ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Моргаушская т. З. 1253 Т. 10.0000

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Е. Ф. ЦАПЕНКО

31.2
Ц17

ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6—35 кВ

МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1986

Обязат. экз.

ББК 31.27-01
Ц17
УДК 621.316.1.027.5/.7.014.7

31.27-017.4

Рецензент С. М. Литвинов

672.115

1221657

Чувашская Республиканская БИБЛИОТЕКА им. М. Горького

Цапенко Е. Ф.

Ц17 Замыкания на землю в сетях 6—35 кВ. — М.: Энергоатомиздат, 1986.—128 с.: ил.

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с замыканиями на землю в сетях 6—35 кВ и защитой сетей и электроустановок от таких повреждений.

Приведены аналитические уравнения для расчета токов замыкания на землю в установившемся и переходном режимах в сетях с изолированной и заземленной через катушку индуктивности нейтралью. Описаны устройства защиты от замыканий на землю и новые методы косвенных измерений токов замыкания на землю.

Для инженеров, занимающихся проектированием, эксплуатацией и исследованием электрических сетей, может быть полезна научным работникам, аспирантам и студентам.

Ц $\frac{2302040000-529}{051(01)-86}$ 156-86 ББК 31.27-01

© Энергоатомиздат, 1986

ПРЕДИСЛОВИЕ

Однофазным замыканиям на землю в распределительных сетях 6—35 кВ посвящено немало работ как у нас, так и за рубежом.

Однако в одних работах процессы рассматриваются с применением сложного математического аппарата, часто недоступного для многих практиков, в других — рассмотрение упрощается настолько, что не используется теоретическая электротехника, в третьих нередко отсутствует необходимая строгость применения понятий и законов теории электрических цепей. По этим причинам затрудняется понимание физических процессов, происходящих при однофазных замыканиях на землю, а следовательно, и создание надежных и эффективных средств защиты от аварийных режимов.

Цель настоящей книги заключается в том, чтобы дать специалистам-энергетикам доступное и в то же время строгое изложение основных понятий и физической сущности процессов, происходящих при однофазных замыканиях на землю. На этой основе можно более обоснованно обеспечить защиту электроустановок и сетей от воздействия аварийных токов.

Работа базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях, проведенных в основном автором в течение ряда последних лет.

Автор благодарит редакцию журнала «Промышленная энергетика» за публикацию статей, составивших основу данной книги, а также редакторов и рецензента за советы и замечания, способствовавшие улучшению книги.

Все замечания и пожелания по книге просьба направлять в адрес Энергоатомиздата: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Автор

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране неуклонно возрастает электровооруженность труда и увеличивается выработка электроэнергии. Если в одиннадцатой пятилетке было произведено 1600 млрд. кВт·ч, то утвержденные XXVII съездом КПСС «Основные направления экономического и социального развития СССР на 1985—1990 годы» намечают довести выработку электроэнергии в 1990 г. до 1880 млрд. кВт·ч.

Электрификация — главная энергетическая база технического прогресса. На развитие энергетики затрачивают огромные средства. Поэтому наряду с разработкой и осуществлением мероприятий, позволяющих упростить и удешевить энергостроительство, следует обеспечить надежность электроснабжения. Известно, что даже кратковременные перерывы в подаче электроэнергии наносят огромные убытки народному хозяйству (брак, тяжелые аварии, а иногда несчастные случаи с людьми). Для обеспечения бесперебойного электроснабжения необходима в первую очередь надежная защита от замыканий на землю как наиболее тяжелого аварийного режима.

Замыкания на землю в распределительных сетях 6—35 кВ является довольно частым явлением и составляют не менее 75% общего числа повреждений [1]. В сети с изолированной нейтралью замыкание одной фазы на землю само по себе не является аварией. Однако с увеличением протяженности электросетей увеличивается их емкость и возрастают токи замыкания на землю. Проходя через место повреждения, ток выделяет много тепла, разрушая при этом токоведущие части и изоляцию. Однофазное замыкание переходит в аварийное трехфазное, нарушая энергоснабжение потребителей. Кроме того, ток однофазного замыкания является причиной увеличения напряжения неповрежденных фаз относительно земли в $\sqrt{3}$ раз. Длительный режим способствует возникновению двойных замыканий на землю, которые даже при хорошем состоянии заземляющих устройств приводят к появлению опасных потенциалов на металлических корпусах оборудования, создают повышенную опасность для персонала.

Причины возникновения замыканий в воздушных и кабельных сетях многообразны. Они появляются вследствие механических разрушений изоляции, обрывов проводов и тросов, а также в результате разрушений изоляции из-за грозовых и внутренних перенапряжений. К внутренним перенапряжениям, как известно, относят коммутационные и резонансные. Коммутационные перенапряжения не могут иметь больших кратностей, так как возникают вследствие переходных процессов. В теоретической электротехнике показано, что коммутационные увеличения напряжений и токов в линейных цепях, как правило, не могут превышать двойную амплитуду установившегося значения. Что касается резонансных перенапряжений, то они изменятся в широких диапазонах и в пределе (теоретически) могут достигать бесконечно больших значений [2]. Перенапряжение зависит от того, насколько соотношения активных, индуктивных и емкостных элементов близки к условиям резонанса в данной цепи. Если в сети отсутствуют индуктивности относительно земли, то, очевидно, резонансные перенапряжения не возникнут.

Резонансные перенапряжения относительно земли в сетях 6—35 кВ с изолированной нейтралью вызываются образованием резонансного контура из индуктивностей и емкостей между фазами сети и землей [3]. В сетях обычно присутствуют индуктивности измерительных трансформаторов напряжения. Емкости в сети всегда имеются как между фазами, так и между фазами и землей. Как показали исследования, проведенные с участием автора, в сетях 6—10 кВ именно резонансные перенапряжения приводят к выходу из строя трансформаторов контроля изоляции.

Эффективным средством, устраняющим аварийный режим замыкания на землю, является быстрое автоматическое отключение поврежденного участка сети. В настоящее время предложено много различных принципов селективной защиты от однофазных замыканий на землю. Однако подобные устройства не нашли применения из-за ложных срабатываний, отрицательно сказывающихся на работе защиты в условиях эксплуатации. Указанное положение во многом объясняется недостаточностью теоретических разработок. В частности, отсутствует обоснованный учет амплитудных и фазовых соотношений токов и напряжений нулевой последовательности при разработке селективных защит от замыкания на землю.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Для уменьшения емкостной составляющей тока замыкания на землю в отечественной практике применяют дугогасящие реакторы, которые включают в нейтраль питающего сеть трансформатора или в нейтраль дополнительного заземляющего трансформатора, не несущего иной нагрузки. В настоящее время накоплен опыт эксплуатации сетей с реактором в нейтрали трансформатора. Однако теория процессов, имеющих место при различных режимах работы таких сетей, требует дальнейшей разработки.

В данной работе систематизированно излагаются основные вопросы, относящиеся к режимам работы сетей с изолированной и заземленной через катушки индуктивности нейтралью в условиях однофазного замыкания на землю, а также обоснованы теоретические предпосылки, необходимые для расчета, разработки и правильной эксплуатации средств защиты от замыканий на землю в сетях 6—35 кВ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

1. Схема замещения сети. Токи утечки и токи замыкания на землю

Каждый элементарный участок электрической сети сколь угодно малой длины имеет продольные и поперечные сопротивления. Поперечные сопротивления определяют токи утечки, появляющиеся вследствие несовершенства изоляции между проводами. Продольные сопротивления образованы активными составляющими проводов и индуктивностями двух противостоящих друг другу участков линии.

Следовательно, электрическая сеть или ее часть может быть представлена в виде совокупности элементарных участков, состоящих из последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений и параллельно включенных активной проводимости и емкости. При этом ток, входящий в каждый из этих элементарных участков, не равен току, выходящему из него.

Процессы в линиях передачи в общем случае исследуют на основании теории электрических цепей с распределенными параметрами. Однако относительно небольшая протяженность сетей напряжением до 35 кВ по сравнению с длиной волны позволяет считать ток в каждый момент времени в любой точке линии одинаковым. Поэтому можно рассматривать такие линии с сосредоточенными, а не распределенными параметрами.

Поскольку междуфазные сопротивления и емкости не оказывают значительного влияния на токи утечки на землю, то схема замещения трехфазной сети с изолированной нейтралью может быть представлена, как показано на рис. 1. При этом приняты следующие обозначения:

$\underline{U}_{фA}$, $\underline{U}_{фB}$, $\underline{U}_{фC}$ — комплексные фазные напряжения, равные по модулю; $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ — комплексные напряжения отдельных

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

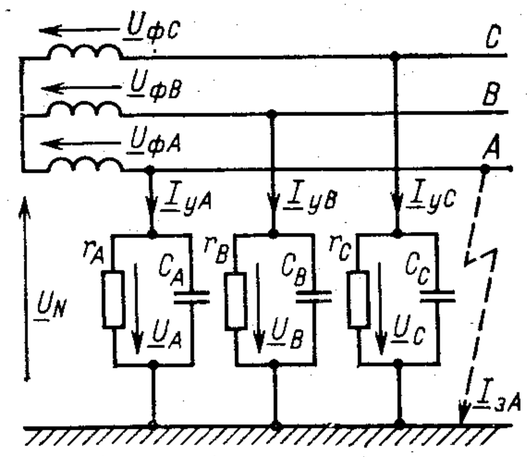


Рис. 1. Схема замещения трехфазной сети с изолированной нейтралью

фаз сети относительно земли; $\underline{U}_N$ — комплексное напряжение смещения нейтрали; $\underline{I}_{уA}$, $\underline{I}_{уB}$, $\underline{I}_{уC}$ — комплексные полные токи утечки на землю; r_A, r_B, r_C — активные сопротивления между отдельными фазами сети и землей; C_A, C_B, C_C — емкости проводов по отношению к земле.

Полные комплексные проводимости фаз сети относительно земли определяются по формуле

$$\underline{Y}_A=\frac{1}{r_A}+j\omega C_A;\quad \underline{Y}_B=\frac{1}{r_B}+j\omega C_B;\quad \underline{Y}_C=\frac{1}{r_C}+j\omega C_C.$$

Воспользуемся известным уравнением для напряжения смещения нейтрали, которое представим в виде

$$\underline{U}_N=U_ф\frac{\underline{Y}_s}{\underline{Y}_\Sigma},\qquad (1)$$

где $\underline{Y}_\Sigma=\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C$ — суммарная комплексная проводимость сети относительно земли; $U_ф$ — модуль фазного напряжения сети; $\underline{Y}_s=\underline{Y}_A+a^2\underline{Y}_B+a\underline{Y}_C$ — фазная комплексная проводимость сети относительно земли, которая равна нулю при равенстве проводимостей фаз $\underline{Y}_A=\underline{Y}_B=\underline{Y}_C$;

$a=-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}=e^{j\frac{2\pi}{3}}$ — фазный множитель, учитывающий сдвиг фаз.

Так как ток утечки в фазе A

$$\underline{I}_{уA}=(\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N)\underline{Y}_A,$$

то с учетом (1) получим

$$\underline{I}_{уA}=U_ф\frac{\underline{Y}_\Sigma-\underline{Y}_s}{\underline{Y}_\Sigma}\underline{Y}_A.\qquad (2)$$

Аналогично найдем ток утечки в фазе B

$$\underline{I}_{уB}=U_ф\frac{a^2\underline{Y}_\Sigma-\underline{Y}_s}{\underline{Y}_\Sigma}\underline{Y}_B\qquad (3)$$

и в фазе C

$$\underline{I}_{уC}=U_ф\frac{a\underline{Y}_\Sigma-\underline{Y}_s}{\underline{Y}_\Sigma}\underline{Y}_C.\qquad (4)$$

Соотношения (2)—(4) позволяют определить токи утечки в любой фазе сети при известных активных сопротивлениях r_A, r_B, r_C и емкостях C_A, C_B, C_C относительно земли.

Из этих соотношений получаем выражения для токов однофазного глухого замыкания на землю различных фаз сети. Так, для тока замыкания в фазе A ($\underline{Y}_A=\infty$) имеем

$$\underline{I}_{зA}=U_ф[\underline{Y}_B(1-a^2)+\underline{Y}_C(1-a)],\qquad (5)$$

аналогично для фазы B

$$\underline{I}_{зB}=U_ф[\underline{Y}_A(a^2-1)+\underline{Y}_C(a^2-a)]\qquad (6)$$

и для фазы C

$$\underline{I}_{зC}=U_ф[\underline{Y}_A(a-1)+\underline{Y}_B(a-a^2)].\qquad (7)$$

Таким образом, для вычисления токов утечки отдельных фаз и токов замыкания на землю необходимо располагать сведениями о параметрах изоляции сети относительно земли r_A, r_B, r_C, C_A, C_B и C_C. Для их определения разработаны специальные косвенные методы измерения (см. гл. 7).

2. Соотношения между комплексными напряжениями фаз относительно земли и их модулями

Рассмотрим, каким образом при косвенных измерениях токов утечки и замыкания на землю, параметров изоляции сети относительно земли могут быть определены комплексные напряжения фаз сети относительно земли по их модулям. Такой подход позволяет получать расчетные данные, пользуясь только показаниями вольтметров контро-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

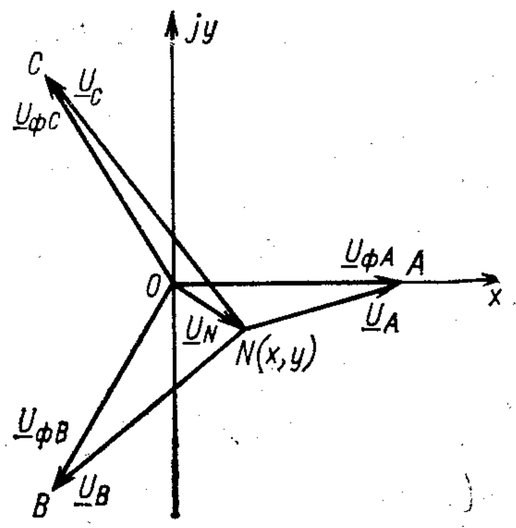


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений схемы рис. 1

ля изоляции, которые являются необходимой принадлежностью каждой сети 6—35 кВ.

Для схемы замещения сети с изолированной нейтралью, представленной на рис. 1, задача сводится к установлению зависимостей между комплексными напряжениями $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ и их модулями $|\underline{U}_A|=U_A$, $|\underline{U}_B|=U_B$, $|\underline{U}_C|=U_C$. Векторная диаграмма указанных напряжений дана на рис. 2. Найдем мнимую и действительную части комплексного напряжения смещения нейтрали $\underline{U}_N$, т. е. координаты точки $N(x, y)$.

Для этого составим уравнения окружностей с центрами в точках A, B, C и радиусами U_A, U_B, U_C:

$$\left(x-\frac{U_л}{\sqrt{3}}\right)^2+y^2=U_A^2; \qquad (8)$$

$$\left(x+\frac{U_л}{2\sqrt{3}}\right)^2+\left(y+\frac{U_л}{2}\right)^2=U_B^2; \qquad (9)$$

$$\left(x+\frac{U_л}{2\sqrt{3}}\right)^2+\left(y-\frac{U_л}{2}\right)^2=U_C^2. \qquad (10)$$

Из (8)—(10) имеем

$$x=\frac{U_B^2+U_C^2-2U_A^2}{6U_ф}; \qquad (11)$$

$$y=\frac{U_B^2-U_C^2}{2\sqrt{3}U_ф}. \qquad (12)$$

Следовательно,

$$\underline{U}_N=\frac{U_B^2+U_C^2-2U_A^2}{6U_ф}+j\frac{U_B^2-U_C^2}{2\sqrt{3}U_ф}. \qquad (13)$$

Комплексные напряжения фаз сети относительно земли

$$\underline{U}_A=\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N;\quad \underline{U}_B=a^2\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N;\quad \underline{U}_C=a\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N,$$

тогда искомые уравнения получают вид

$$\underline{U}_A=\frac{2U_A^2-(U_B^2+U_C^2)}{6U_ф}+U_ф+j\frac{U_C^2-U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}; \qquad (14)$$

$$\underline{U}_B=\frac{2U_A^2-(U_B^2+U_C^2)}{6U_ф}-\frac{1}{2}U_ф+j\left(\frac{U_C^2-U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}-\frac{\sqrt{3}}{2}U_ф\right); \qquad (15)$$

$$\underline{U}_C=\frac{2U_A^2-(U_B^2+U_C^2)}{6U_ф}-\frac{1}{2}U_ф+ +j\left(\frac{U_C^2-U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}+\frac{\sqrt{3}}{2}U_ф\right). \qquad (16)$$

Уравнения (14)—(16) позволяют по известным напряжениям фаз сети относительно земли U_A, U_B, U_C рассчитывать их комплексы $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$, значения которых необходимо знать для дальнейших расчетов токов замыкания на землю и параметров изоляции в сетях с изолированной нейтралью.

3. Распределение токов нулевой последовательности по участкам сети при замыкании фазы на землю

Исследования режимов работы сетей с изолированной нейтралью показали, что в большинстве случаев в цепи имеется несимметрия фазных напряжений. Поэтому расчет устройств защиты от замыканий на землю и контроль изоляции в сетях с изолированной нейтралью целесообразно производить по методу симметричных составляющих. При этом несимметричный режим представляется как результат наложения трех симметричных режимов. Следует отметить, что теория симметричных составляющих для систем с изолированной нейтралью в отличие от сетей с заземленной нейтралью в литературе освещена недостаточно полно. Это относится прежде всего к случаю, когда необходимо знать распределение токов нулевой последовательности по отдельным участкам сети при однофазном замыкании на землю на одном из них.

На рис. 3 приведена расчетная схема сети с тремя участками, на которых указаны условные положительные направления токов и напряжений. На схеме приняты следующие обозначения: $\underline{I}_{01}$ — ток нулевой последовательности на поврежденном участке; $\underline{I}_{02}$, $\underline{I}_{03}$ — токи нулевой по-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

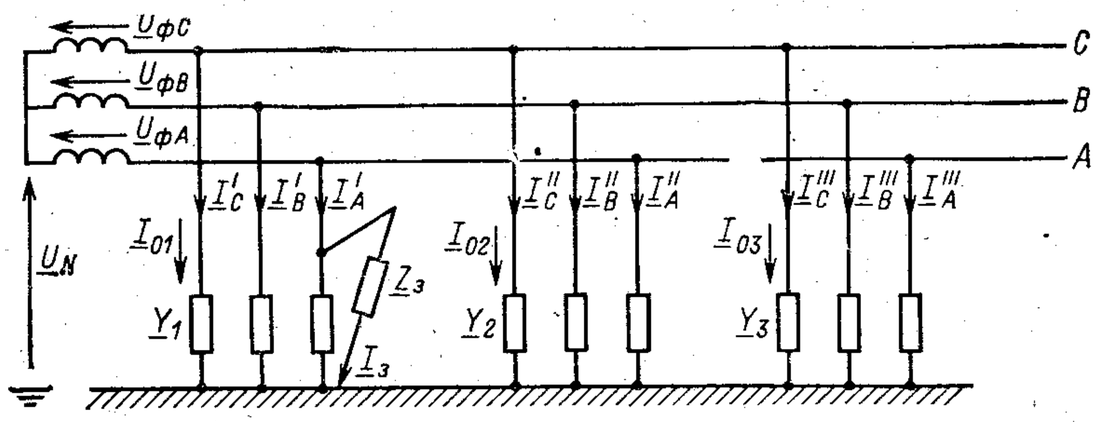


Рис. 3. Схема замещения сети с тремя участками

следовательности на неповрежденных участках; $\underline{I}_з$ — ток однофазного замыкания на землю; $\underline{Z}_з$ — сопротивление в цепи тока замыкания; $\underline{Y}_1$, $\underline{Y}_2$ $\underline{Y}_3$ — полные комплексные проводимости отдельных участков сети относительно земли.

Запишем уравнения для токов $\underline{I}'_A$, $\underline{I}'_B$, $\underline{I}'_C$ на поврежденном участке сети:

$$\left.\begin{aligned} \underline{I}'_A &= (\underline{U}_{фA} - \underline{U}_N)\left(\frac{1}{\underline{Z}_з} + \underline{Y}_1\right); \\ \underline{I}'_B &= (\underline{U}_{фB} - \underline{U}_N)\,\underline{Y}_1; \\ \underline{I}'_C &= (\underline{U}_{фC} - \underline{U}_N)\,\underline{Y}_1. \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

На основании метода симметричных составляющих ток нулевой последовательности на первом участке равен

$$\underline{I}_{01} = \frac{1}{3}(\underline{I}'_A + \underline{I}'_B + \underline{I}'_C). \qquad (18)$$

Напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_0$ равняется взятому с обратным знаком напряжению смещения нейтрали $\underline{U}_N$. Для определения $\underline{U}_N$ воспользуемся уравнением (1), тогда

$$\underline{U}_0 = -\underline{U}_N = -\frac{\underline{U}_{фA}}{1 + 3\underline{Z}_з(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3)}. \qquad (19)$$

Далее из (17)—(19) найдем

$$\underline{I}_{01} = -\underline{U}_0(\underline{Y}_2 + \underline{Y}_3). \qquad (20)$$

Аналогично

$$\underline{I}_{02} = \underline{U}_0\underline{Y}_2, \quad \underline{I}_{03} = \underline{U}_0\underline{Y}_3. \qquad (21)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

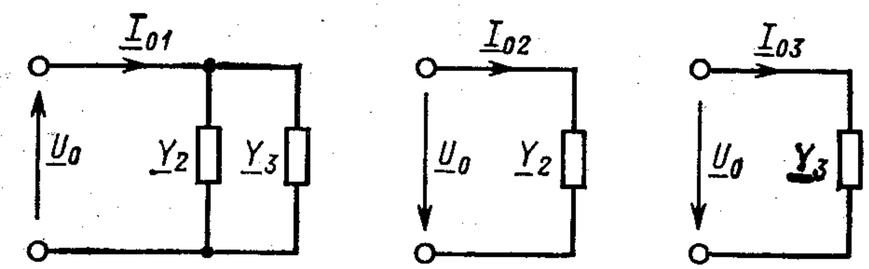


Рис. 4. Расчетные схемы токов нулевой последовательности отдельных участков сети рис. 3

Уравнениям (20) и (21) соответствуют схемы замещения, представленные на рис. 4.

Пользуясь приведенными уравнениями и схемами замещения, при известных параметрах изоляции каждой конкретной сети относительно земли, можно установить амплитудные и фазовые соотношения токов и напряжений в рассматриваемой системе электроснабжения.

В качестве примера рассчитаем симметричные составляющие тока замыкания на землю в сети 6,3 кВ при сопротивлении в месте замыкания $r_з = 1000$ Ом для следующих параметров изоляции: $g_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ См, $g_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ См, $g_3 = 3 \cdot 10^{-3}$ См, $C_1 = 5$ мкФ, $C_2 = 15$ мкФ, $C_3 = 10$ мкФ. Частота напряжения сети 50 Гц ($\omega = 314$ рад).

Для указанных параметров изоляции найдем комплексные проводимости отдельных участков сети

$$\underline{Y}_1 = g_1 + j\omega C_1 = (1 + j1{,}57) \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$\underline{Y}_2 = g_2 + j\omega C_2 = (4 + j4{,}7) \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$\underline{Y}_3 = g_2 + j\omega C_3 = (3 + j3{,}14) \cdot 10^{-3} \text{ См}.$$

Из (19) определим напряжение нулевой последовательности

$$\underline{U}_0 = -\frac{3640}{1 + 3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}(8 + j9{,}41)} = 96{,}4\,\underline{|131{,}5^\circ} \text{В}.$$

По (20) и (21) находим комплексы токов нулевой последовательности

$$\underline{I}_{01} = -96{,}4\,\underline{|131{,}5^\circ}\,(7 + j7{,}84) \cdot 10^{-3} = 1{,}01\,\underline{|-0{,}23^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{02} = 96{,}4\,\underline{|131{,}5^\circ}\,(4 + j4{,}7) \cdot 10^{-3} = 0{,}595\,\underline{|-178{,}9^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{03} = 96{,}4\,\underline{|131{,}5^\circ}\,(3 + j3{,}14) \cdot 10^{-3} = 0{,}419\,\underline{|177{,}8^\circ} \text{ А}.$$

Переходя от комплексных значений токов к действительным, получим мгновенные значения токов нулевой последовательности:

$$i_{01} = 1{,}343 \sin(\omega t - 0{,}23^\circ);$$

$$i_{02} = 0{,}84 \sin(\omega t - 178{,}9^\circ);$$

$$i_{03} = 0{,}592 \sin(\omega t + 177{,}8^\circ).$$

При глухом замыкании фаз A на землю ($r_з=0$) напряжение смещения нейтрали равно фазному напряжению замкнувшейся фазы. Для этого случая симметричные составляющие тока замыкания на землю равны:

$$\underline{I}_{01}=3640(7+j\,7{,}84)\cdot10^{-3}=38{,}26\,\underline{|48{,}3^\circ}\ \text{А};$$

$$\underline{I}_{02}=-3640(4+j\,4{,}7)\cdot10^{-3}=22{,}47\,\underline{|-130{,}4}\ \text{А};$$

$$\underline{I}_{03}=-3640(3+j\,3{,}14)\cdot10^{-3}=15{,}81\,\underline{|-133{,}7^\circ}\ \text{А}.$$

Для полученных комплексов мгновенные значения симметричных составляющих равны:

$$i_{01}=54{,}1\sin(\omega t+48{,}3^\circ);$$

$$i_{02}=31{,}8\sin(\omega t-130{,}4^\circ);$$

$$i_{03}=22{,}4\sin(\omega t-133{,}7^\circ).$$

4. Сопротивления, вносимые трансформаторами напряжения в схему замещения сети

Трансформаторы напряжения контроля изоляции подключаются между фазами сети и землей и поэтому вносят определенное сопротивление в цепь протекания тока относительно земли. Поскольку эти сопротивления носят индуктивный характер, а сеть обладает емкостью относительно земли, вносимые сопротивления могут значительно влиять на токи утечки и замыканий на землю.

При несимметричном режиме через трансформаторы напряжения проходят токи нулевой последовательности, поэтому вносимые трансформаторами сопротивления могут быть найдены как отношение напряжения нулевой последовательности к току нулевой последовательности. Для применяемых трансформаторов напряжения контроля изоляции, например, типа НТМИ справедлива зависимость $\underline{I}_0=f(\underline{U}_0)$.

Магнитная система НТМИ-6 и НТМИ-10 состоит из трех не связанных между собой магнитопроводов Ш-образной формы, на средних стержнях которых располагается по три обмотки каждой фазы, намотанных одна поверх другой. На рис. 5 для примера показан магнитопровод, на котором обмотки условно расположены рядом.

Магнитное сопротивление участка цепи равно

$$R_м=\frac{l_1}{\mu_a S_1}+\frac{l_2}{2\mu_a S_2},$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

где l_1 и l_2 — длина средних линий магнитной индукции соответствующих участков магнитной цепи; S_1 и S_2 — поперечные сечения соответствующих участков магнитной цепи; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость стали магнитопровода.

Поскольку индуктивность катушки с числом витков w определяется в общем случае как $L=w^2/R_м$, то индуктив-

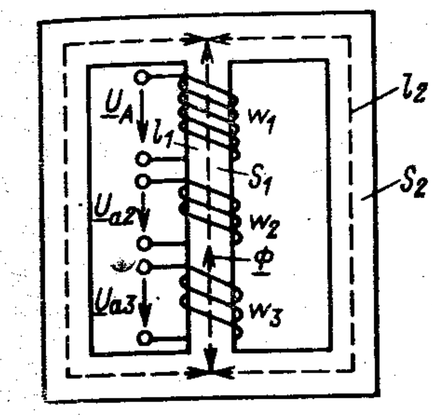


Рис. 5. Магнитопровод одной фазы трансформаторов напряжения типов НТМИ-6 и НТМИ-10

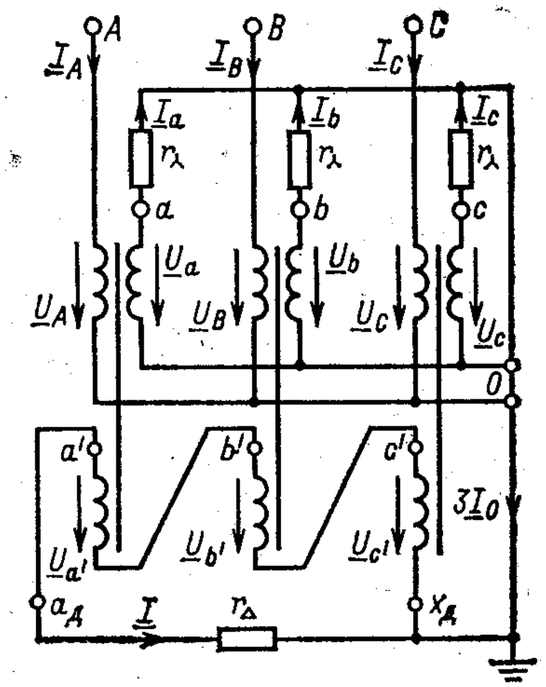


Рис. 6. Схема соединений первичных и вторичных обмоток трансформаторов типов НТМИ-6 и НТМИ-10

ное сопротивление первичной обмотки с числом витков w_1 для промышленной частоты f найдем из уравнения

$$\omega L_1=2\pi f\frac{w_1^2}{R_м}.$$

Принятая на практике схема соединений обмоток трансформатора напряжения показана на рис. 6. Найдем для этой схемы соединений обмоток вносимое сопротивление.

На основании законов Кирхгофа запишем систему уравнений:

для первичных обмоток трансформатора

$$\left.\begin{aligned}
&\underline{I}_A j\omega L_1-\underline{I}j\omega\sqrt{L_1L_3}-\underline{I}_a j\omega\sqrt{L_1L_2}=\underline{U}_A;\\
&\underline{I}_B j\omega L_1-\underline{I}j\omega\sqrt{L_1L_3}-\underline{I}_b j\omega\sqrt{L_1L_2}=\underline{U}_B;\\
&\underline{I}_C j\omega L_1-\underline{I}j\omega\sqrt{L_1L_3}-\underline{I}_c j\omega\sqrt{L_1L_2}=\underline{U}_C;
\end{aligned}\right\}\qquad(22)$$

для вторичных обмоток трансформатора, соединенных в звезду,

$$\left.\begin{aligned}
&\underline{I}_a(j\omega L_2+r_\lambda)-\underline{I}_A j\omega\sqrt{L_1L_2}+\underline{I}j\omega\sqrt{L_2L_3}=0;\\
&\underline{I}_b(j\omega L_2+r_\lambda)-\underline{I}_B j\omega\sqrt{L_1L_2}+\underline{I}j\omega\sqrt{L_2L_3}=0;\\
&\underline{I}_c(j\omega L_2+r_\lambda)-\underline{I}_C j\omega\sqrt{L_1L_2}+\underline{I}j\omega\sqrt{L_2L_3}=0;
\end{aligned}\right\}\qquad(23)$$

для вторичных обмоток, соединенных в открытой треугольник,

$$\underline{I}(r_\triangle+3j\omega L_3)-j\omega\sqrt{L_1L_2}(\underline{I}_A+\underline{I}_B+\underline{I}_C)+$$
$$+j\omega\sqrt{L_2L_3}(\underline{I}_a+\underline{I}_b+\underline{I}_c)=0.\qquad(24)$$

Определим токи и напряжения нулевой последовательности

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

$$\underline{U}_0=\frac{1}{3}(\underline{U}_A+\underline{U}_B+\underline{U}_C).$$

Из (22)—(24) можем определить

$$\underline{I}_0=\left(\frac{1}{j\omega L_1}+\frac{L_2}{L_1r_\lambda}+\frac{3L_3}{L_1r_\triangle}\right)\underline{U}_0;$$

откуда полная проводимость ТН относительно земли

$$\underline{Y}_{\text{вн}}=\frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_0}=\frac{1}{j\omega L_1}+\frac{1}{K_1^2r_\lambda}+\frac{3}{K_2^2r_\triangle};$$

здесь $K_1=\frac{w_1}{w_2}=\frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}$, $K_2=\frac{w_1}{w_3}=\frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_3}}$

— коэффициенты трансформации трансформатора напряжения.

Таким образом, вносимое трансформатором напряжения активного сопротивления

$$r_1=\left(\frac{1}{K_1^2r_\lambda}+\frac{3}{K_2^2r_\triangle}\right)^{-1}\qquad(25)$$

и индуктивное $X_1=\omega L_1$.

На рис. 7 показана схема замещения сети с учетом сопротивлений трансформатора напряжения типа НТМИ-6.

Полученные уравнения справедливы и для однофазных трансформаторов напряжения контроля изоляции типа НОМ. При этом в (25) будет отсутствовать второй член.

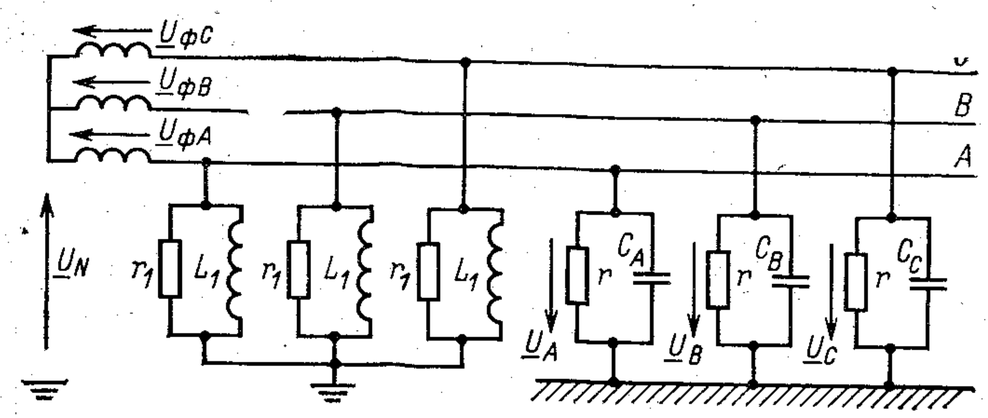


Рис. 7. Схема замещения трехфазной сети с учетом сопротивлений трансформаторов напряжения

Представляют интерес сопротивления фаз сети относительно земли, обусловленные наличием пятистержневых трансформаторов напряжения, например, типа НТМИ-18.

Пятистержневой магнитопровод трансформатора указанного типа с первичными и вторичными обмотками изображен на рис. 8, а применяемая на практике схема соединений обмоток показана на рис. 9. Найдем для этой схемы соединений обмоток вносимое сопротивление [4].

Так как коэффициент связи катушек, расположенных на одном (общем для этих катушек) сердечнике, равен единице, а для катушек, расположенных на разных сердечниках,— 1/4, то, воспользовавшись известным соотношением $M_{12}=k_{12}\sqrt{L_1L_2}$, найдем для схемы рис. 9 коэффициенты взаимоиндукции M и самоиндукции L всех катушек пятистержневого трансформатора напряжения

$$M_{AB}=M_{AC}=M_{BC}=\frac{1}{4}L_1;$$

$$M_{Aa}=M_{Bb}=M_{Cc}=\sqrt{L_1L_2};$$

$$M_{Ab}=M_{Ac}=M_{Ba}=M_{Bc}=M_{Ca}=M_{Cb}=\frac{1}{4}\sqrt{L_1L_2};$$

$$M_{ab}=M_{ac}=M_{bc}=\frac{1}{4}L_2;$$

$$M_{Aa'}=M_{Bb'}=M_{Cc'}=\sqrt{L_1L_3};$$

$$M_{Ab'}=M_{Ac'}=M_{Ba'}=M_{Bc'}=M_{Ca'}=M_{Cb'}=\frac{1}{4}\sqrt{L_1L_3};$$

$$M_{aa'}=M_{bb'}=M_{cc'}=\sqrt{L_2L_3};$$

2—5188

1221657

Чувашская Республиканская БИБЛИОТЕКА им. М. Горького

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$M_{ab'} = M_{ac'} = M_{ba'} = M_{bc'} = M_{ca'} = M_{cb'} = \frac{1}{4}\sqrt{L_2 L_3};$$

$$M_{a'b'} = M_{a'c'} = M_{b'c'} = \frac{1}{4} L_3.$$

На основании закона Кирхгофа запишем систему уравнений: для первичных обмоток, соединенных в звезду,

$$\left.\begin{aligned}
&j\omega L_1\left(\underline{I}_A - \frac{1}{4}\underline{I}_B - \frac{1}{4}\underline{I}_C\right) - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(\underline{I}_a - \frac{1}{4}\underline{I}_b - \frac{1}{4}\underline{I}_c\right) - \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_1 L_3}\underline{I} = \underline{U}_A; \\
&j\omega L_1\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_A + \underline{I}_B - \frac{1}{4}\underline{I}_C\right) - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_a + \underline{I}_b - \frac{1}{4}\underline{I}_c\right) - \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_1 L_3}\underline{I} = \underline{U}_B; \\
&j\omega L_1\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_A - \frac{1}{4}\underline{I}_B + \underline{I}_C\right) - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_a - \frac{1}{4}\underline{I}_b + \underline{I}_c\right) - \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_1 L_3}\underline{I} = \underline{U}_C;
\end{aligned}\right\} \quad (26)$$

для вторичных обмоток ТН, соединенных в звезду,

$$\left.\begin{aligned}
&\underline{I}_a r_\lambda + j\omega L_2\left(\underline{I}_a - \frac{1}{4}\underline{I}_b - \frac{1}{4}\underline{I}_c\right) + \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_2 L_3}\underline{I} - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(\underline{I}_A - \frac{1}{4}\underline{I}_B - \frac{1}{4}\underline{I}_C\right) = 0; \\
&\underline{I}_b r_Y + j\omega L_2\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_a + \underline{I}_b - \frac{1}{4}\underline{I}_c\right) + \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_2 L_3}\underline{I} - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_A + \underline{I}_B - \frac{1}{4}\underline{I}_c\right) = 0; \\
&\underline{I}_c r_\lambda + j\omega L_2\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_a - \frac{1}{4}\underline{I}_b + \underline{I}_c\right) + \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_2 L_3}\underline{I} - \\
&- j\omega\sqrt{L_1 L_2}\left(-\frac{1}{4}\underline{I}_A - \frac{1}{4}\underline{I}_B + \underline{I}_C\right) = 0;
\end{aligned}\right\} \quad (27)$$

для вторичных обмоток, соединенных в треугольник,

$$\underline{I}\left(r_\Delta + \frac{3}{2} j\omega L_3\right) + \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_2 L_3}\,(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) - \\ - \frac{1}{2} j\omega\sqrt{L_1 L_3}\,(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0. \quad (28)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

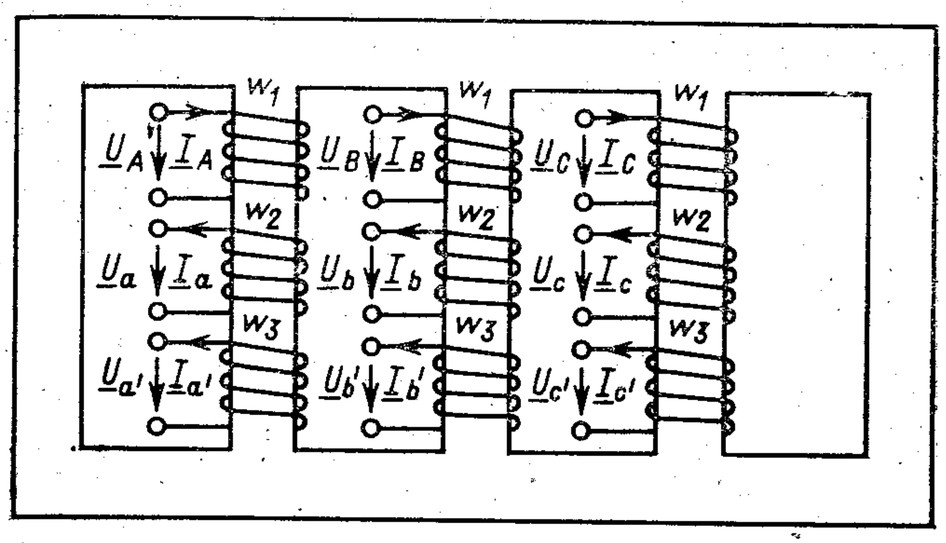


Рис. 8. Магнитопровод пятистержневого трансформатора напряжения типа ТНМИ-18

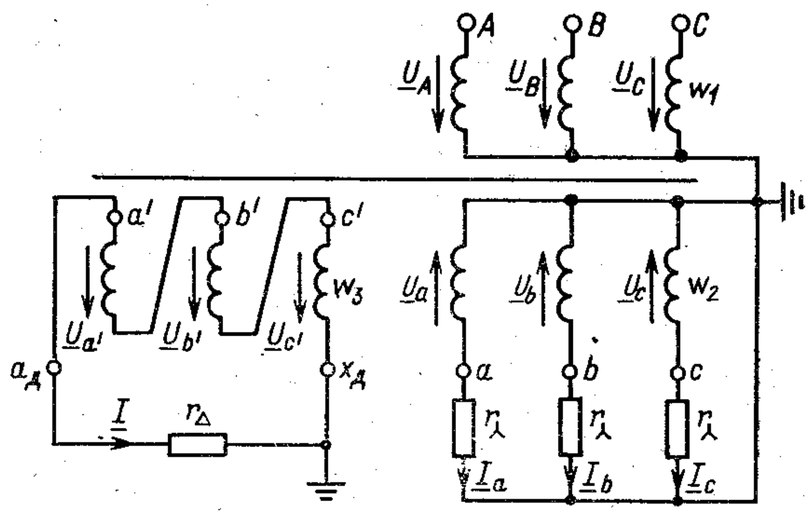


Рис. 9. Схема соединений первичных и вторичных обмоток пятистержневых трансформаторов напряжения типа ТНМИ-18

Воспользуемся выражением для токов и напряжений нулевой последовательности

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_0;$$
$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 3\underline{U}_0.$$

Тогда из (26)—(28) найдем

$$\underline{I}_0 = \left(\frac{2}{j\omega L_1} + \frac{L_2}{L_1 r_\lambda} + \frac{3L_3}{L_1 r_\Delta}\right)\underline{U}_0,$$

откуда полная проводимость пятистержневого трансформатора напряжения относительно земли будет

$$\underline{Y}_{вн} = \frac{1}{K_1^2 r_\lambda} + \frac{3}{K_2^2 r_\Delta} + \frac{2}{j\omega L_1}.$$

Таким образом, вносимое каждой фазой пятистержневого трансформатора напряжения типа НТМИ-18 активное сопротивление имеет такие же составляющие, как активное сопротивление трансформаторов типов НТМИ-6 и НТМИ-10:

$$r_1 = \left(\frac{1}{K_1^2 r_\Lambda} + \frac{3}{K_2^2 r_\triangle}\right)^{-1}.$$

Индуктивное сопротивление имеет в 0,5 раза меньшее значение

$$X_1 = \frac{1}{2}\omega L_1.$$

Следовательно, в схеме замещения рис. 7 вместо значения индуктивности L_1 должно быть $0{,}5L_1$. При этом, разумеется, численные значения индуктивности L_1 однофазных трансформаторов НТМИ-6 и трехфазных НТМИ-18 не равны между собой, так как они зависят от конструктивных размеров магнитопровода и числа витков.

