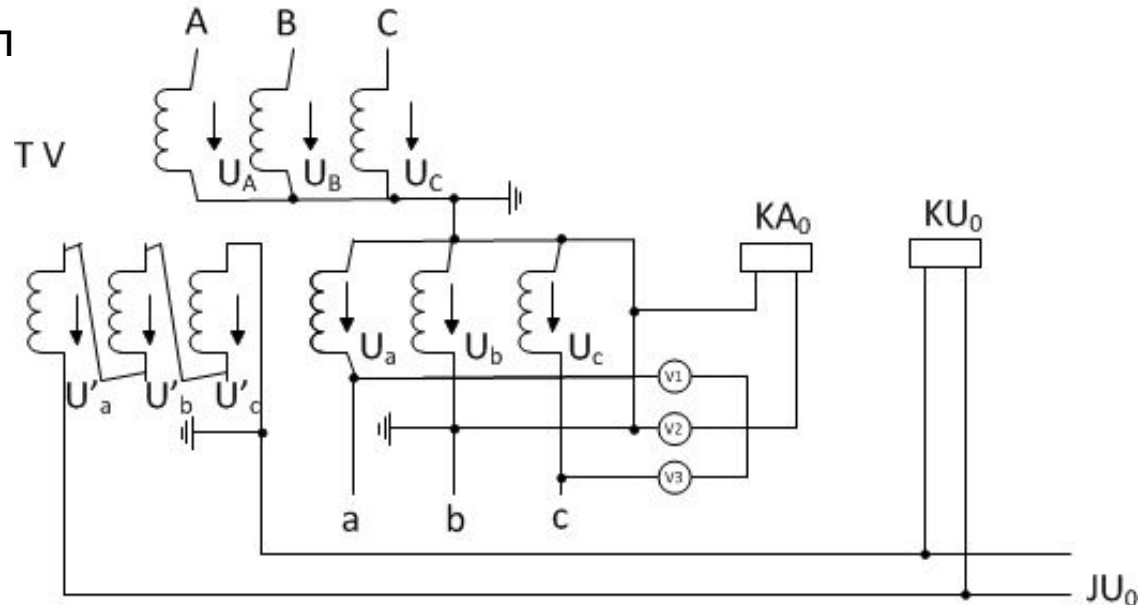
Все виды РЗ от однофазных замыканий на землю реагируют на составляющие нулевой последовательности тока I_0 и напряжения U_0 . Простейшим устройством является неселективная сигнализация о появлении замыкания на землю, реагирующая на $3U_0$. Такое устройство состоит из одного реле повышения напряжения KV_0 , которое питается напряжением $3U_0$ от обмоток ТН, соединенных по схеме разомкнутого треугольника (рис. 11.5). Подобная *неселективная* сигнализация устанавливается на шинах РУ 6-35 кВ. Возможен и другой вариант ее исполнения, изображенный на том же рисунке. В этой схеме сигнал о появлении земли даст реле KA_0 , включенное в нулевой провод вольтметров контроля изоляции фаз сети, показания которых позволяют определить поврежденную фазу.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Селективная сигнализация должна дополняться РЗ, способной определять, на каком участке сети возникло замыкание на землю. В качестве селективных применяются токовые ненаправленные и направленные РЗ, реагирующие на составляющие НП.

Все применяемые РЗ можно подразделить на четыре группы защиты, реагирующие:

1) на естественный емкостный ток сети (такой способ РЗ возможен только при отсутствии компенсации ил сети);



ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

- 2) на токи НП, создаваемые искусственным путем;
- 3) на токи высших гармоник, возникающие в поврежденной ЛЭП при резонансной компенсации емкостных токов в установившемся режиме;
- 4) на токи переходного режима, возникающие в первый момент замыкания.

11.4. ФИЛЬТРЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Для получения составляющих током I_0 возможно использование трехтрансформаторных фильтров, применяемых в сетях с глухозаземленными нейтралями или специальных трансформаторов тока нулевой последовательности (рис. 11.6). Как уже отмечалось, токи очень малы, поэтому трехтрансформаторные фильтры не могут применяться.

Действительно, выполнение чувствительной селективной сигнализации с использованием обычных трансформаторов тока и электромеханических реле встречает ряд серьезных трудностей:

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

1) номинальный ток обычных ТТ выбирается по току нагрузки линии, и поэтому они имеют сравнительно большие коэффициенты трансформации. Вследствие этого вторичный ток замыкания на землю имеет очень малое значение. Так, например, если ток замыкания на землю составляет 18 А, а ТТ имеют коэффициент трансформации 600/5, то вторичный ток равен 0,15 А;

2) для включения на такой ток необходимо выбрать самое чувствительное токовое реле РТ 40/0.2, которое имеет сопротивление обмоток 80 Ом. Включение реле с такими большими сопротивлениями приводит к тому, что только часть тока попадает в реле, а другая часть, называемая «током отсоса», бесполезно замыкается через вторичные обмотки ТТ неповрежденных фаз. Ток отсоса может достигать 40-50%.

Значительно большую чувствительность обеспечивает сигнализация при однофазных замыканиях на землю, выполняемая на специальных ТТ, имеющих на выходе малые токи небаланса и позволяющие благодаря этому выполнить более чувствительные РЗ.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА

ЗЕМЛЮ

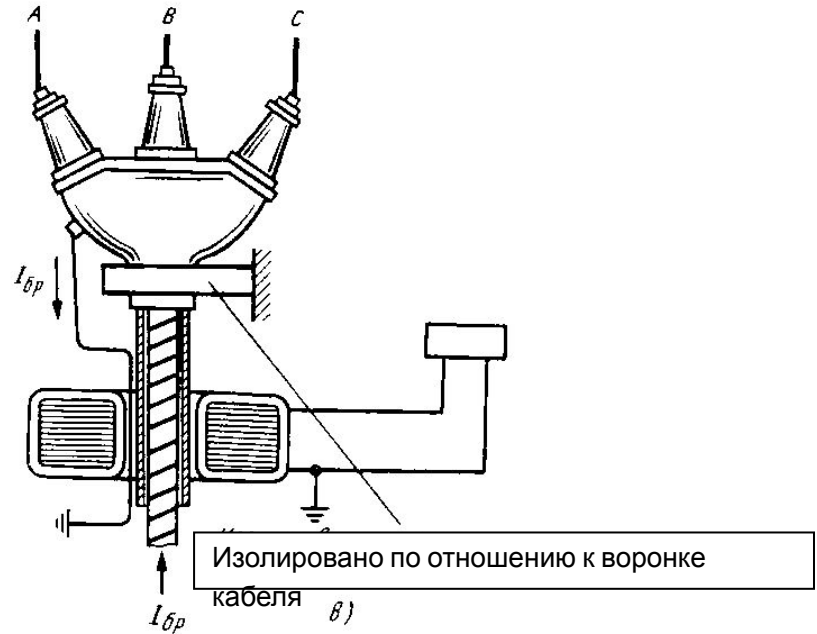
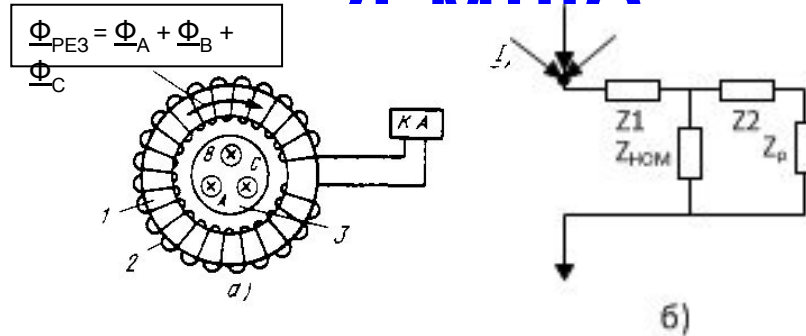


Рис.11.6. Трансформатор тока нулевой последовательности: а – устройство; б – схема замещения; в – установка ТНП на кабеле; 1 – магнитопровод; 2 – обмотка; 3 – трехфазный силовой кабель

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Устройство ТНП показано на рис. 11.6, а. Магнитопровод 1, собранный из листов трансформаторной стали, имеет обычно форму кольца или прямоугольника, охватывающего все три фазы защищаемой кабельной ЛЭП. Провода фаз А, В, С, проходящие через отверстие ТНП, являются первичной обмоткой трансформатора, вторичная обмотка 2 располагается на магнитопроводе с числом витков $w = 20 / 30$.