Приведенные уравнения и схема замещения сети, учитывающая сопротивления трансформатора напряжения, могут быть использованы для исследования резонансных явлений в системах электроснабжения.

Рассмотрим условие, при котором возможно возникновение резонанса в сетях 6—10 кВ при наличии в ней измерительного трансформатора напряжения, например, типа НТМИ-6.

Перенапряжения относительно земли удобно характеризовать напряжением смещения нейтрали $\underline{U}_N$, так как оно определяет напряжения фаз относительно земли

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{\text{ф}A} - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_{\text{ф}B} - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_{\text{ф}C} - \underline{U}_N.$$

Для схемы сети с внесенными трансформаторами напряжения сопротивлениями (рис. 7) напряжение смещения нейтрали равно

$$\underline{U}_N = U_\text{ф} \frac{j\omega(C_A + a^2 C_B + aC_C)}{3/r_1 + 3/r + j\left(\omega C_A + \omega C_B + \omega C_C - \frac{3}{\omega L_1}\right)}.$$

Следовательно, кратность перенапряжений может быть рассчитана из уравнения

$$K = \frac{U_N}{U_\text{ф}} = \omega \sqrt{\frac{(C_A + C_B + C_C)^2 - 3(C_A C_B + C_B C_C + C_C C_A)}{\left(\frac{3}{r_1} + \frac{3}{r}\right)^2 + \omega^2\left(C_A + C_B + C_C - \frac{3}{\omega^2 L_1}\right)^2}}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

При резонансе, когда

$$C_A + C_B + C_C = \frac{3}{\omega^2 L_1},$$

кратность перенапряжения имеет наибольшее значение и определяется уравнением

$$K = \frac{r_1 r\omega}{3(r_1 + r)} \sqrt{C_\Sigma^2 - 3(C_A C_B + C_B C_C + C_C C_A)}, \qquad (29)$$

где $C_\Sigma = C_A + C_B + C_C$ — суммарная емкость сети относительно земли; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Индуктивность L_1 одной фазы трансформатора напряжения типа НТМИ-6 равна примерно 180 мГн. В сетях одновременно могут работать до десяти трансформаторов напряжения. При этом

$$C_A + C_B + C_C = \frac{3 \cdot 10^6}{314 \cdot 180 \cdot 10^{-1}} = 1{,}6 \text{ мкФ}.$$

Покажем, что резонанс может возникнуть при малых емкостях сети относительно земли, т. е. когда сеть имеет небольшую протяженность. В этих условиях активное сопротивление проводов относительно земли может достигать больших значений, в пределе — бесконечности.

Пусть, например, $C_A = C_B = 0{,}5$ мкФ, $C_C = 0{,}6$ мкФ, $r = 300$ кОм. Тогда при разомкнутых вторичных обмотках трансформаторов напряжения ($r_1 = \infty$) из (29) найдем

$$K = \frac{300 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 10^{-6}}{3} \sqrt{(1{,}6)^2 - 3(0{,}5 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}6 + 0{,}6 \cdot 0{,}5)} =$$

$$= 3{,}14.$$

Таким образом, в данном примере, в котором рассмотрены реальные параметры сети, возможно более чем трехкратное увеличение напряжения смещения нейтрали, а следовательно, и напряжений сети относительно земли.

Следует заметить, что при $r_\triangle = 0$ напряжение смещения нейтрали U_N равно нулю. Поэтому Правила устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуют в цепь вторичной обмотки трансформатора контроля изоляции, соединенной в разомкнутый треугольник, включать активное сопротивление $r_\triangle = 25$ Ом [5]. В зарубежной практике для ограничения резонансных перенапряжений применяют сети с нейтралью, заземленной через резистор.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

5. Общие сведения

При однофазном замыкании в линиях 6—35 кВ в зоне контакта проводника с землей часто возникает электрическая дуга. Аварийный процесс характеризуется рядом следующих друг за другом повторных зажиганий и погасаний электрической дуги. Дуга, играя роль своеобразного коммутатора, периодически закорачивает емкость поврежденной фазы относительно земли, затем вновь включает ее в сеть. Погасание и зажигание перемежающейся дуги вызывает сложные переходные процессы, интенсивность которых зависит от таких факторов, как, например, характеристика дуги, емкость, индуктивность, сопротивление цепи и др.

Необходимо отметить, что учет всех факторов, влияющих на переходные процессы, при перемежающихся замыканиях на землю представляет собой трудную задачу. В настоящее время из-за сложности физических явлений, связанных с дуговыми замыканиями, не существует их строгого аналитического описания. Иначе говоря, процессы, происходящие при перемежающихся однофазных замыканиях на землю, не удается описать простыми математическими уравнениями. Из-за отсутствия данных о закономерностях изменения токов и напряжений затруднено создание надежных и эффективных мер по защите электрических сетей от дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

Вообще говоря, изучению однофазных замыканий на землю, сопровождающихся горением перемежающейся электрической дуги в месте замыкания, и возникающих при этом перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью посвящено немало работ как у нас, так и за рубежом.

Первые попытки исследования дуговых перенапряжений, вызванных переходными процессами, относятся к 1917 г. и принадлежат известному немецкому электроэнергетику Петерсену. В своих теоретических разработках Петерсен, опираясь на экспериментальные данные и осциллографические наблюдения, интуитивно приходит к обоснованию механизма развития перенапряжений. Исходя из

этого даны формулы и уравнения для вычисления кратностей указанных перенапряжений.

Не приводя строгого научно обоснованного анализа, Петерсен объясняет образование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю возникновением в поврежденной сети «уравнительных зарядов», из-за чего повышается общий потенциал сети. В сумме с рабочим напряжением сети колебания высокой частоты, образующиеся при каждом погасании и повторном зажигании перемежающейся дуги, приводят к развитию кумулятивного процесса формирования перенапряжений. При этом амплитуда высокочастотных колебаний, уравнительных зарядов определяется по упрощенным формулам. Своей недостаточной теоретической обоснованностью приведенные формулы вызывали сомнения в математической точности. В целом вся теоретическая трактовка механизма образования дуговых перенапряжений по Петерсену носит характер гипотезы. Естественно, что при таком уровне обоснования теория не может быть признана совершенной и являться основой для расчета дуговых перенапряжений и разработки мер защиты от аварий, особенно в современных мощных энергосистемах.

Дальнейшее развитие теория дуговых перенапряжений получила в работах советских ученых. Было, в частности, высказано мнение, что в механизме образования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю существенную роль играет скорость восстановления электрической прочности дугового промежутка в месте повреждения сети. Однако эта теория из-за отсутствия аналитического аппарата при изучении рассматриваемых повреждений энергосистемы не вскрыла сущности образования дуговых перенапряжений и оставила открытым вопрос о механизме их образования.

Автором проведен дополнительный анализ физических процессов, возникающих в электрических сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю одной фазы через перемежающуюся электрическую дугу. Ниже приводятся наиболее существенные теоретические результаты, в основном объясняющие суть и причины возникновения дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю как в однофазных, так и в трехфазных сетях.

В исследованиях была использована в качестве исходной гипотеза Петерсена о том, что дуга гаснет при прохождении тока через нуль и зажигается при прохождении

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

напряжения в области дуги через ближайший максимум. Многочисленные эксперименты, проведенные как самим Петерсеном, так и другими исследователями, подтверждают этот факт.

В рассматриваемом режиме дуга попеременно гаснет и зажигается, причем это происходит через каждые полпериода.

Перемежающаяся дуга каждый раз вызывает сложные переходные процессы. В своей гипотезе Петерсен отмечал существование таких переходных процессов и даже полагал, что именно они приводят к перенапряжениям. Однако теоретические исследования переходных процессов проведены не были. Поэтому установленная Петерсеном максимальная кратность напряжений при переходных процессах, равная 3—4, по сравнению с номинальными значениями фазных напряжений сети не может считаться достоверной.

Необходимо отметить, что анализ переходных процессов при перемежающихся замыканиях на землю с учетом различных факторов требует специальных методов и не является предметом данной главы.

Бездуговые однофазные замыкания на землю в сетях 6—35 кВ с изолированной нейтралью также являются довольно частым явлением. Такие замыкания сопровождаются прохождением в земле тока, значение которого в переходном режиме определяется в основном емкостью проводов сети относительно земли. Вообще говоря, целесообразно различать два вида бездуговых однофазных замыканий: замыкания на землю и замыкания на корпус. В ПУЭ [5] отмечается: «Замыканием на землю называется случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с конструктивными частями, не изолированными от земли, или непосредственно с землей. Замыканием на корпус — случайное соединение находящихся под напряжением частей электроустановки с их конструктивными частями, нормально не находящимися под напряжением».

Это различие имеет существенное значение, поскольку во втором случае может иметь место значительное переходное сопротивление в месте замыкания. В том и другом случае возникает ток, который будем называть током однофазного замыкания.

Глухие однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью приводят, как известно, к увеличению напряжения неповрежденных фаз относительно земли

в $\sqrt{3}$ раз. Более того, однофазные замыкания являются причиной возникновения перенапряжений высокой кратности. Возникающие перенапряжения могут вызвать повреждение изоляции, поражение людей током, а также привести к пожарам и взрывам. В § 11 рассмотрен пример переходного процесса, возникшего в результате замыкания на корпус трансформатора мачтовой подстанции 6—0,4 кВ. Возникшие при этом перенапряжения привели к пожару с большими убытками.

6. Трехфазная сеть с идеальной изоляцией

Пусть имеется симметричная трехфазная сеть с изолированной нейтралью (рис. 10). Рассмотрим поведение такой сети при однофазном дуговом замыкании на землю, например, в фазе A. Будем полагать, что первое замыкание произошло в момент времени $t=0$, когда напряжение

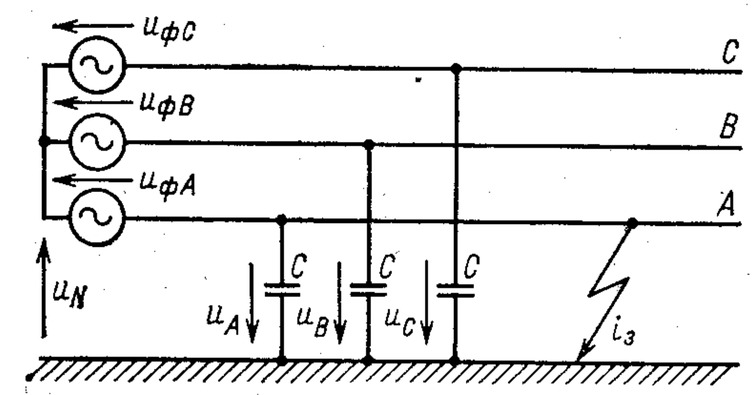


Рис. 10. Расчетная схема идеализированной сети при однофазном замыкании на землю

фазы A относительно земли имело максимальное значение. Изменение фазных напряжений источника питания сети запишем в виде

$$u_{фA}=U_{mф}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_{фB}=U_{mф}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}-\frac{2\pi}{3}\right);$$

$$u_{фC}=U_{mф}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}-\frac{4\pi}{3}\right).$$

Непосредственно перед замыканием фазы A на землю, т. е. при $t=(-0)$, напряжения фаз A, B, C относительно земли имели значения

$$u_A(-0)=U_{mф};\ u_B(-0)=u_C(-0)=-0{,}5U_{mф}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

В интервале времени от $\omega t=0$ до $\omega t=\pi$ (назовем его первым интервалом) ток замыкания на землю изменяется по закону

$$i_з=3U_{mф}\omega C\sin(\omega t+\pi),$$

а напряжение смещения нейтрали u_N будет равно напряжению фазы A источника.

Согласно гипотезе Петерсена дуга гаснет при прохождении тока замыкания через ближайший нуль. Это случится в момент $\omega t=\pi$ (рис. 11). Емкость поврежденной фазы больше не будет закорочена током дуги, сопротивление которой мы полагаем равным нулю. Следовательно, произойдет мгновенное перераспределение напряжений на емкостях сети относительно земли.

Напряжение смещения нейтрали в следующем интервале, т. е. при $\pi\leqslant\omega t\leqslant\frac{3}{2}\pi$, найдем из операторной схемы рис. 12. Так, напряжение смещения нейтрали в операторной форме

$$U_N(p)=-\frac{U_{mф}}{p}.$$

Переход от изображения к оригиналу дает

$$u_N=-U_{mф}.$$

Следовательно, нулевая точка трехфазного источника относительно земли после погасания дуги принимает не изменяющийся во времени потенциал, равный по значению амплитуде фазного напряжения сети.

Поэтому напряжения в сети в интервале погасания дуги будут определяться выражениями:

$$u_A=U_{mф}\left[\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)+1\right];$$

$$u_B=U_{mф}\left[\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}-\frac{2\pi}{3}\right)+1\right];$$

$$u_C=U_{mф}\left[\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}-\frac{4\pi}{3}\right)+1\right].$$

Таким образом, напряжения фаз сети относительно земли могут достигать значения, равного удвоенной амплитуде фазного напряжения сети $2U_{mф}$ (рис. 11).

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

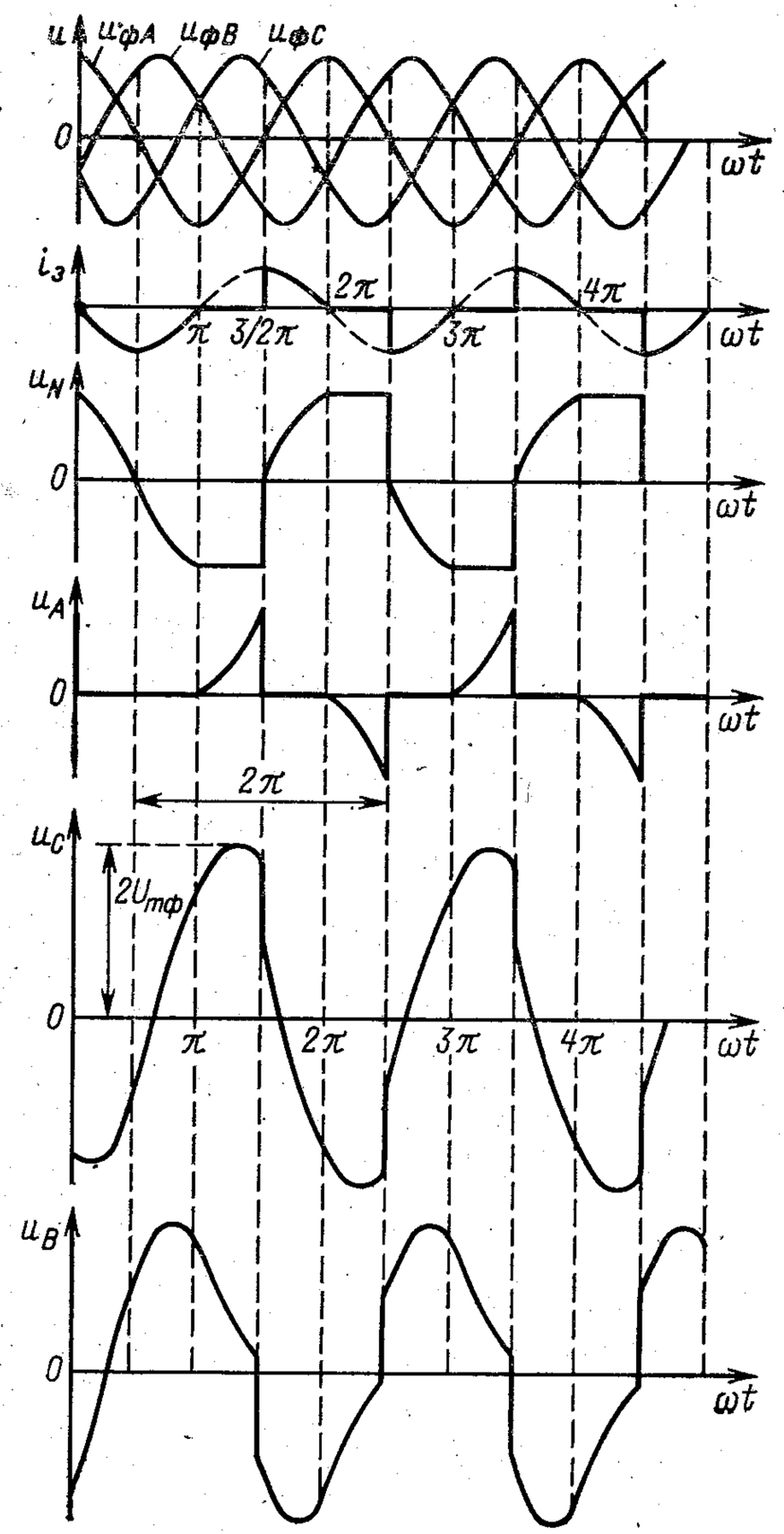


Рис. 11. Кривые, характеризующие переходный процесс при дуговом замыкании на землю в схеме рис. 10

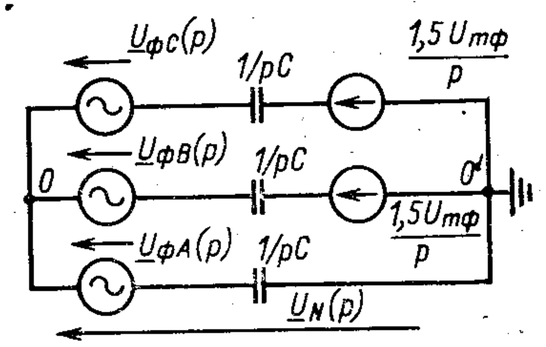


Рис. 12. Операторная схема расчета переходного процесса для интервала $\pi \leqslant \omega t \leqslant \frac{3}{2}\pi$

В момент $\omega t = \frac{3}{2}\pi$ напряжение фазы A опять достигнет максимума, $u_A = U_{mф}$, т. е. опять возникает ток дуги на землю. В этот момент конденсатор закоротится, в связи с этим произойдет скачок тока $i_з$ (рис. 11). Далее процесс, как и с момента $\omega t = \frac{\pi}{2}$, повторится, только все значения (токи, напряжения) поменяют знаки.

Таким образом, при дуговых замыканиях на землю наибольшее перенапряжение не может превышать удвоенной амплитуды приложенного фазного напряжения в идеальной сети.

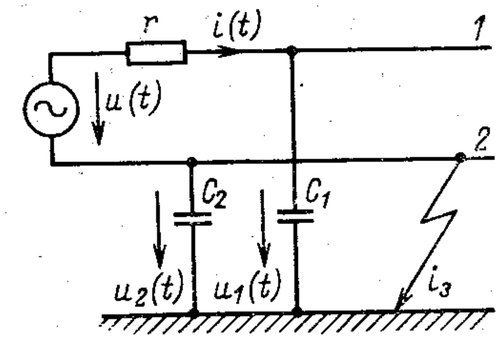
7. Однофазная сеть, обладающая активным сопротивлением и емкостью

Определяющим в развитии перенапряжений является процесс, протекающий в сети непосредственно после очередного погасания заземляющей дуги. Этот физический процесс характеризуется восстановлением напряжений фаз сети по отношению к земле. Наглядно это может быть проиллюстрировано схемой замещения однофазной сети, представленной на рис. 13. На схеме C_1 и C_2 — емкости фаз сети относительно земли. При одинаковой протяженности проводов линии электропередачи они принимаются равными по значению, т. е. $C_1 = C_2 = C$. Сопротивление r учитывает активные потери в цепи замыкания. В частности, им может являться активное сопротивление проводов. Напряжение источника электроэнергии задано выражением

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Вследствие погасания перемещающейся электрической дуги, что для схемы рис. 13 соответствует включению в сеть емкости второго провода относительно земли, в образующейся при этом цепи возникает переходный процесс, который и определяет закон изменения напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ проводов сети по отношению к земле.

Рис. 13. Расчетная схема однофазной сети при замыкании на землю в однофазной сети



Пользуясь любым из известных методов расчета переходных процессов, нетрудно получить

$$u_1(t) = \frac{U_m}{\sqrt{(\omega Cr)^2 + 4}} \sin\left(\omega t + \psi + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 20 + 16/(\omega Cr)^2}} e^{-\frac{2}{rC}t} + \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 4}} \sin\left(\psi + \varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_2(t) = -\frac{U_m}{\sqrt{(\omega Cr)^2 + 4}} \sin\left(\omega t + \psi + \varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 20 + \frac{16}{(\omega Cr)^2}}} e^{-\frac{2}{rC}t} + \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 4}} \sin\left(\psi + \varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $\varphi_1 = \operatorname{arctg} 1/\omega Cr$; $\varphi_2 = \operatorname{arctg} 2/\omega Cr$.

Емкостный ток на землю в переходном режиме, когда ток дуги замыкания на землю $i_з = 0$, определяется уравнением

$$i(t) = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + \frac{4}{(\omega C)^2}}} \sin(\omega t + \psi + \varphi_2) + \frac{U_m e^{-\frac{2}{rC}t}}{\sqrt{(\omega Cr)^2 + 5 + 4/(\omega Cr)^2}}.$$

Из представленных выражений видно, что напряжения фаз сети относительно земли $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в результате переходного процесса после погасания заземляющей дуги приобретают некоторые постоянные составляющие, равные по значению и одинаково ориентированные по отношению к земле

$$u_{01} = u_{02} = \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 4}} \sin\left(\psi + \varphi_1 - \frac{\psi}{2}\right) = \text{const}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Очевидно, что указанные постоянные составляющие присутствуют в сети до очередного повторного зажигания дуги. В сумме с рабочим фазным напряжением эти составляющие обусловливают повышение напряжений сети по отношению к земле. Кратность образующихся перенапряжений зависит от многих факторов, в том числе от параметров сети и от моментов времени, в которые происходят повторные зажигания и погасания перемежающейся дуги.

Так можно показать, что при

$$\psi = (2k+1)\frac{\pi}{2} - \varphi_1, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$$

$$u_{01} = u_{02} = 0,$$

а при $\psi = (k+1)\pi - \varphi_1$, $k = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots$

$$u_{01} = u_{02} = \pm \frac{U_m}{\sqrt{4(\omega Cr)^2 + 4}} = \pm u_{0\,max}.$$

Таким образом рассмотренный физический процесс лежит в основе формирования дуговых перенапряжений в однофазных сетях, а учет активных потерь позволяет количественно оценить кратность этих перенапряжений.

8. Трехфазная сеть с емкостью и активными сопротивлениями изоляции

Рассмотрим процессы, происходящие при дуговом замыкании на землю в симметричной трехфазной сети при $C_A = C_B = C_C = C$, $r_A = r_B = r_C = r$, схема замещения которой представлена на рис. 1.

Для указанной схемы мгновенные значения фазных напряжений источника питания зададим уравнениями

$$u_{\text{ф}A} = U_m \sin(\omega t + \psi);$$

$$u_{\text{ф}B} = U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$u_{\text{ф}C} = U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right),$$

где ψ — угол зажигания дуги, принятый равным $\pi/2$.

При анализе схемы замещения учитывалась периодичность появления и исчезновения дуги в месте замыкания. Определим зависимость напряжений фаз сети относительно земли от времени для любого аварийного цикла перемежающегося замыкания. При этом под аварийным циклом понимается промежуток времени между двумя следующими друг за другом зажиганиями дуги.

Каждый цикл разделен на два этапа так, что в течение первого ($t_{2n} \leqslant t \leqslant t_{2n+1}$) осуществляется дуговое замыкание, а при втором ($t_{2n} \leqslant t \leqslant t_{2n+2}$) дуга отсутствует. Для напряжений фаз сети относительно земли и тока замыкания на землю можно записать следующие уравнения:

в интервале $t_{2n} \leqslant t \leqslant t_{2n+1}$ при $n = 0, 1, 2 \ldots$

$$\left.\begin{aligned} u_A(t) &= 0; \\ u_B(t) &= \sqrt{3}U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{6}\right); \\ u_C(t) &= \sqrt{3}U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right); \end{aligned}\right\} \quad (30)$$

$$i(t) = 3\sqrt{\frac{1}{r^2} + (\omega C)^2}\, U_m \sin(\omega t + \psi + \varphi + \pi/2), \quad (31)$$

где $\varphi = \operatorname{arctg} - 1/\omega Cr$.

В результате очередного погасания заземляющей дуги в момент времени $t = t_{2n+1}$ в сети возникают переходные процессы, определяющие изменения напряжений фаз сети относительно земли. Эти напряжения в течение второго этапа аварийного цикла, определяемого промежутком времени $t_2 \leqslant t \leqslant t_{2n+2}$, описываются уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} u_A(t) &= U_m \sin(\omega t + \psi) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\frac{t - t_{2n+1}}{rC}}; \\ u_B(t) &= U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\frac{t - t_{2n+1}}{rC}}; \\ u_C(t) &= U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\frac{t - t_{2n+1}}{rC}}, \end{aligned}\right\} \quad (32)$$

где $n = 0, 1, 2 \ldots$

Из (30) видно, что напряжения фаз сети по отношению к земле в течение первого этапа произвольного n-го аварийного цикла оказываются равными линейному напряжению сети, которое и определяет возникающие в данном случае перенапряжения. В течение второго этапа перенапряжения зависят от времени переходного процесса со-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

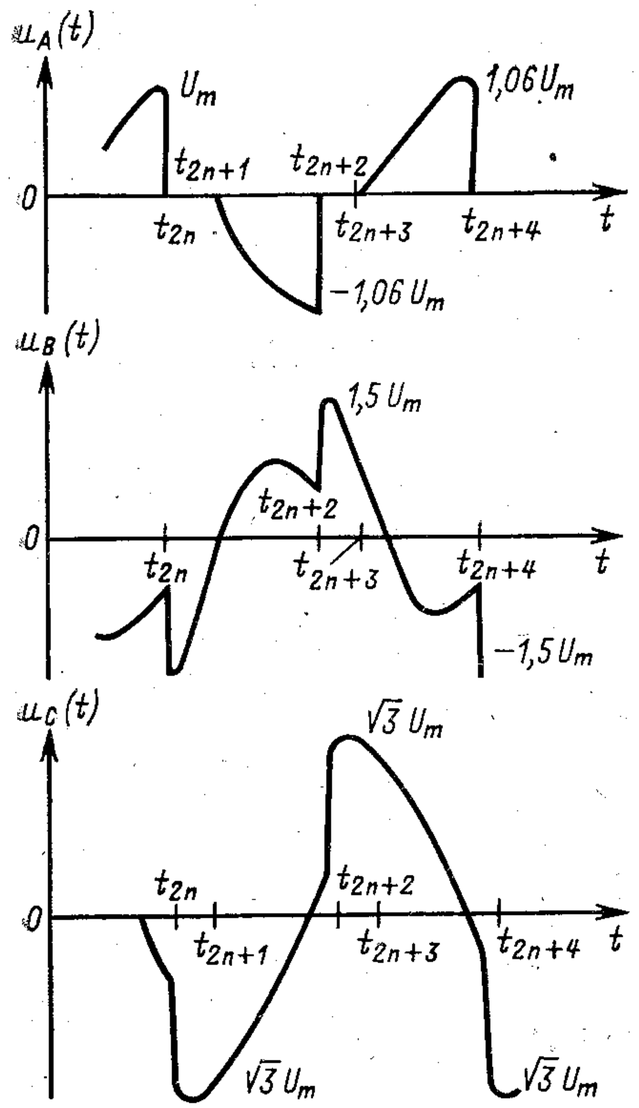


Рис. 14. Кривые, характеризующие переходный процесс при дуговом замыкании на землю в однофазной сети

ответственно уравнениям (32). Постоянная времени определяется параметрами сети r и C.

В качестве примера на рис. 14 приведены графики, иллюстрирующие аналитические зависимости (30) и (32), которые описывают аварийный режим однофазного замыкания на землю для случая, когда параметры сети удовлетворяют условию

$$r = \frac{1}{\omega C}. \qquad (33)$$

При указанном соотношении параметров r и C уравнения (32) и (31) имеют вид

$$u_A(t) = U_m \sin(\omega t + \psi) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\omega(t - t_{2n+1})};$$

$$u_B(t) = U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\omega(t - t_{2n+1})};$$

$$u_C(t) = U_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right) - U_m \sin(\omega t_{2n+1} + \psi)\, e^{-\omega(t - t_{2n+1})};$$

$$i(t) = 3\sqrt{2}\,\omega C U_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{\pi}{4}\right). \qquad (34)$$

Следует отметить, что фазовые углы повторных зажиганий и погасаний заземляющей дуги определяются решением трансцендентных уравнений, соответствующих каждому этапу n-го цикла. Решение таких уравнений может быть получено графическим методом. При выполнении условия (33) имеем

$$\omega t_{2n} = \pi n, \quad \omega t_{2n+1} = \frac{\pi}{4}(1 + 4n),$$

где $n = 0, 1, 2 \ldots$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Уравнения (32) и графики рис. 14 позволяют сделать вывод о том, что дуговые перенапряжения, возникающие в сети в результате переходных процессов во втором этапе каждого аварийного цикла, зависят от сопротивления изоляции r и тем меньше, чем меньше это сопротивление. При $r = 1/\omega C$ они не превышают амплитудного значения линейного напряжения данной сети.

Следовательно, искусственно изменяют активное сопротивление сети относительно земли так, чтобы выполнялось условие $r \leqslant 1/\omega C$. Это означает возможность существенно влиять на кратность дуговых перенапряжений, возникающих в сетях с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю. Для этого может служить устройство, состоящее из трех активных сопротивлений, подключенных к фазам защищаемой сети, с общей заземленной точкой. Такие устройства отличаются простотой, невысокой стоимостью, требуют минимального ухода и достаточно надежно работают без регулировки.

9. Общая методика исследования и расчета дуговых замыканий

Реальные сети обладают, кроме емкостной проводимости фаз относительно земли, активно индуктивным сопротивлением проводов. Поэтому при перемежающихся замыканиях дуги на землю возможны колебательные процессы. Возникающие при этом перенапряжения будут иметь некоторую кратность относительно полученных ранее значений для идеализированных сетей. В связи с этим процессы, происходящие при перемежающейся дуге целесообразно исследовать на принципиальной схеме, представленной на рис. 15, в которой учтены индуктивности L и сопротивления r проводов. В данном случае целесообразно рассматривать возникающие переходные процессы

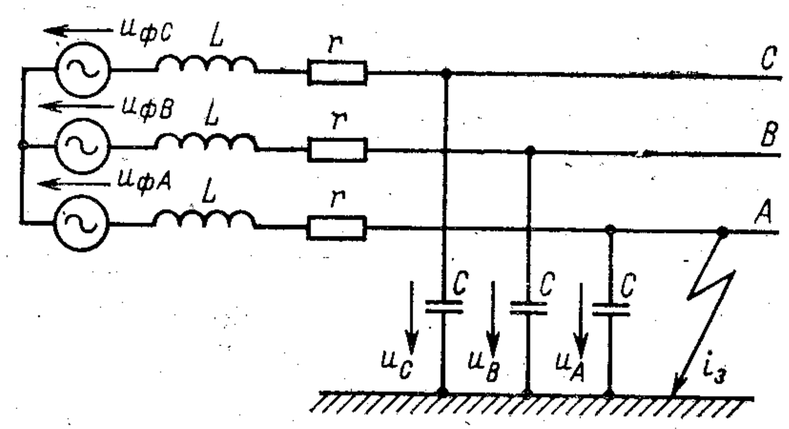


Рис. 15. Расчетная схема трехфазной сети, обладающая активным и индуктивным сопротивлениями при замыкании фазы на землю

шаг за шагом, начиная с первоначального возникновения дуги. Мы уже отмечали сложность таких задач. Поэтому приведем здесь лишь методику решения и основные расчетные соотношения.

Логично предположить, что возникновение дуги происходит в тот момент, когда напряжение данной фазы имеет значение, близкое к амплитудному. Найдем напряжение на поврежденной фазе A в момент прохождения его через максимум и из этого условия определим начальную фазу ψ напряжений трехфазного источника. Имеем

$$u_{\text{ф}A}=U_{m\text{ф}}\sin(\omega t+\psi);$$

$$u_{\text{ф}B}=U_{m\text{ф}}\sin\left(\omega t+\psi-\frac{2\pi}{3}\right);$$

$$u_{\text{ф}C}=U_{m\text{ф}}\sin\left(\omega t+\psi-\frac{4\pi}{3}\right).$$

Согласно принятой схеме напряжение на фазе A до замыкания на землю определяется уравнением

$$u_A=\frac{U_{m\text{ф}}}{\sqrt{r^2\omega^2C^2+(1-\omega^2LC)}}\sin(\omega t+\psi-\varphi),$$

где

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{r\omega C}{1-\omega^2LC}.$$

Очевидно, что для момента времени $t=0$ наибольшее значение u_A будет иметь при $\psi=\frac{\pi}{2}-\varphi$. Таким образом, начальную фазу ψ будем считать величиной известной.

Расчет тока переходного процесса теперь легко произвести из операторной схемы, представленной на рис. 16,*а*. Имея выражение для тока переходного процесса, можно определить момент времени погасания дуги, приняв $i_з=0$.

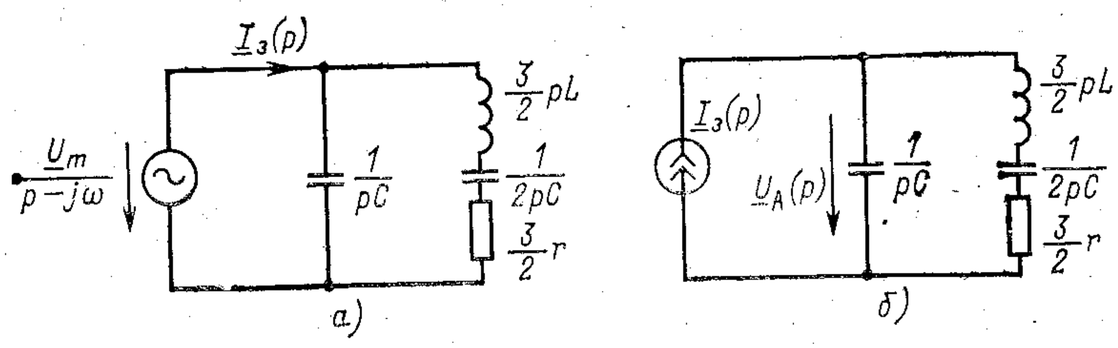


Рис. 16. Операторные схемы расчета тока замыкания на землю: *а* — при горении дуги; *б* — после погасания дуги

Напряжение на емкости поврежденной фазы после погасания дуги целесообразно определять из операторной схемы замещения с источником тока (рис. 16,*б*) как

$$\underline{U}_A(p)=\underline{I}_з(p)\underline{Z}(p),$$

где операторное сопротивление имеет вид

$$\underline{Z}(p)=\frac{1/2\left(3r+3pL+\frac{1}{pC}\right)\frac{1}{pC}}{1/2\left(3r+3pL+\frac{1}{pC}\right)+\frac{1}{pC}}.$$

Переход от изображений к оригиналам осуществляется по формуле Хевисайда.