Токи фаз I_A , I_B и I_C создают в магнитопроводе соответствующие магнитные потоки Φ_A , Φ_B , Φ_C , которые, складываясь, образуют результирующий поток:

$$\Phi_{рез} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C \quad (11.16)$$

Так как сумма токов $I_A + I_B + I_C = 3I_0$ то можно сказать, что результирующий поток, создаваемый первичными токами ТНП, пропорционален составляющей тока НП: $\Phi_{рез} = k * 3I_0$
(11.17)

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Поток $\Phi_{\text{РЕЗ}}$, а следовательно, вторичная ЭДС E_2 и вторичный ток I_2 могут возникнуть только при условии, что сумма токов фаз не равна нулю, или, иначе говоря, когда фазные токи, проходящие через ТНП, содержат составляющую I_0 . Поэтому ток во вторичной цепи ТНП будет появляться только при замыкании на землю. В режиме нагрузки, трехфазного и двухфазного КЗ (без замыкания на землю) сумма токов фаз $I_A + I_B + I_C = 0$, и поэтому ток в реле отсутствует ($\Phi_{\text{РЕЗ}} = 0$).

Однако, поскольку из-за неодинакового расположения фаз А, В и С относительно вторичной обмотки ТНП коэффициенты взаимоиндукции этих фаз с вторичной обмоткой различны, несмотря на полную симметрию первичных токов, сумма их магнитных потоков в нормальном режиме не равна нулю. Появляется магнитный поток небаланса ($\Phi_{\text{РЕЗ}} = \Phi_{\text{НБ}}$), вызывающий во вторичной обмотке ЭДС и ток $I_{\text{НБ}}$.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Ток небаланса ТНП значительно меньше, чем в трехтрансформаторном фильтре. Это объясняется тем, что в последнем суммируются вторичные токи, которые искажены погрешностью трансформации ($I_{\text{НАМ}}$), особенно проявляющейся при насыщении стали сердечника при токах КЗ, а то время как в ТНП трансформация тока не вызывает небаланса. В ТНП суммируются магнитодвижущие силы одновитковых первичных обмоток, сумма которых при между фазных КЗ равна нулю. Ток $I_{\text{НБ}}$ во вторичной обмотке ТНП зависит только от несимметрии расположения фаз первичного тока.

Для получения наибольшей мощности от ТНП, а следовательно, и максимальной чувствительности реле, питающихся от ТНП, сопротивление обмотки реле должно равняться сопротивлению ТНП. Пренебрегая сопротивлением вторичной обмотки Z_p , согласно рис. 11.6,б получаем $Z_{\text{ТНП}} = Z_{\text{НАМ}}$; тогда условие отдачи максимальной мощности можно выразить равенством

$$Z_p = Z_{\text{НАМ}} \quad (11.18)$$

Из эквивалентной схемы ТНП (рис. 11.6,б) видно, что при выполнении

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

$I_{\text{НАМ}} = I_{\text{P}}$. Отсюда следует, что погрешность ТНП достигает примерно 50%. При столь большой погрешности нельзя вычислять вторичный ток по первичному, пользуясь коэффициентом трансформации $k_1 = w_2/w_1$. Поэтому чувствительность защиты, включенной на ТНП, оценивается по значению первичного тока, при котором обеспечивается действие защиты.

В ряде случаев она должна быть на уровне долей одного ампера. При малых значениях $3I_0$ ТНП работает в начальной части характеристики намагничивания, при которой МДС, созданная одновитковым ТНП, очень мала. Таким образом, для обеспечения необходимой чувствительности, кроме конструктивных улучшений ТНП, требуется применение высокочувствительных ИО.

Для защиты линий ТНП выполняются только кабельного типа (ТЗ, ТЗЛ, ТФ). При необходимости осуществления РЗ воздушных ЛЭП делается кабельная вставка, на которой устанавливается ТНП. Для кабельных ЛЭП изготавливаются ТНП типа ТЗ с неразъемным магнитопроводом, надеваемым на кабель до монтажа воронки, и типов ТЗР и ТФ с разъемным магнитопроводом, которые можно устанавливать на кабелях, находящихся в эксплуатации, без снятия кабельной воронки.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

При прохождении токов $I_{БР}$ по оболочке неповрежденного кабеля, охваченного ТНП, в реле РЗ появляется ток, от которого РЗ может подействовать неправильно. Эти токи появляются при замыканиях на землю вблизи кабеля или при работе сварочных аппаратов.

Для исключения ложной работы РЗ необходимо компенсировать влияние блуждающих токов, замыкающихся по свинцовой оболочке и броне кабеля. С этой целью воронка и оболочка кабеля на участке от воронки до ТНП изолируются от земли (рис. 11.6, в), а заземляющий провод присоединяется к воронке кабеля и пропускается через окно ТНП. При таком исполнении ток, проходящий по броне кабеля, возвращается по заземляющему проводу, поэтому магнитные потоки в магнитопроводе ТНП от токов в броне и проводе взаимно уничтожаются. Магнитопровод ТНП должен быть надежно изолирован от брони кабеля.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

11.5. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Защита реагирует на составляющие НП полного естественного емкостного тока, проходящего по фазам защищаемого присоединения при замыканиях на землю. Схема РЗ дана на рис. 9.7. Токовое реле КА служит измерительным органом РЗ, оно действует на сигнал через реле времени КТ. Срабатывание РЗ фиксируется указательным реле КН.

Измерительный орган выполняется с помощью чувствительного токового реле мгновенного действия; используются электромагнитное реле РТ-40/0,2 и более чувствительное реле, выполненное на транзисторах типа РТЗ-50. Защита с РТЗ-50 может срабатывать при первичном токе порядка 1-2 А. Высокая чувствительность этого реле обеспечивается с помощью двухкаскадного усилителя постоянного тока, включенного через промежуточный трансформатор и выпрямительный мост. Питание полупроводниковой схемы осуществляется либо от делителя напряжения 110/220 В постоянного тока, либо выпрямленным напряжением переменного тока. Ток срабатывания реле плавно регулируется в пределах 10-60мА. Мощность срабатывания реле около 12 мВ - А.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Взамен РТЗ-50 ЧЭАЗ освоил выпуск реле типа РТЗ-5, выполненного на ИМС. Устройство реле РТЗ-51, поясняет функциональная схема реле, изображенная на рис. 11.8. В соответствии со структурной схемой полупроводниковых реле тока ее можно подразделить на три функциональные части: воспринимающую входной сигнал, преобразующую его и сравнивающую преобразованный сигнал с заданной уставкой. Воспринимающая часть (как обычно, в полупроводниковых реле) выполняется в виде промежуточного трансформатора тока ТА, замкнутого