Рассматривая, таким образом, интервал за интервалом погасания и зажигания дуги, получим картину переходных процессов, из которой можно определить кратности возникающих перенапряжений для конкретных параметров цепи r, L и C.

10. Расчет токов переходных процессов при глухих замыканиях на землю

Токи переходного процесса отличаются от токов установившегося режима наличием свободных составляющих.

Ток однофазного замыкания на землю при переходном процессе наиболее просто можно определить на основании метода эквивалентного генератора расчета линейных цепей. Согласно этому методу переходный ток замыкания на землю найдем из уравнения, записанного в операторной форме:

$$\underline{I}_з(p)=\frac{\underline{U}(p)}{\underline{Z}_\Sigma(p)+\underline{Z}_з(p)},$$

где $\underline{U}(p)=\frac{\underline{U}_m}{p-j\omega}$ — операторное изображение комплексного напряжения $\underline{U}_m e^{j\omega t}$ между фазой сети и землей, имевшего место до замыкания этой фазы на землю; $\underline{Z}_\Sigma(p)=\frac{1}{\underline{Y}_\Sigma(p)}$ — полное операторное сопротивление сети относительно земли; $\underline{Z}_з(p)$ — операторное сопротивление в цепи тока замыкания на землю.

Переход от операторной формы к комплексной может быть осуществлен на основании известной формулы вклю-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

чения на гармоническое напряжение

$$\underline{I}_з(t)=\frac{\underline{U}_m e^{j\omega t}}{\underline{Z}(j\omega)}+\sum_{k=1}^{n}\frac{\underline{U}_m e^{p_k t}}{(p_k-j\omega)\underline{Z}'(p_k)}, \qquad (35)$$

где $\underline{U}_m$ — комплексная амплитуда напряжения между фазой сети и землей, имевшего место до замыкания на зем-

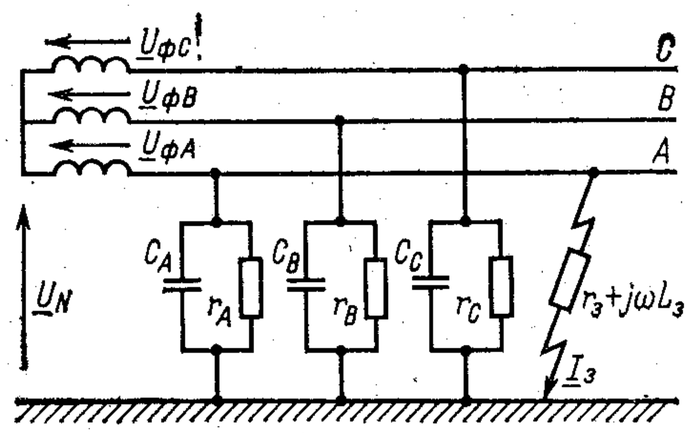


Рис. 17. Схема замещения трехфазной сети при замыкании на землю через активно-индуктивное сопротивление

лю; $\underline{Z}(j\omega)=\underline{Z}_\Sigma(j\omega)+\underline{Z}_з(j\omega)$ — комплексное сопротивление схемы замещения по методу эквивалентного генератора; $\underline{Z}'(p_k)$ — значение производной $\underline{Z}(p)$ при $p=p_k$; $\underline{Z}(p)=Z_\Sigma(p)+\underline{Z}_з(p)$ — операторное сопротивление схемы замещения по методу эквивалентного генератора; p_k — нули функции $\underline{Z}(p)$.

Искомый ток однофазного замыкания на землю при переходном процессе находится как мнимая часть тока $\underline{I}_з(t)$, т. е. $i_з(t)=\mathrm{Im}[\underline{I}_з(t)]$.

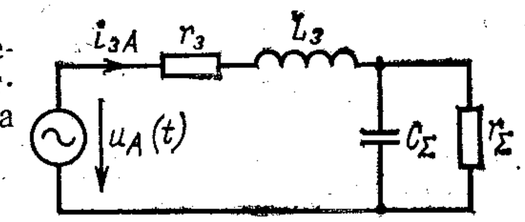
Рассмотрим общий случай замыкания на землю, когда в цепи тока, кроме активного сопротивления $r_з$, имеется и индуктивность $L_з$, обусловленная, например, повреждением обмоток двигателей, силовых и измерительных трансформаторов и других устройств, обладающих индуктивностью. На рис. 17 приведена схема замещения сети для этого случая.

На основании теоремы об эквивалентном источнике напряжения сложную трехфазную цепь с тремя источниками напряжения (рис. 17) можно заменить схемой с одним источником напряжения, как это показано на рис. 18. К этой схеме прикладывается напряжение $u_A(t)=U_m\sin(\omega t+\psi)$, которое является напряжением холостого хода в схеме до замыкания на землю. На схеме приняты обозначения $\frac{r_A r_B r_C}{r_A r_B+r_B r_C+r_C r_A}=r_\Sigma$ — общее активное

сопротивлние сети относительно земли; $C_A+C_B+C_C=C_\Sigma$ — суммарная емкость сети относительно земли; $r_з$ — переходное сопротивление в цепи тока замыкания на землю (при глухом замыкании $r_з=0$); $L_з$ — индуктивность в цепи тока замыкания на землю.

Применим к схеме рис. 18 формулу включения на гармоническое напряжение (35).

Рис. 18. Расчетная схема к методу эквивалентного генератора расчета цепей



Если предположить, что замыкание произошло в фазе A, то комплекс амплитудного значения определится

$$U_m=U_m e^{j\psi}=\sqrt{2}(\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N).$$

Полное комплексное сопротивление для схемы рис. 18

$$\underline{Z}(j\omega)=r_з+j\omega L_з+\frac{r_\Sigma}{1+j\omega C_\Sigma r_\Sigma};$$

в операторной форме

$$\underline{Z}(p)=r_з+pL_з+\frac{r_\Sigma}{1+pC_\Sigma r_\Sigma}.$$

Корни характеристического уравнения p_k определяются из уравнения $\underline{Z}(p)=0$, при этом имеем

$$p_{1,2}=\frac{-(r_\Sigma r_з C_\Sigma+L_з)\pm\sqrt{(r_\Sigma r_з C_\Sigma+L_з)^2-4r_\Sigma C_\Sigma L_з(r_\Sigma+r_з)}}{2r_\Sigma C_\Sigma L_з}.$$

Значение функции $\underline{Z}'(p)$ при $p=p_k$

$$Z'(p_1)=\frac{L_з C_\Sigma^2 r_\Sigma^2 p_1^2+2L_з C_\Sigma r_\Sigma p_1+r_\Sigma^2 C_\Sigma+L_з}{(1+r_\Sigma C_\Sigma p_1)^2};$$

$$\underline{Z}'(p_2)=\frac{L_з C_\Sigma^2 r_\Sigma^2 p_2^2+2L_з C_\Sigma r_\Sigma p_2+r_\Sigma^2 C_\Sigma+L_з}{(1+r_\Sigma C_\Sigma p_2)^2}.$$

Подстановка полученных соотношений в (35) дает уравнение для расчета тока однофазного замыкания на землю в комплексной форме. Искомый ток в функции времени находится как мнимая часть от выражения $i_{Aз}(t)$ в

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

комплексной форме. При вещественных корнях p_1 и p_2 будем иметь

$$i_{A3}(t) = \frac{U_m}{Z}\sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{U_m \sin(\psi + \theta_1)(p_1 C_\Sigma r_\Sigma + 1)}{\sqrt{p_1^2 + \omega^2}\,(2p_1 L_3 C_\Sigma r_\Sigma + C_\Sigma r_\Sigma r_3 + L_3)} e^{p_1 t} + \frac{U_m \sin(\psi + \theta_2)(p_2 C_\Sigma r_\Sigma + 1)}{\sqrt{p_2^2 + \omega^2}\,(2p_2 L_3 C_\Sigma r_\Sigma + C_\Sigma r_\Sigma r_3 + L_3)} e^{p_2 t}, \qquad (36)$$

где $\theta_1 = \operatorname{arctg}\frac{\omega}{p_1}$; $\theta_2 = \operatorname{arctg}\frac{\omega}{p_2}$; φ—фазовый угол сдвига между током и напряжением в схеме рис. 18; $Z = |\underline{Z}_\Sigma + \underline{Z}_3|$ — полное сопротивление схемы.

Полученное уравнение для тока однофазного замыкания на землю при переходном процессе соответствует случаю присоединения фазы A к земле через активно-индуктивное сопротивление. Пользуясь приведенной методикой, можно определить токи переходного процесса и в любых других случаях замыкания (фаз B, C через емкость C или любое другое сопротивление).

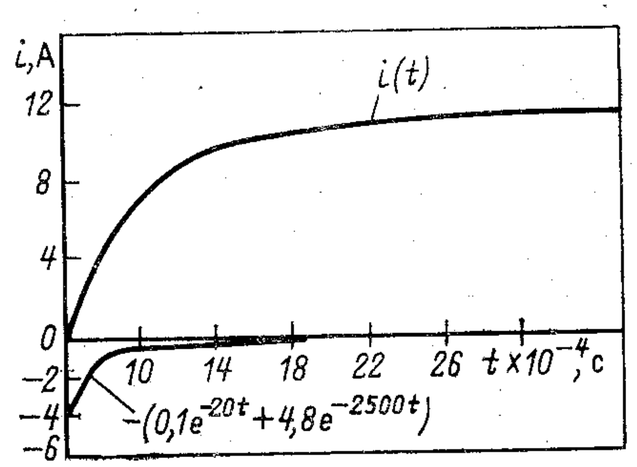


Рис. 19. Кривые тока замыкания на землю, построенные по данным примера 3.1

Пример. Допустим, что однофазное замыкание на землю произошло через активно-индуктивное сопротивление при следующих параметрах сети: $C_\Sigma = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф, $r_\Sigma = 10 \cdot 10$ Ом, $r_3 = 50 \cdot 10^3$ Ом, $L_3 = 20$ Гн. Напряжение, которое было между фазой A и землей до замыкания

$$u_A = 440 \cdot 10^3 \sqrt{2}\sin\left(314t + \frac{\pi}{6}\right).$$

Подставив указанные данные в приведенные выше уравнения, получаем $p_1 = -20$ с$^{-1}$; $p_2 = -2500$ с$^{-1}$; $\underline{Z}'(p_1) = 150 \cdot 10^2$ Ом·с; $\underline{Z}'(p_2) = 19{,}97$ Ом·с; $\underline{Z}'(j\omega) = 50\,344\angle 6{,}5°$ Ом.

Для этих числовых данных по (36) получаем аналитическое выражение, описывающее изменение тока в переходном режиме (в комплексной форме)

$$\underline{I}_{3A} = \frac{440 \cdot 10^3 \sqrt{2}\,\angle 30° e^{j314t}}{50\,344\,\angle 6{,}5°} - \frac{\sqrt{2} \cdot 440 \cdot 10^3\,\angle 30° e^{-20t}}{(-20 - j\,3{,}14)\,1500} + \frac{\sqrt{2} \cdot 440 \cdot 10^{-3}\,\angle 30° e^{-2500t}}{(-2500 - j3{,}14)\,19{,}97}.$$

Искомый ток замыкания на землю равен мнимой части I_{3A}

$$i(t) = 12{,}32\sin(314t + 23{,}5°) - 0{,}1e^{-20t} - 4{,}8e^{-2500t}.$$

По результатам расчета на рис. 19 приведена зависимость тока однофазного замыкания на землю от времени.

11. Переходные процессы при замыканиях фазы на корпус трансформатора 6/0,4 кВ

Однофазные замыкания фазы на корпус являются частой причиной возникновения аварийных режимов. Так, известен пожар, нанесший большие убытки народному хозяйству, возникший в результате перенапряжений от замыкания на корпус трансформатора мачтовой подстанции 6/0,4 кВ.

На стороне высокого напряжения МТП произошло перекрытие элетрической дугой изолятора предохранителей 6 кВ. Дуга разрушила фарфоровый изолятор, вследствие чего металлический штырь повис на проводе и коснулся металлической траверсы, связанной с общим контуром заземления МТП. Авария произошла при сильном ветре. Повисший на проводе штырь изолятора периодически размыкал и замыкал электрическую цепь, создавая тем самым серию импульсов тока переходного процесса и перенапряжения в сети 0,4 кВ. Все это привело к пожару.

Впоследствии на подстанции были восстановлены условия, имевшие место во время аварии и проведены осциллографирования переходных процессов токов замыкания на землю и напряжений на сопротивлении заземляющего устройства. Измерения подтвердили правильность предположения о имевшихся в сети перенапряжениях большой кратности. В протоколе проведения замеров отмечалось, что осциллографирование тока замыкания на землю было приостановлено из-за появления перенапряжений на заземлителе.

Исследование процессов, имеющих место в подобных случаях, можно провести по схеме, представленной на рис. 20. При замыкании фазы A на корпус трансформатора 6—10/0,4 кВ возникает ток переходного процесса i_3. В результате этого на сопротивлении заземления нейтрали r_0 появится напряжение $u_0 = i_3 r_0$. Если при этом ток достиг-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

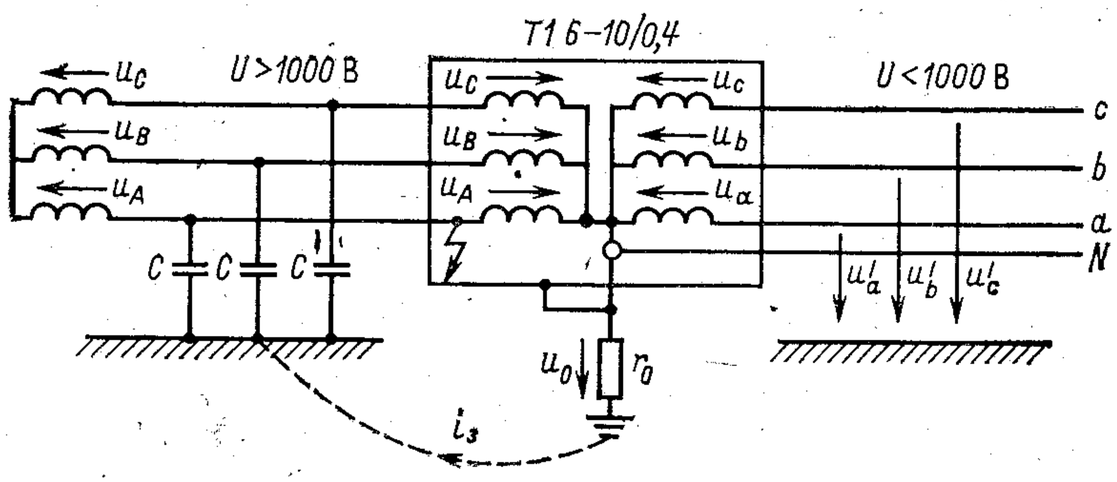


Рис. 20. Схема замещения сети для исследования замыкания на корпус трансформатора 6/0,4 кВ

нет значительной величины, то в сети напряжением до 1000 В возникает перенапряжение относительно земли со всеми вытекающими последствиями.

В рассматриваемой задаче можно не учитывать индуктивности линии и обмоток трансформатора из-за их малости по сравнению с емкостью проводов C относительно земли. Это допущение обусловливает более высокие расчетные напряжения на сопротивлении при переходном процессе и тем самым позволяет выявить наиболее тяжелый случай перенапряжений.

Если мгновенное значение фазного напряжения провода, на котором произошло замыкание на корпус, обозначить как $u_A = U_{mA} \sin(\omega t + \psi)$, то ток переходного процесса в рассматриваемом случае можно

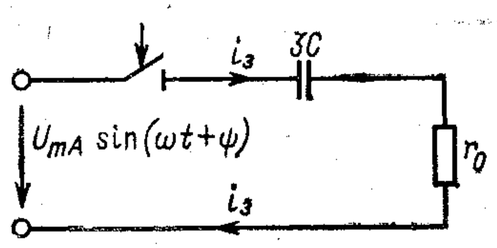


Рис. 21. Расчетная схема к методу эквивалентного генератора расчета цепей

определить из расчетной схемы рис. 21. Воспользовавшись методикой, приведенной в § 10, получим уравнение для тока переходного процесса

$$i_з = \frac{U_{mA}}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_{mA}}{3Z\omega C r_0} \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{3r_0C}}, \qquad (37)$$

где $Z = \sqrt{r_0^2 + \frac{1}{9\omega^2C^2}}$;

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{1}{3\omega C r_0}.$$

Из (37) определим напряжение на сопротивлении r_0: $u_0 = ir_0$. В момент замыкания на корпус при $t=0$

$$u_0(0) = U_{mA} \sin\psi.$$

Таким образом, в первый момент переходного процесса напряжение на сопротивлении заземления нейтрали не зависит от значения этого сопротивления и определяется начальной фазой ψ. При самом неблагоприятном случае, когда $\psi = \pm\pi/2$, напряжение на заземлении нейтрали достигает амплитуды фазного напряжения сети. Так, для номинального напряжения 6 кВ $u_0(0) = 4{,}9$ кВ, а для напряжения 10 кВ $u_0(0) = 8{,}2$ кВ.

Напряжения фаз для сетей до 1000 В относительно земли найдем из уравнений:

$$u_a' = u_0 + u_a = u_0 + U_{ma} \sin(\omega t + \psi);$$

$$u_b' = u_0 + u_b = u_0 + U_{mb} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$u_c' = u_0 + u_k = u_0 + U_{mc} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{4\pi}{3}\right).$$

В момент замыкания при самых неблагоприятных условиях будем иметь:

для номинального напряжения 6 кВ

$$u_a'(0) = 5{,}12 \text{ кВ}; \; u_b'(0) = u_c'(0) = 4{,}79 \text{ кВ};$$

для номинального напряжения 10 кВ

$$u_a'(0) = 8{,}42 \text{ кВ}; \; u_b'(0) = u_c'(0) = 7{,}98 \text{ кВ}.$$

В первый момент замыкания на землю напряжение на сопротивлении заземления нейтрали не зависит от сопротивления. Это позволяет сделать вывод, что рассматриваемый случай замыкания практически всегда приводит к перенапряжениям.

Длительность переходного процесса определяется постоянной времени $\tau = 3r_0C$. Поскольку r_0 выражается в омах, то длительность переходных процессов будет определяться микросекундами. Тем не менее возникновение перенапряжений может привести к опасным последствиям. Во-первых, при плохом контакте в месте замыкания на корпус трансформатора может возникнуть серия импульсов, сопровождающихся дуговыми явлениями во вторичной сети 0,4 кВ. Во-вторых, даже при наличии одного импульса высокого напряжения в сети 0,4 кВ может произойти пробой изоляции с последующим металлическим коротким замыканием. При возникновении такого процесса на стороне низкого напряжения трансформатора не всегда срабатывает защита.

Таким образом, при эксплуатации сетей необходимо учитывать опасность перенапряжений от замыкания на корпус трансформатора и принимать дополнительные меры для их предупреждения.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

КОМПЕНСАЦИЯ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

12. Компенсация в идеальной схеме

В Правилах устройства электроустановок [5] отмечается: «Работа электрических сетей 3—35 кВ должна предусматриваться с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью. Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях этого тока в нормальных режимах: в сетях напряжением 3—20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на ВЛ, и во всех сетях 35 кВ — более 30 А; при 10 кВ — более 20 А; при 15—20 кВ — более 15 А; в схемах 6—20 кВ блоков генератор — трансформатор (на генераторном напряжении) — более 5 А. При токах замыкания на землю более 50 А рекомендуется применение не менее двух заземляющих реакторов».

Необходимо, однако, отметить, что, несмотря на широкое применение компенсации емкостных токов замыкания на землю при помощи катушек индуктивности, в настоящее время многие вопросы особенно теоретического характера, исследованы не достаточно полно. Прежде всего для реальных условий эксплуатации сетей с компенсирующими катушками в нейтрали трансформатора не были установлены аналитические зависимости, характеризующие процессы при различных режимах работы сети. Исследования проводились, как правило, экспериментальным путем. Результаты обобщить практически невозможно из-за многих не поддающихся учету случайных факторов.

Компенсацию емкостных токов однофазного замыкания на землю при помощи катушек индуктивности предложил известный немецкий электротехник Петерсен в 1919 г. Свои выводы он сделал на основании исследований схемы замещения симметричной сети, т. е. при $C_A=C_B=C_C=C$, с идеальной катушкой индуктивности для случая глухого замыкания одной фазы на землю (рис. 22).

Для этой схемы уравнение тока замыкания на землю имеет вид:

$$I_з=U_ф\left(3\omega C-\frac{1}{\omega L}\right).$$

При выполнении условия резонанса

$$3\omega C-\frac{1}{\omega L}=0$$

ток замыкания на землю равен нулю.

Таким образом, проблема гашения дуги как будто решена. При идеальных условиях не возникают перенапряжения относительно земли в нормальном режиме работы

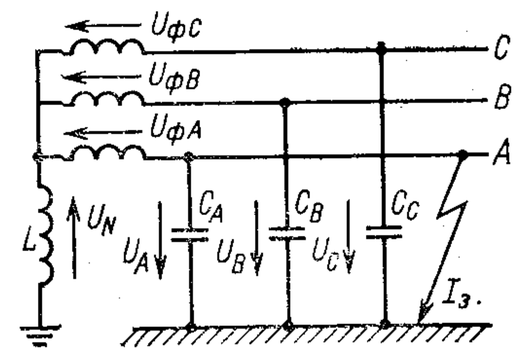


Рис. 22. Схема компенсации емкостных токов замыкания на землю при идеальных параметрах сети и катушки

сети. Так как напряжение смещения нейтрали U_N при $C_A=C_B=C_C=C$ равно нулю, то напряжения отдельных фаз сети относительно земли U_A, U_B, U_C равны фазному напряжению источника питания $U_ф$.

Сети и катушки обладают активными сопротивлениями, а емкости сети относительно земли могут отличаться друг от друга, т. е. $C_A\neq C_B\neq C_C$. Имеется также принципиальное различие между замыканием бездуговым (металлическим) и с перемежающейся дугой. Как уже отмечалось, погасание и зажигание дуги эквивалентно коммутации цепи, что вызывает переходные процессы в сети. Поэтому говорить о резонансе в обычном понимании этого явления не следует. Резонанс имеет место в установившемся режиме при промышленной частоте синусоидальных токов и напряжений.

13. Схемы замещения катушки индуктивности

Катушка может быть представлена последовательной (рис. 23,*а*) и параллельной (рис. 23,*б*) схемами замещения. Параметры схем замещения определяются на основании измерений. Для заданной частоты они являются вполне оправданными, что дает возможность для этой частоты использовать указанные схемы замещения с конкретными параметрами.

Для схемы рис. 23,*а* полное сопротивление определяется отношением действующих значений напряжения и тока

$$Z_к=\frac{U}{I}=\sqrt{r_{к1}^2+(\omega L_{к1})^2}$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

и может быть измерено с помощью вольтметра и амперметра. Активное сопротивление определяется как отношение активной мощности катушки к квадрату действующего значения тока

$$r_{к1} = \frac{P}{I^2}.$$

Тогда индуктивное сопротивление найдем как

$$\omega L_{к1} = \sqrt{Z_к^2 - r_{к1}^2}.$$

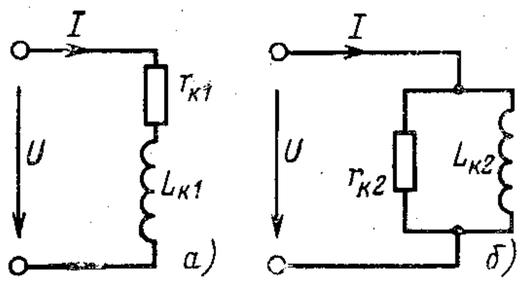


Рис. 23. Схема замещения катушки

Связь между параметрами параллельной и последовательной схем замещения может быть установлена следующим образом:

$$\frac{1}{r_{к2}} = \frac{r_{к1}}{r_{к1}^2 + \omega^2 L_{к1}^2}; \quad \frac{1}{\omega L_{к2}} = \frac{\omega L_{к1}}{r_{к1}^2 + \omega^2 L_{к1}^2},$$

откуда

$$r_{к2} = r_{к1}\left(1 + \frac{\omega^2 L_{к1}^2}{r_{к1}^2}\right) = r_{к1} + \frac{\omega^2 L_{к1}^2}{r_{к1}}; \qquad (38)$$

$$L_{к2} = L_{к1} + \frac{r_{к1}^2}{\omega^2 L_{к1}}. \qquad (39)$$

Таким образом, из (38) и (39) следует, что $r_{к2} > r_{к1}$ и $L_{к2} > L_{к1}$. Обычно $\omega L_{к1} \gg r_{к1}$, а значит, $r_{к2} \gg r_{к1}$ и $L_{к2} \approx L_{к1}$.

В общем случае параметры $r_{к1}$, $L_{к1}$, $r_{к2}$, $L_{к2}$ обеих схем замещения являются функциями частоты.

При низких частотах катушку можно рассматривать только как индуктивное сопротивление. С возрастанием частоты начинает проявлять себя межвитковая емкость. Дальнейшее увеличение частоты может привести к полной компенсации индуктивного сопротивления, емкостной нагрузке цепи в целом. Активное сопротивление катушки также зависит от частоты из-за проявления поверхностного эффекта и вихревых токов.

Отсюда следует, что, определив теоретически или экспериментально параметры схем замещения катушки при одной частоте, в частности при постоянном токе, можно допустить ошибку, используя эти параметры на другой частоте.

В дальнейшем будем применять параллельную схему замещения катушки индуктивности, так как при этом получаются более простые уравнения, описывающие состояния рассматриваемой сети.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

14. Режим бездугового однофазного замыкания на землю

Пусть в сети с компенсирующей катушкой (рис. 24) произошло однофазное замыкание на землю. На рисунке цепь тока показана пунктиром.

При рассмотрении резонансного явления будем полагать, что замыкание является бездуговым. Действительно, при дуговом замыкании вследствие периодических зажиганий и погасаний дуги в цепи имеют место переходные процессы, при которых говорить о резонансе в общепринятом

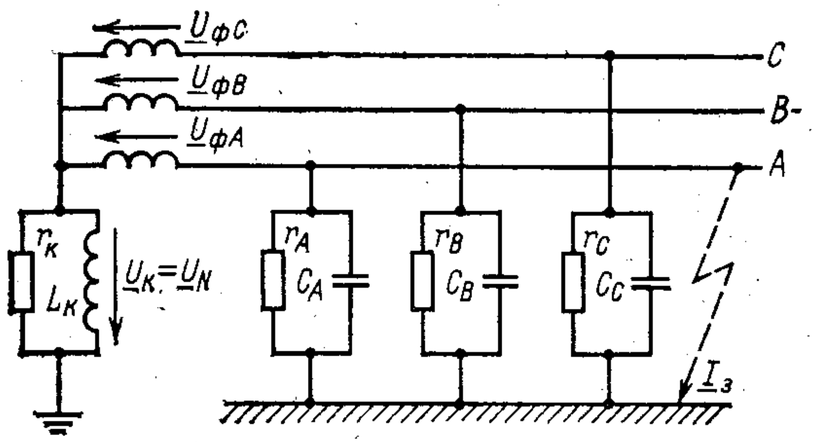


Рис. 24. Схема сети с компенсацией емкостного тока при бездуговом замыкании на землю

понимании этого явления не следует. Явление резонанса обычно полагают в установившемся режиме, когда токи и напряжения являются синусоидальными функциями. Будем также считать, что в сети нет соединений с землей — трансформаторов напряжения контроля изоляции, искусственно введенных активных сопротивлений и др.

Рассмотрим случай, когда катушка включена в нейтраль питающего сеть трансформатора. Ток замыкания на землю согласно [8]

$$\underline{I}_{зA} = U_ф\left[\frac{1}{r_к} + \frac{3}{2}\left(\frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_C}\right) + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega(C_C - C_B)\right] +$$

$$+ jU_ф\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_C}\right) + \frac{3}{2}\omega(C_B + C_C) - \frac{1}{\omega L_к}\right]. \qquad (40)$$

Как видно из (40), ток замыкания на землю представляет собой сложную функцию, зависящую от значения емкостей, сопротивлений фаз сети относительно земли и параметров катушки. Его наименьшее значение имеет место

при резонансе, когда

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\left(\frac{1}{r_B}-\frac{1}{r_C}\right)+\frac{3}{2}\omega(C_B+C_C)=\frac{1}{\omega L_к}.$$

Ток замыкания на землю при условии резонанса определяется из выражения

$$I_{зA}=U_ф\left[\frac{1}{r_к}+\frac{3}{2}\left(\frac{1}{r_B}+\frac{1}{r_C}\right)+\frac{\sqrt{3}}{2}\omega(C_C-C_B)\right].$$

Таким образом, даже при идеальной настройке ток замыкания на землю существенно отличается от нуля и зависит не только от активных сопротивлений, но и от разности емкостей C_B и C_C неповрежденных фаз.

При наличии асимметрии токи замыкания на землю каждой фазы имеют различные значения и вопрос о настройке катушки для несимметричной сети не может рассматриваться вообще. Поэтому рассмотрим симметричную сеть, т. е. при $C_A=C_B=C_C=C$ $r_A=r_B=r_C=r$. Для этого случая из (40) имеем выражение для тока замыкания

$$I_з=U_ф\sqrt{\left(\frac{1}{r_к}+\frac{3}{r}\right)^2+\left(3\omega C-\frac{1}{\omega L_к}\right)^2} \qquad (41)$$

и условие резонанса

$$3\omega C=\frac{1}{\omega L_к}.$$

Уравнению (41) соответствует эквивалентная схема, представленная на рис. 25, для которой

$$I_з=\sqrt{(I_a+I_r)^2+(I_C-I_L)^2},$$

где $I_a=\frac{U_ф}{r_к}$ — активная составляющая тока дугогасящей катушки; $I_L=\frac{U_ф}{\omega L_к}$ — реактивная составляющая тока дугогасящей катушки; $I_L=3U_ф\frac{1}{r}$ — активная составляющая тока замыкания на землю $I'_з$ при отключенной катушке; $I_C=3U_ф\omega C$ — емкостная составляющая тока замыкания на землю $I'_з$ при отключенной катушке.

Условием резонанса является равенство емкостного I_C и индуктивного I_L токов. Ток замыкания на землю в этом случае определяем из выражения

$$I_з=U_ф\left(\frac{1}{r_к}+\frac{3}{r}\right).$$

Как видно, и в этом частном случае при резонансной настройке ток замыкания на землю не равен нулю и определяется сопротивлениями изоляции и параметрами катушки.

При указанных условиях симметрии можно говорить о настройке с перекомпенсацией, недокомпенсацией или в

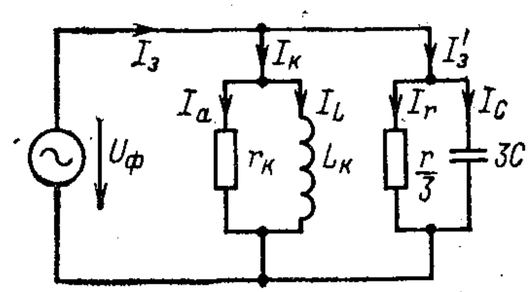


Рис. 25. Расчетная схема к методу эквивалентного генератора расчета цепей

резонанс. Для оценки настройки удобно воспользоваться понятием степени расстройки компенсации [9]

$$v=\frac{I_C-I_L}{I_C}.$$

При недокомпенсации $v>0$, при перекомпенсации $v<0$, при резонансе $v=0$.

При измерении амперметром могут быть определены токи замыкания на землю при наличии катушки индуктивности (41) и без нее

$$I_з'=3U_ф\sqrt{\frac{1}{r^2}+\omega^2C^2};$$

ток катушки

$$I_к=U_ф\sqrt{\frac{1}{r_к^2}+\frac{1}{\omega^2L_к^2}}.$$

Поскольку емкостная составляющая тока замыкания на землю не может быть определена прямым измерением, то резонансная настройка, соответствующая равенству токов $I_C=I_L$, не может быть осуществлена непосредственно. Поэтому настройку компенсации следует вести не по измеренному току $I'_з$, а по расчетному

$$I_C=3U_ф\omega C.$$

Для этого необходимо предварительно с помощью специальных измерений определить емкости отдельных фаз сети относительно земли. Методы определения r и C в сетях с изолированной нейтралью приведены в гл. 7.

Таким образом резонансная настройка катушки для компенсации емкостных токов может быть осуществлена

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

лишь приближенно, а ток замыкания на землю при всех видах настройки всегда будет отличен от нуля. Эффективность гашения дуги не может быть высокой, так как и при малых токах горение дуги поддерживается высоким напряжением сети.

15. Режим дугового замыкания

При исследовании дуговых замыканий на землю в сети с катушкой в нейтрали питающего трансформатора воспользуемся гипотезой Петерсена, заключающейся в том, что дуга гаснет при прохождении тока через нуль. Погасание и зажигание перемещающейся дуги вызывают в сети сложные переходные процессы.

Будем их рассматривать начиная с первоначального дугового замыкания на землю. Для первого интервала времени ток $i_{зA}$ определим из расчетной схемы рис. 24. При резонансной настройке катушки ток переходного процесса определяется только активными сопротивлениями сети. Если фазные напряжения записать в виде

$$u_{фA} = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_{фB} = U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$u_{фC} = U_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{2}\right),$$

то ток замыкания на землю в первый интервал времени будет равен

$$i_{зA} = \frac{U_m}{r_э} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где

$$r_э = \frac{3r_к}{3r_к + r}.$$

В момент прохождения тока $i_{зA}$ через нуль, т. е. при $\omega t = \frac{\pi}{2}$, дуга погаснет. Непосредственно перед погасанием дуги напряжения на емкостях неповрежденных фаз будут равны

$$u_B\left(\frac{\pi}{2} -\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m; \quad u_C\left(\frac{\pi}{2} -\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} U_m.$$

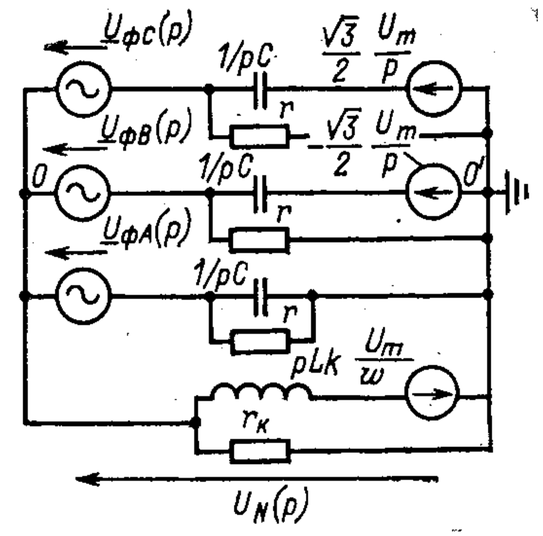


Рис. 26. Операторная схема расчета в интервале, когда ток дуги равен нулю

Ток в катушке $L_к$ в момент погасания дуги ($i_з = 0$) равен амплитудному значению

$$i_L = \frac{U_m}{\omega L_к} \sin\frac{\pi}{2} = \frac{U_m}{\omega L_к}.$$

В соответствии с этим операторная схема замещения в следующем интервале, когда ток дуги равен нулю, может быть представлена, как показано на рис. 26. Из этой схемы нетрудно найти в операторной форме напряжение между нулевой точкой трансформатора и землей, равное напряжению на катушке:

$$U_N(p) = U_к(p) = \frac{U_m}{\omega} \frac{1}{3p^2LC + pL_к\left(\frac{3}{r} + \frac{1}{r_к}\right) + 1}.$$

Переходя от изображения к оригиналу, получаем

$$u_N(t) = u_к(t) = \frac{U_m}{\omega L_к}\left(\frac{1}{6p_1C + \frac{3}{r} + \frac{1}{r_к}} e^{p_1 t} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{6p_2C + \frac{3}{r} + \frac{1}{r_к}} e^{p_2 t}\right),$$

где

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2C}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{3r_к}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4C^2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{3r_к}\right)^2 - \frac{1}{L_кC}}.$$

При $\frac{1}{L_кC} > \frac{1}{4C^2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{3r_к}\right)$ корни p_1 и p_2 будут комплексными, поэтому напряжение свободной составляющей между нулевой точкой трансформатора и землей будет носить затухающий колебательный характер с угловой частотой

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{L_кC} - \frac{1}{4C^2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{3r_к}\right)^2}. \qquad (42)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Для идеализированной сети и катушки, т. е. когда $\frac{1}{r}=\frac{1}{3r_к}=0$, угловая частота незатухающих колебаний $\omega_0=1/\sqrt{L_к C}$ равна резонансной частоте контура, состоящего из индуктивности катушки и суммарной емкости сети относительно земли.

Таким образом, в интервале времени после погасания дуги даже при симметричной сети напряжение на катушке индуктивности не равно нулю. Оно изменяется с угловой частотой, определяемой (42). В этих условиях между отдельными проводами сети и землей могут возникать перенапряжения. Их значение определяется разностью фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали:

$$u_A=u_{фA}-u_N,\ u_B=u_{фB}-u_N,\ u_C=u_{фC}-u_N.$$

Дуга снова зажигается при прохождении напряжения фазы через ближайший максимум. Далее процесс повторится. Однако при расчете токов и напряжений переходного процесса в последующие интервалы необходимо учитывать другие начальные значения тока в индуктивности катушки как в моменты замыкания на землю, так и в моменты погасания дуги.

Рассмотренный метод позволяет рассчитать токи и напряжения при переходных процессах для конкретных параметров катушки и сети и определить возможные перенапряжения.

16. Нормальный режим работы сети

До появления замыкания на землю или после погасания дуги ($I_з=0$) сеть приходит в нормальное состояние. В этом режиме напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_N$ равно напряжению на катушке $\underline{U}_к$ и определяется из уравнения

$$\underline{U}_к=\underline{U}_N=U_ф\frac{j\omega(C_A+a^2C_B+aC_C)}{\frac{3}{r}+\frac{1}{r_к}+j\omega(C_A+C_B+C_C+1/\omega^2L_к)}.$$

Не исключено, что могут возникать условия, близкие к резонансу, когда

$$C_A+C_B+C_C=\frac{1}{\omega L_к}. \qquad (43)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Из (43) видно, что условие резонанса зависит теперь от емкостей трех фаз, а не двух, как это следует из уравнения (40).

В этом случае

$$\underline{U}_N=U_ф\frac{j\omega(C_A+a^2C_B+aC_C)}{\frac{3}{r}+\frac{1}{r_к}}.$$

Так как $r_к$ имеет довольно большое значение, а сопротивление изоляции зависит от состояния сети и может принимать самые различные значения, в том числе и

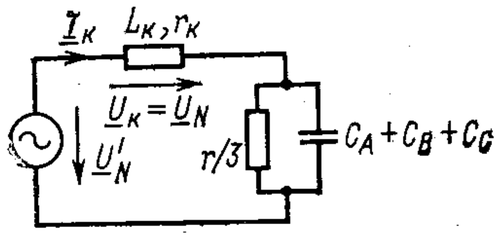


Рис. 27. Расчетная схема для определения тока в катушке как функции напряжения смещения нейтрали

большие, то напряжение смещения нейтрали в принципе может достигать значительных величин и в пределе бесконечности.