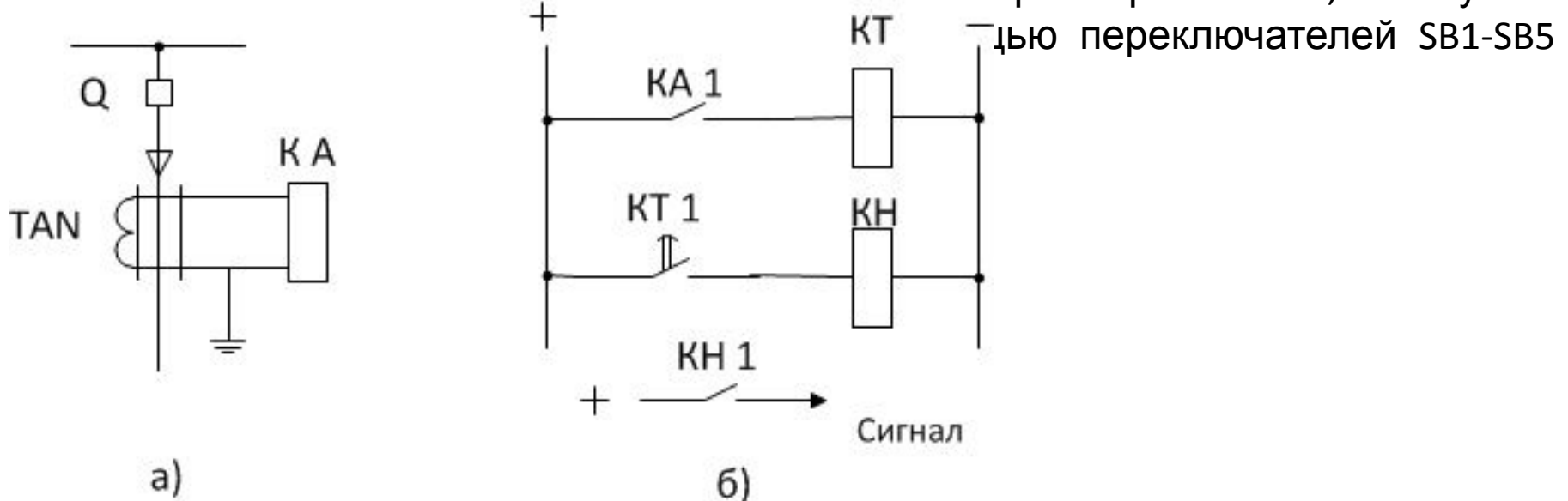


Рис.11.7. Схема РЗ от замыканий на землю кабельной линии:
а - подключение токового реле ТНП (ТАН);
б - цепи оперативного тока

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА

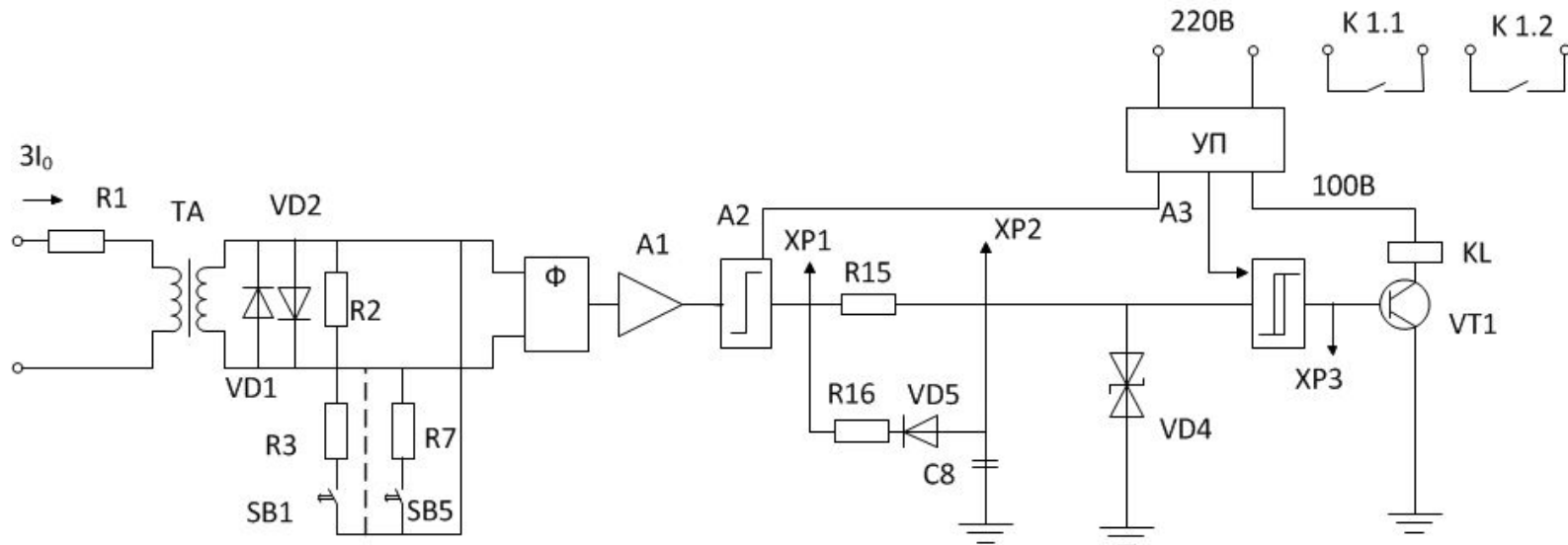


Рис. 11.8. функциональная схема реле тока нулевой последовательности типа РТЗ – 51

предназначенные для дискретного регулирования уставки тока срабатывания реле. Диоды VD1, VD2 ограничивают уровень входного сигнала. При замыкании на землю входной сигнал в виде тока $3I_0$ поступает в первичную обмотку трансформатора ТА и преобразуется в напряжение на зажимах резистора R2 ($U_{R2} = i_{0ТА} R_2$). Это напряжение поступает в преобразующую часть, состоящую из частотного фильтра Ф и усилителя А1. Фильтр пропускает ток 50 Гц и запирает выход в схему сравнения токов высших гармоник, если они имеются в токе

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Усилитель А1 служит для повышения чувствительности реле к малым значениям тока $I_3^{(1)}$, на которые должно реагировать реле. В качестве усилителя А1 используется операционный усилитель (ОУ). Сигнал с выхода А1 поступает на схему сравнения, построенную аналогично типовому реле тока на ИМС (завода ЧЭАЗ).

Схема сравнения состоит из порогового элемента, выполненного на операционном усилителе А2, времяизмерительной цепи (образованной из резисторов R15, R16, диода VD5 и конденсатора C8) и триггера Шмитта, построенного на операционном усилителе А3 с положительной обратной связью. Выходной сигнал А3 воздействует на исполнительный орган, функции которого выполняет промежуточное реле KL, включенное в коллекторную цепь усилительного каскада на транзисторе VT1. Реле KL срабатывает при появлении положительного сигнала на выходе А3.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В нормальном режиме, когда сигнал $3I_0$, поступающий на вход реле ТА отсутствует или меньше порога срабатывания компаратора А2, выходное напряжение операционного усилителя А2 имеет положительный знак, под действием которого конденсатор С8 заряжен и на его выходе устанавливается напряжение того же знака (+). При этом выходное напряжение А3 имеет отрицательную полярность, поэтому исполнительный орган (VT1 и KL) не работает.

При появлении воздействующего сигнала, превышающего опорное напряжение А2 ($U_{вх} > U_{оп}$), операционный усилитель переключается, его выходное напряжение становится отрицательным, конденсатор перезаряжается и на входе А3 появляется потенциал отрицательного знака. При этом на его выходе появляется напряжение положительного знака, что приводит к срабатыванию исполнительного органа.

Реле РТЗ-51 имеет шесть диапазонов срабатывания по току - от 0,02 до 0,12 А. Коэффициент возврата $k_B \approx 0,93$. Потребляемая мощность питания на постоянном токе - не более 10 Вт, на переменном токе - не более 5 В • А. Таким образом, это реле имеет высокую чувствительность и широко используется в сетях, питающих торфоразработки и аналогичные установки.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Селективность действия РЗ основана на различии абсолютных значений токов $3I_0$ в защищаемой ЛЭП при замыкании на ней и замыкании на землю внешнем (на других присоединениях). Условия работы РЗ поясняет распределение токов I_0 на рис. 9.9.

Ток срабатывания РЗ каждой ЛЭП по условию селективности необходимо отстраивать от емкостного тока $3I_{0л}$, проходящего по защищаемой ЛЭП при замыкании на землю на других присоединениях, и от тока небаланса, появляющегося в ТНП при внешних междуфазных КЗ.