Поскольку напряжения отдельных фаз относительно земли равны

$$\underline{U}_A=\underline{U}_{фA}-\underline{U}_N,\ \underline{U}_B=\underline{U}_{фB}-\underline{U}_N,\ \underline{U}_C=\underline{U}_{фC}-\underline{U}_N,$$

возможны резонансные перенапряжения больших кратностей, которые приведут к повреждению изоляции и замыканию на землю.

В некоторых схемах с автоматической настройкой компенсации управляющим сигналом для работы регуляторов является напряжение смещения нейтрали, которое отлично от нуля и при нормальных режимах работы сети. В этих случаях при расчете системы регулирования целесообразно пользоваться схемой замещения, изображенной на рис. 27. Согласно схеме ток в катушке определяется как функция напряжения смещения нейтрали $\underline{U}'_N$ при отключенной катушке, т. е. в режиме холостого хода нейтрали

$$\underline{U}'_N=U_ф\frac{j\omega(C_A+a^2C_B+aC_C)}{\frac{3}{r}+j\omega(C_A+C_B+C_C)}.$$

Зная $\underline{U}'_N$ из схемы рис. 27, на основании закона Ома можно найти ток в катушке $\underline{I}_к$ и напряжение $\underline{U}_к=\underline{U}_N$.

17. Включение катушки в нейтраль заземляющего трансформатора

Правилами устройства электроустановок в сетях напряжением 6—10 кВ рекомендуется обмотки питающего трансформатора соединять в треугольник. В таких сетях катушка подключается к искусственной нулевой точке, образованной первичными обмотками, соединенными в звезду дополнительного (заземляющего) трансформатора, не имеющего никакой другой нагрузки. Вторичные обмотки дополнительного трансформатора соединяются в треугольник, чем достигается уменьшение сопротивления токам нулевой последовательности (рис. 28).

Магнитная система заземляющего трансформатора представляет собой обычный магнитопровод Ш-образной формы, на стержнях которого располагаются первичные и вторичные обмотки соответствующих фаз. При таком магнитопроводе магнитные потоки нулевой последовательности замыкаются по произвольным путям (воздуху, баку, другим металлическим частям конструкции трансформатора).

В схеме компенсации с индуктивной катушкой будет иметь место влияние сопротивлений дополнительного трансформатора на условия оптимальной компенсации емкостных токов замыкания на землю. Для простоты дальнейшего изложения магнитное сопротивление потока нулевой последовательности примем равным магнитному сопротивлению одного стержня дополнительного трансформатора.

На рис. 28 приведена расчетная схема трехфазного заземляющего трансформатора, к нулевой точке которого подключена компенсирующая катушка. На рисунке приняты обозначения: L_1 — индуктивности первичных обмоток трансформатора; L_2 — индуктивности вторичных обмоток; $L_к$ — индуктивность компенсирующей катушки; $r_к$ — активное сопротивление катушки; r_Δ — активное сопротивление, учитывающее сопротивление вторичных обмоток трансформатора; $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ — комплексные напряжения на первичных обмотках трансформатора; $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ комплексные токи в первичных обмотках; I — ток в активном сопротивлении r_Δ.

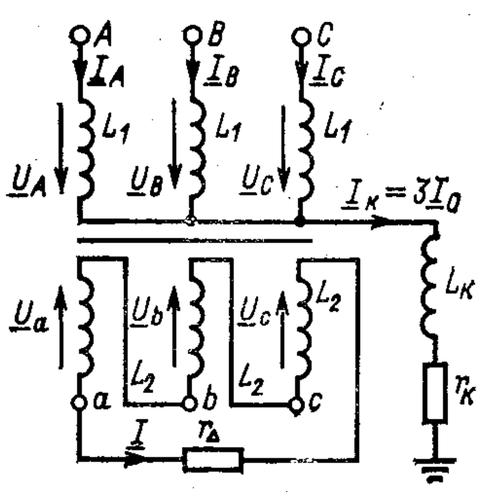


Рис. 28. Схема трехфазного заземляющего трансформатора с подключенной к нейтрали компенсирующей катушкой

Представленная на рис. 28 схема может быть заменена эквивалентной, у которой магнитные связи между обмотками дополнительного трансформатора отсутствуют. При этом учтем, что коэффициент связи катушек, расположенных на одном общем сердечнике, равен единице, а для катушек, расположенных на разных сердечниках, равен 1/3. Воспользовавшись соотношением $M_{12} = k\sqrt{L_1L_2}$, найдем для схемы рис. 28 связь между коэффициентами взаимоиндукции M и самоиндукции L всех катушек заземляющего трансформатора

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{BC} = \frac{1}{3}L_1;$$

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = \frac{1}{3}L_2;$$

$$M_{Ab} = M_{Ac} = M_{Ba} = M_{Bc} = M_{Ca} = M_{Cb} = \frac{1}{3}\sqrt{L_1L_2};$$

$$M_{Aa} = M_{Bb} = M_{Cc} = \sqrt{L_1L_2}.$$

На основании законов Кирхгофа имеем

$$\left.\begin{aligned} j\omega L_1\left(\underline{I}_A - \frac{1}{3}\underline{I}_B - \frac{1}{3}\underline{I}_C\right) - \frac{1}{3}j\omega\sqrt{L_1L_2}I &= \underline{U}_A;\\ j\omega L_1\left(-\frac{1}{3}\underline{I}_A + \underline{I}_B - \frac{1}{3}\underline{I}_C\right) - \frac{1}{3}j\omega\sqrt{L_1L_2}I &= \underline{U}_B;\\ j\omega L_1\left(-\frac{1}{3}\underline{I}_A - \frac{1}{3}\underline{I}_B + \underline{I}_C\right) - \frac{1}{3}j\omega\sqrt{L_1L_2}I &= \underline{U}_C. \end{aligned}\right\} \quad (44)$$

Сложив правые и левые части системы уравнений (44), получим

$$\frac{1}{3}j\omega L_1(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) - j\omega\sqrt{L_1L_2}\,\underline{I} = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C. \quad (45)$$

Для вторичного контура, образованного обмотками трансформатора, соединенными в треугольник, можем записать

$$\underline{I}(r_\Delta + j\omega L_2) - \frac{1}{3}j\omega\sqrt{L_1L_2}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0,$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

отсюда

$$\underline{I} = \frac{1}{3}\,\frac{j\omega\sqrt{L_1L_2}}{r_\triangle + j\omega L_2}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C). \qquad (46)$$

Подстановка (46) в (45) дает

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \frac{3(r_\triangle + j\omega L_2)}{j\omega L_1 r_\triangle}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C).$$

Воспользуемся выражением для тока и напряжения нулевой последовательности в первичных обмотках трансформатора:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_0;$$
$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 3\underline{U}_0.$$

Тогда полная проводимость одной фазы дополнительного трансформатора будет равна

$$\frac{\underline{I}_0}{\underline{U}_0} = \frac{3}{n^2 r_\triangle} + \frac{3}{j\omega L_1},$$

где $n = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$ — коэффициент трансформации заземляющего трансформатора.

Таким образом, вносимое дополнительным трансформатором активное сопротивление равно

$$r_1 = \frac{1}{3}n^2 r_\triangle, \qquad (47)$$

а индуктивное

$$X_1 = \frac{1}{3}\omega L_1. \qquad (48)$$

Следовательно, в схеме замещения электрической сети для учета влияния дополнительного трансформатора, включенного между каждой фазой и общей точкой, к которой присоединяется катушка, необходимо включить активное $\frac{1}{3}r_\triangle n^2$ и индуктивное $\frac{1}{3}\omega L_1$ сопротивления. На рис. 29 приведена схема замещения с учетом параметров заземляющего трансформатора. Для этой схемы нетрудно получить все необходимые уравнения, характеризующие работу сети в режиме компенсации токов замыкания на землю.

Необходимо отметить, что при $r_\triangle = 0$ общая проводимость, обусловленная дополнительным трансформатором,

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

равна бесконечно большой величине. При разомкнутом треугольнике ($r_\triangle = \infty$) сопротивление трансформатора равно только индуктивному сопротивлению

$$X_1 = \frac{1}{3}\omega L_1,$$

которое может быть использовано также для компенсации емкостного тока замыкания на землю.

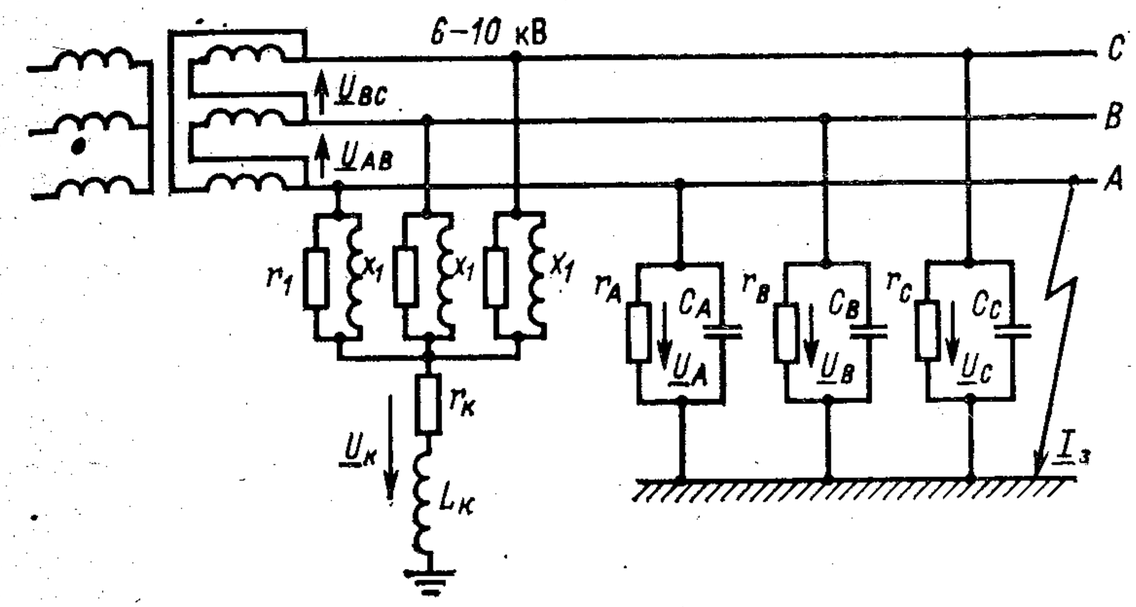


Рис. 29. Эквивалентная схема сети с учетом сопротивлений заземляющего трансформатора

Из схемы замещения рис. 29 найдем и напряжение смещения нейтрали, которое имеет место при отсутствии замыкания на землю:

$$\underline{U}_N = U_ф \frac{j\omega(C_A + a^2C_B + aC_C)}{\frac{3}{r} + j\omega(C_A + C_B + C_C) + \frac{1}{\frac{1}{9}\,\frac{j\omega L_1 r_\triangle}{r_\triangle + j\omega L_2} + r_к + j\omega L_к}},$$

и ток однофазного замыкания на землю

$$\underline{I}_{зA} = U_ф\left[\frac{3}{r} + j\omega(C_B + C_C) - j\omega(a^2C_B + aC_C) + \frac{1}{\frac{1}{9}\,\frac{j\omega L_1 r_\triangle}{r_\triangle + j\omega L_2} + r_к + j\omega L_к}\right]. \qquad (49)$$

При разомкнутых вторичных обмотках, соединенных в треугольник ($r_\triangle = \infty$), и $r_к = 0$ из (49) уточним значение

тока замыкания на землю для симметричной сети ($C_A = C_B = C_C = C$)

$$\underline{I}_{зA} = \frac{U_л}{\sqrt{3}}\left[\frac{3}{r} + j\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L_к + \frac{1}{9}\omega L_1}\right)\right]. \qquad (50)$$

Из (50) условие резонанса в схеме компенсации с заземляющим трансформатором запишется

$$3\omega C = \frac{1}{\omega\left(L_к + \frac{1}{9}L_1\right)}. \qquad (51)$$

Как видно из (51), к индуктивности катушки $L_к$ добавляется значение $^1/_9 L_1$, обусловленное наличием заземляющего трансформатора.

Таким образом, компенсация емкостных токов замыкания на землю в принципе может быть осуществлена и без компенсирующей катушки, только за счет индуктивностей первичных обмоток самого заземляющего трансформатора. При этом вторичные его обмотки должны быть разомкнутыми.

Однако если не нужны вторичные обмотки трансформатора, то, очевидно, отпадает необходимость и в самом

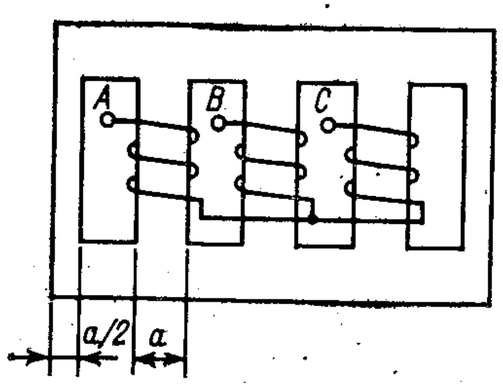


Рис. 30. Магнитопровод трехфазного дросселя для компенсации емкостных токов замыкания на землю

трансформаторе, тем более что конструкция заземляющего трансформатора обладает таким серьезным недостатком, как отсутствие путей для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности.

С учетом отмеченных обстоятельств наиболее целесообразно компенсирующее устройство выполнить в виде трехфазного дросселя с пятистержневым магнитопроводом по схеме, представленной на рис. 30. Для этого случая из (49) запишем расчетное выражение для тока замыкания на землю

$$\underline{I}_{зA} = \frac{U_л}{\sqrt{3}}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{3}{r_B} + \frac{3}{r_C} - \sqrt{3}\omega C_B + \sqrt{3}\omega C_C\right) +\right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}j\left(\frac{\sqrt{3}}{r_B} - \frac{\sqrt{3}}{r_C} + 3\omega C_B + 3\omega C_C\right) + \frac{9}{j\omega L}\right],$$

где L — индуктивность одной катушки пятистержневого дросселя.

Из полученного выражения видно, что при условии

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\sqrt{3}}{r_B} - \frac{\sqrt{3}}{r_C} + 3\omega C_B + 3\omega C_C\right) = \frac{9}{\omega L}$$

происходит резонанс, и ток замыкания на землю будет минимальным

$$I_{зA} = \frac{U_л}{2\sqrt{3}}\left(\frac{3}{r_B} + \frac{3}{r_C} - \sqrt{3}\omega C_B + \sqrt{3}\omega C_C\right).$$

Если сеть симметрична относительно земли в фазах B и C ($r_B = r_C = r$, $C_B = C_C = C$), то условие резонанса выражается в виде

$$\omega C = \frac{3}{\omega L},$$

а ток замыкания на землю

$$I_{зA} = \frac{\sqrt{3}U_л}{r}.$$

При указанном техническом решении система компенсации будет значительно экономичнее, так как вместо двух громоздких аппаратов — дополнительного трансформатора и компенсирующей катушки будет применяться только один пятистержневой трехфазный дроссель. Заметим, что за рубежом применялись трехфазные дугогасительные устройства (трансформаторы Бауха). Такие устройства представляют собой комбинацию вспомогательного трансформатора и катушки и принципиально не отличаются от обычной дугогасящей катушки с дополнительным трансформатором. Недостатком по сравнению с описанным выше дросселем является более сложная конструкция аппарата.

18. Об эффективности компенсации емкостных токов замыкания на землю

По определению Ф. А. Лихачева [1] эффективностью компенсации емкостного тока замыкания на землю называется способность дугогасящих аппаратов ограничивать токи через линию повреждения, перенапряжения и скорости восстанавливающихся напряжений после га-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

шения заземляющей дуги. Показателем эффективности компенсации принимают отношение количества замыканий на землю, не развившихся в короткие замыкания сети $n_{общ}-n_к$, к общему количеству замыканий

$$Э_к = 1 - \frac{n_к}{n_{общ}}.$$

Из этого определения следует, что все замыкания, не развившиеся в короткие, надо рассматривать как результат эффективного действия компенсирующих катушек. Это не соответствует действительности, так как часть замыканий по своей сути является металлическими, а не дуговыми, и в связи с этим не могут переходить в междуфазные короткие замыкания. По этой причине статистические данные о высоком показателе эффективности компенсации $Э_к$ являются явно преувеличенными.

Как следует из определения, показатель $Э_к$ относится к сетям с компенсацией емкостных токов замыкания на землю. Однако и в сетях с изолированной нейтралью не все замыкания на землю приводят к междуфазным коротким замыканиям и отключениям релейной защитой. Опыт эксплуатации показывает, что в таких сетях длительное время могут существовать однофазные замыкания на землю, не переходящие в междуфазные короткие замыкания. В связи с этим для сетей с изолированной нейтралью формально можно использовать такой же показатель.

Если испытать одну и ту же сеть, работающую поочередно с компенсацией емкостных токов и в режиме изолированной нейтрали в одинаковых условиях эксплуатации, то можно получить данные о реальной эффективности компенсации. К сожалению, такие сведения в литературе отсутствуют.

На основании проведенных исследований можно лишь утверждать, что количество случаев однофазных замыканий на землю в сети с компенсирующей катушкой будет больше, чем в сети с изолированной нейтралью. Действительно наличие дополнительной индуктивности является причиной резонансных явлений. Связанные с ними перенапряжения, в свою очередь, могут явиться причиной повреждения изоляции и замыканий на землю. В сети с изолированной нейтралью при отсутствии индуктивных элементов резонансы и связанные с ними перенапряжения возникать не могут.

Вопросы экономической целесообразности применения сетей с компенсацией емкостных токов замыкания на землю требуют дальнейшего изучения. Как отмечалось, в сетях 6—10 кВ, имеющих соединение обмоток трансформаторов в треугольник, для подключения компенсирующего реактора требуется специальный заземляющий трансформатор, мощность которого должна быть примерно равной мощности самой катушки [9]. Такой блок катушки и трансформатора является довольно громоздким сооружением и, безусловно, дорогостоящим,

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Мы уже говорили также, что эффективность компенсации может быть обеспечена при автоматической настройке катушки индуктивности в резонансе. Однако это требует применения сложных систем автоматического регулирования, экономическая целесообразность которых не всегда оправдана.

За рубежом сети с катушками в нейтрали трансформаторов в настоящее время не находят применения.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

19. Принципиальные схемы промышленных устройств защиты от замыканий на землю

Защита от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6—10 кВ имеет большое значение для надежности энергоснабжения и безопасности персонала, обслуживающего сети и электроустановки потребителей.

Рассматривая защиту от замыканий на землю с точки зрения электробезопасности, мы имеем в виду прежде всего уменьшение опасности однополюсных прикосновений. Известно, что прикосновение к фазе сети 6 или 10 кВ всегда представляет собой исключительную опасность для жизни человека. Однако можно с уверенностью сказать, что путем быстрого отключения напряжения можно во многих случаях избежать смертельного исхода, особенно если пострадавшему будет немедленно оказана эффективная доврачебная помощь. Указанное отключение можно выполнить устройством защиты от однофазных замыканий на землю. При попадании человека под высокое напряжение его сопротивление резко снижается и ток, проходящий через тело человека, сможет вызвать срабатывание защиты. Таким образом, защита от замыканий на землю должна выполнять и функции защитного отключения. И с этой точки зрения она имеет исключительно важное значение.

В настоящее время применяются следующие виды защиты: реагирующие на напряжение нулевой последовательности; на токи нулевой последовательности; реагирующая на напряжение и токи нулевой последовательности. Выбор вида защиты определяется в зависимости от числа ответвлений на шинах подстанции.

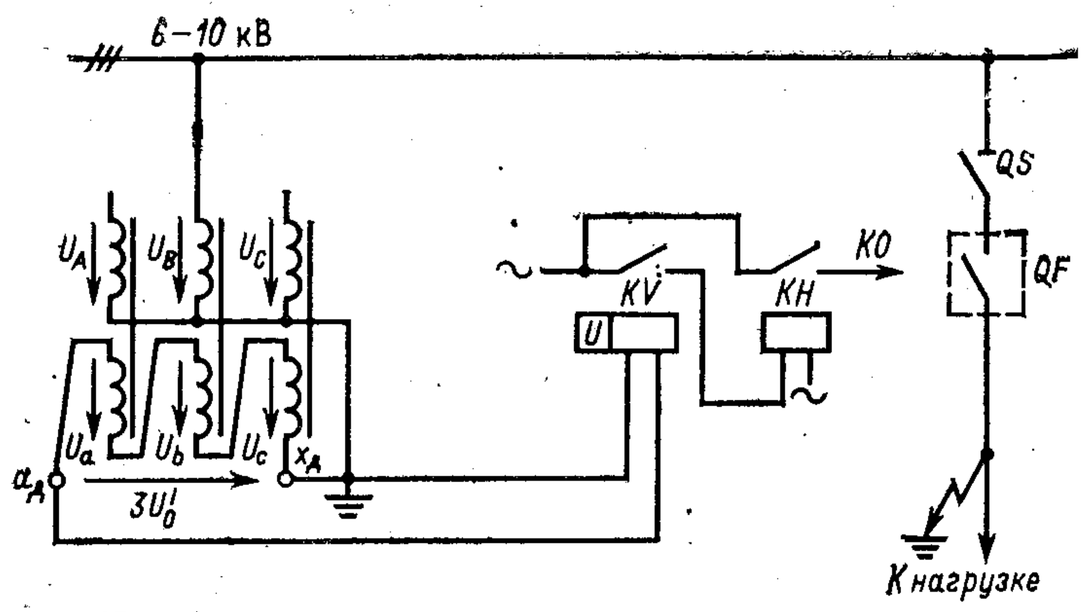


Рис. 31. Принципиальная схема защиты, реагирующая на напряжение нулевой последовательности

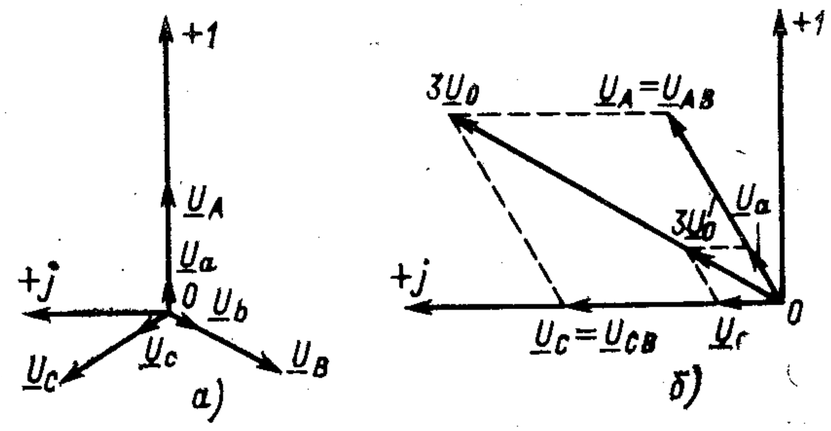


Рис. 32. Векторная диаграмма напряжений

В защитах, реагирующих на напряжение нулевой последовательности, сигнал снимается с вторичных обмоток трансформатора напряжения, соединенных в открытый треугольник. На рис. 31 показана принципиальная схема защиты, реагирующая на напряжение нулевой последовательности.

При отсутствии замыкания на землю напряжения U_a, U_b, U_c равны между собой и сдвинуты по фазе на угол 120° (рис. 32,*а*). Поэтому вторичное напряжение нулевой последовательности на вторичной обмотке трансформатора равно нулю

$$\underline{U}_0' = \frac{1}{3}(\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c) = 0.$$

При замыкании на землю одной фазы, например *B*,

$$\underline{U}_b = 0, \quad \underline{U}_a = \frac{1}{K}\underline{U}_{AB} = \frac{1}{K}U_л e^{j30°};$$

$$\underline{U}_c = \frac{1}{K}\underline{U}_{CB} = \frac{1}{K}U_л e^{j90°},$$

поэтому

$$\underline{U}_0' = (\underline{U}_a + 0 + \underline{U}_c) = \frac{U_л}{\sqrt{3}K}e^{j60°},$$

где $U_л$ — линейное напряжение сети; K — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

На рис. 32,*б* показана векторная диаграмма первичных и вторичных напряжений при однофазном замыкании на землю фазы *B*.

Таким образом, напряжение нулевой последовательности на вторичной обмотке трансформатора возрастает от нуля до

$$U_0' = \frac{U_л}{\sqrt{3}K}. \qquad (52)$$

В условиях глухого замыкания на землю напряжение $3U'_0$ у трансформаторов типов НТМИ-6 и НТМИ-10 составляет 100 В.

Напряжение $3U'_0$ подводится к реле напряжения *KV* (рис. 31). При срабатывании этого реле сигнал поступает на промежуточное реле *KH*, которое своими контактами подает напряжение на катушку отключения *KO* масляного выключателя. В результате происходит отсоединение поврежденной фазы от шин подстанции.

В качестве реле напряжения обычно применяется реле типа РН53/60Д.

Поскольку рассмотренная схема не может работать селективно, она применяется в тех случаях, когда к шинам подстанции подключена неразветвленная сеть.

В сетях с числом присоединений более восьми — десяти, отходящих от шин подстанции, для селективного отключения поврежденного участка применяется простая токовая защита, в которой в качестве датчиков сигнала используются трансформаторы тока нулевой последовательности, а в качестве реагирующих органов — различные токовые реле.

На поврежденном участке ток нулевой последовательности имеет наибольшее значение и поэтому напряжение на вторичной обмотке трансформатора тока также будет наибольшим. Поэтому чем больше участков в сети, тем выше селективность защиты. На практике защита, реагирующая на ток нулевой последовательности, применяется в тех случаях, когда к шинам подстанции подключено не

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

менее пяти отходящих присоединений. В этом случае хорошо обеспечиваются условия для четкой селективной работы защиты.

На рис. 33 показана принципиальная схема токовой защиты от однофазных замыканий на землю. Если произойдет замыкание на землю, во вторичной обмотке трансформатора тока нулевой последовательности *ТА* возникает ток $3I'_0$, под действием которого включится токовое реле *КА* и своим замыкающим контактом подаст напряжение на промежуточное реле КН. Контакт этого реле соединен последовательно с отключающей катушкой КО масляного выключателя.

В качестве датчиков сигнала нулевой последовательности промышленность выпускает трансформаторы тока нулевой последовательности ТЗ, ТЗР, ТФ, ТТНП-2 и др. Эти трансформаторы предназначены для установки на кабельных линиях или кабельных вставках. В качестве реагирующих органов токовой защиты применяют реле типов РТ-40/0,2, РТЗ-551 и ЭТД-551.

Основной недостаток токовых защит — возможность неселективных отключений неповрежденных участков сети, особенно при небольшом числе присоединений на шинах подстанции. Так, при двух отходящих присоединениях, на которых установлена защита, при замыкании на одном из них отключаются оба присоединения. В этом случае за счет влияния емкостных составляющих ток нулевой последовательности в неповрежденной линии, от которого отстраивается защита, становится соизмеримым с током замыкания на землю в поврежденной линии. Недостатком этой системы защиты является трудность выбора уставки

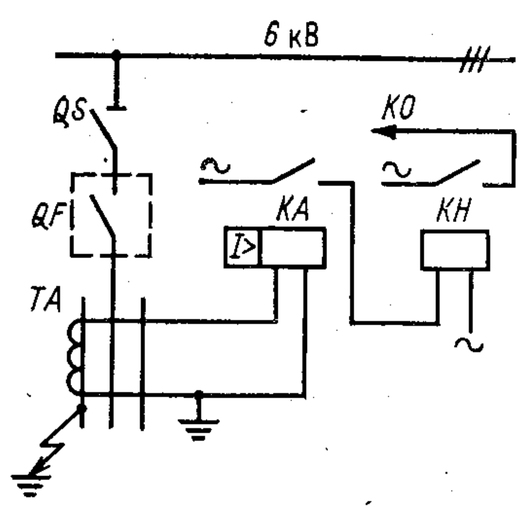


Рис. 33. Принципиальная схема токовой защиты от однофазных замыканий на землю

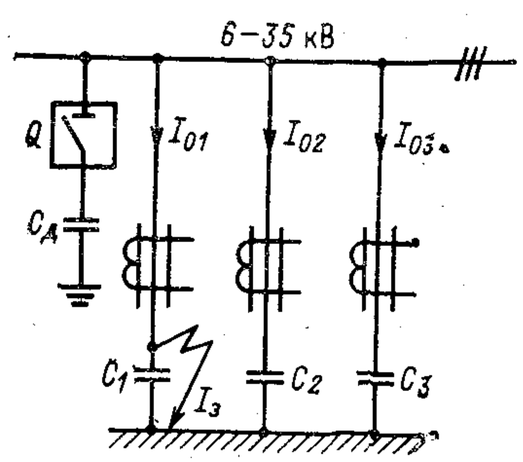


Рис. 34. Схема токовой защиты с подключенными дополнительными конденсаторами $C_д$

тока срабатывания, так как количество одновременно работающих присоединений в процессе эксплуатации сети меняется, а следовательно, изменяется и полный ток замыкания на землю.

Для улучшения селективной работы простых токовых защит достаточно подключить к шинам подстанции конденсаторы с одинаковыми по значению емкостями $C_д$, а общую их точку соединить с землей (рис. 34). В этом случае токи нулевой последовательности при глухом замыкании фазы на землю будут равны

$$I_{01}=U_ф\omega(C_д+C_2+C_3);$$

$$I_{02}=U_ф\omega C_2;$$

$$I_{03}=U_ф\omega C_3.$$

Как видно из этих уравнений, ток нулевой последовательности на поврежденном участке I_{01} с введением в сеть дополнительной емкости возрастает прямо пропорционально емкости $C_д$, а на неповрежденных участках токи I_{02} и I_{03} остаются без изменения.

Таким образом, подключая к сети конденсаторы $C_д$ (рис. 34), можно добиться селективной защиты от однофазных замыканий на землю с использованием простой и надежной защиты, работающей на базе реле типа ЭТД. Работа защиты будет обеспечена, если емкость конденсатора будет рассчитана из условия

$$C_д \approx \frac{1}{3}(C_1+C_2+C_3).$$

Необходимо отметить, что в нормальных условиях работы сети дополнительный конденсатор будет способствовать повышению коэффициента мощности системы электроснабжения.

Значительно сложнее решается задача создания селективной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания, когда число присоединений на шинах подстанции не превышает пяти-шести. Такие сети широко применяются, например, для электроснабжения горных работ, на торфоразработках и др.

В последние годы в периодической печати опубликовано большое количество статей, в которых предлагаются различные схемы защиты в сетях 6—10 кВ с малыми емкостными токами замыкания на землю. И тем не менее многие приведенные в литературе схемы защиты не на-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

шли практического применения. В настоящее время серийно выпускается лишь защита типа ЗЗП-1, предназначенная для селективного отключения защищаемого присоединения при однофазном замыкании на землю в сетях карьеров, в шахтных и тяговых сетях. Однако и эта защита обладает серьезными принципиальными недостатками.

Указанное положение объясняется прежде всего отсутствием необходимых теоретических предпосылок. Известно, что большинство разрабатываемых схем селективной защиты использует принцип сравнения фаз и амплитуд токов и напряжений нулевой последовательности. Однако аналитические зависимости этих величин от параметров изоляции сети относительно земли в настоящее время не установлены.

Через блоки устройства защиты в общем случае проходит сигнал, пропорциональный току замыкания на землю, изменяющийся соответственно значениям тока короткого замыкания, его фазе и форме кривой. Исследование этого вопроса с точки зрения теоретической электротехники представляет собой нелегкую задачу. Не случайно поэтому, что авторы предлагаемых в литературе схем не рассматривают этот вопрос вообще. В таком случае не получает объяснения и принцип работы предлагаемой схемы защиты со всеми вытекающими из этого последствиями.

Из этих соображений можно объяснить отсутствие эффективных схем защиты, удовлетворяющих предъявляемым требованиям электробезопасности. Рассмотрим отдельные примеры. Чебоксарским электроаппаратным заводом серийно выпускается устройство защиты от замыканий на землю типа ЗЗП-1, которое разработано во ВНИИВЭ.

В инструкции по эксплуатации этого устройства в разделе «Принцип действия и конструктивное оформление» отмечается, что «защита типа ЗЗП-1 представляет собой направленную защиту нулевой последовательности. Защита состоит из согласующего устройства, усилителя переменного тока, фазочувствительного усилителя. Согласующее устройство обеспечивает: а) сдвиг фазы выходного тока на угол, близкий к 90° по отношению к первичному току нулевой последовательности во всем диапазоне изменения последнего; б) термическую стойкость защиты при двойных замыканиях на землю; в) возможность использования защиты с трансформаторами тока нулевой последовательности различных типов...»

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

«Усилитель переменного тока усиливает выходной сигнал согласующего устройства, пропорциональный $3I_0$...»

Фазочувствительный усилитель усиливает сигнал, соответствующий току нулевой последовательности с углом фазы по отношению к напряжению нулевой последовательности, чем обусловливает срабатывание выходного реле в зоне около 180°.

Из этого описания невозможно установить принцип работы рассматриваемой схемы защиты и объяснить, в результате чего достигается селективность ее действия.

Необходимо отметить, что приведенная в инструкции рабочая схема устройства представляет собой с точки зрения теоретической электротехники сложную нелинейную электрическую цепь. Для таких цепей аналитический анализ процессов практически невозможен. При наличии вентилей и реактивных элементов в схеме теряет смысл понятие «фазовый угол» и какие-либо другие фазовые соотношения, о которых говорится в инструкции.

К сожалению, известные в литературе материалы, относящиеся к указанной защите, также не отличаются полнотой изложения и не имеют необходимых сведений о принципах действия схемы рассматриваемой защиты.

Опыт эксплуатации защиты типа ЗЗП-1 свидетельствует о ее неселективной и неустойчивой работе. Она, как правило, преднамеренно отключается энергетиками и поэтому не работает.

В зарубежной практике трудности создания селективной защиты от замыканий на землю в распределительных сетях преодолены в основном путем рационального выбора режима нейтрали. Так, например, в США основная часть сетей среднего и высокого напряжения, в том числе и карьерные сети, имеет нейтраль, заземленную через резистор. Заземление может быть выполнено как через резистор с малым сопротивлением, так и с большим. В первом случае резистор применяется в основном в сетях напряжением 1,4—13,8 кВ. Сопротивление резистора в цепи заземления выбирается так, чтобы при замыкании на землю создать ток, достаточный для надежного срабатывания защиты. В сетях, заземленных через большое активное сопротивление, резисторы рассчитываются на ток 15—20 А, а в сетях, заземленных через малое активное сопротивление, на ток до 600 А.

При включении резисторов между нейтралью сети и землей уменьшается вероятность возникновения резонансных перенапряжений; отпадает необходимость в примене-

нии трансформаторов напряжения нулевой последовательности, являющихся при определенных условиях причиной опасных перенапряжений (см. гл. 1).

Защита с искусственно увеличенным током замыкания на землю за рубежом применяется уже в течение многих лет. Например, в ЧССР эта идея осуществляется путем создания искусственной нейтрали, заземленной через резистор.

В Советском Союзе работы по созданию защиты от замыканий на землю в распределительных сетях 6—10 кВ с изолированной нейтралью проводятся в ряде научно-исследовательских и учебных институтов. Так, в Московском горном институте на основании проведенных теоретических исследований разработана оригинальная селективная защита от замыканий на землю в сетях 6 кВ карьеров, работающая на принципе логических блокировок неповрежденных участков сети.

20. Амплитудные и фазовые соотношения токов и напряжений нулевой последовательности при замыканиях на землю

Для правильного построения защиты от замыканий на землю необходимо располагать зависимостями токов и напряжений нулевой последовательности от параметров изоляции сети относительно земли. К сожалению, до настоящего времени такие зависимости установлены не были. Это затрудняет расчет и исследование указанных защит.

Принцип действия большинства селективных защит от однофазных замыканий на землю основан на сравнении фаз и амплитуд токов и напряжений нулевой последовательности. Аналитические зависимости токов и напряжений нулевой последовательности от емкостей отдельных участков сети относительно земли можно получить, рассматривая расчетную схему рис. 35 с тремя участками, на которых установлены трансформаторы тока нулевой последовательности *TA1—TA3* [10]. Напряжение нулевой последовательности $3u_0'$ снимается со вторичных обмоток трансформаторов напряжений *TV*. На схеме приняты следующие обозначения: $u_{фA}$, $u_{фB}$, $u_{фC}$ — фазные напряжения питающего трансформатора *T1*; u_N — напряжение смещения нейтрали; i_{01} — ток нулевой последовательности на поврежденном участке; i_{02}, i_{03} — токи нулевой последовательности на неповрежденных участках; $i_з$ — ток замыкания на землю; C_1—C_3 — емкости фаз относительно земли; $r_з$ —

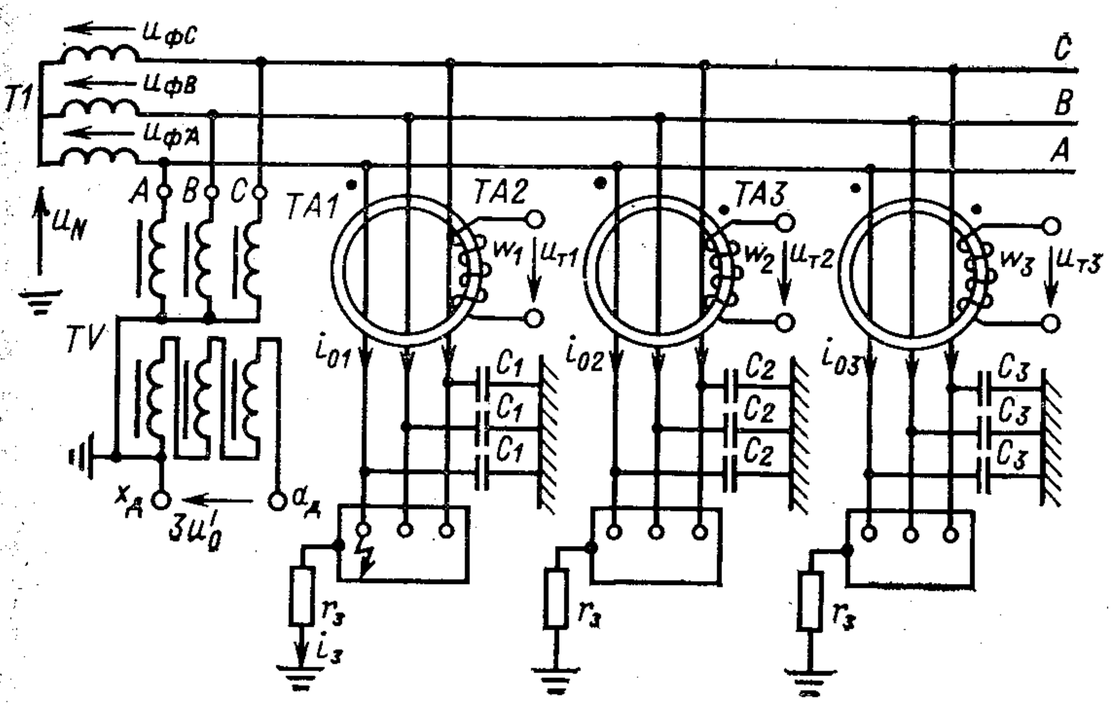


Рис. 35. Схема исследования распределения токов нулевой последовательности при замыкании на землю

сопротивление в цепи тока замыкания на землю; $u_{т1}$—$u_{т3}$ — напряжения на разомкнутых зажимах вторичных обмоток *TA1—TA3*; w_1—w_3 — число витков вторичных обмоток *TA1—TA3*.

При $u_{фA}=U_m\sin\omega t$ для принятых на рис. 35 положительных направлений напряжений и токов на основании (20), (21) можем записать основные уравнения:

$$i_{01}=\frac{U_m\omega(C_2+C_3)}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\sin(\omega t-\varphi); \qquad (53)$$

$$i_{02}=-\frac{U_m\omega C_2}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\sin(\omega t-\varphi); \qquad (54)$$

$$i_{03}=-\frac{U_m\omega C_3}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\sin(\omega t-\varphi); \qquad (55)$$

$$i_з=\frac{3U_m\omega(C_1+C_2+C_3)}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\sin(\omega t-\varphi), \qquad (56)$$

где U_m — амплитудное значение фазного напряжения, питающего сеть трансформатора;

$\varphi=-\operatorname{arctg}\frac{1}{r_з\omega C_\Sigma}$ — фазовый сдвиг.

По аналогии можно записать выражения для токов нулевой последовательности в сети с любым числом участ-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ков, при этом за первый участок можно принять любой из них.

Из приведенных уравнений следует, что токи нулевой последовательности i_{02} и i_{03} на неповрежденных участках и i_{01} на поврежденном участке находятся в противофазе и отличаются по амплитуде.

Первичное напряжение нулевой последовательности u_0, равное по значению и противоположное по фазе напряжению смещения нейтрали u_N, определяется по (1)

$$u_0 = -u_N = -\frac{U_m}{\sqrt{1 + r_з^2\omega^2 C_\Sigma^2}} \sin(\omega t - \varphi'), \qquad (57)$$

где

$$\varphi' = \operatorname{arctg} \omega C_\Sigma r_з.$$

Напряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока *ТА1—ТА3* найдем как

$$u_{т1} = \frac{3w_1}{R_{м1}} \frac{di_{01}}{dt} = \frac{3w_1\omega}{R_{м1}} I_{m01} \cos(\omega t - \varphi); \qquad (58)$$

$$u_{т2} = -\frac{3w_2}{R_{м2}} \frac{di_{02}}{dt} = -\frac{3w_2\omega}{R_{м2}} I_{m02} \cos(\omega t - \varphi); \qquad (59)$$

$$u_{т3} = -\frac{3w_3}{R_{м2}} \frac{di_{03}}{dt} = -\frac{3w_3\omega}{R_{м3}} I_{m03} \cos(\omega t - \varphi), \qquad (60)$$

где $R_{м1}$—$R_{м3}$ — магнитные сопротивления *ТА1—ТА3*. Амплитуды токов нулевой последовательности I_{m01}—I_{m03} равны амплитудным значениям синусоид в (53)—(55).

На рис. 36 представлена векторная диаграмма напряжений и токов для схемы рис. 35. Как видно, напряжение нулевой последовательности u'_0 и напряжение $u_{т1}$, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора тока на поврежденном участке, совпадают по фазе. В то же время напряжения $u_{т2}$ и $u_{т3}$ на неповрежденных участках находятся в противофазе с u'_0.

В качестве примера рассмотрим сеть, в которой $U_л = \sqrt{3}U_ф = 6000$ В, $r_з = 10$ Ом, $C_1 = 5$ мкФ, $C_2 = 15$ мкФ, $C_3 = 10$ мкФ.

Подставим полученные значения в (53)—(55)

$$i_{01} = 37 \sin(314t + 74°);$$

$$i_{02} = -22{,}23 \sin(314t + 74°);$$

$$i_{03} = -14{,}82 \sin(314t + 74°);$$

$$u_0 = -u_N = 4719 \sin(314t + 164°);$$

$$u_{фA} = 4899 \sin 314t.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

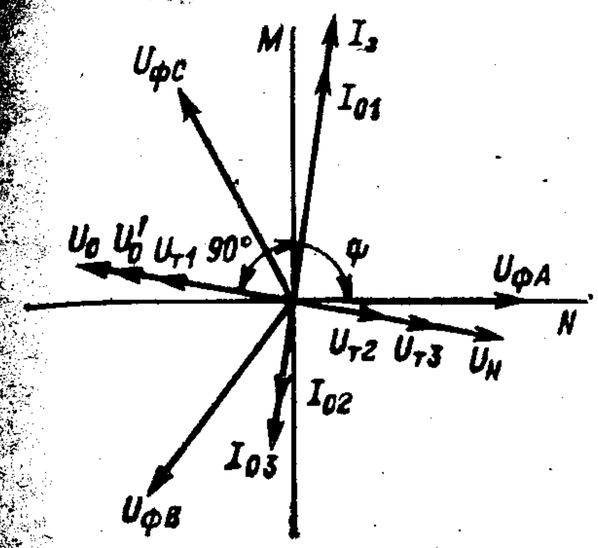


Рис. 36. Векторная диаграмма токов и напряжений в схеме рис. 35

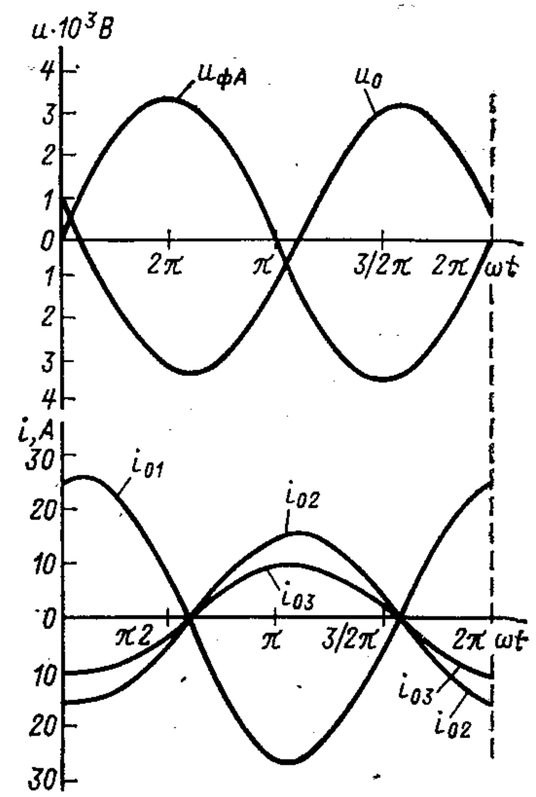


Рис. 37. Кривые, характеризующие распределение токов нулевой последовательности в схеме рис. 35

На рис. 37 приведены зависимости распределения токов и напряжения нулевой последовательности в любой момент времени периода переменного тока.

При глухом замыкании фазы на землю, когда $r_з = 0$, (53)—(55) примут вид:

$$i_{01} = U_m\omega\,(C_2 + C_3) \cos \omega t;$$

$$i_{02} = -U_m\omega C_2 \cos \omega t;$$

$$i_{03} = -U_m\omega C_3 \cos \omega t;$$

$$i_з = 3U_m\omega\,(C_1 + C_2 + C_3) \cos \omega t.$$

При замыкании напряжение нулевой последовательности равно фазному напряжению с обратным знаком той фазы, на которой произошло замыкание на землю. В данном случае оно равно напряжению фазы *A*.

Так как при глухом замыкании на землю $\varphi' = 0$, то

$$u_0 = -u_N = -U_m \sin \omega t.$$

На рис. 38 проведена векторная диаграмма токов и напряжений для случая глухого замыкания на землю.

Сравним изменения фазовых и амплитудных характеристик токов и напряжений нулевой последовательности, когда участки сети обладают только активными сопротивлениями и не обладают емкостью относительно земли.

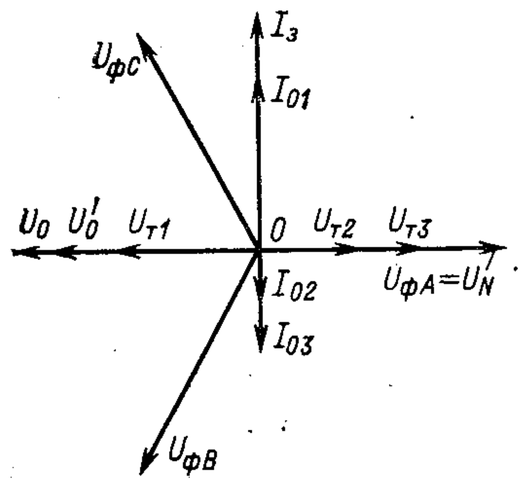


Рис. 38. Векторная диаграмма токов и напряжений при глухом замыкании на землю

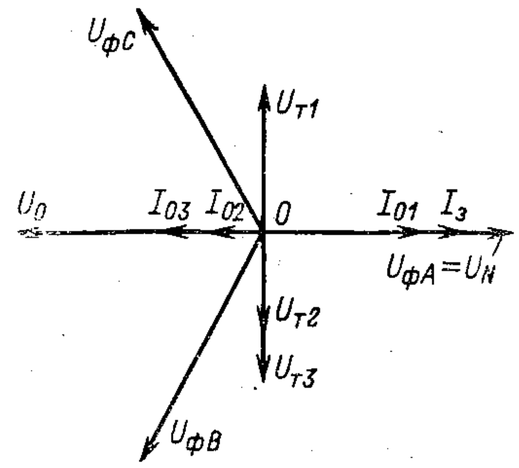


Рис. 39. Векторная диаграмма токов и напряжений при активных сопротивлениях сети относительно земли

Как и ранее, согласно (16), (17) уравнения для токов нулевой последовательности имеют вид

$$i_{01} = \frac{U_m(g_2+g_3)}{1+r_з g_\Sigma}\sin\omega t; \qquad (61)$$

$$i_{02} = -\frac{U_m g_2}{1+r_з q_\Sigma}\sin\omega t; \qquad (62)$$

$$i_{03} = -\frac{U_m g_3}{1+r_з g_\Sigma}\sin\omega t; \qquad (63)$$

$$i_з = 3U_m\frac{g_1+g_2+g_3}{1+r_з g_\Sigma}\sin\omega t, \qquad (64)$$

где $g_1=1/r_1$, $g_2=1/r_2$, $g_3=1/r_3$ — активные проводимости отдельных фаз соответствующих участков; $g_\Sigma=1/r_1+1/r_2+1/r_3=g_1+g_2+g_3$ — полная активная проводимость сети относительно земли.

Напряжение нулевой последовательности в соответствии с (57) равно

$$u_0 = -u_N = -\frac{U_m}{1+r_з g_\Sigma}\sin\omega t.$$

Напряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока *ТА1—ТА3* для этого случая определяются следующим образом:

$$u_{т1} = \frac{3w_1\omega}{R_{м1}} I_{m01}\cos\omega t; \qquad (65)$$

$$u_{т1} = -\frac{3w_2\omega}{R_{м2}} I_{m02}\cos\omega t; \qquad (66)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$u_{т3} = -\frac{3w_1\omega}{R_{м3}} I_{m03}\cos\omega t, \qquad (67)$$

где I_{m01}, I_{m02}, I_{m03} — амплитуды токов нулевой последовательности, равные соответственно постоянной составляющей выражений (61)—(63).

Векторная диаграмма токов и напряжений для сети, обладающей только активными сопротивлениями изоляции, приведена на рис. 39.

Из рисунка видно, что в отличие от емкостной сети напряжение u'_0 и токи i_{02}, i_{03} на неповрежденных участках совпадают по фазе. В то же время ток i_{01} на поврежденном участке находится в противофазе с u'_0.

Проведенные исследования фазовых и амплитудных соотношений токов и напряжений нулевой последовательности позволяют сделать вывод, имеющий важное значение для правильного выбора принципа защиты от однофазных замыканий на землю. В сетях, обладающих значительной емкостью относительно земли, т. е. когда можно полагать, что $\varphi=\pi/2$, трансформаторы тока должны работать в режиме холостого хода, т. е. вторичные обмотки *ТА* следует подключать к высокоомным нагрузкам. В этом случае можно добиться селективной защиты, так как напряжение нулевой последовательности и напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора тока на поврежденном участке, совпадают по фазе. Следовательно, их значения суммируются. На неповрежденных участках соответствующие напряжения будут вычитаться, что может быть учтено схемой защиты.

В сетях с малой емкостью относительно земли и большими активными утечками на землю, т. е. когда $\varphi=0$, трансформаторы тока должны работать в режиме, близком к короткому замыканию. В этом случае с напряжением нулевой последовательности совпадают по фазе токи на неповрежденных участках сети и противоположен с этим напряжением по фазе ток на поврежденном участке. Следовательно, при соответствующем включении вторичных обмоток трансформаторов токов и напряжения можно получать суммирование сигналов на поврежденном участке и вычитание на неповрежденных.

Следует, однако, принять во внимание, что в большинстве случаев в сетях 6—35 кВ преобладают емкостные составляющие полной проводимости сети относительно земли. Значит, при разработке защит от замыканий на землю необходимо исходить из условия работы ТТНП в режиме холостого хода.

21. Токи и напряжения нулевой последовательности при переходных процессах, вызванных замыканиями на землю

В момент замыкания фазы на землю возникает переходный процесс, при котором токи и напряжение нулевой последовательности изменяются по сложному закону и могут значительно превышать установившиеся значения. В этих условиях возможны ложные срабатывания защиты. Следовательно, при обосновании защиты от однофазных замыканий на землю необходимо рассматривать и учитывать токи и напряжение нулевой последовательности в переходных режимах.

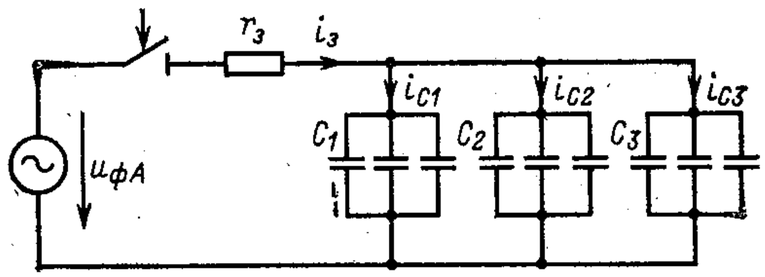


Рис. 40. Схема расчета токов нулевой последовательности при переходных процессах

Для схемы рис. 35 при напряжении сети $u_{фA}=U_m \sin(\omega t+\psi)$ расчет цепей будем вести на основании метода эквивалентного генератора. Ток переходного процесса $i_з$, вызванного замыканием фазы A на землю, найдем из расчетной схемы рис. 40

$$i_з=\frac{U_m\omega C_\Sigma}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\left[\sin(\omega t+\psi-\varphi)-\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з C_\Sigma}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right], \quad (68)$$

где $\varphi=-\operatorname{arctg}\frac{1}{\omega C_\Sigma r_з}$ — фазовый угол; $C_\Sigma=3(C_1+C_2+C_3)$ — суммарная емкость сети относительно земли.

Токи в емкостях схемы рис. 35 найдем из соотношений

$$i_{C1}=\frac{C_1}{C_1+C_2+C_3}i_з; \quad (69)$$

$$i_{C2}=\frac{C_2}{C_1+C_2+C_3}i_з; \quad (70)$$

$$i_{C3}=\frac{C_3}{C_1+C_2+C_3}i_з. \quad (71)$$

Так как сумма токов в емкостях схемы рис. 40 до замыкания на землю была равна нулю, то с учетом (68)—(71) найдем искомые переходные токи нулевой последовательности

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$$i_{01}=\frac{U_m\omega(C_2+C_3)}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\left[\sin(\omega t+\psi-\varphi)-\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з C_\Sigma}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right];$$

$$i_{02}=-\frac{U_m\omega C_2}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\left[\sin(\omega t+\psi-\varphi)-\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з C_\Sigma}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right];$$

$$i_{03}=-\frac{U_m\omega C_3}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\left[\sin(\omega t+\psi-\varphi)-\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з C_\Sigma}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right].$$

Первичное напряжение нулевой последовательности найдем из уравнения

$$u_0=i_з r_з-u_{фA}. \quad (72)$$

Подставив в (72) значение тока замыкания на землю из (68), получаем

$$u_0=-\frac{U_m}{\sqrt{1+r_з^2\omega^2C_\Sigma^2}}\left[\sin(\omega t+\psi+\varphi')-\sin(\psi+\varphi')e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right], \quad (73)$$

где $\varphi'=-\operatorname{arctg}\omega C_\Sigma r_з$.

По аналогии можно записать выражения для токов переходного процесса в сети с любым числом участков.

Напряжения на вторичных обмотках трансформаторов тока *ТА1—ТА3* найдем из выражений:

$$u_{г1}=\frac{3w_1}{R_{м1}}\frac{di_{01}}{dt}=\frac{3w_1}{R_{м1}}I_{m01}\left[\omega\cos(\omega t+\psi-\varphi)+\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з^2C_\Sigma^2}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right]; \quad (74)$$

$$u_{г2}=-\frac{3w_2}{R_{м2}}\frac{di_{02}}{dt}=$$

$$=-\frac{3w_2}{R_{м2}}I_{m02}\left[\omega\cos(\omega t+\psi-\varphi)+\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з^2C_\Sigma^2}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right]; \quad (75)$$

$$u_{г3}=-\frac{3w_3}{R_{м3}}\frac{di_{03}}{dt}=$$

$$=-\frac{3w_3}{R_{м3}}I_{m03}\left[\omega\cos(\omega t+\psi-\varphi)+\frac{\cos(\psi-\varphi)}{\omega r_з^2C_\Sigma^2}e^{-\frac{t}{r_з C_\Sigma}}\right], \quad (76)$$

где $R_{м1}$—$R_{м3}$ — магнитные сопротивления трансформаторов тока.

Полученные уравнения дают возможность определить длительность переходных процессов, исследовать влияние апериодических составляющих токов и напряжений на уставку защиты и др. Например, сравнивая уравнения (73) и (74)—(76), можно отметить, что на по-

врежденном участке сети апериодические составляющие напряжений u_0' и $u_{т1}$ имеют разные знаки, а на поврежденных участках апериодические составляющие напряжений $u_{т2}$ и $u_{т3}$ имеют одинаковые знаки с u_0'. Это обстоятельство усложняет достижение селективной работы защиты во время переходного процесса. Однако установленная закономерность позволяет обосновывать технические решения для защиты сети по характеристикам в переходных режимах.

Таким образом, полученные уравнения позволяют исследовать работу защиты с учетом переходных процессов и проводить необходимые расчеты при практической разработке селективных защит от замыканий на землю.

22. Режимы работы трансформаторов тока нулевой последовательности в схемах защиты

Трансформатор тока нулевой последовательности является основным элементом устройства защиты от однофазных замыканий на землю, может работать в схемах защиты в режиме короткого замыкания, в режиме холостого хода, а также в согласованном режиме, при котором в нагрузку передается максимальная мощность. Это значит, что расчет конструктивных параметров ТТНП должен соответствовать режиму работы. Режим короткого замыкания имеет место при работе трансформатора тока с усилителями, имеющими низкое входное сопротивление, например полупроводниковыми. Режим холостого хода имеет место, когда вторичная обмотка ТТНП подключается к усилителю (например, электронному или полупроводниковому с большим входным сопротивлением). При согласованном режиме вторичная обмотка трансформатора тока включается непосредственно на электромагнитное реле. При этом режиме обеспечивается передача максимума активной мощности от источника к приемнику.

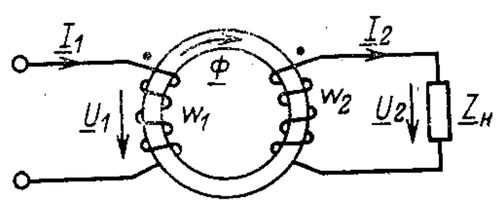


Рис. 41. Схема трансформатора тока нулевой последовательности

Трансформатор тока нулевой последовательности с железным сердечником является нелинейным элементом электрической сети. Действительно, зависимость между магнитными потоками и токами нелинейна и выражается кривой намагничивания. Поэтому процессы, происходящие в ТТНП, описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Однако основные уравнения и схемы замещения можно получить для так называемого линейного трансформатора, т. е. для такого, у которого магнитная проницаемость сердечника постоянна ($\mu = \text{const}$). Будем считать, что трансформатор тока нулевой последовательности, изображенный на рис. 41, не обладает потерями и рассеянием. Для

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

принятых на рис. 41 положительных направлений токов и магнитного потока на основании закона полного тока можем записать

$$\underline{\Phi} = \frac{1}{R_м}(\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2), \qquad (77)$$

где w_1 — число витков одной фазы ТТНП; w_2 — число витков вторичной обмотки ТТНП; $R_м = l/\mu S$ — магнитное сопротивление цепи трансформатора тока; $\underline{I}_1 = 3\underline{I}_0$ — расчетный первичный ток, равный устроенному значению тока нулевой последовательности.

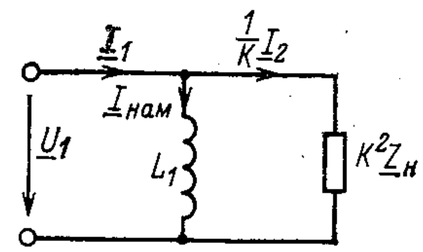


Рис. 42. Схема замещения идеального трансформатора тока нулевой последовательности

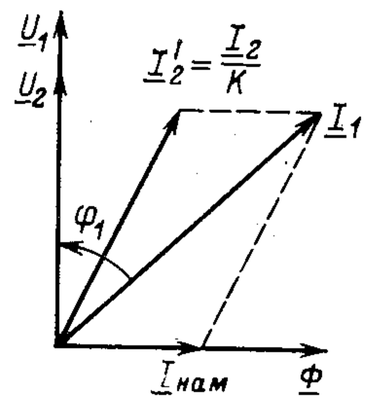


Рис. 43. Векторная диаграмма трансформатора тока нулевой последовательности

Магнитный поток $\underline{\Phi}$ связан с напряжением на первичной обмотке w_1 соотношением

$$\underline{\Phi} = \frac{\underline{U}_1}{j\omega w_1}; \qquad (78)$$

используя (77) и (78), получаем

$$\underline{U}_1\left(\frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{K^2\underline{Z}_н}\right) = 3\underline{I}_0, \qquad (79)$$

где $L_1 = w_2^1/R_м$ — индуктивность первичной обмотки, которая учитывает основной магнитный поток трансформатора; $K = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации.

Уравнению (79) соответствует схема замещения идеального трансформатора (рис. 42). Векторная диаграмма для такого трансформатора тока нулевой последовательности показана на рис. 43.

Преобразуя схему, показанную на рис. 42, можно получить полную схему замещения, изображенную на рис. 44. Иначе говоря, реальный трансформатор можно представить как идеальный, включив последовательно первичной и вторичной обмоткам катушки, представляющие собой индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток. Потери в стальном сердечнике могут быть учтены введением активного сопротивления параллельно индуктивности L_1 или комплекса $L_1 e^{-j\delta}$. Угол δ учитывает потери в стали.

Рассмотрим расчетные режимы работы ТТНП.

Режим короткого замыкания. Так как ток $\underline{I}_1=3\underline{I}_0$ не зависит от сопротивления нагрузки $\underline{Z}_н$, то при уменьшении сопротивления нагрузки будет возрастать ток $\underline{I}_2'=\underline{I}_2/K$ и уменьшаться ток намагничивания $\underline{I}_{нам}=\underline{U}_1/j\omega L_1$. При $\underline{Z}_н=0$, т. е. в режиме глухого короткого замыкания,

$$w_2/w_1=3\underline{I}_0/\underline{I}_2.$$

Следовательно, в этом идеальном случае отношение первичного тока ко вторичному равно величине, обратной коэффициенту трансформации. В действительности из-за влияния конечных значений индуктивностей обмоток вторичный ток отличается от идеального значения. Значение возникающей при этом относительной погрешности токов определим как

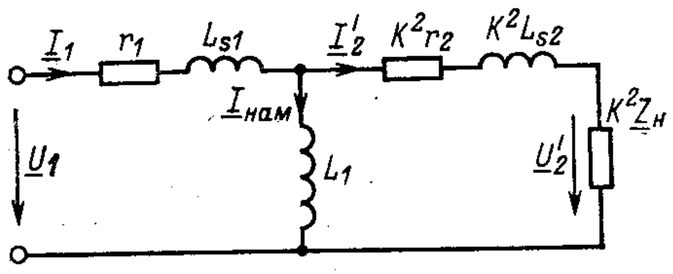


Рис. 44. Схема замещения реального трансформатора тока нулевой последовательности

$$\Delta=\frac{\frac{w_2}{w_1}\underline{I}_2-3\underline{I}_0}{3\underline{I}_0}100\%.$$

Кроме того, угол сдвига фаз между первичным и вторичным токами не равен 0, как это было в идеальном случае, а несколько меньше. Модуль угла сдвига фаз между первичным и вторичным токами называют угловой ошибкой ε трансформатора.

По схеме замещения трансформатора (рис. 44) можно определить погрешности измерения, исходя из конструктивных параметров трансформатора.

Обозначим

$$r_2+j\omega L_{s2}+\underline{Z}_н=\underline{Z}_s e^{j\varphi}.$$

На основании закона распределения токов можем записать

$$\underline{I}'_2=\frac{\underline{I}_2}{K}=3\underline{I}_0\frac{j\omega L_1 e^{-j\delta}}{j\omega L_1 e^{-j\delta}+K^2\underline{Z}_s e^{j\varphi}}=3\underline{I}_0\frac{1}{1+\frac{K^2\underline{Z}_s}{j\omega L_1}e^{j(\varphi+\delta)}}$$

или

$$\underline{I}_2=3\underline{I}_0K\frac{1}{1+\frac{Z_s}{\omega L_1}[\sin(\varphi+\delta)-j\cos(\varphi+\delta)]}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Для приближенной оценки относительных погрешностей, свойственных ТТНП в режиме короткого замыкания, можно использовать выражения:

$$\Delta=\frac{Z_s}{\omega L_1}\sin(\varphi+\delta);$$

$$\varepsilon=\frac{Z_s}{\omega L_1}\cos(\varphi+\delta).$$

Отсюда следует, что погрешности растут пропорционально общему сопротивлению Z_s на вторичной стороне. Практически углы φ и δ очень малы, так что можно приближенно принять, что

$$\varepsilon=\frac{Z_s}{\omega L_1}\quad\text{и}\quad\Delta=\varepsilon(\varphi+\delta).$$

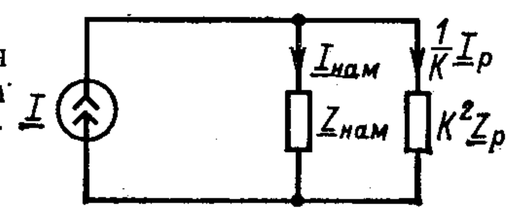
Поскольку мы ведем расчет режима работы ТТНП в условиях защиты, а не измерения первичных токов, то эти погрешности не оказывают существенного значения на работу отключающего устройства.

Режим холостого хода. В режиме холостого хода ток во вторичной обмотке w_2 ТТНП равен нулю и магнитный поток Ф определяется только утроенным током нулевой последовательности. Напряжение на зажимах обмотки w_2 будет равно

$$\underline{U}_2=w_2j\omega\underline{\Phi}=\frac{3j\omega w_2w_1}{R_м}\underline{I}_0, \qquad (80)$$

т. е. будет изменяться пропорционально току нулевой последовательности.

Рис. 45. Упрощенная схема трансформатора тока нулевой последовательности



Однако для этого режима имеется характерная особенность. Сердечник трансформатора с увеличением тока нулевой последовательности быстро насыщается. В этом случае зависимость (80) не будет соблюдаться.

Согласованный режим работы ТТНП. Найдем условие максимума полной мощности реле, подключенного ко вторичной обмотке ТТНП. Для расчетов такого режима можно воспользоваться упрощенной схемой, приведенной на рис. 45. Так как $L=w_1^2\frac{1}{R_м}$, индуктивное сопротивление намагничивания, выраженное через параметры ТТНП, имеет следующий вид:

$$\omega L=2\pi f w_1^2\mu\frac{s}{l},$$

где s — поперечное сечение сердечника ТТНП; l — средняя длина силовой линии в сердечнике; μ — магнитная проницаемость.

Полная мощность $S_р$ в реле, обладающем сопротивлением $Z_р$, определяется следующим образом:

$$S_р = I_р^2 Z_р = I^2 Z_р \left| \frac{\underline{Z}_{нам}}{K^2 \underline{Z}_р + \underline{Z}_{нам}} \right|^2 = I^2 \frac{Z_р}{\left| 1 + K^2 \frac{Z_р}{Z_н} e^{j(\varphi_р - \varphi_н)} \right|^2},$$

где $\varphi_р$ и $\varphi_{нам}$ — углы комплексных сопротивлений $\underline{Z}_р$ и $\underline{Z}_{нам}$.

После преобразования имеем

$$S_р = I^2 \frac{Z_р}{1 + 2K^2 \frac{Z_р}{Z_{нам}} \cos(\varphi_р - \varphi_{нам}) + \left(K^2 \frac{Z_р}{Z_{нам}}\right)^2}. \qquad (81)$$

Приняв $Z_{нам} = \text{const}$, запишем условие максимума функции $\frac{dS_р}{dZ_р} = 0$, откуда

$$1 + 2K^2 \frac{Z_р}{Z_{нам}} \cos(\varphi_р - \varphi_{нам}) + \left(K^2 \frac{Z_р}{Z_{нам}}\right)^2 -$$
$$- Z_р \left[2 \frac{K^2}{Z_{нам}} \cos(\varphi_р - \varphi_{нам}) + 2K^2 \frac{Z_р}{Z_{нам}^2} \right] = 0$$

или

$$1 + K^4 \left(\frac{Z_р}{Z_{нам}}\right)^2 - 2K^2 \left(\frac{Z_р}{Z_{нам}}\right)^2 = 0,$$

следовательно,

$$Z_{нам} = K^2 Z_р. \qquad (82)$$

Аналогичное условие получается и при $Z_р = \text{const}$. Подстановка (82) в (81) дает

$$S_{max} = I^2 \frac{1}{2K^2 Z_{нам} [1 + \cos(\varphi_р - \varphi_{нам})]}.$$

Таким образом, передача максимума мощности в нагрузку при заданном $\cos\varphi_р$ достигается при равенстве сопротивлений $K^2 Z_р$ и $Z_{нам}$. Очевидно, передаваемая мощность тем больше, чем больше разность углов φ сопротивлений нагрузки и ветви намагничивания.

Отметим, что если условие (82) не соблюдается, то относительное отклонение передаваемой полной мощности от максимальной составит

$$\frac{S_{max} - S_р}{S_{max}} = \frac{(Z_{нам} - K^2 Z_р)^2}{Z_{нам}^2 + 2K^2 Z_{нам} Z_р \cos(\varphi_р - \varphi_{нам}) + (K^2 Z_р)^2}.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Например, при $Z_{нам} = K^2 Z_р$ первичный ток ТТНП примерно равен удвоенному вторичному току, т. е.

$$I = I_р' + I_{нам} = 2I_р'.$$

Мощность, отдаваемая трансформатором тока в оптимальных условиях,

$$S_р = I_р^2 Z_{нам} = \frac{I^2 K^2}{4} Z_{нам}, \qquad (83)$$

откуда

$$I = 2 \frac{1}{K} \sqrt{\frac{S_р}{Z_{нам}}}.$$

Пользуясь полученным уравнением, можно найти расчетные выражения для отключающего устройства, если заменить $Z_{нам}$ через конструктивные параметры трансформатора.

23. Новые устройства селективной защиты в сетях с малыми токами замыкания на землю

На кафедре электротехники Московского горного института были разработаны новые устройства защиты от однофазных замыканий на землю карьерных сетей 6 кВ. Рассмотрим принцип работы устройства, предусматривающего суммирование мгновенных сигналов, пропорциональных токам нулевой последовательности, с сигналами напряжений нулевой последовательности на поврежденном участке и вычитание их на неповрежденных участках. Такой подход позволяет осуществить селективную защиту присоединений независимо от формы кривых тока замыкания на землю и напряжения нулевой последовательности. При этом подразумевается, что сети обладают преимущественно емкостной проводимостью относительно земли и поэтому ТТНП работает в режиме холостого хода.

Структурная и электрическая принципиальная схемы устройства приведены на рис. 46 и 47. В качестве основной элементной базы взята 140-интегральная серия (операционные усилители). Операционные усилители, на основе которых выполнены инвертор с регулируемым коэффициентом усиления и сумматор с цепями коррекции, собраны на отдельных печатных платах со штырьковыми выводами и запаяны в общую плату устройства. На рис. 47 в треугольниках усилителей обозначены только номера штырьковых выводов. Усилитель *A1*, являющийся инвертором с регулируемым коэффициентом усиления, позволя-

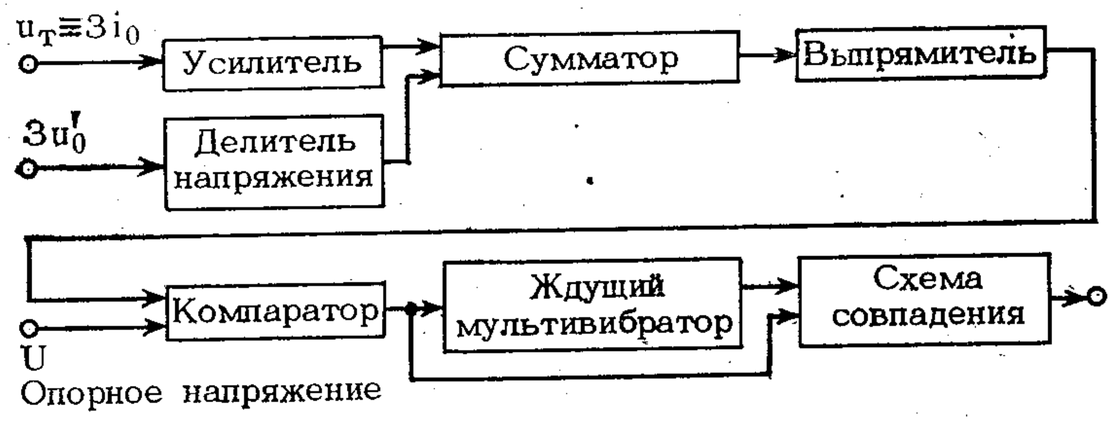


Рис. 46. Структурная схема устройства защиты МГИ

ет усиливать сигналы с ТТНП в диапазоне возможных токов замыкания на землю. Коэффициент усиления при этом

$$k_{y1} = -\frac{R_4 + R_5}{R_1}.$$

В обратную связь усилителя включены два стабилитрона для ограничения выходного напряжения. Резисторы R_3 и R_7 выполняют функции оптимизации разности входных токов усилителей. Потенциометр R_4, установленный на передней панели, служит для регулирования коэффициента усиления. Усилитель *A2* предназначен для сложения сигналов, поступающих с выхода усилителя *A1* и регулируемого делителя, подключенного к трансформатору напряжения нулевой последовательности. Его коэффициент усиления для обоих сигналов равен 1. Делители напряжения на сопротивлениях $R_а$, $R_б$, R_2, $R_д$, R_8 и $R_в$ служат для компенсации ЭДС смещения обоих усилителей.

На выходе усилителя *A2* установлен выпрямитель с емкостным фильтром для выходного сигнала. За выпрямителем установлен компаратор, выполненный на усилителе 1УТ401Б, который предназначен для сравнения выходного сигнала усилителя *A2* с опорным напряжением, выбираемым при наладке схемы. На компараторе формируется релейная характеристика.

Сигнал с компаратора поступает одновременно на базу открытого транзистора ждущего мультивибратора, вырабатывающего импульс задержки длительностью 2 с, и на вход схемы совпадения в коллекторную цепь транзистора, в которую включено реле, осуществляющее включение промежуточного реле. Промежуточное реле воздействует на управляющую цепь привода выключателя поврежденной линии.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

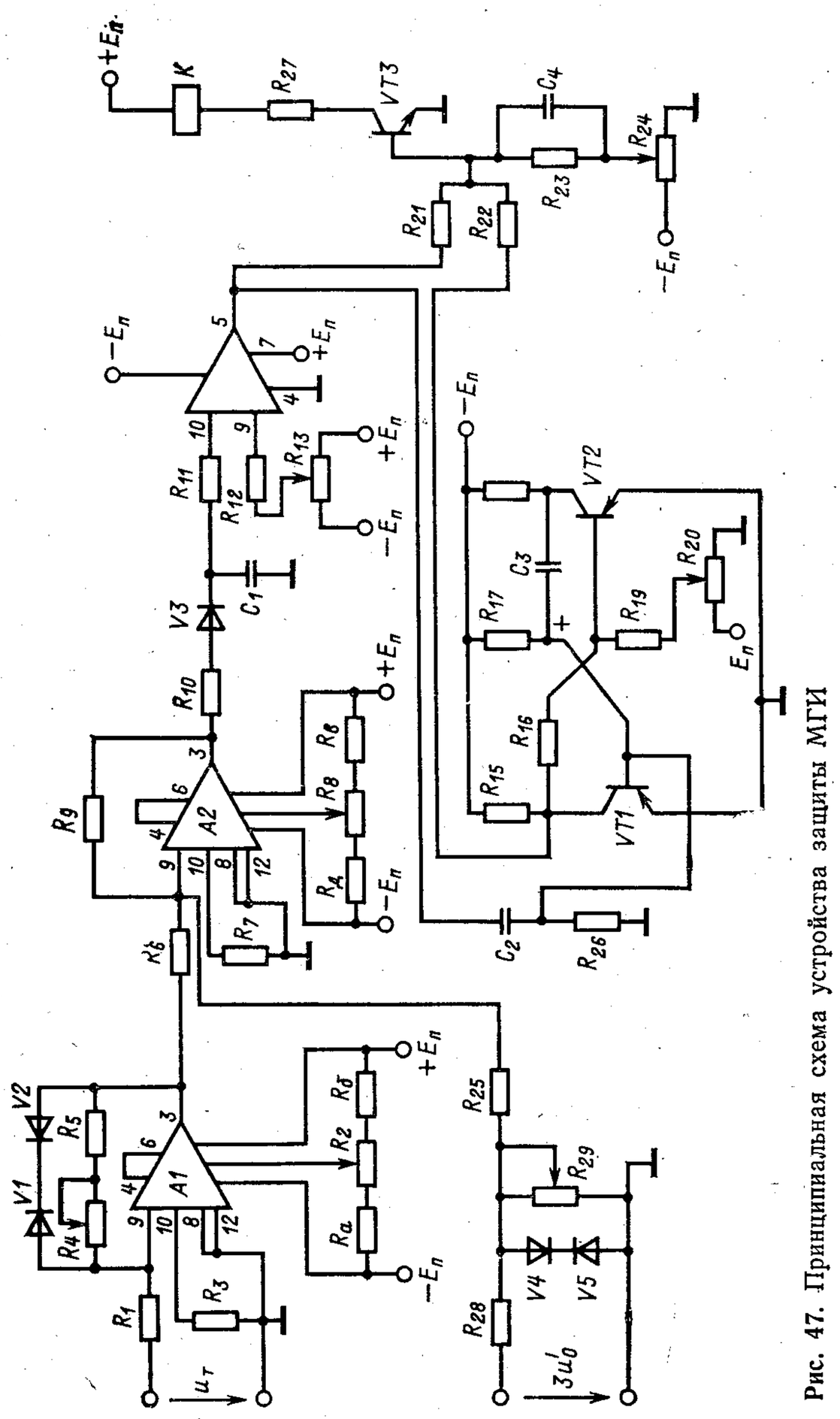


Рис. 47. Принципиальная схема устройства защиты МГИ

При замыкании на землю устройство, подключенное к поврежденной линии, работает следующим образом. Напряжение, поступающее на вход усилителя *A1* со вторичной обмотки трансформатора тока нулевой последовательности, усиливается им и изменяет фазу. Усилитель *A2* осуществляет сложение выходного сигнала усилителя *A1* и сигнала, пропорционального $3u'_0$, снимаемого с делителя напряжения. Выходной сигнал *A2* выпрямляется и поступает на вход компаратора, который перебрасывается из исходного во второе устойчивое состояние. Его входное напряжение становится равным $+E$. Это напряжение через дифференцирующую цепь, которой формируется положительный импульс, подается на базу транзистора *VT1* и закрывает его. Одновременно выходное напряжение компаратора поступает на вход схемы совпадения. Таким образом, до того момента, когда транзистор *VT1* ждущего мультивибратора вновь открывается на базе транзистора *VT3* схемы совпадения, напряжение будет близко к нулю, транзистор *VT3* будет закрыт. После возвращения мультивибратора в исходное состояние напряжение на базе транзистора *VT3* будет равно выходному напряжению компаратора, транзистор откроется. Реле, включенное в его коллекторную цепь, замкнет свои контакты.