Если емкость фазы защищаемой ЛЭП (например, W2 на рис. 9.4) равна C_{W2} , то тогда при внешнем замыкании на землю установившийся ток в этой ЛЭП $3I_{0CW2} = 3U_{\phi} \omega C_{W2}$. В переходном режиме, возникающем в начальный момент повреждения и при замыкании через перемежающуюся электрическую дугу» возникают значительные броски емкостного тока во всех элементах сети, в 4-5 раз превышающие его установившееся значение. С учетом этого первичный ток срабатывания по первому условию

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА МПЮ

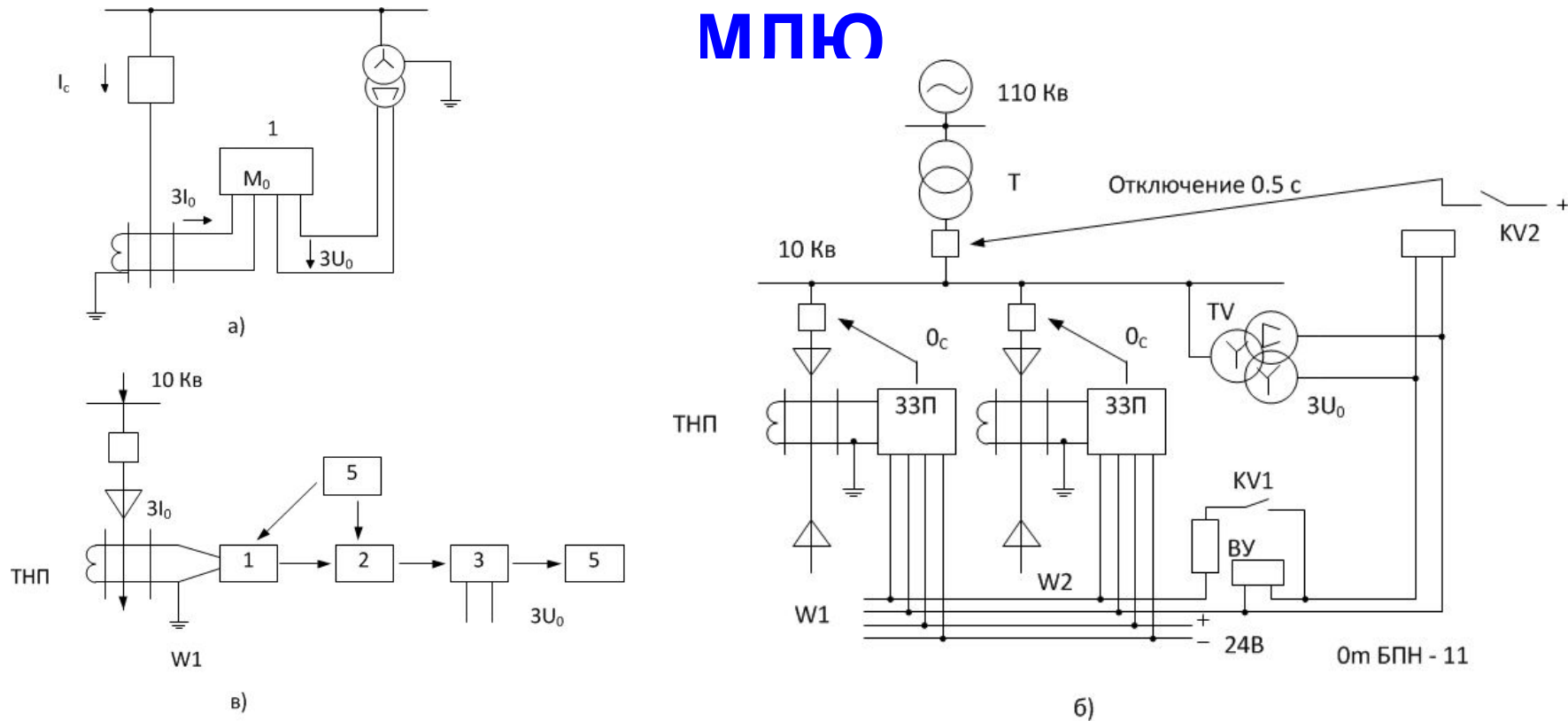


Рис. 11.9. Схема РЗ типа 33П - 1М:
 а — схема направленной защиты с реле направления мощности нулевой последовательности; б - принципиальная схема включения; в - структурная схема; г — распределение емкостных токов при однофазных замыканиях на землю

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

$$I_{C.3 W2} = k_H k_{\phi} * 3 I_{03.Л W2} = k_H k_{\phi} * 3 U_{\phi} \omega C_{03.Л W2}, \quad (11.19)$$

где $C_{3.Л}$ - емкость защищаемой ЛЭП; k_{ϕ} - коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока I_{0C} (в РЗ, работающей без выдержки времени, $k_{\phi} = 4 \div 5$, при наличии выдержки времени $k_{\phi} = 1 \div 2$ в зависимости от значений t_3); $k_H = 1,1 \div 1,2$.

По второму условию

$$I_{C.3} = k_H I_{H\phi \max}. \quad (11.20)$$

Приближенно $I_{H\phi \max} = I_{H\phi \text{ НАГ}} I_{k \max} / I_{\text{НАГ}}$, здесь $I_{H\phi \text{ НАГ}}$ – ток небаланса при токе нагрузки $I_{\text{НАГ}}$, измеряется при наладке РЗ.

Обычно на длинных ЛЭП, имеющих большую C , ток $I_{C.3}$ выбранный по (11.19), удовлетворяет условию (11.20).

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

При повреждении на защищаемой ЛЭП РЗ срабатывает при условии, что ток в поврежденной ЛЭП, определяемый по (11.12).

$$3I_{0\text{п.л}} \geq 3U_{\phi}\omega(C_{0\Sigma} - C_{0(c)л}). \quad (11.21)$$

Коэффициент чувствительности, равный отношению тока в поврежденной ЛЭП к $I_{c.з}$ должен быть не менее 1,25-1,5. Вследствие сложности оценки вторичного тока ТИП по первичному, реле регулируется на заданный ток $I_{c.з}$ подачей тока в первичную цепь ТНП. Как уже отмечалось, токовая РЗ может применяться в некомпенсированных сетях при условии, что от шин подстанции отходит достаточное количество ЛЭП, при котором $C_{0\Sigma} \geq C_{0л}$.

Токовая РЗ НП, выполненная по схеме на рис. 11.7, применяется не только на кабельных, но и на воздушных ЛЭП 6-10 кВ. Рассмотренная защита используется в основном в сетях с изолированной нейтралью, где она реагирует на естественный емкостный ток. В компенсированных сетях для действия токовой защиты может использоваться остаточный ток перекомпенсации или активная составляющая тока ДГР, или активный ток при заземлении сети через резистор R .

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

11.6. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

В радиальных сетях, когда собственные емкостные токи отдельных присоединений велики и соизмеримы с полным емкостным током сети, токовая защита неприменима. В этом случае имеется принципиальная возможность использовать направленные защиты, которые не требуется отстраивать от собственных емкостных токов защищаемой линии.

Направленная защита состоит из одного реле мощности, которое включается на ток и напряжение нулевой последовательности (рис. 11.9, а).

В некомпенсированной сети защита реагирует на мощность нулевой последовательности, создаваемую емкостным током линии. Как следует из токораспределения на рис. 11.4, направление тока, а следовательно, и мощности на поврежденной и неповрежденной линиях противоположны, и, следовательно, по знаку мощности направленное реле может определить поврежденную линию.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Учитывая, что емкостный ток I_0 сдвинут относительно напряжения на 90° , применяют реле мощности синусного типа, реагирующее на

$$S_p = 3U_0 3I_0 \sin \phi_0$$

В сети, работающей с перекомпенсацией емкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в поврежденной линии, и емкостный ток в неповрежденной линии имеют одинаковое направление.

В перекомпенсированной сети реле мощности используется в тех случаях, когда для действия защиты создается активный ток искусственным путем. В этом случае должно применяться реле мощности косинусного типа.

Для обеспечения селективности при "земле" в сети реле мощности направленной защиты должно отстраиваться от тока и напряжения небаланса, обусловленного нагрузкой, протекающей по данной линии; этим условием ограничивается чувствительность защиты.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Реле мощности должны иметь высокую чувствительность. При питании токовой обмотки реле от ТНП нужно учитывать большую угловую погрешность последнего. Для правильной работы направленной защиты требуется малая угловая погрешность измерительных трансформаторов и точность угловой характеристики реле.

Возможно также использовать активную составляющую тока замыкания на землю, которая обуславливается активным сопротивлением дугогасящей катушки. Эта составляющая невелика и достигает 3-5% тока катушки. Активный ток катушки замыкается только по поврежденному присоединению и на него должна реагировать защита.

Защита выполняется с помощью реле мощности косинусного типа, реагирующего только на активную составляющую мощности нулевой последовательности.

Промышленность изготавливает по разработкам ВНИИЭ реле направления мощности типа ЗЗП-1М, выполненное на транзисторах. Реле реагирует на реактивную составляющую мощности; имеет три уставки срабатывания по току (0,07; 0,5; 2А) при номинальных значениях напряжений и $\phi_{\text{м.ч.}} = 90^{\circ}$.