Конструктивно устройство представляет собой два блока. В первом блоке установлены пять печатных плат по одной на каждую линию в вертикальном положении и регулируемый делитель напряжения. Во втором блоке делитель является стабилизированным источником питания. Он смонтирован на выдвигающемся шасси, что обеспечивает свободный доступ к элементам. На переднюю панель первого блока вынесены органы управления и настройки. Потенциометром R_4 регулируется коэффициент усиления инверторов при настройке. Потенциометром R_{29} регулируется выходное напряжение делителя напряжения, подключаемого к выходу трансформатора напряжения нулевой последовательности. В устройстве предусмотрена коммутация выходов функциональных элементов, к которым подключается осциллограф, контролирующий их неисправность и режимы работы при наладке. Для визуального наблюдения имеется световая сигнализация наличия замыкания на землю. На передней панели установлен штекерный разъем, к которому через кабель подключают трансформаторы тока нулевой последовательности. На задней панели устройства установлены два предохранителя ПП-25 на 1 А и два штекерных разъема для подключения к источнику питания через соединительный кабель.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Печатные платы выполнены двусторонними с металлизированными отверстиями; к внешним цепям устройства подключены штепсельной вилкой МТРПМ-Ш42. Печатные платы операционных усилителей соединяют с общей схемой устройства штырьковыми выводами.

На основе установленного вывода о том, что ток на поврежденном участке сети всегда больше тока на любом из неповрежденных участков, и полученных зависимостей

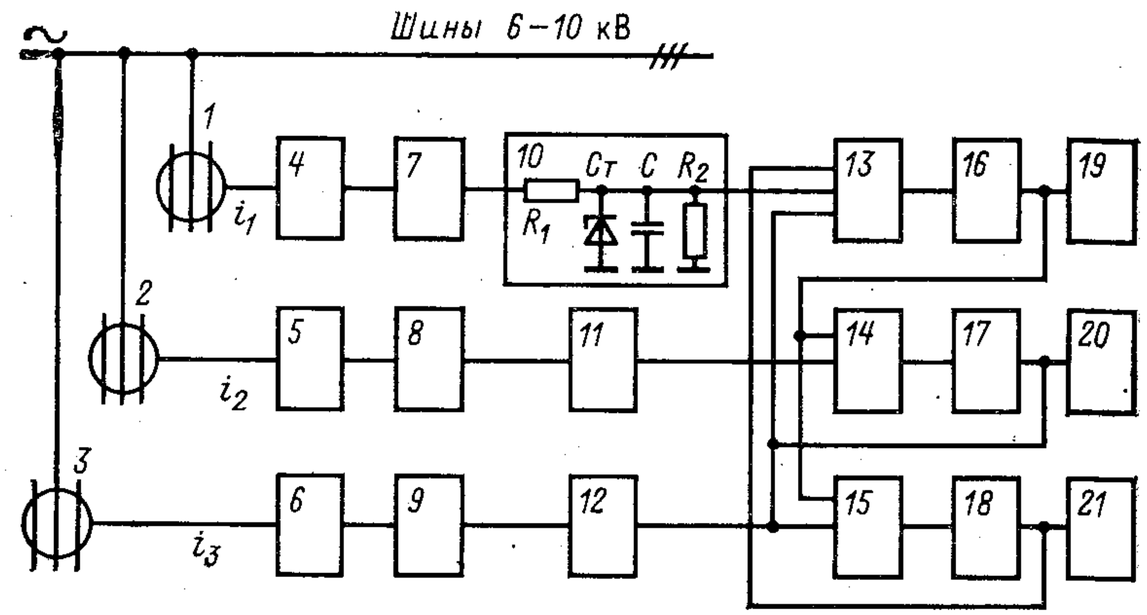


Рис. 48. Структурная схема защиты с блокировкой неповрежденных участков

(53)—(55) было разработано другое устройство защиты, работающее по принципу блокировки защит на неповрежденных участках. Рассмотрим его работу для трех участков структурной схемы рис. 48.

На схеме обозначены: *1, 2, 3* — трансформаторы тока нулевой последовательности соответственно первого, второго и третьего участков сети; *4, 5, 6* — усилители токов нулевой последовательности; *7, 8, 9* — мостовые выпрямители усиленных токов; *10, 11, 12* — блоки выдержки времени; *13, 14, 15* — блоки запрета (схемы ЗИ—НЕ); *16, 17, 18* — блокировки (логические *RS*-триггеры, выполненные на элементах логики); *19, 20, 21* — исполнительные органы.

Блок *10* выполнен в виде входного резистора R_1 и параллельно включенных стабилитрона *Ст*, конденсатора *C* и выходного резистора R_2. Блоки *11, 12* выполнены и подключены аналогично.

Устройство для селективной защиты от замыканий на землю работает следующим образом.

При возникновении однофазного замыкания на любом участке, например первом, во вторичных обмотках всех трансформаторов тока появятся токи i_1, i_2 i_3, пропорциональные токам нулевой последовательности. При этом ток i_1 на поврежденном участке в соответствии с законом Кирхгофа равен сумме токов i_2 и i_3

$$i_1 = i_2 + i_3$$

и поэтому всегда будет больше каждого из них.

Усиленные и выпрямленные токи i_1, i_2, i_3 поступают на входы блоков *10*, *11*, *12*, в которых сигнал, пройдя ограничительный резистор R_1 стабилитрона *Ст*, начинают заряжать конденсатор *С*. Конденсаторы всех блоков одинаковые, поэтому напряжение быстрее достигнет требуемого на конденсаторе блока поврежденного участка. Следовательно, на рабочий вход блока *13* сигнал логической 1 поступает раньше, чем такие же сигналы поступят на блоки *14* и *15*.

В блоках *13*, *14*, *15* имеется схема запрета, построенная на логических элементах ЗИ—НЕ. При поступлении на рабочий вход схемы сигнала логической 1 схема запрета открывается и формирует на выходе сигнал логический 0, который поступает на блок *16*, *17*, *18*.

Блокировки *16*, *17*, *18* включают в себя *RS*-триггеры, собранные по схеме логики. До прихода с блока запрета логического 0 триггер находится в режиме ожидания. Сигнал логического 0 перебрасывает электронную схему триггера и на его выходе (блоках *13*, *14*, *15*) появляется сигнал логического 0, который поступает на подготовительные входы блоков *14* и *15* запрета. Выходы этих блоков окажутся закрытыми, и сигнал на входы блоков *14* и *15* не поступит.

Одновременно с выхода блока *16* блокировки сигнал поступает на вход исполнительного органа *19*, который отключает поврежденный участок сети.

Устройство обладает высокой селективностью, поскольку при появлении тока замыкания на одном участке защита других участков будет сразу заблокирована от ложного срабатывания.

В рассматриваемой схеме защиты от однофазных замыканий на землю отсутствуют трансформаторы напряжения. Это является большим достоинством, так как увеличивается надежность защиты и снижаются затраты,

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

определяемые стоимостью трансформатора напряжения и его эксплуатацией.

Конструктивно блоки защиты всех участков собраны в виде небольшого измерительного прибора.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

24. Прямые и косвенные методы измерения

При эксплуатации сетей 6—35 кВ часто возникает необходимость измерения тока при замыкании на землю. По этим токам определяют параметры изоляции сети относительно земли, оценивают опасность прикосновения к корпусам поврежденного электрооборудования, настраивают уставки защит от замыканий на землю и др.

Ток замыкания на землю зависит от многих факторов: сопротивлений измерительных трансформаторов напряжения, вторичные обмотки которых присоединяются к заземляющему устройству; сопротивлений изоляции на землю, асимметрии емкостей относительно земли. Поэтому наиболее правильное представление о значении и фазе тока замыкания на землю может быть получено в том случае, если измерение произведено при металлическом (глухом) замыкании фазы на землю. Метод прост, требует минимального количества аппаратуры и приборов. Измерения проводятся быстро и не требуют сложных пересчетов для получения окончательных результатов. Недостатком этого метода является повышенная опасность для изоляции оборудования. При искусственном металлическом замыкании одной фазы напряжения двух других возрастают до линейного, т. е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, что может быть опасным для изоляции электрических машин, как правило имеющих небольшие запасы прочности. Такие режимы опасны и для персонала, работающего на линиях и непосредственно ведущего измерения. Действительно, увеличение напряжения на заземленных корпусах электрооборудования может привести к повышенной опасности для работающих. Кроме того, искусственное замыкание на землю вызывает срабатывание устройств сигнализации и защиты. Иногда это заставляет отключать их или увеличивать выдержку времени, что затрудняет эксплуатацию и ухудшает условия безопасности.

Особенно опасным является пробой или перекрытие

ослабленной изоляции незамкнутой фазы, что приводит к двухфазному короткому замыканию и аварийному отключению с перерывом электроснабжения потребителей. Поэтому метод металлического замыкания для определения тока однофазного замыкания применим только при условии обеспечения быстрого отключения замыканий, если они возникают в процессе измерений. Для сокращения времени замыкания на землю измерения желательно вести с использованием шлейфовых осциллографов, а замыкание осуществлять специально предназначенным выключателем, управляемым автоматически с заданной выдержкой времени.

Для устранения указанных недостатков предложены косвенные методы определения токов замыкания на землю, основанные на измерении их через добавочное сопротивление $r_з$ с последующим пересчетом по формулам [9].

Необходимо, однако, отметить, что эти методы несовершенны и не учитывают всех факторов, от которых зависит ток замыкания на землю.

25. Способ дополнительного источника, вводимого в отключенную от рабочего напряжения сеть

Способ требует измерений в двух режимах: при нормальном рабочем напряжении сети и при отключенной от источника питания сети и присоединенном к ней дополнительном источнике напряжения.

Принципиальная электрическая схема, реализующая данный способ, показана на рис. 49.

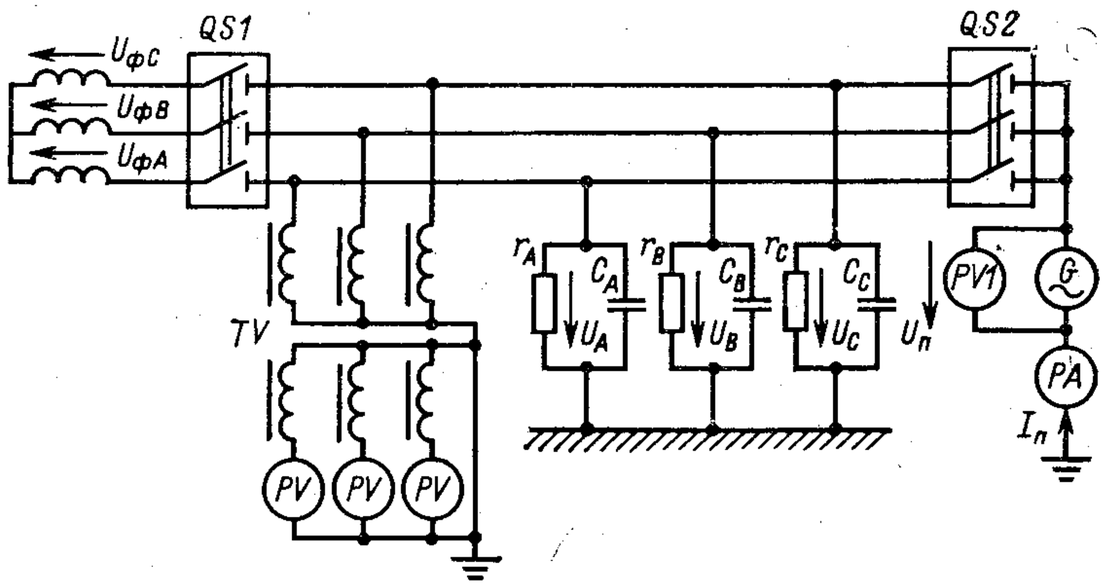


Рис. 49. Схема определения тока замыкания на землю с помощью постороннего источника

Для первого режима (выключатель *QS2* отключен) комплексы токов однофазного замыкания на землю отдельных фаз можно представить уравнениями:

$$\underline{I}_{зA} = \underline{U}_A \underline{Y}_\Sigma; \quad \underline{I}_{зB} = \underline{U}_B \underline{Y}_\Sigma; \quad \underline{I}_{зC} = \underline{U}_C \underline{Y}_\Sigma. \tag{84}$$

При втором режиме (выключатель *QS1* отключен) измерительный ток пропорционален напряжению дополнительного источника. Поэтому

$$\underline{I}_п = \underline{U}_п \underline{Y}_\Sigma. \tag{85}$$

Из (84) и (85) получаем выражения для определения искомых токов замыкания на землю отдельных фаз:

$$\left.\begin{aligned} I_{зA} &= I_п \frac{U_A}{U_п}; \\ I_{зB} &= I_п \frac{U_B}{U_п}; \\ I_{зC} &= I_п \frac{U_C}{U_п}. \end{aligned}\right\} \tag{86}$$

В (86) U_A, U_B, U_C соответствуют показаниям вольтметров контроля изоляции сети 6—35 кВ в режиме, когда выключатель *QS2* отключен. Величины $U_п$ и $I_п$ соответствуют показаниям вольтметра *PV1* и амперметра *PA* при отключенном выключателе *QS1*. В качестве дополнительного источника может быть, например, одна фаза сети 380/220 В. Так как активные сопротивления и емкости относительно земли распределены вдоль сети, то подключение дополнительного источника к контролируемой сети в принципе может быть осуществлено в любом месте. При этом результат измерения и расчетов не изменится.

Недостатки рассмотренного способа определения токов замыкания на землю заключаются в том, что измерения производятся при разных напряжениях (это отрицательно сказывается на точности результатов расчета), а также в том, что при этом способе не учитываются параметры изоляции относительно земли отключенного на время измерения электрооборудования.

26. Определение токов замыкания на землю на основании измерений вольтметрами

Автором разработан способ косвенного определения токов замыкания на землю, основанный на измерении напряжений фаз сети относительно земли вольтметрами

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

контроля изоляции с последующим расчетом искомых токов. Способ применим для различных соотношений активных и емкостных параметров изоляции отдельных фаз сети относительно земли [11].

Принципиальная электрическая схема способа расчета показана на рис. 50. Приняты следующие обозначения: *T1* — питающий сеть трансформатор; *TV1* — измерительный трансформатор напряжения, во вторичные обмотки которого включены вольтметры контроля изоляции *PV*;

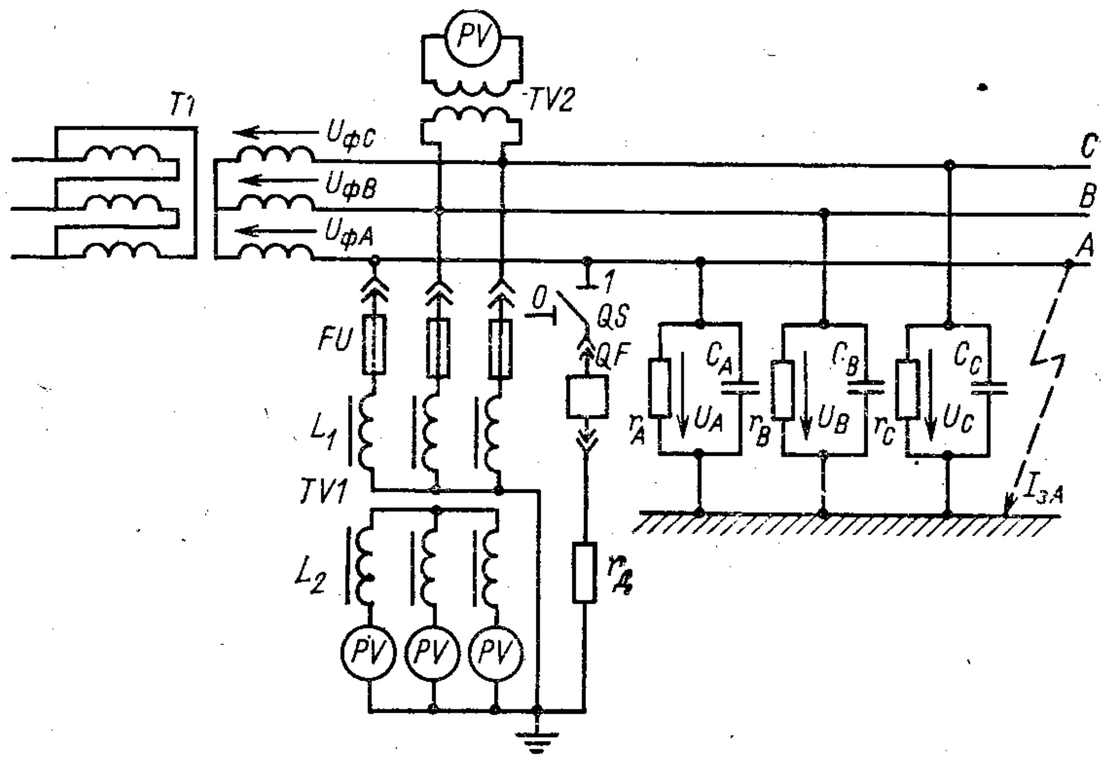


Рис. 50. Схема определения тока замыкания на землю с помощью вольтметров контроля изоляции

TV2 — измерительный трансформатор для линейного напряжения; $r_д$ — добавочное сопротивление, которое подключается к фазе *A* разъединителем *QS* и масляным выключателем *QF*; L_1, L_2 — индуктивности первичных и вторичных обмоток трансформатора *TV1*.

Запишем комплексный ток замыкания на землю в фазе *A* в первом режиме (выключатель *QS* отключен)

$$\underline{I}_{зA} = \underline{U}_A \underline{Y}_\Sigma, \tag{87}$$

где $\underline{U}_A$ — напряжение фазы *A* относительно земли, которое имело место до замыкания на землю;

$\underline{Y}_\Sigma = g_\Sigma + \frac{3}{K^2 r_V} + j\left(\omega C_\Sigma - \frac{3}{\omega L_1}\right)$ — полная проводимость сети относительно земли; $g_\Sigma = 1/r_A + 1/r_B + 1/r_C$ — суммарная активная составляющая полной проводимости; $C_\Sigma = C_A +$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

$+ C_B + C_C$ — суммарная емкость сети относительно земли; r_V — сопротивление вольтметра контроля изоляции; $K = w_1/w_2$ — коэффициент трансформации измерительного трансформатора; ωL_1 — индуктивное сопротивление трансформатора.

При втором режиме (выключатель *QS* включен), т. е. при наличии в фазе *A* дополнительной проводимости $\underline{Y}$,

$$\underline{I}_{зA} = \underline{U}'_A(\underline{Y}_\Sigma + \underline{Y}_д), \tag{88}$$

где $\underline{U}_A'$ — комплексное напряжение фазы *A* относительно земли при подключенной дополнительной проводимости $\underline{Y}_д$.

Из (87) и (88) получим комплексный ток замыкания на землю в фазе *A*

$$\underline{I}_{зA} = \frac{\underline{U}_A \underline{U}'_A}{\underline{U}_A - \underline{U}'_A} \underline{Y}_д. \tag{89}$$

Аналогично получим уравнения для токов замыкания в фазах *B* и *C*

$$\underline{I}_{зB} = \frac{\underline{U}_B \underline{U}'_A}{\underline{U}_A - \underline{U}'_A} \underline{Y}_д; \tag{90}$$

$$\underline{I}_{зC} = \frac{\underline{U}_C \underline{U}'_A}{\underline{U} - \underline{U}'_A} \underline{Y}_д. \tag{91}$$

Комплексные напряжения $\underline{U}_A$ и $\underline{U}'_A$ можно записать в виде

$$\underline{U}_A = a_A + jd_A, \quad \underline{U}'_A = a'_A + jd'_A,$$

где в соответствии с (14)

$$a_A = \frac{2U_A^2 - (U_B^2 + U_C^2)}{6U_ф} + U_ф; \quad a'_A = \frac{2U_A'^2 - (U_B'^2 + U_C'^2)}{6U_ф} + U_ф; \tag{92}$$

$$d_A = \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}; \quad d'_A = \frac{U_C'^2 - U_B'^2}{2\sqrt{3}U_ф}. \tag{93}$$

Приняв в качестве добавочного сопротивления $1/\underline{Y}_д$, например, активное сопротивление $r_д$ резистора и с учетом (92) и (93), из (89) в итоге получим

$$I_{зA} = \frac{U_A U'_A}{r_д \sqrt{(a_A - a'_A)^2 + (d_A - d'_A)^2}}. \tag{94}$$

Аналогично получим уравнения для токов замыкания в фазах B и C

$$I_{зB}=\frac{U_B U'_A}{r_д\sqrt{(a_A-a'_A)+(d_A-d'_A)^2}}; \qquad (95)$$

$$I_{зC}=\frac{U_C U'_A}{r_д\sqrt{(a_A-a'_A)^2+(d_A-d'_A)^2}}. \qquad (96)$$

Таким образом, предлагаемый способ [11] предусматривает определение токов однофазного глухого замыкания на землю в любой фазе с помощью четырех замеров вольтметрами PV контроля изоляции (рис. 50) напряжений U_A, U_B, U_C. Значения U_A', U_B', U_C' рассчитывают по (94)—(96). С учетом современных возможностей расчет целесообразно вести при помощи ЭВМ.

Следует заметить, что при отсутствии в условиях измерения активного сопротивления $r_д$ можно воспользоваться реактивными сопротивлениями. В этом случае в (92)—(94) следует вместо $r_д$ подставить $1/\omega C_д$ при емкостном добавочном сопротивлении и $\omega L_д$ — при индуктивном. Так, для фазы A при дабочном емкостном сопротивлении

$$I_{зA}=\frac{\omega C_д U_A U'_A}{\sqrt{(a_A-a'_A)^2+(d_A-d'_A)^2}}. \qquad (97)$$

В частном случае для симметричной цепи, когда $U_A=U_B=U_C$, токи замыкания на землю каждой фазы также будут равны между собой и определяться выражением

$$I_{зA}=I_{зB}=I_{зC}=\frac{U_ф U'_A}{r_д\sqrt{a'^2_A+d'^2_A}}. \qquad (98)$$

Для точности вычисления включаемое добавочное сопротивление должно изменить показание вольтметра контроля изоляции не менее чем на 10% по отношению к первоначальному значению.

27. Активная и емкостная составляющие тока замыкания на землю

Для исследования условий возникновения резонансных явлений, настройки релейной защиты, получения более объемной информации о состоянии сети высокого напряжения с точки зрения надежности

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

часто необходимо знать не только ток замыкания на землю, но и его активную и емкостную составляющие.

Активные и емкостные составляющие токов замыкания на землю отдельных фаз могут быть определены из (89), (90), (91) выделением вещественных и мнимых частей соответственно.

Так, например, для фазы A можем записать активную составляющую тока замыкания на землю

$$I_{rA}=\mathrm{Re}\left[\frac{\underline{U}\,\underline{U}'_A\underline{Y}_д}{\underline{U}_A-\underline{U}'_A}\right] \qquad (99)$$

и для емкостной

$$I_{CA}=\mathrm{Im}\left[\frac{\underline{U}_A\underline{U}'_A\underline{Y}_д}{\underline{U}_A-\underline{U}'_A}\right]. \qquad (100)$$

С учетом (92) и (93) после преобразований (99) и (100) для $\underline{Y}_д=j\omega C_д$ найдем

$$I_{rA}=\frac{\omega C_д[d_A(a'^2_A+d'^2_A)-d'_A(a^2_A+d^2_A)]}{(a_A-a'_A)^2+(d_A-d'_A)^2}. \qquad (101)$$

$$I_{CA}=\frac{\omega C_д[a'_A(a^2_A+d^2_A)-a_A(a'^2_A+d'^2_A)]}{(a_A-a'_A)^2+(d'_A-d'_A)^2}. \qquad (102)$$

Полный ток замыкания на землю фазы A

$$I_{зA}=\sqrt{I^2_{rA}+I^2_{CA}}. \qquad (103)$$

Аналогично составляются уравнения для расчета активной и емкостной составляющих тока замыкания на землю в фазах B и C.

С учетом изложенного рекомендуемый порядок измерений и расчета состоит из следующих этапов:

1. В положении *0* разъединителя QS (рис. 50) снимаются показания вольтметров контроля изоляции U_A, U_B, U_C.

2. В положении *1* разъединителя QS снимаются показания вольтметров контроля изоляции U_A', U_B', U_C'.

3. Используя показания вольтметров и известное значение добавочной емкости $C_д$, рассчитывают искомые значения активных и емкостных составляющих токов однофазного замыкания. В частности, для фазы A расчет ведется по (101) и (102).

При необходимости оценки полных токов замыкания на землю их можно определить по (103).

Для повышения точности расчетов следует провести несколько замеров и выполнить при этом n раз вычисления, определив среднее

значение соответствующего тока по выражению

$$I_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} I_{jik}. \qquad (104)$$

Дисперсию активной и емкостной составляющих тока замыкания оценим из

$$\sigma^2_{ji} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (I_{jik} - I_{ji})^2, \qquad (105)$$

где $j=r, C$; $i=A, B, C$.

Затем, используя критерий Стьюдента, рассчитаем доверительный интервал активной и емкостной составляющих тока замыкания на землю

$$\Delta_{ji} = \left(\bar{I}_{ji} - t_\beta \frac{\sigma_{ji}}{\sqrt{n}}, \quad \bar{I}_{ji} + t_\beta \frac{\sigma_{ji}}{\sqrt{n}} \right). \qquad (106)$$

Пример. В выбранный момент времени вольтметры контроля изоляции показали $U_B=7{,}878$ кВ; $U_C=8{,}733$ кВ; $U_B'=7{,}707$ кВ; $U_C'=8{,}232$ кВ.

Найдем активную и емкостную составляющие тока однофазного замыкания на землю на примере фазы C:

$$I_{rC}=6{,}29 \text{ А}; \; I_{CC}=13{,}02 \text{ А}.$$

После вычислений для десяти выборок U_B, U_C, U_B', U_C' получим два ряда значений при $C_д=0{,}5$ мкФ:

$I_{rC}=\{I_{rCk}\}=6{,}29$; 7,24; 6,82; 6,55; 6,94; 7,12: 7,37; 7,92; 7,85; 8,76;

$I_{CC}=\{I_{CCk}\}=13{,}02$; 14,19; 14,86; 15,08; 15,25; 14,07; 15,86; 14,18; 15,41; 16,37.

Подставляя их значения в (104), получаем усредненную оценку активной и емкостной составляющих тока однофазного замыкания на землю для фазы C:

$\bar{I}_{rC}=7{,}286$; $\bar{I}_{CC}=14{,}829$. Оценки дисперсии активной и емкостной составляющих тока, вычисленной по (105), равны соответственно $\sigma^2_{rC}=0{,}533$ и $\sigma^2_{CC}=0{,}966$, а среднеквадратичные отклонения — $\sigma_{rC}=0{,}730$ и $\sigma_{CC}=0{,}982$.

Как известно, при доверительной вероятности $\beta=0{,}95$ и $n=10$ квантиль распределения Стьюдента $t_\beta=2{,}23$. Подставляя в выражение (106) численные значения $\bar{I}_{rC}$, $\bar{I}_{CC}$, n, σ_{rC}, σ_{CC} и t_β, получаем доверительные интервалы для оценки активной и емкостной составляющих тока однофазного замыкания на землю, равные $\Delta_{rC}=(6{,}771;\ 7{,}801)$ А, $\Delta_{CC}=(14{,}137;\ 15{,}522)$ А.

Как видно из рассмотренного примера, с вероятностью, равной 0,95, можно утверждать, что истинные значения активной и емкостной

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

составляющих тока однофазного замыкания на землю фазы C заключены соответственно в интервалах (6,771; 7,801) А и (14,137; 15,522) А. Как известно, увеличивая число измерений, можно сделать доверительные интервалы сколь угодно малыми, а оценку активной и емкостной составляющих и среднего тока однофазного замыкания на землю вести с целесообразной для практических целей точностью.

Таким образом, предлагаемый метод предусматривает косвенное измерение активных и емкостных составляющих токов однофазного замыкания на землю в любой фазе сети 6—35 кВ на основании показаний вольтметров контроля изоляции.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ И ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

28. Изоляция высокого напряжения при постоянном и переменном напряжении

Электрическая изоляция разделяет различные токоведущие части электрической установки, находящиеся под разными потенциалами. Поэтому любая изоляция вместе с токоведущими частями образует конденсатор. Процессы в идеальных конденсаторах хорошо известны из электротехники. Однако в реальных изоляторах все обстоит значительно сложнее. Дело в том, что техническая изоляция не является однородной и в той или иной степени всегда содержит различные включения, обладающие различной проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Более того, в практике находит широкое применение многослойная изоляция из нескольких диэлектриков.

Поскольку при указанном виде контроля изоляция подвергается воздействию постоянным и переменным токам, рассмотрим, какие процессы происходят в ней при таких режимах.

Результаты опытов показывают, что в процессах заряда и разряда конденсаторов при использовании реальных диэлектриков напряжение и ток приближаются к своим конечным значениям медленнее, чем должно происходить согласно расчетам. Это явление при заряде называют дозарядкой, а при разряде — образованием остаточного заряда. Причиной этого, главным образом, является неоднородность изоляционного материала и особенно местные различия удельной проводимости.

Процессы, происходящие в изоляции, проще всего рассмотреть на примере изоляции с двухслойным диэлектриком. Количественные соотношения получают, как правило, путем измерений.

Предположим, что диэлектрик плоского конденсатора состоит из двух слоев, из которых один обладает исчезающе малой проводимостью (например, тонкий слой воздуха), а другой имеет конечную проводимость (например, бумага).

Поскольку поверхность раздела является поверхностью равного потенциала, то можно в ней мысленно расположить тончайший металлический лист. В таком случае мы получим два последовательно соединенных конденсатора, из которых первый имеет бесконечно большое, а второй — конечное сопротивление изоляции. Принятому нами представлению применительно к зарядке конденсатора соответствует схема замещения рис. 51. Здесь обозначено: C_1 и C_2 — емкости обоих условных конденсаторов; u — напряжение между зажимами конденсатора; u_1 и u_2 — частичные напряжения на обоих слоях диэлектрика. Сопротивление изоляции второго слоя можно заменить внешним сопротивлением r_2, подключенным параллельно конденсатору, образуемому этим слоем. Поэтому ток через конденсатор можно представить разветвляющимся на два тока: i_r и i_c. Под током i_c следует понимать ток смещения, а под током i_r — ток проводимости.

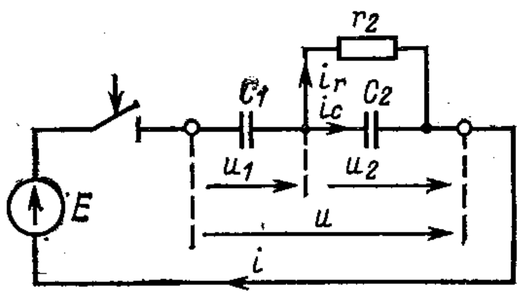


Рис. 51. Схема замещения двухслойной изоляции

Для нахождения тока $i(t)$ в конденсаторе воспользуемся операторным методом расчета переходных процессов. На основании закона Ома в операторной форме можем записать

$$I(p)=EC_1\frac{1+pr_2C_2}{1+pr_2(C_1+C_2)}. \qquad (107)$$

Поскольку в (107) степень полинома числителя равна степени полинома знаменателя, то нахождение тока $i(t)$ применительно к схеме рис. 51 относится к некорректным задачам. Для ее решения разделим числитель уравнения (107) на знаменатель. Тогда

$$I(p)=\frac{EC_1C_2}{C_1+C_2}\left[1+\frac{C_1}{C_2}\,\frac{1}{1+pr_2(C_1+C_2)}\right]. \qquad (108)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Известно, что оригиналом единицы является так называемая дельта-функция, т. е.

$$1 \doteqdot \delta(t).$$

Дельта-функция $\delta(t)$ называется также функцией Дирака, или импульсной функцией, и определяется следующим образом:

$$\delta(t)=\begin{cases}\infty & \text{при } t=0\\ 0 & \text{при } t\neq 0.\end{cases}$$

Оригиналом второго числа (108) является экспонента. С учетом сказанного

$$i(t)=\frac{EC_1C_2}{C_1+C_2}\,\delta(t)+\frac{E}{r_2}\left(\frac{C_1}{C_1+C_2}\right)^2 e^{-\frac{t}{\tau}}, \qquad (109)$$

где $\tau=r_2(C_1+C_2)$ — постоянная времени.

Таким образом, в момент включения ($t=0$) такого диэлектрика под действием источника постоянной ЭДС теоретически возникает бесконечно большой импульс тока, значение которого определяется внутренним сопротивлением реального источника и сопротивлением подводящих проводов.

Напряжение на конденсаторе C_1 в операторной форме найдем из уравнения

$$U_1(p)=\frac{EC_2}{C_1+C_2}\left[\frac{1}{p}+\frac{C_1}{pC_2}\,\frac{1}{1+pr_2(C_1+C_2)}\right].$$

Переход к оригиналу дает

$$u_1(t)=\frac{EC_2}{C_1+C_2}\left[1(t)+\frac{C_1}{C_2}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)\right].$$

Здесь

$$1(t)=\left\{\begin{matrix}0, \text{ когда } t<0\\ 1, \text{ когда } t>0\end{matrix}\right\} \text{— единичная функция.}$$

Напряжение на конденсаторе C_2 определяется из уравнения

$$u_2(t)=E-u_1(t).$$

Таким образом, напряжения на конденсаторах схемы рис. 51 для всех $t>0$ изменяются по законам

$$u_1=E\left(1-\frac{C_1}{C_1+C_2}\,e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \qquad (110)$$

$$u_2=E\frac{C_1}{C_1+C_2}\,e^{-\frac{t}{\tau}}. \qquad (111)$$

При $t=0$ эти напряжения определяются только частичными емкостями C_1 и C_2, т. е.

$$u_1(0+)=\frac{C_2}{C_1+C_2}E,\quad u_2(0+)=\frac{C_1}{C_1+C_2}E,$$

причем на обкладках конденсаторов будут находиться одинаковые заряды

$$q(0+)=q_1(0+)=q_2(0+)=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}E.$$

В конце переходного процесса, т. е. при $t=\infty$, $u_2(\infty)=0$, $u_1(\infty)=E$ и заряд на емкости C_1 равен $q(\infty)=q_1(\infty)=EC_1$. Можно показать, что $q(\infty)>q(0+)$.

Таким образом, диэлектрику был сообщен дополнительный заряд, так называемый заряд абсорбции

$$q_{абс}=EC_1-E\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}=E\frac{C_1^2}{C_1+C_2},$$

благодаря чему во время переходного процесса через диэлектрик проходит ток абсорбции, определяемый (109)

$$i=i_{абс}=\frac{E}{r_2}\left(\frac{C_1}{C_1+C_2}\right)^2 e^{-\frac{t}{\tau}}. \qquad (112)$$

Следовательно, в неоднородном диэлектрике процессы, происходящие при включении на постоянное напряжение, выражаются в проявлении тока абсорбции, который может быть зафиксирован, например, при помощи осциллографа.

Из последнего уравнения следует, что при увеличении проводимости слоя бумаги увеличивается ток абсорбции и одновременно уменьшается его длительность (уменьшается постоянная времени τ). Поэтому, изучив осциллограмму тока абсорбции, можно составить представление о состоянии изоляции.

На рис. 52 показаны изменения во времени напряжений и зарядного тока, определяемые выведенными формулами для случая, когда $C_1=C_2$. Из этих кривых видно, что непосредственно после включения заряды находятся преимущественно на обкладках конденсатора с двухслойным диэлектриком. Ток проводимости, изменяясь во времени аналогично изменению u_2, медленно разряжает частичный конденсатор C_2. В это же время конденсатор C_1 заряжается до полного напряжения.

Сопротивление току проводимости совместно с сопротивлениями различных повреждений образуют сопротив-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ление сети и отдельной электроустановки относительно земли.

Приведенная на рис. 51 схема замещения изоляции дает возможность представить характер прохождения тока через изоляцию под действием переменного напряжения. Из схемы замещения следует, что проводимость диэлектрика, определяющая ток проводимости при переменном токе, должна отличаться от величины, обратной сопротивлению изоляции при постоянном токе. Диэлектрические

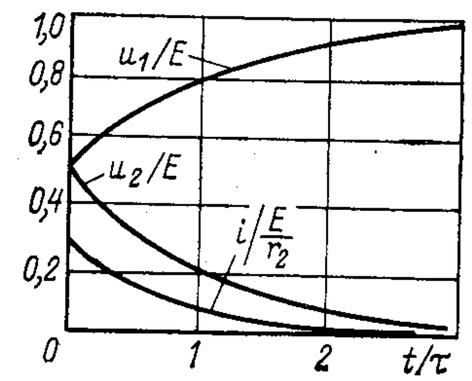


Рис. 52. Зарядка конденсатора с двухслойным диэлектриком

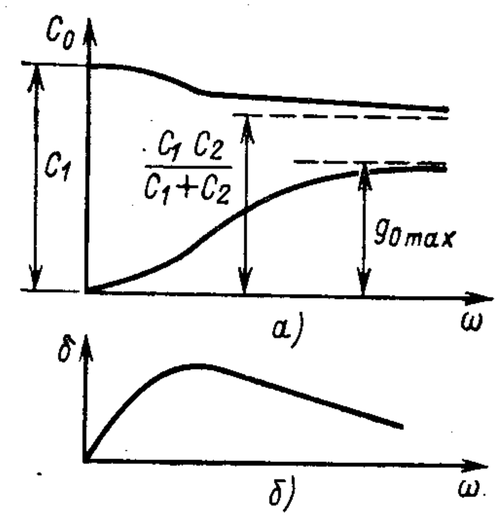


Рис. 53. Активная проводимость и емкость конденсатора с двухслойным диэлектриком; угол диэлектрических потерь конденсатора с двухслойным диэлектриком

потери при переменном и постоянном токе также должны иметь разные значения. В переменном поле электрические заряды должны беспрерывно то подводиться к поверхности раздела, то отводиться от нее. Перемещение зарядов способствует возникновению диэлектрических потерь.

Если к схеме замещения двухслойной изоляции, изображенной на рис. 51, подвести синусоидальное напряжение, то в ней возникает переменный ток, комплексное выражение которого можно представить в виде

$$\underline{I}=\underline{U}(g_0+j\omega C_0),$$

где g_0 — эквивалентная активная проводимость реальной изоляции:

$$g_0=\frac{\omega^2C_1^2r_2}{1+\omega^2(C_1+C_2)^2r_2^2};$$

C_0 — эквивалентная емкость реальной изоляции:

$$C_0=C_1\frac{1+\omega^2C_2(C_1+C_2)r_2^2}{1+\omega^2(C_1+C_2)^2r_2^2}.$$

При постоянном токе ($\omega=0$) активная проводимость получается малой и соответственно сопротивление изоляции при постоянном токе бесконечно велико. Однако при переменном токе сопротивление изоляции получается конечным. При увеличении частоты переменного тока g_0 приближается к предельному значению

$$g_{0\,max}=\frac{1}{r_2}\left(\frac{C_1}{C_1+C_2}\right)^2.$$

При малых частотах эквивалентная емкость имеет начальное значение $C_0=C_1$. При этом через сопротивление r_2 подводятся заряды к поверхности раздела обоих слоев диэлектрика конденсатора. При больших частотах, наоборот, преобладают токи смещения; эквивалентная емкость приближается к предельному значению

$$C_0=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}.$$

На рис. 53,*а* изображены зависимости активной проводимости и эквивалентной емкости от частоты переменного тока.

Угол диэлектрических потерь δ определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{g_0}{\omega C_0}=\frac{\omega C_1 r_2}{1+\omega^2 C_2(C_1+C_2)r_2^2}.$$

На рис. 53,*б* показана зависимость угла диэлектрических потерь от частоты. При определенной частоте он достигает максимального значения, определяемого из выражения

$$\operatorname{tg}\delta_{max}=\frac{C_1}{2\sqrt{C_2(C_1+C_2)}},$$

и, таким образом, не зависит от сопротивления r_2.

Применяемые изоляционные материалы в большом диапазоне частот имеют угол потерь приблизительно постоянный, так что действительная кривая является значительно более пологой, чем это показано на рис. 53,*б*. Это объясняется тем, что изоляционные материалы не сводятся к двум слоям диэлектриков. В них имеются различные неоднородности, действия которых накладываются, вследствие чего зона максимума угла диэлектрических потерь становится шире.

Сопротивление изоляции зависит от подвижности и распределения зарядов, находящихся в материале. На характер их движения могут воздействовать многие факторы и прежде всего температура и напряженность электрического поля. Поэтому при строгом определении сопротивления изоляции необходимо учитывать температуру и напряжение, при которых производились измерения.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

С повышением температуры сопротивление изоляции, как правило, изменяется по экспоненциальному закону. С увеличением приложенного к изоляции напряжения сопротивление изоляции уменьшается.

В процессе работы изоляция электрических цепей подвергается воздействию ряда факторов, приводящих с течением времени к ее старению, что отражается на степени электрической и механической прочности. Основными причинами, вызывающими старение, являются:

а) постоянное увлажнение изоляции в результате проникновения в нее влаги через микротрещины лаковых покрытий, заливочных компаундов и т. п.;

б) нагревание током нагрузки и особенно сверхтоками — пусковыми токами двигателей, токами короткого замыкания и т. п.;

в) случайные перенапряжения;

г) постоянное воздействие электрических полей, при котором происходит ионизация различных газовых включений, неизбежных в изоляции;

д) различные механические воздействия. Так, например, динамические усилия, возникающие вследствие резких изменений тока, вызывают трещины, смещения и износ изоляции.

Для выявления дефектов, возникающих в изоляции, разработаны и применяются методы профилактических испытаний и измерений.

29. Контроль изоляции вольтметрами

Непрерывный контроль сопротивления изоляции в сетях напряжением 6—35 кВ с изолированной нейтралью является эффективным средством, повышающим уровень электробезопасности электроустановок и надежность снабжения потребителей электроэнергией. Действительно, если своевременно выявить снижение сопротивления изоляции, то можно предупредить многие аварии в электроустановках. Для этой цели в настоящее время применяют вольтметры контроля изоляции, включенные во вторичные обмотки трансформаторов напряжения типа НТМИ или НОМ (см. рис. 49).

Напряжения U_{vA}, U_{vB}, U_{vC} на вольтметрах могут быть представлены в виде

$$\underline{U}_{vA} = U_{ф}\frac{\underline{Y}_B(1-a^2)+\underline{Y}_C(1-a)+3g_v}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+3g_v};$$

$$\underline{U}_{vB} = U_{ф}\frac{\underline{Y}_A(a^2-1)+\underline{Y}_C(a^2-a)+3a^2g_v}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+3g_v};$$

$$\underline{U}_{vC} = U_{ф}\frac{\underline{Y}_A(a-1)+\underline{Y}_B(a-a^2)+3ag_v}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+3g_v}.$$

Из этих уравнений следует, что при равных проводимостях изоляции фаз сети относительно земли $\underline{Y}_A=\underline{Y}_B=\underline{Y}_C$ напряжения, измеряемые вольтметрами, будут равны фазному, т. е. $U_{vA}=U_{vB}=U_{vC}\neq U_{ф}$ независимо от значения этих проводимостей. Следовательно, равномерное снижение сопротивлений изоляции не может быть обнаружено. В более общем случае, когда $\underline{Y}_A\neq\underline{Y}_B\neq\underline{Y}_C$, показания вольтметров будут различными и судить о значении сопротивления изоляции невозможно. По этим причинам контроль вольтметрами целесообразно применять только для регистрации однофазных замыканий на землю. При замыкании на землю одной фазы, например A ($\underline{Y}_A\to\infty$), будем иметь

$$U_{vA}=0,\quad U_{vB}=U_{vC}=\sqrt{3}U_{ф},$$

т. е. напряжение вольтметра повреждений фазы равно нулю, а два других находятся под линейным напряжением сети. С этой точки зрения предпочтительным является применение фильтров нулевой последовательности — асимметров. Асимметр состоит из трех равных по значению сопротивлений (активных или реактивных), соединенных в звезду. Нулевая точка звезды через трансформатор тока присоединяется к заземляющему устройству. Другие концы сопротивлений звезды асимметра присоединяются к фазам сети A, B, C (рис. 54).

Первичный ток в цепи трансформатора тока определяется уравнением

$$\underline{I} = 3U_{ф}\frac{\underline{Y}_A+a^2\underline{Y}_B+a\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A+\underline{Y}_B+\underline{Y}_C+3\underline{Y}_0}\underline{Y}_0, \qquad (113)$$

где $\underline{Y}_0=\frac{\underline{Y}_н\underline{Y}}{3\underline{Y}+\underline{Y}_н}$ — вносимая асимметром в сеть эквивалентная проводимость нулевой последовательности одной фазы.

Из (113) следует, что при равных сопротивлениях сети относительно земли, т. е. когда $\underline{Y}_A=\underline{Y}_B=\underline{Y}_C$, ток в цепи нагрузки асимметра равен нулю. Таким образом, как и

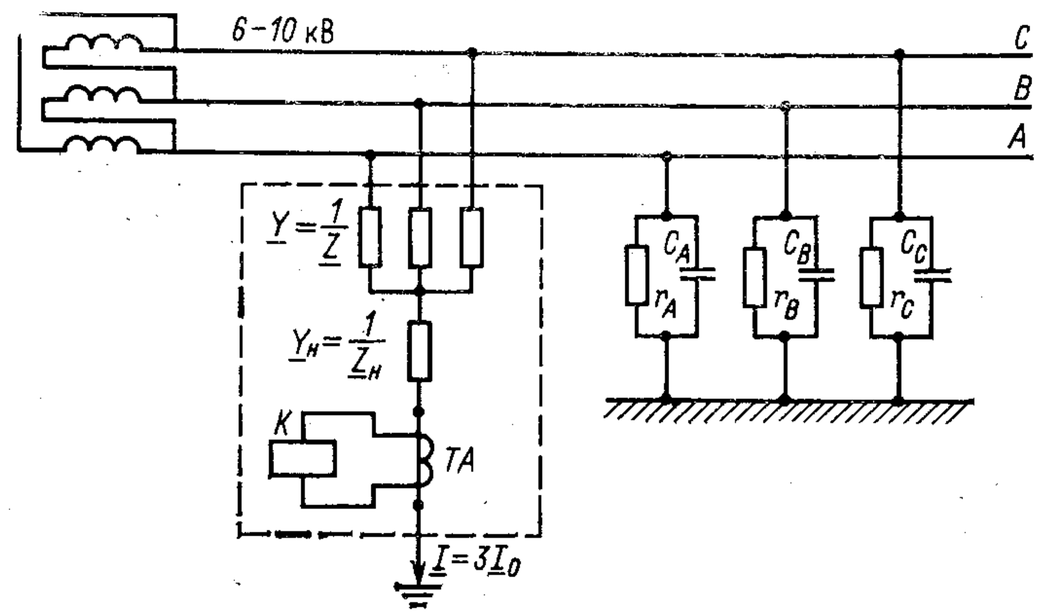


Рис. 54. Схема непрерывного контроля изоляции с помощью асимметра

в схеме с вольтметрами, равномерное снижение сопротивления изоляции в этом случае не может быть обнаружено.

Недостатком схемы является также зависимость тока I от емкостей фаз сети относительно земли, поэтому по значению тока нельзя однозначно судить о значении активного сопротивления изоляции сети относительно земли. По этим причинам устройства, работающие на токах нулевой последовательности, целесообразно использовать только в качестве устройств контроля однофазных замыканий на землю. В таких режимах всегда имеется неравенство сопротивлений фаз относительно земли.

При замыкании одной фазы на землю, например фазы A ($\underline{Y}_A\to\infty$), (113) примет вид

$$\underline{I} = 3U_{ф}\frac{\underline{Y}\underline{Y}_н}{3\underline{Y}+\underline{Y}_н};\qquad \underline{I}=\frac{3U_{ф}}{3\underline{Z}_н+\underline{Z}}.$$

Для устранения указанных недостатков контроля при помощи вольтметров и асимметров в последние годы начинают применяться более совершенные методы, основан-

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

ные на наложении постоянных токов на контролируемую сеть, а также схемы на выпрямленных токах контролируемой сети (вентильные схемы).

30. Контроль сопротивления изоляции токами постороннего источника

При этом способе непрерывного контроля сопротивления изоляции используют токи, создаваемые источником энергии. Обычно в качестве такого источника применяют трансформатор с выпрямителями. В цепи нагрузки таких схем, кроме выпрямленного тока источника энергии, проходит переменный ток, вызванный напряжением контролируемой сети. Для его ослабления применяют различные фильтрующие сопротивления. Следует указать, что схемы с использованием постороннего источника нашли широкое применение в сетях напряжением до 1 кВ.

Применение таких схем в сетях 6—10 кВ ограничено трудностью разделения цепей высокого и низкого напряжения, что необходимо для обеспечения безопасной эксплуатации самого устройства контроля изоляции. С этой точки зрения оригинальным является предложение о включении контролируемого сопротивления изоляции в цепь нагрузки разделительного трансформатора [12]. На рис. 55 приведена принципиальная схема контроля, в которой измерительная цепь отделена от высокого напряжения разделительным трансформатором *T2*. Показание

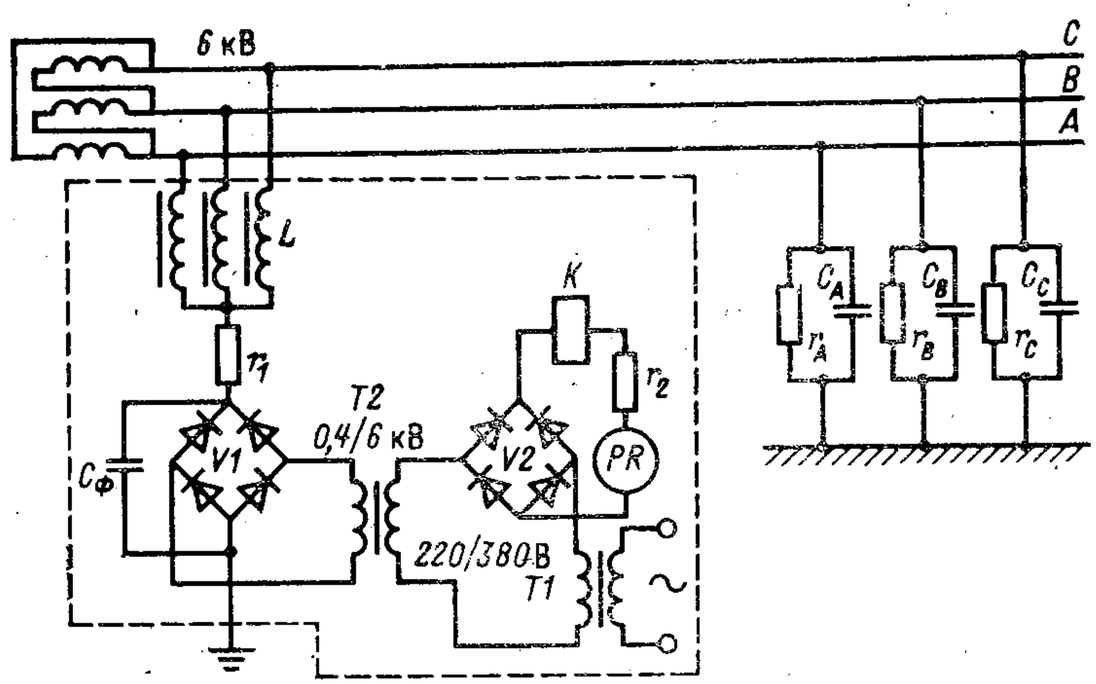


Рис. 55. Схема непрерывного контроля изоляции, использующая принцип наложения тока постороннего источника на контролируемую сеть

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

измерительного прибора магнитоэлектрической системы пропорционально значению r_Σ. Три однофазных дросселя служат для присоединения схемы измерения к контролируемой сети. Емкость $C_ф$ уменьшает влияние переменного тока на работу схемы измерения. Сопротивление r_1 ограничивает ток измерения на стороне высокого напряжения, сопротивление r_2 — ток измерения на стороне низкого напряжения трансформатора *T1*.

На ток в цепи измерительного прибора и сигнального реле *K*, вызванного оперативным источником выпрямленного напряжения, существенное влияние оказывает ток от действия напряжения контролируемой сети, что приводит к значительной погрешности показаний измерительного прибора. Это и является серьезным недостатком этих устройств.

31. Вентильные схемы измерения и контроля сопротивления изоляции

Вентильные схемы непрерывного контроля сопротивления изоляции нашли широкое применение в сетях напряжением до 1 кВ с изолированной нейтралью. Их основные достоинства: простота схемы, отсутствие отдельного источника питания, независимость измерительного тока от индуктивных и емкостных элементов цепи контроля. В настоящее время в связи с освоением отечественной промышленностью полупроводниковых вентилей высокого напряжения и улучшением их характеристик возможно применение вентильных схем и в сетях высокого напряжения (6—10 кВ).

Принципиальная вентильная схема показана на рис. 56. Три полупроводниковых вентиля *V* подключаются к фазам *A*, *B*, *C* контролируемой сети через предохранители *F*. Общая точка вентилей соединяется с землей через ограничительный резистор $R_д$, килоомметр *PR* и сигнальное реле *K*. Килоомметр измеряет общее активное сопротивление изоляции сети относительно земли, а сигнальное реле приводит в действие световую или звуковую сигнализацию при снижении сопротивления изоляции ниже установленного предела.

В рассматриваемой схеме одновременно может работать, точнее говоря, проводить ток только один вентиль, анод которого имеет наиболее высокий потенциал в данную часть периода. Два других вентиля в эту часть периода не пропускают ток и аноды имеют отрицательный по-

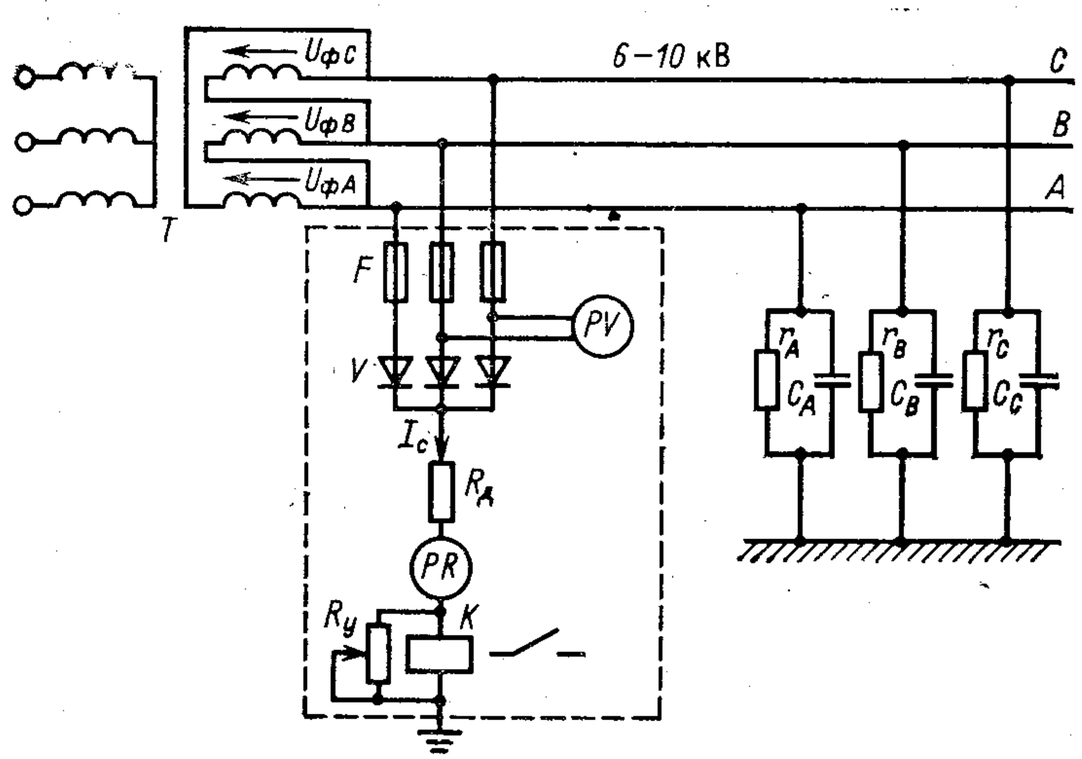


Рис. 56. Вентильная схема непрерывного контроля изоляции

тенциал по отношению к катодам. Поскольку катоды электрически связаны, то их общий потенциал отличается от потенциала анода работающего вентиля лишь на небольшое значение падения напряжения в нем. Переход тока от одного диода к другому происходит в момент пересечения положительных полуволн синусоид фазных напряжений сети. Будем считать, что вентили обладают идеальной характеристикой, т. е. их сопротивление равно нулю в проводящем направлении и бесконечно большое — в обратном. Будем также считать, что переход тока с одного вентиля на другой происходит мгновенно.

По [7] среднее значение измерительного тока не зависит от емкости сети относительно земли и определяется уравнением

$$I_c = \frac{1,5}{\pi} \frac{U_{m,л}}{R_н + r_\Sigma}, \qquad (114)$$

где $U_{m,л}$ — амплитуда линейного напряжения контролируемой сети; $R_н$ — эквивалентное сопротивление измерительной цепи (включает в себя ограничительный резистор, сопротивления измерительного прибора, реле и др.);

$$r_\Sigma = \frac{r_A r_B r_C}{r_A r_B + r_B r_C + r_C r_A}$$

— общее активное сопротивление изоляции сети относительно земли.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Чувствительность вентильной схемы можно найти как отношение изменения тока ΔI_c к изменению полного сопротивления изоляций сети Δr_Σ, т. е.

$$\sigma = \frac{\Delta I_c}{\Delta r_\Sigma}.$$

При малых изменениях r_Σ по (114) чувствительность можно рассчитать следующим образом:

$$\sigma = \frac{dI_c}{dr_\Sigma} = -\frac{1,5}{\psi} \frac{U_{m,л}}{(R_н + r_\Sigma)^2}. \qquad (115)$$

Из этого выражения видно, что наибольшую чувствительность схема имеет при малых сопротивлениях изоляции, т. е. когда r_Σ близко к нулю,

$$\sigma_{max} \approx -\frac{1,5 U_{m,л}}{\pi R_н^2}. \qquad (116)$$

По условиям безопасности $R_н$ должна быть достаточно большой (десятки и даже сотни килоом). Например, для $R_н$=100 кОм, $U_л$=6000 В, σ_{max}=0,4 мА/кОм.

Таким образом, даже максимальная чувствительность вентильных схем имеет малое значение, что является их основным недостатком.

Другим недостатком вентильных схем контроля изоляции является зависимость их измерительного тока от колебаний напряжения контролируемой сети, такие колебания при эксплуатации могут достигать 25—30% номинального значения. Настолько же будет изменяться и измерительный ток, поскольку его значение прямо пропорционально линейному напряжению $U_л$. Однако этот недостаток не имеет существенного значения. При необходимости можно ввести уточнения результата измерения, полученного при значительных отклонениях напряжения сети от номинального значения. Для этого достаточно рассчитать общее сопротивление изоляции по формуле

$$r_\Sigma = \frac{1,5 U_л \sqrt{2}}{\pi I_c} - R_н. \qquad (117)$$

В измерительном приборе, кроме шкалы сопротивлений, предусмотрена шкала тока, по которой отсчитывается измерительный ток I_c (рис. 57). Для измерения линейного напряжения в устройстве контроля предусмотрен также вольтметр. Сопротивление $R_н$ для данного прибора является постоянным и известным.

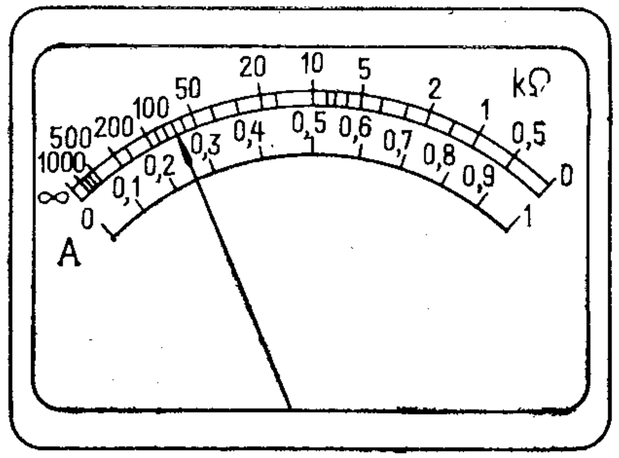


Рис. 57. Шкала измерительного прибора вентильной схемы непрерывного контроля изоляции

Сопротивление устройства контроля изоляции должно быть значительно большим, чем сопротивление изоляции контролируемой сети. Значит, ток I_c должен быть малым. Из условий надежной работы устройства контроля изоляции и получения необходимой чувствительности можно принять, что ток не должен превышать 0,05—0,08 А. Это значительно меньше токов замыкания на землю, имеющих место в реальных сетях 6—10 кВ.

Из этого условия при $r_\Sigma=0$ может быть определено значение сопротивления нагрузки $R_н$:

$$R_н = \frac{1,5}{\pi}\,\frac{U_{m,л}}{0,05 \div 0,08}, \qquad (118)$$

где

$$R_н = r_д + \frac{r_у r_р}{r_у + r_р}.$$

Обычно $r_д \gg \frac{r_р r_у}{r_у + r_р}$ и поэтому можно полагать, что измерительный ток схемы контроля определяется только ограничительным сопротивлением $r_д$.

Сопротивление $r_у$, включенное параллельно реле, легко найти, если известен ток срабатывания реле $I_р$:

$$r_у = \frac{I_р r_р}{I_c - I_р}. \qquad (119)$$

Типы вентилей выбирают по значению обратного напряжения, которое равно амплитуде линейного напряжения контролируемой сети

$$U_{обр} = \sqrt{2}U_л. \qquad (120)$$

Другой характеристикой является наибольший ток, проходящий через вентили

$$I = \frac{1}{3}(0,05 \div 0,08)\,А.$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Полученные уравнения позволяют с достаточной для практики точностью рассчитать и выбрать основные элементы устройства контроля изоляции, работающего на вентильной схеме.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЗЕМЛИ СЕТЕЙ В РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

32. Определение общего активного сопротивления и суммарной емкости сети относительно земли

В электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением 6—35 кВ в рабочем режиме и с включенными токоприемниками необходимо знать общее активное сопротивление изоляции и суммарную емкость сети относительно земли, что позволяет своевременно планировать проведение профилактических ремонтных работ. Своевременная профилактика позволяет получить экономический и социальный эффект за счет предотвращения аварий и устранения связанных с ними несчастных случаев и вынужденных простоев оборудования.

Наряду с этим, определив общее активное сопротивление изоляции и суммарную емкость фаз электрической сети с изолированной нейтралью относительно земли, можно косвенно оценить токи однофазных замыканий на землю в рабочем режиме сети с включенными токоприемниками. Одновременно можно определить условия компенсации емкостных составляющих этих токов.

Определение активного сопротивления изоляции и суммарной емкости сети сопряжено с необходимостью выполнения глухих замыканий на землю и создает повышенную опасность для обслуживающего персонала. В отличие от них предлагаемый метод позволяет определять указанные параметры при помощи косвенных измерений. Здесь используются показания вольтметров контроля изоляции с последующим расчетом по формулам на микро-ЭВМ без привлечения дополнительных измерительных приборов [13].

Суть метода состоит в следующем. Для схемы рис. 58 при замкнутом разъединителе *QS1* и разомкнутом *QS2* полная проводимость сети относительно земли равна $\underline{Y}_\Sigma = g_\Sigma + j\omega C_\Sigma$.

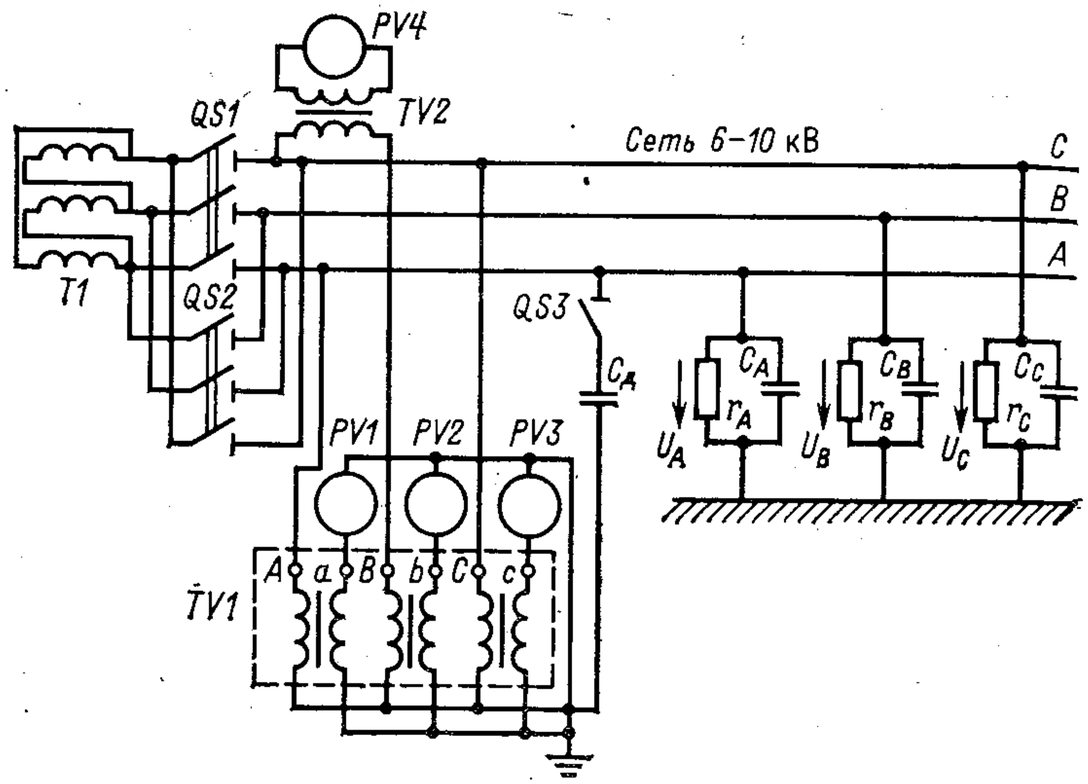


Рис. 58. Принципиальная схема для определения сопротивления изоляции и емкости сети относительно земли в рабочем режиме

Ток замыкания на землю фазы A может быть определен как

$$\underline{I}_{зA} = \underline{U}_A \underline{Y}_\Sigma. \qquad (121)$$

С другой стороны, при наличии добавочной проводимости в фазе A

$$\underline{I}_{зA} = \underline{U}'_A (\underline{Y}_\Sigma + \underline{Y}_д). \qquad (122)$$

Из (121) и (122) получаем

$$\underline{Y}_\Sigma = \frac{\underline{U}'_A \underline{Y}_д}{\underline{U}_A - \underline{U}'_A}. \qquad (123)$$

Активная составляющая полной проводимости сети определяется как вещественная часть комплекса (123)

$$g_\Sigma = \mathrm{Re}\left[\frac{\underline{U}'_A \underline{Y}_д}{\underline{U}_A - \underline{U}'_A}\right], \qquad (124)$$

а реактивная составляющая — как мнимая часть комплекса (123)

$$\omega C_\Sigma = \mathrm{Im}\left[\frac{\underline{U}'_A \underline{Y}_д}{\underline{U}_A - \underline{U}'_A}\right]. \qquad (125)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Напряжение фазы A относительно земли выражено через модули соответствующих напряжений других фаз

$$\underline{U}_A = \frac{2U_A^2 - (U_B^2 + U_C^2)}{6U_ф} + U_ф + j\frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}. \qquad (126)$$

Положим $\underline{U}_A = a + jd$, $\underline{U}'_A = a' + jd'$,

где $a = \dfrac{2U_A^2 - (U_B^2 + U_C^2)}{6U_ф} + U_ф$; $a' = \dfrac{2U_A'^2 - (U_B'^2 + U_C'^2)}{6U_ф} + U_ф$;

$$d = \frac{U_C^2 - U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}; \quad d' = \frac{U_C'^2 - U_B'}{2\sqrt{3}U_ф}.$$

Тогда, полагая $\underline{Y} = j\omega C_д$ из (124), (126), получаем

$$g_\Sigma = \frac{1}{r_\Sigma} = \frac{\omega C_д (da' - d'a)}{(a - a')^2 + (d - d')^2}; \qquad (127)$$

$$C_\Sigma = \frac{C_д [a'(a - a') + d'(d - d')]}{(a - a')^2 + (d - d')^2} \qquad (128)$$

и при активном добавочном сопротивлении $r_д$

$$g_\Sigma = \frac{1}{r_\Sigma} = \frac{a'(a - a') + d'(d - a')}{r_д [(a - a')^2 + (d - d')^2]}; \qquad (129)$$

$$C_\Sigma = \frac{1}{\omega r_д} = \frac{d'(a' + a) + a'(d' + d)}{(a - a')^2 + (d - d')^2}. \qquad (130)$$

Таким образом, предлагаемый способ предусматривает определение параметров сети относительно земли с помощью показаний вольтметров контроля изоляции U_A, U_A', U_B, U_B', U_C, U_C' по зависимостям (127)—(130).

Таблица 1. Результаты измерения вольтметрами и расчета параметров изоляции

$U_л$, кВ	U_A, В	U'_A, кВ	U_B, кВ	U'_B, кВ	U_C, кВ	U'_C, кВ	C_Σ, мкФ	r_Σ, кОм
10	5,85	5,69	5,82	5,27	5,65	6,45	21,8	0,99
10	5,77	5,52	5,77	5,02	5,77	7	14,4	2,53
10	5,74	5,61	5,53	5,12	6,06	6,72	26,2	0,87
10	6,4	5,83	6,36	5,17	4,7	6,38	10,7	1,49
10	5,77	5,59	5,77	5,18	5,77	6,66	19,5	1,37
10	5,34	5,23	6,23	6,77	5,78	6,38	25,4	1,13
10	6,55	6,19	7	5,73	4,1	5,43	13,5	1,46
10	5,77	5,5	5,77	5,04	5,77	7	14,1	2,1

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты расчетов указанных параметров по экспериментальным данным, полученным в сети 10 кВ с изолированной нейтралью. В качестве добавочного сопротивления $r_д$ взят резистор с сопротивлением 1 кОм.

Предлагаемый метод был проверен в производственных условиях и может быть рекомендован для нахождения параметров изоляции относительно земли в сетях 6—10 кВ с изолированной нейтралью.

33. Определение активных сопротивлений и емкостей отдельных фаз сети относительно земли

Для расчета токов замыкания на землю, оценки распределения токов утечки по фазам, расчета резонансных перенапряжений в электрических сетях 6—10 кВ с изолированной нейтралью необходимо знать параметры изоляции отдельных фаз этих сетей относительно земли.

Однако методов для определения активных сопротивлений изоляции и емкостей отдельных фаз сети относительно земли до последнего времени не было. Впервые метод, позволяющий решать указанную задачу, был разработан в Московском горном институте на кафедре электротехники [14].

Метод основан на использовании системы уравнений, одно из которых получено для сети с измененным чередованием фаз.

Воспользуемся схемой рис. 58. В исходном состоянии система описывается одним уравнением относительно неизвестных проводимостей $\underline{Y}_A$, $\underline{Y}_B$, $\underline{Y}_C$ согласно первому закону Кирхгофа

$$\underline{U}_A\underline{Y}_A+\underline{U}_B\underline{Y}_B+\underline{U}_C\underline{Y}_C=0, \qquad (131)$$

где $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ — комплексы напряжений отдельных фаз относительно земли в исходном состоянии; $\underline{Y}_A=1/r_A+j\omega C_A$; $\underline{Y}_B=1/r_B+j\omega C_B$; $\underline{Y}_C=1/r_C+j\omega C_C$ — комплексы полных проводимостей каждой фазы относительно земли.

Разъединителем *QS3* введем в любую фазу, например А, добавочную проводимость $\underline{Y}_д$. Новое состояние системы описывается уравнением, подобным (131), с правой частью, отличной от нуля:

$$\underline{U}'_A\underline{Y}_A+\underline{U}'_B\underline{Y}_B+\underline{U}'_C\underline{Y}_C=-\underline{U}'_A\underline{Y}_д. \qquad (132)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Изменим чередование фаз в сети. Для этого разомкнем разъединитель *QS1* и замкнем разъединитель *QS2* при разомкнутом разъединителе *QS3*. В этом случае напряжение фазы *A* относительно земли будет приложено к проводимости $\underline{Y}_B$, а напряжение фазы *B* — к проводимости $\underline{Y}_A$. Поэтому третье уравнение будет иметь вид

$$\underline{U}''_B\underline{Y}_A+\underline{U}''_A\underline{Y}_B+\underline{U}''_C\underline{Y}_C=0. \qquad (133)$$

Нетрудно показать, что определитель системы уравнений (131)—(133), составленный из коэффициентов при неизвестных $\underline{Y}_A$, $\underline{Y}_B$, $\underline{Y}_C$, отличен от нуля

$$\Delta=\begin{vmatrix}\underline{U}_A & \underline{U}_B & \underline{U}_C\\ \underline{U}'_A & \underline{U}'_B & \underline{U}'_C\\ \underline{U}''_B & \underline{U}''_A & \underline{U}''_C\end{vmatrix}\neq 0.$$

Мы получим систему независимых уравнений, из которой могут быть определены проводимости $\underline{Y}_A$, $\underline{Y}_B$, $\underline{Y}_C$, а по ним и искомые параметры r_A, r_B, r_C, C_A, C_B, C_C.

Связь комплексов $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ с их модулями представлена уравнениями (14)—(16). Поэтому определение параметров изоляции сети относительно земли может быть осуществлено на основании измерений вольтметрами, например вольтметрами контроля изоляции, являющимися принадлежностью любой сети 6—35 кВ.

Рассмотренный метод целесообразно применить в сетях с малыми токами замыкания на землю. В таких сетях легко предусмотреть меры безопасности при изменении порядка чередования фаз.

В частном случае, когда сеть относительно земли симметрична ($U=U_B=U_C$), достаточно решить систему при активном добавочном сопротивлении $r_д$

$$\left.\begin{aligned}(a'_A+a'_B+a'_C)\frac{1}{r}+(d'_A+d'_B+d'_C)\omega C&=-\frac{1}{r_д}a'_A;\\ (d'_A+d'_B+d'_C)\frac{1}{r}+(a'_A+a'_B+a'_C)\omega C&=-\frac{1}{r_д}d'_A,\end{aligned}\right\} \qquad (134)$$

при емкостном добавочном сопротивлении $1/\omega C_д$

$$\left.\begin{aligned}(a'_A+a'_B+a'_C)\frac{1}{r}-(d'_A+d'_B+d'_C)\omega C&=\omega C_д d'_A;\\ (d'_A+d'_B+d'_C)\frac{1}{r}+(a'_A+a'_B+a'_C)\omega C&=-\omega C_д a'_A.\end{aligned}\right\} \qquad (135)$$

Таким образом, в симметричной сети искомые параметры изоляции сети относительно земли можно найти из (134) или (135), не изменяя в сети чередования фаз.

При реализации рассмотренного метода определения сопротивлений изоляции и емкостей отдельных фаз в сетях 6—35 кВ необходима разработка ряда вопросов техники безопасности, выбор аппаратуры, элементов схемы измерения и др. Эти вопросы рассмотрены на примере проведенных измерений в сетях 6 кВ Моревского карьера Московской области [15].