Защита ЗЗП-1М состоит из следующих основных органов (Рис.11.9,в): согласующего устройства 1, усилителя переменного

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

тока 2, фазочувствительного усилителя ОНМ 3, выходного реле 4 и блока питания 5. Блок питания типа БПН - 11 подключается к ТН или ТСН подстанции (на рис. 11.9 не показано). На случай отказа РЗ или выключателя поврежденной ЛЭП из-за неисправности или из-за снижения суммарного емкостного тока при выводе одной или нескольких ВЛ на подстанции предусматривается дополнительно к линейным РЗ (ЗЗП-1М) резервная неселективная максимальная РЗ напряжения НП (реле KV2 на рис. 11.9, б), которая с выдержкой времени 0,5-0,7 с действует на отключение питающего трансформатора (при этом должны запрещаться действия АПВ и АВР).

В сети, работающей с перекомпенсацией емкостного тока ($I_{\text{ДГР}} > 3I_{\text{OC}}$), как отмечалось выше, направленная РЗ синусного типа неприменима. Это реле также не может работать в сети С активным током замыкания на землю.

ВНИИЭ разработана новая конструкции устройства, аналогичного реле направления мощности типа ЗЗН, построенного на ИМС. В защите ЗЗН предусмотрена возможность регулирования угла максимальной чувствительности, позволяющая ее использовать в качестве защиты, реагирующей на реактивный ток ($\phi_{\text{м.ч}} = 90^\circ$), активный ток ($\phi_{\text{м.ч}} = 0$) и на

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

11.7. ЗАЩИТА, РЕАГИРУЮЩАЯ НА ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ТОКА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

В установившемся режиме замыканий на землю емкостные токи повреждения и их составляющие НП содержат кроме тока основной частоты 50 Гц составляющие высших гармоник. В компенсированных сетях ДГР компенсирует только основную гармонику емкостного тока замыкания на землю I_3 и $3I_0$ в поврежденной ЛЭП, высшие гармоники этих токов остаются некомпенсированными. При этом, вследствие нелинейности характеристики намагничивания ДГР, индуктивный ток реактора $I_{\text{ДГР}}$ сам содержит высшие гармоники, которые добавляются к гармоникам естественного емкостного тока в поврежденной ЛЭП.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Таким образом, высшие гармоники на токе I_3 и I_0 имеют место как в некомпенсированной, так и компенсированной сетях. Высшие гармоники в токах I_3 и I_0 возникают из-за наличия гармоник в фазных напряжениях и напряжении U_0 , под действием которых появляются эти токи. Искажения формы кривой напряжений вызываются падением напряжения в сопротивлениях элементов системы от несинусоидальных токов намагничивании силовых трансформаторов сети и некоторых видов нагрузки, а также из-за наличия высших гармоник в ЭДС генераторов. Состав частот и амплитуды высших гармоник в токах могут изменяться при изменении конфигурации сети, состава работающих трансформаторов и несинусоидальной нагрузки. В реальных сетях содержание высших гармоник в токах I_3 и I_0 достигает 5-15% основной гармоники, а диапазон частот с заметным уровнем амплитуд находится в пределах от 150 до 650-1000 Гц.

Токи I_0 неповрежденных ЛЭП, идущие к месту замыкания (см. рис. 11.4), суммируются в поврежденной ЛЭП. Вследствие этого и высшие гармоники тока I_0 поврежденного присоединения равны сумме гармонических токов I_0 всех неповрежденных присоединений. К этой сумме в компенсированной сети добавляются гармоники тока ДГР

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Благодаря этому количество гармоник и, что особенно важно, амплитуды и суммарный уровень гармонических составляющих результирующего тока поврежденного присоединения всегда больше, чем в каждом (отдельно взятом) неповрежденном присоединении. Различие в уровне высших гармоник тока $3I_0$ в поврежденной и неповрежденных ЛЭП используется для выполнения селективных РЗ, реагирующих на высшие гармоники. На этом различии основаны три вида РЗ: одни - реагируют на абсолютное значение высших гармоник $3I_0$ в каждом присоединении и сравнивают его с заданным значением тока срабатывания; вторые - производят сравнение между собой уровней высших гармоник всех присоединений и определяют поврежденное присоединение по наибольшему относительному значению уровня тока высших гармоник; третьи - устанавливаются на каждом присоединении и значение проходящего по ним тока сравнивается с моделью присоединения, имеющего больший емкостный ток, чем ток защищаемого присоединения.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА

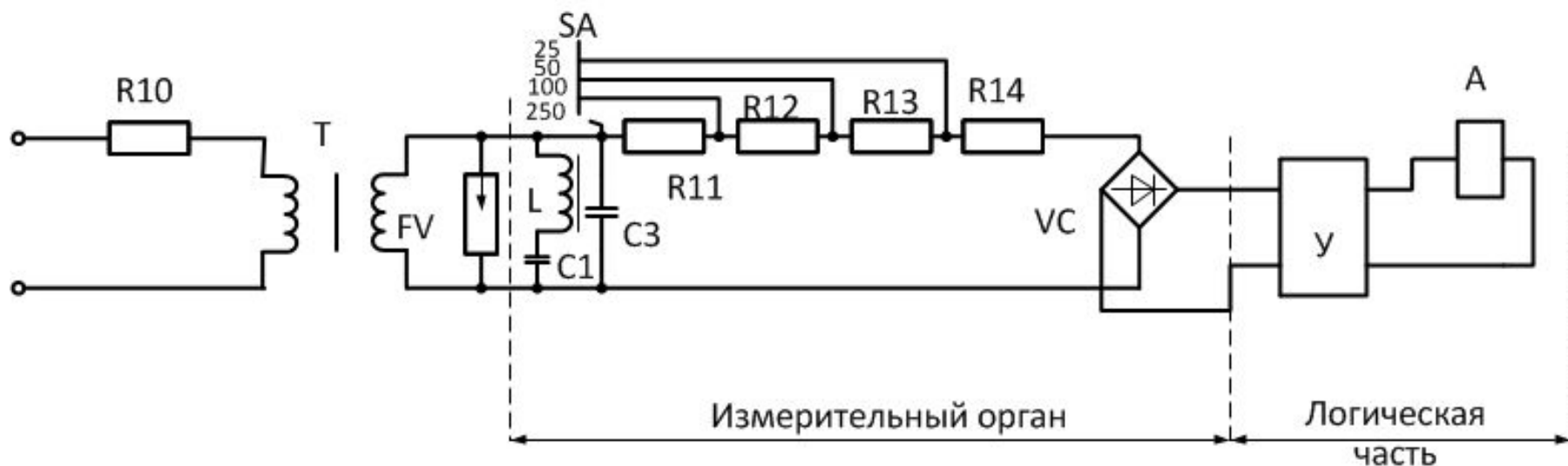


Рис. 11.10. Упрощенная схема устройства сигнализации УСЗ-2/2

Устройства сигнализации, реагирующие на высшие гармоники установившегося тока I_0 , нашли широкое применение. На ЧЭАЗ по разработке ВНИИЭ выпускаются устройства типов УСЗ-2/2 и УСЗ-3М, предназначенные для сигнализации при замыканиях на землю в кабельных сетях 6 и 10 кВ как компенсированных, так и некомпенсированных. Индивидуальное устройство УСЗ-2/2, реагирующее на абсолютное значение, содержит согласующий трансформатор Т, входной частотный фильтр L, С1, подавляющий составляющие промышленной частоты и частоты более 2 кГц. С... выпрямительный мост VC и двухтранзисторный усилитель

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

возможность выбора необходимых уставок тока срабатывания (25, 50, 100, 250 А). Срабатывание промежуточного реле сигнализируется с помощью тиратрона. Для отстройки от свободных периодических составляющих переходного процесса внешнего замыкания на землю в схеме транзисторного усилителя У предусмотрено замедление на 20-30 мс. Основной диапазон, в котором работает устройство УСЗ-2/2, 150-600 Гц.

Для обеспечения селективности действия РЗ, реагирующая на абсолютное значение, должна отстраиваться от максимального уровня высших гармоник своего присоединения при внешнем замыкании на землю и надежно срабатывать при минимальном уровне высших гармоник суммарного тока $3I_{0 \text{ в.г}}$ при повреждении на защищаемом присоединении.