На борту карьера смонтировано РУ 6 кВ с трансформатором ТМ-6300-10/6 и по четырем отходящим линиям напряжение подается непосредственно к приводам горного оборудования. Линии по своей структуре смешанные, т. е. от РУ отходят воздушные линии, к которым подключаются пункты типа ЯКНО и передвижные комплектные трансформаторные подстанции КТПН. С ЯКНО и КТПН гибким кабелем марки КШВГ запитаны экскаваторы ЭКГ-4,6, земснаряды, насосы и землесосы.

Для измерений в РУ две ячейки полностью переоборудованы для данного эксперимента. В одну ячейку устанавливалась тележка масляного выключателя QF типа К-37, в другую ячейку было введено добавочное сопротивление, на которое подавалось напряжение через МВ из первой ячейки. Шинный мост с трансформатора до ячейки ввода 6 кВ монтировался через разъединитель QS (рис. 59).

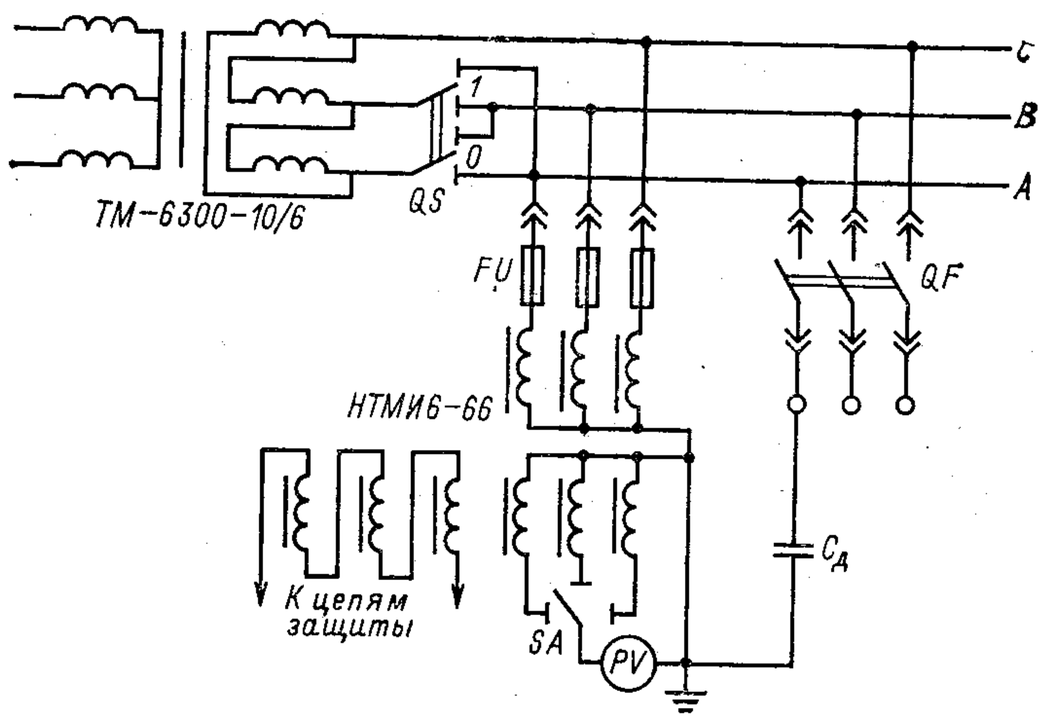


Рис. 59. Схемы измерений для определения сопротивлений изоляции и емкостей отдельных фаз сети относительно земли

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Для контроля линейных и фазных напряжений использовалась ячейка напряжения РУ с трансформатором НТМИ 6-66 с той разницей, что щитовой киловольтметр Э-378 заменяли лабораторным астатическим вольтметром типа АСТВ, предел измерения которого изменяется с помощью универсального ключа SA. В качестве добавочного сопротивления $X_д$ использовался конденсатор емкостью 2,25 мкФ ($1/\omega C_д = 1415$ Ом).

В положении *0* разъединителя QS и при отключенном QF (рис. 59) снимаются показания вольтметров контроля изоляции U_A, U_B, U_C. В положении *0* разъединителя QS и при включенном QF измеряются U_A', U_B', U_C' по вольтметрам контроля изоляции. Следующим этапом эксперимента является отключение трансформатора от сети и переключение разъединителя QS в положение *1*. Затем на трансформатор подается напряжение, выключается QF и снимаются показания вольтметров контроля изоляции U_A'', U_B'', U_C''.

Таблица 2. **Результаты измерения вольтметрами**

№ измерения	$U_л$, В	U_B, В	U_C, В	U_B', В	U_C', В	U_B'', В	U_C'', В
1	6600	3160	3780	4560	4920	4119	3870
2	6660	3940	2960	4810	4480	4442	2980
3	6540	3810	3780	4980	4932	3810	3800
4	6620	3740	3930	4840	4940	3281	3960
5	6600	3300	3720	4400	4560	3993	3680
6	6580	3580	3460	4580	4520	3749	3480
7	6640	3880	2800	4450	4000	4782	2720

Таблица 3. **Результаты расчетов параметров изоляции отдельных фаз сети относительно земли**

№ измерения	r_A, кОм	r_B, кОм	r_C, кОм	C_A, мкФ	C_B, мкФ	C_C, мкФ
1	163	90	132	0,7	0,95	0,6
2	156	80	81	0,5	0,6	0,95
3	450	145	94	0,6	0,7	0,75
4	110	170	240	1,0	0,85	0,8
5	135	130	105	0,8	1,2	0,9
6	310	300	40	1,0	1,1	1,0
7	110	115	120	0,5	0,9	1,4

Измерения проводились в таком порядке. После установки одного добавочного сопротивления в одну ячейку, в другую вкатывалась тележка QF с масляным выключателем. Один человек оперировал приводом QF, включая и отключая его, второй снимал показания приборов.

Результаты измерений приведены в табл. 2, а результаты расчетов — в табл. 3.

34. Алгоритмы расчета параметров изоляции и его реализация на микро-ЭВМ

При расчете параметров изоляции сетей относительно земли по предложенным методам целесообразно использовать электронные клавишные машины (ЭКВМ). Разработан простой алгоритм расчета системы уравнений и показана его реализация на микрокалькуляторах «Электроника МК-54», «Электроника БЗ-34» или «Электроника МК-56» [16].

Запишем уравнения (131)—(133) в виде системы

$$\left.\begin{aligned} &\underline{U}_A\underline{Y}_A+\underline{U}_B\underline{Y}_B+\underline{U}_C\underline{Y}_C=0;\\ &\underline{U}'_A\underline{Y}_A+\underline{U}'_B\underline{Y}_B+\underline{U}'_C\underline{Y}_C=-\underline{U}'_A j\omega C_д;\\ &\underline{U}''_B\underline{Y}_A+\underline{U}''_A\underline{Y}_B+\underline{U}''_C\underline{Y}_C=0. \end{aligned}\right\} \qquad (136)$$

При этом напряжения отдельных фаз относительно земли равны

$$\underline{U}_A=a_A+jd_A,\quad \underline{U}_B=a_B+jd_B,\quad \underline{U}_C=a_C+jd_C,$$

где в соответствии с (14) — (16)

$$a_A=\frac{2U_A^2-(U_B^2+U_C^2)}{6U_ф}+U_ф;\quad d_A=\frac{U_C^2-U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф};$$

$$a_B=a_C=\frac{2U_A^2-(U_B^2+U_C^2)}{6U_ф}-\frac{1}{2}U_ф;$$

$$d_B=\frac{U_C^2-U_B^2}{2\sqrt{3}U_ф}-\frac{\sqrt{3}}{2}U_ф;$$

$$d_C=\frac{U_C^2-U_2}{2\sqrt{3}U_ф}+\frac{\sqrt{3}}{2}U_ф.$$

Обозначив

$$a=-\sqrt{U_B^2-\left(d-\frac{U_л}{2}\right)^2}=-\sqrt{U_C^2-\left(d+\frac{U_л}{2}\right)^2};\qquad (137)$$

$$d=\frac{U_C^2-U_B^2}{2U_л},\qquad (138)$$

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

получим

$$\underline{U}_A=\frac{\sqrt{3}}{2}U_л+a+jd;\quad \underline{U}_B=a+j\left(d-\frac{U_л}{2}\right);$$

$$\underline{U}_C=a+j\left(d+\frac{U_л}{2}\right).$$

Напряжения отдельных фаз относительно земли $\underline{U}'_A=a'_A+jd'_A$, $\underline{U}''_A=a''+jd''_A$ имеют аналогичный вид.

Напряжения U_B, U_C, U'_B, U'_C, U''_B, U''_C измеряются вольтметрами $PV2$ и $PV3$ (рис. 58) при различных положениях разъединителей (табл. 4).

Таблица 4. **Положения разъединителей при измерениях**

Положения разъединителей			Показания приборов	
$QS1$	$QS2$	$QS3$	$PV2$	$PV3$
1	0	0	U_B	
1	0	1	U'_B	U'_C
0	1	0	U''_B	U_C

Напряжение $U_л$ измеряется вольтметром $PV4$. При заданных ω и $C_д$ система уравнений (136) может быть решена относительно неизвестных $\underline{Y}_A$, $\underline{Y}_B$ и $\underline{Y}_C$.

Алгоритм расчета вычисляется по формулам:

$$\left.A+jD=\frac{1}{\frac{\sqrt{3}}{2}U_л+a+jd};\quad A'+jD'=\frac{1}{\frac{\sqrt{3}}{2}U_л+a'+jd'}\right\}\qquad (139)$$

$$\underline{Y}=\frac{-j\omega C_д}{(A-A')+j(D-D')};\qquad (140)$$

$$\underline{Y}_C=\frac{\underline{Y}_0}{\sqrt{3}-j3}\left\{1+(A+jD)\left[a''+j\left(d''-\frac{U_л}{2}\right)\right]\right\};\qquad (141)$$

$$Y_B=\frac{\underline{Y}_0}{\sqrt{3}+j3}-\frac{\sqrt{3}-j}{\sqrt{3}+j}\underline{Y}_C;\quad \underline{Y}_A=(A+jD)\underline{Y}_0-\underline{Y}_B-\underline{Y}_C.\qquad (142)$$

Такая последовательность требует наименьшего числа математических операций и расчета лишь трех промежуточных величин.

Задача решается в два этапа: на первом рассчитываются коэффициенты (137), (138) по напряжениям U_B, U_C, U'_B, U'_C, U''_B, U''_C и $U_л$; на втором — решается система уравнений (139)—(142). В соответствии с этим используются две программы: программа 1 и программа 2. Тексты программы приведены ниже. В каждой строке 10 операторов. Адрес перехода mn к любому оператору легко определить по номеру $m=0, 1, \ldots, 9$ строки и номеру $n=0, 1, \ldots, 9$ столбца, на пересечении которых находится этот оператор [16].

Программами пользуются так:

в программную память вводится текст программы 1;

в регистры памяти заносится исходная информация. При этом регистры заполняются следующим образом: U_B=Р3, U_C=Р4, U'_B=Р5, U'_C=Р6, U''_B=Р7, U''_C=Р8, $U_л/2$=Р9, $\omega C_д$=РД, $\sqrt{3}$=РВ, затем программа пускается в автоматический счет (В/О С/П);

после автоматического счета (примерно через 45—55 с) на индикаторе высвечивается число 2;

в программную память вводится программа 2. Следует обратить внимание, что ЭКВМ нельзя отключать от сети, так как в программе 2 используются данные расчета по предыдущей программе;

затем программа пускается в автоматический счет (В/О С/П);

после автоматического счета (примерно через 50—60 с) на индикаторе высвечивается 00000001.

Рассчитанные значения проводимостей изоляции хранятся в регистрах памяти:

$$Р3 = \mathrm{Re}\,\underline{Y}_A = \frac{1}{r_A};\quad Р4 = \mathrm{Im}\,\underline{Y}_A = \omega C_A;\quad Р5 = \mathrm{Re}\,\underline{Y}_B = \frac{1}{r_B};$$

$$Р6 = \mathrm{Im}\,\underline{Y}_B = \omega C_B;\quad Р7 = \mathrm{Re}\,\underline{Y}_C = \frac{1}{r_C};\quad Р8 = \mathrm{Im}\,\underline{Y}_C = \omega C_C.$$

Программы записаны в обозначениях и символике клавиш ЭКВМ типа МК-54 или БЗ-34. Заметим, что при использовании МК-56 нужно заменить команду П на Х—П, а команду ИП на П—Х.

В качестве примера были рассчитаны параметры изоляции сети при: $U_л$=6300 В, U_B=3743 В, U_C=3928 В, U'_B=4836 В, U'_C=4939 В, U''_B=3281 В, U''_C=3946 В, $\omega C_д$=0,7065 мСм ($C_д$=2,25 мкФ).

После автоматического счета по программе 1 в регистрах памяти хранилась следующая информация (первые три значащие цифры): Р1=—0,0487, Р2=0,814, Р3=0,962, Р4=—0,0330, Р5=—1,15, Р6=—0,0690, Р7=—0,558, Р8=—0,873, Р9=0,750, Р0=00000001, РА=0,962, РВ=—0,030, РС=—0,558, РД=—0,878.

Затем была введена программа 2 и после автоматического счета получено:

Р1=Р2=00000003, Р0=00000001, Р3=$1/r_A$=9,99·10⁻³ См;

Р4=0,314 (мСм)=ωC_A; Р5=$1/r_B$=6,01·10⁻³ См;

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Программа 1. Расчет коэффициентов (139)

3	ПО	9	П1	П2	К ИП	1 ИП9	Fx²	÷	←
К ИП1	ИП9	÷	Fx²	—	4	÷	1	К П2	+
Fx²	—	F√—	/—/	К П2	F L0	05	ИП 3	ИП В	+
П3	ИПВ	ИП5	+	П 5	ИП8	1	П8	—	2
П0	7	П1	П2	ПП	79	F L0	ИП3	44	ИП5
—	П5	ИП4	ИП6	—	П6	7	П2	П1	ПП
79	ИПА	×	/—/	П2	ИП6	ИПА	П1	×	ИП3
ПА	ИП4	П В	ИП7	П С	ИП8	П Д	С/П	2	К ИП1
↑	Fx²	К ИП1	Fx²	FВ$_x$	Г О	+	П9	÷	/—/
КПП 2	Г О	ИП9	÷	К П2	В/О				

Программа 2. Расчет параметров изоляции относительно земли

ПП	76	1	+	ПА	3	F√—	П 0	1	2
÷	П С	4	F 1/x	П Д	ПП	76	П7	ИПВ	П8
2	/—/	П С	2	ИП0	×	П Д	ПП	76	ИП0
+	4	÷	П5	ИПВ	1	—	4	÷	П6
ИП 3	ИП5	—	ИП7	—	П3	ИП4	ИП6	—	ИП 8
—	П4	ИП 1	П С	ИП2	П Д	3	П 0	9	П1
П 2	К ИП1	П В	К ИП1	ПА	ПП	76	ИПВ	К П2	ИПА
/—/	К П2	F L0	61	ИП 0	С/П	ИПА	ИПС	×	ИПВ
ИП Д	×	—	ИПА	ИП Д	×	ИПВ	ИПС	×	+
П В	←→	П А	В/О						

P6=0,251 (мСм) $=\omega C_B$, P7$=1/r_C=3{,}99\cdot10^{-3}$ См;
P8=0,219 (мСм) $=\omega C_C$.

Общее время ввода программ, исходных данных и автоматического счета около 15 мин.

Для расчета общего сопротивления изоляции r_Σ и суммарной емкости сети C_Σ относительно земли также целесообразно пользоваться программируемыми микрокалькуляторами.

При активном добавочном сопротивлении $r_д$ искомые параметры определяются уравнениями (129) и (130).

Представим коэффициенты, входящие в (129), (130), a, a' и d, d' в виде

$$\left.\begin{aligned} a&=\frac{\sqrt{3}}{2}U_л-\sqrt{U_C^2\left(d+\frac{U_л}{2}\right)^2};\\ a'&=\frac{\sqrt{3}}{2}U_л-\sqrt{U_C'^2-\left(d'-\frac{U_л}{2}\right)^2};\\ d&=\frac{U_C^2-U_B^2}{2U_л};\quad d'=\frac{U_C'^2-U_B'^2}{2U_л}.\end{aligned}\right\}\qquad(143)$$

Разделив числитель и знаменатель в (129) и (130) на $\left(\frac{U_л}{3}\right)^2$, что равносильно делению левой и правой частей (143) на $U_л/2$, получим

$$\left.\begin{aligned} &\tilde a=\sqrt{3}-\sqrt{\tilde U_C^2-(\tilde d+1)^2};\quad \tilde a'=\sqrt{3}-\sqrt{\tilde U_C'^2-(\tilde d'+1)^2};\\ &\tilde d=\frac{\tilde U_C^2-\tilde U_B^2}{4};\quad \tilde d'=\frac{\tilde U_C'^2-\tilde U_B'^2}{4};\\ &\tilde U_C=U_C\Big/\left(\frac{U_л}{2}\right);\quad \tilde U_B=U_B\Big/\left(\frac{U_л}{2}\right);\\ &\tilde U_C'=U_C'\Big/\left(\frac{U_л}{2}\right);\quad \tilde U_B'=U_B'\Big/\left(\frac{U_л}{2}\right).\end{aligned}\right\}\qquad(144)$$

Теперь (129) и (130) можно представить в виде

$$r_\Sigma=r_д\frac{(\tilde a-\tilde a')^2+(\tilde d-\tilde d')^2}{\tilde a'(\tilde a-\tilde a')+\tilde a'(\tilde d-\tilde d')}=r_д\frac{A}{B}=\frac{A^*}{B};\qquad(145)$$

$$C_\Sigma=\frac{1}{r_д\omega}\,\frac{\tilde a\tilde d'-\tilde a'\tilde d}{A}=\frac{1}{r_д\omega}\,\frac{D}{A}=\frac{D}{\omega A^*}.\qquad(146)$$

Соотношения (144)—(146) представляют собой алгоритм расчета, который можно реализовать на «Электронике МК-56» или ее аналогах «Электронике БЗ-34» и «Электронике МК-54».

Текст программы 3 имеет вид.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Программа 3

П—х6	2	÷	x—П6	2	П—х6	÷	x—П0	6	x—П1	КП—х1	П—х6
÷	Fx²	В↑	КП—х1	ГО			÷	Fx²	—	4	÷
П—х1	2	+	x—П1	Кх—П1	П—х2	—	Кх—П1	1	+	Fx²	—
F√—	3	F√—	—	П—х2	+	—	F L0	0,8	П—х3	П—х5	—
x—Пс	П—х5	×	П—х4	—	—	÷	—	x—Пb	П—х4	×	—
П—хb	Fx²	П—хс	Fx²	÷	П—х3	x—Пd	x—Пa	÷	x—Пb	П—х4	П—х3
×	П—х²	П—х5	×	П—х7	П—хd	П—хd	П—хb	÷	/—/	x—Пa	П—хb
÷	x—П0	П—х8	П—хa		x—П1	П—х8	С/П	П—хa	÷	x—П1	С/П

Программа 4

Инструкция к программе 3:

1) Перейти в программный режим В/О F ПРГ.

2) Занести текст программы в память.

3) Перейти в режим автоматического счета F АВТ.

4) Занести исходные данные: $U_B \to$П2; $U_C \to$П3; $U'_B \to$П4; $U'_C \to$П5; $U_л \to$П6; $\omega \to$П7; $r_д \to$П8.

5) Пустить программу и автоматический счет В/О С/П.

После счета на индикаторе и в П1 — значение r_Σ. Для получения C_Σ нажать $\longleftrightarrow$ или П — x 0.

Время автоматического счета 40 с.

Контрольный пример. $U_л=10$ кВ, $U_B=5{,}77$ кВ, $U_C=5{,}77$ кВ, $U'_B=5{,}02$ кВ, $U'_C=7$ кВ, $r_д=1$ кОм.

Расчет контрольного примера по приведенной программе дает: $r_\Sigma=2{,}301$ кОм, $C_\Sigma=13{,}97\cdot10^{-6}$ Ф.

При емкостном добавочном сопротивлении $1/\omega C_д$ искомые параметры определяются (127) и (128).

Проделав те же действия, что и в предыдущем случае, получим расчетные соотношения в виде

$$r_\Sigma = -\frac{A}{\omega C_д D}; \tag{147}$$

$$C_\Sigma = C_д \frac{B}{A}, \tag{148}$$

где A, B и D определяются теми же соотношениями, что и в (145) и и (146). Формулы (147) и (148) получаются из (145) и (146) заменой B на $(-D)$ в (147) и B на D в (148). Если вместо добавочного сопротивления $r_д$ используется $1/\omega C_д$, то программа, реализующая (147) и (148), будет отличаться только заменой переменных.

Текст программы 4 приведен на с. 119.

Инструкция к программе 4:

1) Перейти в программный режим В/О F ПРГ.

2) Занести текст программы в программную память.

3) Перейти в режим автоматического F АВТ.

4) Занести исходные данные для расчетов

$U_B \to$П2; $U_C \to$П3; $U'_B \to$П4; $U'_C \to$П5, $U_л$ — П6; $\omega \to$П7; $1/\omega C_д \to$П8.

5) Пустить программу в автоматический счет В/О С/П.

6) После очага на индикаторе и в П1 — значение r_Σ.

Для получения C_Σ нужно нажать $\longleftrightarrow$ или П — x0.

Контрольный пример. $U_B=3{,}81$ кВ, $U_C=3{,}78$ кВ, $U_B'=4{,}98$ кВ, $U'_C=4{,}952$ кВ, $U_л=6{,}6$ кВ, $I/\omega C_д=1415$ Ом.

Расчет дает: $r_\Sigma=45{,}384$ кОм, $C_\Sigma=2{,}49\cdot10^{-6}$ Ф.

Предлагаемые алгоритмы позволяют рассчитывать параметры сопротивлений изоляции и на обычных ЭКВМ, например МК-36, МК-39, МК-51 и т. п., без программирования. При этом, естественно, время расчета будет значительно больше и составляет в зависимости от умения пользователя и типа ЭКВМ 25—40 мин. Кроме того, при расчетах

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

на непрограммируемых ЭКВМ имеется большая вероятность появления ошибок и сбоев, особенно при вводе чисел.

Особенности расчетов на программируемых ЭКВМ подробно изложены в [17].

На практике при определении состояния сетей с точки зрения электробезопасности и надежности часто полагают, что емкости отдельных фаз сети относительно земли равны между собой. Такое допущение вполне оправданно, так как протяженность проводов отдельных фаз трехфазной системы примерно одинакова. Однако этого нельзя сказать об активных сопротивлениях фаз сети относительно земли, так как их значения зависят от состояния изоляции и различного вида ее повреждения. Поэтому при приближенных расчетах параметров изоляции сети относительно земли можно полагать $C_A=C_B=C_C=C$, $r_A\neq r_B\neq r_C$. В этом случае достаточно измерить напряжения фаз сети относительно земли до и после подключения к одной из фаз известной добавочной проводимости. Из (131) и (132) для $Y_д=j\omega C_д$ имеем:

$$\left.\begin{aligned}
&\omega C\,(d_A+d_B+d_C)-\frac{1}{r_A}a_A-\frac{1}{r_B}a_B-\frac{1}{r_C}a_C=0;\\
&\omega C\,(a_A+a_B+a_C)+\frac{1}{r_A}d_A+\frac{1}{r_B}d_B+\frac{1}{r_C}d_C=0;\\
&\omega C\,(d'_A+d'_B+d'_C)-\frac{1}{r_A}a'_A-\frac{1}{r_B}a'_B-\frac{1}{r_C}a'_C=\\
&\qquad=d'_A\,\omega C_д;\\
&\omega C\,(a'_A+a'_B+a'_C)+\frac{1}{r_A}d'_A+\frac{1}{r_B}d'_B+\frac{1}{r_C}d'_C=\\
&\qquad=a'_A\,\omega C_д.
\end{aligned}\right\} \tag{149}$$

Здесь a_A, a_B, a_C, d_A, d_B, d_C — коэффициенты, рассчитываемые по измеренным напряжениям фаз сети относительно земли U_A, U_B, U_C при отсутствии добавочной проводимости $\omega C_д$; a'_A, a'_B, a'_C, d'_A, d'_B, d'_C — коэффициенты, рассчитываемые по измеренным напряжениям U'_A, U'_B, U'_C при наличии в фазе A добавочной проводимости $\omega C_д$.

Таким образом, из системы уравнений (149) могут быть определены искомые параметры изоляции r_A, r_B, r_C и емкости C отдельных фаз сети относительно земли. Расчет целесообразно вести с использованием средств вычислительной техники. При этом для возможности использования серийно выпускаемых микро-ЭВМ, например «Электроника МК54 (или БЗ34)», рекомендуется предварительно записать искомые параметры как функцию ее коэффициентов, т. е. решить систему (149) относительно r_A, r_B, r_C и C, а затем уже для этих зависимостей составить алгоритм и программу расчета.

35. Применение микропроцессорной техники для контроля параметров изоляции сетей

В соответствии с изложенными методами определение параметров изоляции сетей производится путем проведения измерений напряжений фаз сети относительно земли с подключенными добавочными сопротивлениями и без них и расчетов по полученным формулам и алгоритмам с учетом измеренных величин.

С этой точки зрения большие возможности открываются благодаря прогрессу в области производства микропроцессорной техники, обладающей большими вычислительными возможностями при малых размерах и относительно низкой стоимости. К таким средствам относится, например, микро-ЭВМ «Электроника 60». Ее существенным достоинством является возможность использования программного обеспечения существующих мини-ЭВМ. В то же время применение микро-ЭВМ высокой производительности (около 250 тыс. операций в секунду) открывает принципиально новые возможности. Так, например, использование микропроцессоров позволяет решить задачу по созданию устройства непрерывного контроля сопротивлений изоляции и емкостей отдельных фаз сети относительно земли. Как известно, существующие в настоящее время устройства непрерывного контроля изоляции измеряют только общее активное сопротивление изоляции.

Поскольку параметры изоляции отдельных фаз определяются на основании расчетов по полученным формулам, то в состав такого устройства должно входить вычислительное устройство, способное производить необходимые расчеты. При этом требуется хранить во время вычисления промежуточные величины и окончательные результаты расчетов. Таким образом, в состав устройств должна входить ЭВМ.

Информация о результатах измерения может поступать в ЭВМ только в цифровом коде, причем в виде сигналов определенных дискретных уровней напряжения. Это требование свидетельствует о необходимости наличия в составе разрабатываемого устройства аналого-цифрового преобразователя и блока согласования уровней.

Так как всякий аналого-цифровой преобразователь имеет ограниченный диапазон входного сигнала, измеряемый сигнал следует преобразовать в постоянное напряжение заданного значения, что осуществляется в блоке нормализации. В связи с последовательным характером измерений

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

требуется поочередное подключение на вход измерительного тракта отдельных фаз и добавочного сопротивления, т. е. необходима коммутация, управление которой осуществляется по командам из ЭВМ через соответствующий блок. Кроме того, в устройстве необходимо наличие блока индикации текущих значений и сигнализации о предаварийных ситуациях, а также блока регистрации параметров, нужных в случае дальнейшего анализа.

На кафедре электротехники Московского горного института было разработано устройство непрерывного контроля параметров изоляции отдельных фаз с использованием микро-ЭВМ «Электроника 60». Устройство включает в себя коммутатор для подключения; вход измерительного тракта напряжений отдельных фаз сети относительно земли; блок согласования уровней, осуществляющий преобразование измеряемого напряжения в нормализованное постоянное напряжение; аналого-цифровой преобразователь 15КА-60/8-10; блок связи, состоящий из интерфейсов типа МИНИБАС для связи ЭВМ с периферийными блоками; блок информационного табло, представляющий собой набор десятичных цифровых индикаторов и светодиодов для вывода текущих значений контролируемых параметров изоляции отдельных фаз, а также для аварийной сигнализации при несоответствии этих значений критическим, графопостроитель рулонного типа и микро-ЭВМ «Электроника 60».

Центральный процессор микро-ЭВМ «Электроника 60» состоит из микропроцессоров, памяти объема 4К слов, приемопередатчиков канала, дополнительной логики и размещается на одной печатной плате размером 280×240 мм. Шестнадцатиразрядная длина позволяет обращаться к памяти объемом до 64 Кбайт, из них 8 Кбайт предназначены для регистров внешних устройств. Все функциональные блоки микро-ЭВМ «Электроника 60» выполнены в виде конструктивно законченных устройств. Связь между ними осуществляется через единый канал, который является быстродействующей системой связи.

В настоящее время известны два варианта центрального процессора микро-ЭВМ «Электроника 60». Это однокристальная микро-ЭВМ на базе СБИС микропроцессора и центральный процессор микро-ЭВМ на базе процессора, состоящего из пяти БИС. В нем дополнительно аппаратно реализованы команды расширенной арифметики и операций с плавающей запятой. Благодаря этому удалось увеличить на порядок быстродействие операций умножения, деления с фиксированной и плавающей запятой, которые

необходимо использовать при расчетах, связанных с контролем изоляции отдельных фаз сетей с изолированной нейтралью.

Микро-ЭВМ «Электроника 60» реализует разработанный алгоритм путем управления через блок связи всеми блоками устройства и проведения необходимых расчетов.

Измеренные значения фаз относительно земли U_A, U_B, U_C и U_A', U_B', U_C' записываются в виде двоичных кодов в оперативное запоминающее устройство микро-ЭВМ «Электроника 60». Управляющая программа, реализующая взаимодействие микро-ЭВМ с периферийными блоками для осуществления подбора и проведения измерений, написана на языке Ассемблер. Для вычисления на основании полученных данных параметров изоляции отдельных фаз электрической сети необходимо решить систему линейных уравнений четвертого порядка вида (149). Программа написана на языке Бейсик.

Вычисленные значения сравниваются с практическими, в случае аварийных ситуаций зажигаются соответствующие табло. Кроме того, текущие значения параметров изоляции отдельных фаз в цифровом виде регистрируются на блоке информационного табло, а также выводятся на графопостроитель. Цикл контроля составляет не более 1 мин.

Аналогично может быть решена задача по созданию устройства непрерывного контроля общего активного сопротивления изоляции r_Σ и суммарной емкости C_Σ сети относительно земли. В этом случае при помощи микро-ЭВМ будет реализована более простая система уравнений (127), (128) при емкостном добавочном сопротивлении $\omega C_д$ или (129), (130) при активном $r_д$.

В дальнейшем при разработке устройств электробезопасности на базе микропроцессорной техники ограниченного функционального назначения целесообразно использовать специализированные микропроцессоры.

В заключение необходимо отметить, что несмотря на исключительные возможности микропроцессорной техники, задача создания устройства непрерывного контроля параметров изоляции для общего случая, т. е. при $r_A \neq r_B \neq r_C$, $C_A \neq C_B \neq C_C$, в настоящее время остается нерешенной. Это объясняется отсутствием методов определения указанных параметров, которые бы не требовали изменения режима работы самой контролируемой сети. Как указывалось в § 33, для получения шести независимых уравнений необходимо производить изменение чередования фаз трехфазной системы. Такой метод неприемлем для использования в устройстве непрерывного контроля параметров изоляции с использованием микропроцессоров. В связи с этим необходима разработка более совершенных методов определения параметров изоляции отдельных фаз. Это позволит создавать устройства, которые смогут непрерывно контролировать все другие факторы электробезопасности, такие как токи утечки, токи замыкания на землю (без наличия в сетях замыкания), возможные резонансные перенапряжения относительно земли, токи через тело человека, которые могут возникать при однополюсных прикосновениях и др.

Таким образом, дальнейшая разработка средств непрерывного контроля изоляции отдельных фаз с использованием новой техники является в настоящее время важной задачей организаций и институтов отрасли, занимающихся вопросами эксплуатации, разработки и изготовления устройств контроля и защиты, обеспечивающих надежность эксплуатации и безопасность распределительных сетей напряжением 6—35 кВ.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Список литературы

1. **Лихачев Ф. А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.

2. **Цапенко Е. Ф.** Резонансные явления в системах электроснабжения 6—10 кВ. — Промышленная энергетика, 1979, № 11, с. 54—55.

3. **Цапенко Е. Ф.** Влияние трансформаторов контроля изоляции на перенапряжения в сетях 6—35 кВ. — Промышленная энергетика, 1983, № 12, с. 22—23.

4. **Цапенко Е. Ф., Чан Ань Кйет.** Расчет сопротивлений фаз сети относительно земли, обусловленных наличием пятистержневых трансформаторов контроля изоляции. — Промышленная энергетика, 1985, № 8, с. 46—47.

5. **Правила** устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.

6. **Техника** высоких напряжений/ Под общей. ред. Д. В. Разевига. М.: Энергия, 1976. 488 с.

7. **Цапенко Е. Ф.** Контроль изоляции в сетях до 1000 В. М.: Энергия, 1972. 130 с.

8. **Цапенко Е. Ф.** О настройке дугогасящих катушек для компенсации токов однофазного замыкания на землю в сетях 6—35 кВ. — Промышленная энергетика, 1980, № 7, с. 41—43.

9. **Черников А. А.** Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. М.: Энергия, 1974. 95 с.

10. **Цапенко Е. Ф.** Распределение токов нулевой последовательности в сети с изолированной нейтралью при замыканиях на землю. Промышленная энергетика, 1982, № 12, с. 34—35.

11. **Цапенко Е. Ф., Случевский Ю. Н.** Определение токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью на основании измерений вольтметром. — Изв. вузов. Энергетика, 1981, № 9, с. 101—106.

12. **Пат.** 1271824 (ФРГ). Isolationsmebeinrichtung fiir ein ungeerdetes, in Betrieb befindliches Wechseloder Drechstomnetz/ Schmidt G., Meger K.

13. **Цапенко Е. Ф., Случевский Ю. Н., Чучелов Д. Н.** Определение активного сопротивления изоляции и емкости сетей 6—35 кВ относительно земли при помощи вольтметров контроля изоляции. — Промышленная энергетика, 1982, № 1, с. 50—51.

14. **Цапенко Е. Ф., Случевский Ю. Н.** Определение параметров изоляции отдельных фаз относительно земли в сети с изолированной нейтралью. Метрология, 1981, № 9, с. 44—50.

15. **Цапенко Е. Ф., Кудрявцев А. С.** Определение параметров изоляции отдельных фаз относительно земли сетей 6—10 кВ карьеров. — Изв. вузов. Горный журнал, 1985, № 1, с. 72—74.

16. **Цапенко Е. Ф., Бабичев Ю. Е.** Расчет параметров изоляции относительно земли сетей 6—10 кВ с изолированной нейтралью на ЭКВМ. — Изв. вузов. Энергетика, 1985, № 7.

17. **Трохименко Я. К., Любич Ф. Д.** Радиотехнические расчеты на микрокалькуляторах. Справочное пособие. М.: Радио и связь, 1983. 256 с.

18. **А. с.** 1181040 (СССР). Устройство для защиты от однофазного замыкания на землю в трехфазной электрической сети/ Е. Ф. Цапенко, Д. М. Чекарьков, Я. Б. Дубошинский и др. Опубл. в Б. И., 1985, № 35.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру

Оглавление

Предисловие 3
Введение 4

Глава первая. **Основные понятия** 7

1. Схема замещения сети. Токи утечки и токи замыкания на землю 7
2. Соотношения между комплексными напряжениями фаз относительно земли и их модулями 9
3. Распределение токов нулевой последовательности по участкам сети при замыкании фазы на землю 11
4. Сопротивления, вносимые трансформаторами напряжения в схему замещения сети 14

Глава вторая. **Переходные процессы при замыканиях на землю** 22

5. Общие сведения 22
6. Трехфазная сеть с идеальной изоляцией 25
7. Однофазная сеть, обладающая активным сопротивлением и емкостью 28
8. Трехфазная сеть с емкостью и активными сопротивлениями изоляции 30
9. Общая методика исследования и расчета дуговых замыканий 33
10. Расчет токов переходных процессов при глухих замыканиях на землю 35
11. Переходные процессы при замыканиях фазы на корпус трансформатора 6/0,4 кВ 39

Глава третья. **Компенсация емкостных токов замыкания на землю** 42

12. Компенсация в идеальной схеме 42
13. Схемы замещения катушки индуктивности 43
14. Режим бездугового однофазного замыкания на землю 45
15. Режим дугового замыкания 48
16. Нормальный режим работы сети 50
17. Включение катушки в нейтраль заземляющего трансформатора 52
18. Об эффективности компенсации емкостных токов замыкания на землю 57

Глава четвертая. **Защита от однофазных замыканий на землю** 59

19. Принципиальные схемы промышленных устройств защиты от замыканий на землю 59
20. Амплитудные и фазовые соотношения токов и напряжений нулевой последовательности при замыканиях на землю 66
21. Токи и напряжения нулевой последовательности при переходных процессах, вызванных замыканиями на землю 72
22. Режимы работы трансформаторов тока нулевой последовательности в схемах защиты 74
23. Новые устройства селективной защиты в сетях с малыми токами замыкания на землю 79

Глава пятая. **Измерения токов замыкания на землю** . . . 85
24. Прямые и косвенные методы измерения 85
25. Способ дополнительного источника, вводимого в отключенную от рабочего напряжения сеть 86
26. Определение токов замыкания на землю на основании измерений вольтметрами 87
27. Активная и емкостная составляющие тока замыкания на землю 90

Глава шестая. **Контроль изоляции и замыканий на землю** 93
28. Изоляция высокого напряжения при постоянном и переменном напряжении 93
29. Контроль изоляции вольтметрами 99
30. Контроль сопротивления изоляции токами постороннего источника 102
31. Вентильные схемы измерения и контроля сопротивления изоляции 103

Глава седьмая. **Определение параметров изоляции относительно земли сетей в рабочем режиме** 107
32. Определение общего активного сопротивления и суммарной емкости сети относительно земли 107
33. Определение активных сопротивлений и емкостей отдельных фаз сети относительно земли 110
34. Алгоритмы расчета параметров изоляции и его реализация на микро-ЭВМ 114
35. Применение микропроцессорной техники для контроля параметров изоляции сетей 122
Список литературы 126

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Евгений Федорович Цапенко

ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6—35 кВ

Редакторы *М. А. Шевандин, Л. Г. Ракова*
Редактор издательства *Л. В. Копейкина*
Обложка художника *В. Ф. Громова*
Художественные редакторы *В. А. Гозак-Хозак, Ю. В. Созанская*
Технический редактор *Н. П. Собакина*
Корректор *З. Б. Драновская*
ИБ № 1177

Сдано в набор 13.05.86 Подписано в печать 10.07.86 Т-16705
Формат 84 × 108 1/32 Бумага типографская № 3 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 6,72 Усл. кр.-отт. 6,93 Уч.-изд. л. 6,90
Тираж 14000 экз. Заказ 5188 Цена 35 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, М-54, Валовая, 28.

Важные пункты документа можно найти по ссылке на Энергетик.ру