Устройства, реагирующие на абсолютное значение, в том числе и УСЗ-2/2, имеют существенный недостаток, так как требуют сложного учета и расчета гармоник на каждом присоединении для разных режимов работы присоединений и подстанций. Уставки срабатывания таких защит трудно оценить, что приводит к неправильным их действиям. Поэтому защиты, построенные на относительном замере, обеспечивают более надежное определение поврежденного присоедине

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

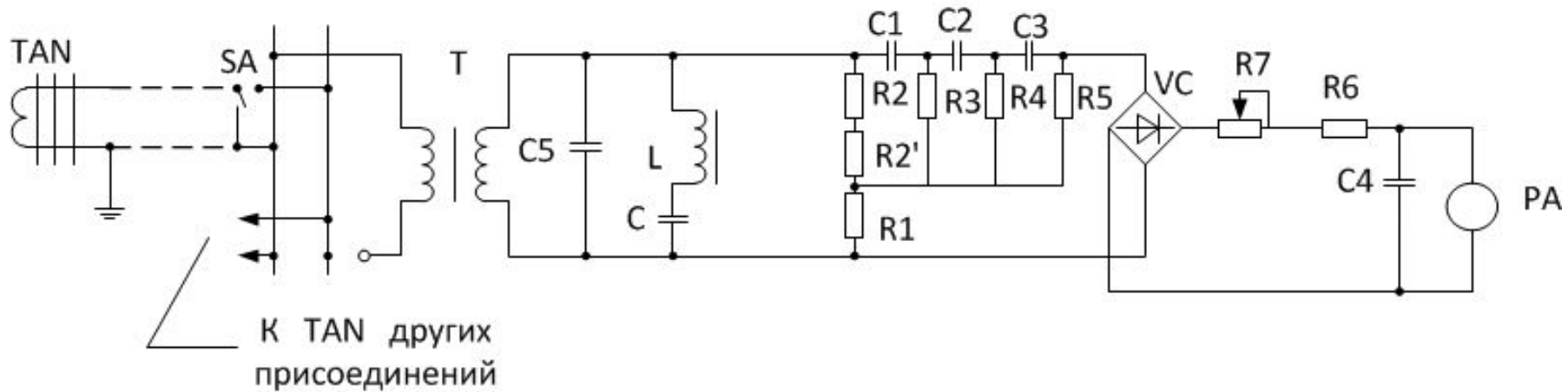


Рис. 11.11. Принципиальная схема устройства сигнализации УСЗ - 3М

Устройство УСЗ-3М (рис. 11.11) выполняется и виде одного централизованного комплекта, поочередно подключаемого к ТНП каждого присоединения (переключателем SA). Такое переключение может выполняться вручную дежурным персоналом или автоматически с помощью специальной схемы. При ручном переключении ИО устройства выполняется в виде измерительного прибора, который измеряет среднее значение суммы высших гармоник тока I_0 в каждом присоединении.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Принцип действия устройства УСЗ-3М аналогичен принципу действия устройства УСЗ-2/2. Оно состоит из согласующего трансформатора Т, фильтра LC, настроенного на частоту резонанса 650 Гц, активно-емкостного фильтра R2-R5 и C1-C3, выпрямительного моста VC и электроизмерительного прибора РА. Емкость C5 служит для отстройки от сигналов, имеющих частоту выше 1000 Гц. Резистор R7 обеспечивает плавную регулировку чувствительности.

Устройство, определяющее поврежденное присоединение по относительному значению контролируемой величины, не требует определения абсолютного значения уровня высших гармоник при замыкании на землю, так как его селективность основывается на сравнении токов присоединений. Это является преимуществом данного устройства, определяющим высокую четкость выявления поврежденного участка. Недостатком устройства является обязательное участие персонала при измерении и оценке показаний прибора. Это затягивает поиск поврежденного присоединения. Автоматическое устройство использующее принцип относительного замера типа КДЗС разработано и применяется в Мосэнерго. При замыкании оно автоматически производит поочередное переключение ИО РЗ к трансформаторам тока нулевой последовательности всех присоединений, выявляет ЛЭП с наибольшим значением высших гармоник и передает с помощью устройства телемеханики информацию о поврежденном присоединении на диспетчерский пункт.

Оба рассмотренных устройства РЗ, реагирующих на сумму высших гармоник установившихся токов НП, предназначены для компенсированных сетей, где токовые и направленные РЗ неприменимы. По принципу действия обе РЗ могут использоваться и в некомпенсированной сети. Для селективной работы обе РЗ отстраиваются от влияния токов высших гармоник

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Во ВНИИЭ на микроэлектронной элементной базе выполнено централизованное устройство сигнализации ПАУК, в котором осуществляется сопоставление токов ВГ контролируемых присоединений с током моделируемого присоединения, приведенная емкость которого с запасом превышает емкость каждого из них. При этом устройство ПАУК, обеспечивая правильное определение поврежденного присоединения из числа контролируемых, селективно работает при внешних замыканиях на землю на шинах питающей подстанции или на присоединениях, не охваченных устройством контроля.

В устройстве ПАУК предусмотрено автоматическое регулирование чувствительности в зависимости от уровня ВГ тока при замыкании через переходное сопротивление.

Устройства централизованного контроля (УСЗ-3, УСЗ-3М, ПАУК и др.) позволяют определить лишь поврежденное присоединение, в сети которого возникло замыкание, и дать направление дальнейшему поиску. Отыскание места однофазного замыкания на ВЛ 6-35 кВ производится по показаниям приборов, установленных на элементах, питающихся от данного присоединения, а если таковых нет, то вручную, с помощью переносных приборов "Поиск", "Волна", "

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

11.8. Защиты, реагирующие на токи переходного режима

Токи высокой частоты возникают во время переходного процесса в момент замыкания на землю. Их появление объясняется тем, что в начальный момент замыкания на землю емкость заземлившейся фазы разряжается, а емкости двух других фаз дозаряжаются, поскольку напряжения на них относительно земли возрастают до междуфазного.

Указанный процесс разряда и дозаряда емкостей фаз носит характер периодических токов с затухающими амплитудами (рис. 11.12).

Частота колебаний и скорость их затухания определяются L , C и R зарядного и разрядного контуров. Расчеты и опыты показывают, что разрядный ток продолжается не более 0,01 с, имеет частоту порядка 1-5 кГц, а его максимальное значение (амплитуда первого периода) в десятки раз превосходит амплитуду основной составляющей тока установившегося режима; время затухания зарядного тока достигает 0,015-0,25 с, частота находится в пределах 400-500 Гц, амплитуды значительно меньше чем у зарядного тока.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Различие в частотах объясняется тем, что токи разряда $I_{C\text{ разр}}$ и заряд $I_{C\text{ зар}}$ проходят по разным контурам, имеющим разные индуктивности L , разрядный ток $I_{C\text{ разр}}$ проходит только по проводам линий, минуя источники питания (генераторы, трансформаторы) (рис. 11.13). Токи заряда $I_{C\text{ зар}}$ замыкаются через большие индуктивности источников питания, что приводит к меньшей частоте токов.

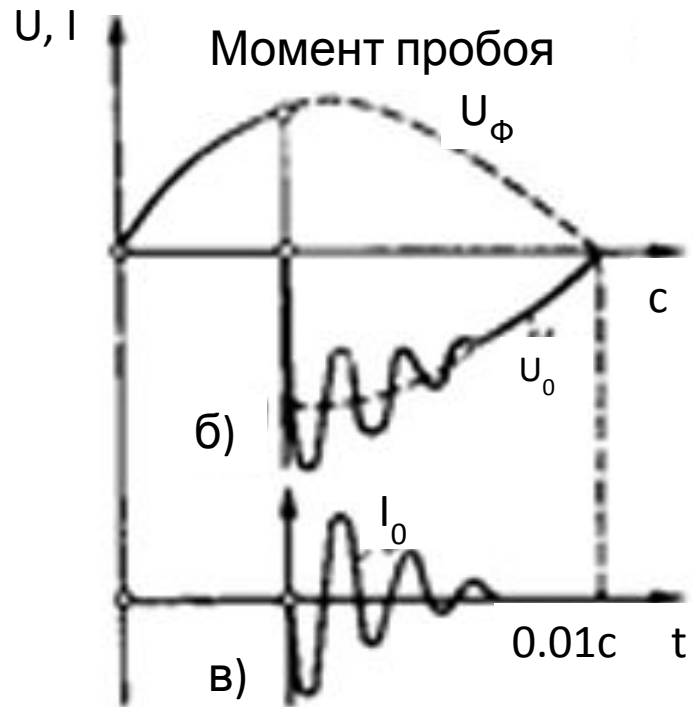
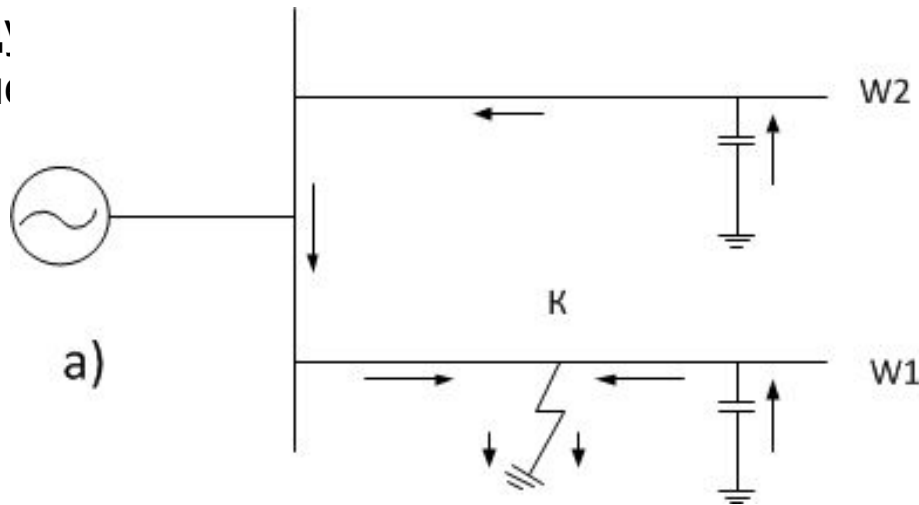


Рис. 11.12. Переходный процесс при замыкании на землю:

а - схема сети; б - кривая напряжений U_0 и U_ϕ в начальный момент замыкания на землю; в - кривая изменения тока I_0 в

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА

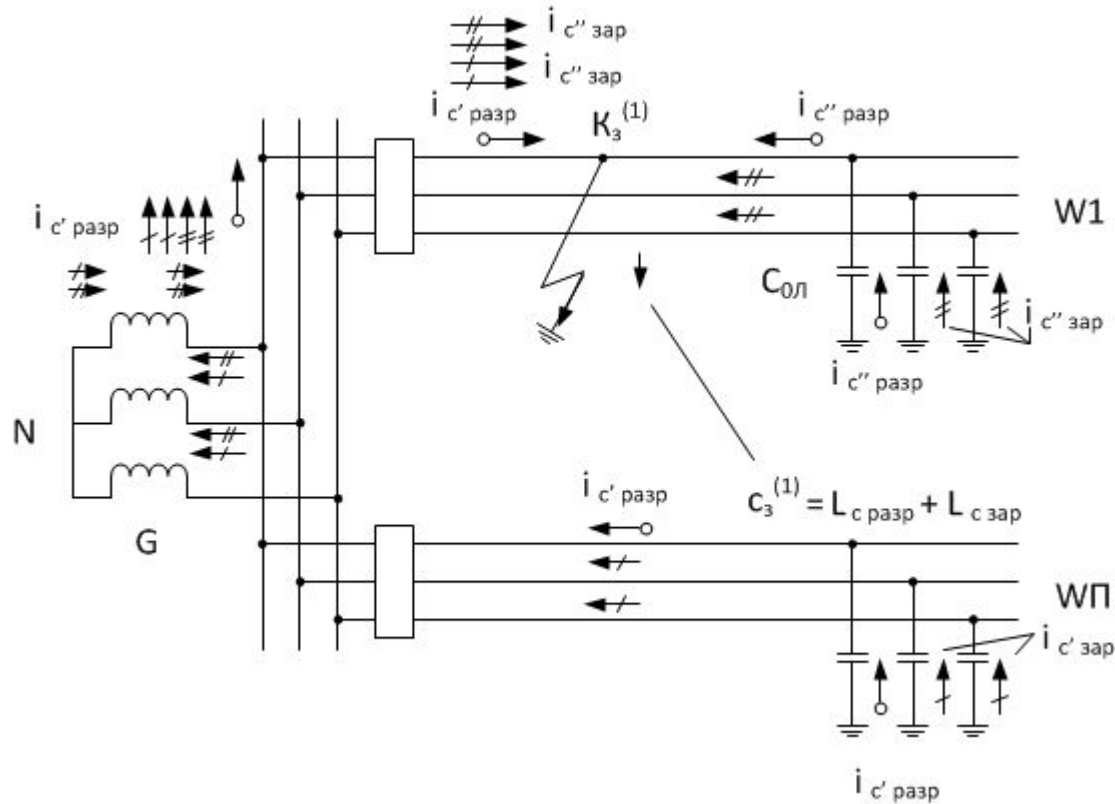


Рис. 9.13. Распределение переходных токов замыкания на землю

С некоторым приближением считается, что отношение максимальных значений переходных токов к их установившимся значениям пропорционально отношению частот f переходного режима к рабочей частоте 50 Гц. Поэтому переходные токи

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

На поврежденной линии переходный ток имеет поэтому максимальное значение. На неповрежденных линиях этот ток соответственно меньше, а его направление противоположно направлению тока в поврежденной линии.

В первом периоде переходного процесса (в его начальной стадии) преобладают токи разряда, во втором периоде (во второй стадии), после затухания тока разряда, остается разрядный ток с меньшими амплитудами и частотой, переходящий через 0,15-0,25 с в установившийся ток I_3 . Для выполнения РЗ используется первая стадия переходного процесса. Наличие ДГР в компенсированных сетях не влияет на характер переходного процесса, так как индуктивность ДГР и трансформатора, к которому они подключаются, значительно больше индуктивности проводов ЛЭП, поэтому ток дугогасящего реактора нарастает очень медленно и появляется лишь после затухания токов разряда.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Реле тока, реагирующее на начальное значение (амплитуду) переходного тока, должно выполняться быстродействующим $t_{CP} < 0.1$ с. При больших значениях начальных амплитуд защита может подключаться к трехтрансформаторному фильтру НП и к обычным ТНП на ток $3I_0$ через фильтр, пропускающий и измерительный орган реле только токи ВЧ более 1000 - 2000 Гц. Селективность действия РЗ так же, как и у РЗ, реагирующих на высшие гармоники $3I_0$ установившегося режима, основана на использовании различия в значении и направлении переходного тока в поврежденном и неповрежденном присоединении, с учетом того, что в поврежденной ЛЭП на участке между местом замыкания (точка $K^{(1)}_3$) и сборными шинами подстанции Р (место установки РЗ) ток равен сумме токов неповрежденных присоединений.

По принципу действия РЗ могут выполняться реагирующими на абсолютное значение тока в каждом присоединении или в виде устройства, сравнивающего между собой значения токов присоединений и определяющее по относительно большему току поврежденное присоединение. Защита, реагирующая на значение тока переходного режима, пока не нашла широкого применения, но в этой области ведутся разработки.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Ивановским государственным энергетическим университетом разработано и установлено в ряде энергосистем, для проверки в эксплуатации, централизованное устройство селективной сигнализации типа ЦНУЗЗ ("Импульс"). Оно основано на использовании электрических величин переходного процесса, возникающих в момент пробоя изоляции на землю. В частности, осуществляется контроль мгновенной мощности нулевой последовательности.

Большие исследования и разработка защиты, реагирующей на волновые процессы, были проведены в ЭНИН АН СССР им. Г. М. Кржижановского.

Защита с импульсным РНИ, реагирующая на направление (знак) электромагнитной волны тока.

Линии имеют распределенную емкость фаз относительно земли, в связи с этим и учетом очень высоких частот (малой длины волны) токов, проходящих по линиям в первой стадии процесса, явления, происходящие в них в неустановившемся режиме, как и на длинных ЛЭП с распределенными параметрами, можно рассматривать с учетом возникающих при этом электромагнитных волн.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

При таком рассмотрении ток разряда $i_{\text{РАЗ}}$, возникающий в месте замыкания (в точке К на рис.11.14), представляется в виде электромагнитной волны, распространяющейся в обе стороны от места повреждения по контуру фаза - земля.

Одновременно с волной тока возникает волна напряжения u , связанная с током через волновое сопротивление выражением: $i = u/z_B$. На рис. 11.14 показано направление распространения фронта обеих волн u и i (начальный участок). В соответствии с ранее принятой условностью волны тока i_0 , проходящие к шинам, считаются отрицательными (-), а уходящие - положительными (+). Волны напряжения U_0 , как проходящая, так и уходящая, считаются имеющими одинаковый знак (-).

Из рис.11.14 следует, что направление или знак мгновенного тока и мгновенной мощности $S = ui$ на фронте волны тока относительно шин А в поврежденной W1 и неповрежденной W2 ЛЭП будут различными.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Это означает, что с помощью реле, реагирующего на знак мощности, можно пополнить селективную РЗ, срабатывающую при положительном знаке $+S$ на поврежденном присоединении и недействующую при $-S$ на неповрежденных присоединениях. Измерительный орган такой РЗ должен выполняться с помощью быстродействующего реле направления мощности, способного подействовать от первого импульса мгновенной мощности S , пришедшего к месту установки РЗ 1 или 2 на фронте волны тока и напряжении и запомнить его.

Серийно выпускается и применяется в эксплуатации импульсная РЗ типа ИЗС на ИМС, разработанная в ЭНИН. Токовые цепи устройства ИЗС могут подключаться к ТНП или к трехтрансформаторному фильтру. Последнее является достоинством устройства, поскольку позволяет не выполнять кабельную вставку для ВЛ 10-35 кВ. Цепи напряжения подводятся от обмоток ТН, соединенных в разомкнутый треугольник (рис. 11.15, а).

Устройство ИЗС состоит из пускового органа, реагирующего на появление напряжения НИ при замыкании на землю; органа направления тока, контролирующего знак мощности на фронте волны в контуре фаза-земля; блока питания и указательного реле. Устройство может действовать на сигнал или на отключение защищаемой ЛЭП. Защита ИЗС может применяться в радиальных и

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА

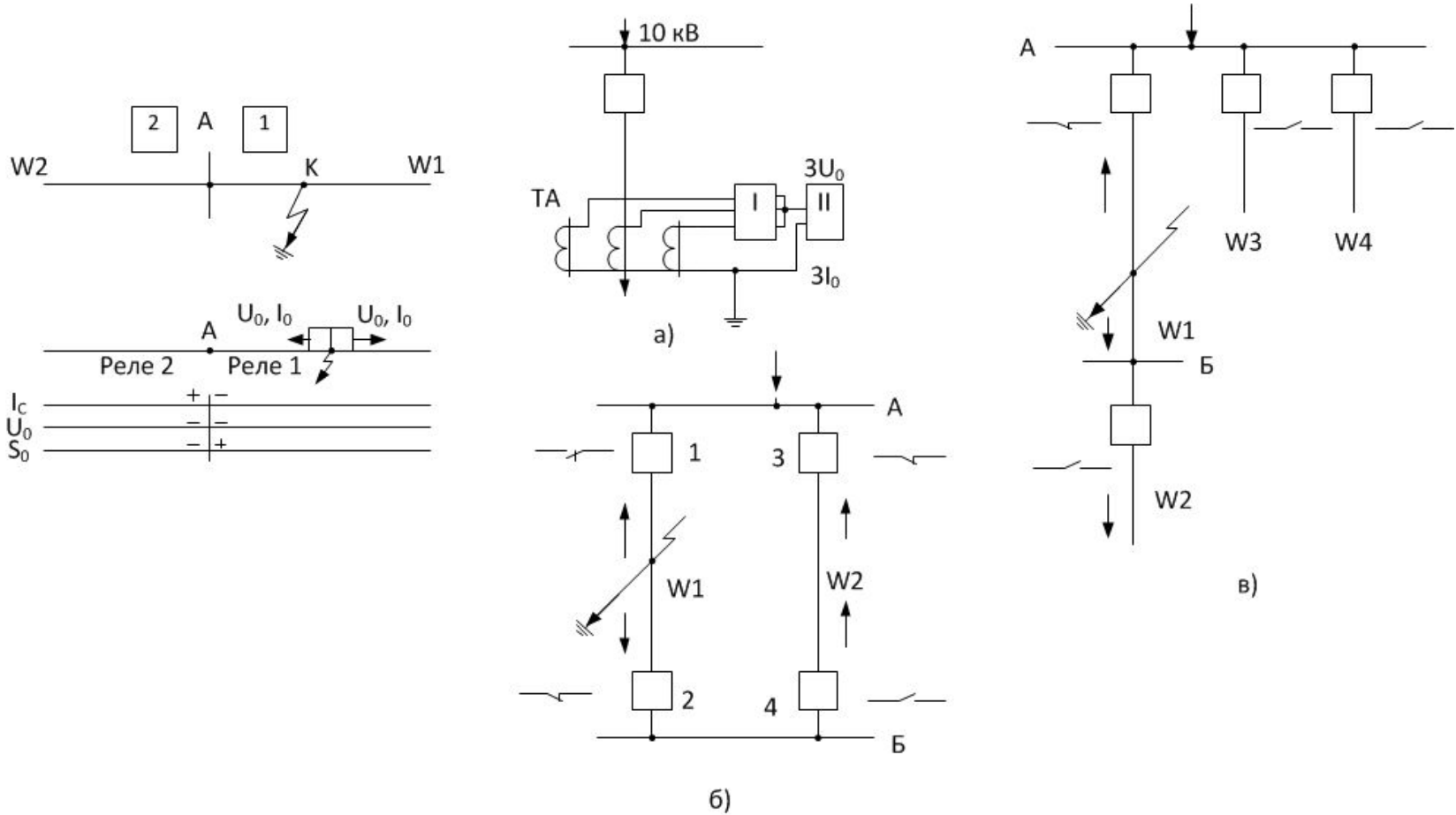


Рис. 11.4. Знаки волн тока, напряжения и мгновенной мощности при замыкании на землю

Рис. 11.5. Схема включения РЗ ИЗС (а) и поясняющие схемы ее работы при однофазных замыканиях на землю в сетях 10 кВ разной конфигурации (б, в);

I- РЗ от междуфазных КЗ; II-РЗ ИЗС

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

работе двух или нескольких ЛЭП (рис. 11.15, б). Устройства ИЗС включаются на обеих сторонах контролируемых ЛЭП таким образом, что они срабатывают на замыкание контактов при условно положительном направлении распространения волны (мощности) от места замыкания к шинам подстанций А и Б. При этом только на поврежденной ЛЭП знак мощности на обоих ее концах будет положительным и оба устройства ИЗС сработают (на рис. 11.15, б контакты ИЗС 1 и 2 показаны в замкнутом положении). На неповрежденных ЛЭП этой замкнутой сети контакты ИЗС замыкаются только на одной из сторон. По показаниям ИЗС можно однозначно определить, на какой из ЛЭП произошло однофазное замыкание на землю. При однофазном замыкании на w_1 в радиальной сети (Рис. 11.15, в) устройство ИЗС на подстанции А сработает (мощность направлена к шинам), а на подстанции Б устройство ИЗС неповрежденной ЛЭП w_2 не сработает (мощность направлена от шин). На неповрежденных ЛЭП w_3 и w_4 устройства ИЗС также не сработают.

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С МАЛЫМИ ТОКАМИ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

Вопросы для самопроверки

1. Почему защита от замыканий на землю кабельной линии в общем случае выполняется с действием на сигнал? В каких случаях должна выполняться на отключение?
2. От чего зависит значение емкостного тока кабельной линии?
3. В чем преимущество кабельного трансформатора тока нулевой последовательности по сравнению с трехтрансформаторным фильтром токов нулевой последовательности?
4. От какого тока по условиям селективности следует отстраивать защиту кабельной линии от замыканий на землю?
5. В чем преимущество устройства КДЗС для определения поврежденной линии?
6. В чем преимущество защит относительного замера?

**Благодарю за
внимание!**