

Г.Э.ЛИНТ

СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ





БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

В ы п у с к 654

Основана в 1959 году

Г.Э.ЛИНТ

**СИММЕТРИЧНЫЕ
СОСТАВЛЯЮЩИЕ
В РЕЛЕЙНОЙ
ЗАЩИТЕ**



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1996

ББК. 31.27-05
Л 59
УДК 621.316.925

Редакционная коллегия серии:

В.Н.Андриевский, С.А.Бажанов, М.С.Бернер, Л.Б.Годгельф, В.Х.Ишкин, Д.Т.Комаров, В.Н.Кудрявцев, В.П.Ларионов, Э.С.Мусаэлян, С.П.Розанов, В.А.Семенов, А.Д.Смирнов, А.Н.Трифонов, А.А.Филатов, А.Н.Щепеткин

Рецензент Я.С. Гельфанд

Линт Г.Э.

Л 59 Симметричные составляющие в релейной защите. — М.: Энергоатомиздат, 1996. — 160 с.: ил. — (Б-ка электромонтера, Вып. 654).
ISBN 5-283-01231-X

Освещены основные вопросы применения метода симметричных составляющих при расчетах аварийных токов и напряжений в электрических системах. Рассмотрены схемы фильтров симметричных составляющих, применяемых в реле защиты отечественного производства. Дано описание новых серийных реле, реагирующих на симметричные составляющие и выполненных на операционных усилителях. Рассмотрены особенности технического обслуживания аппаратуры, в которой используются фильтры симметричных составляющих, проведен анализ ее действия при реальных КЗ и в искусственных условиях несимметрии, создаваемых в рабочем режиме.

Для квалифицированных рабочих, мастеров и инженеров, занимающихся обслуживанием устройств релейной защиты.

Л 2202080000-028 Без объявл.
051(01)-96

ББК 31.27-05

ISBN 5-283-01231-X

© Автор, 1996

Предисловие

Аппаратура, реагирующая на симметричные составляющие токов и напряжений, находит широкое применение в технике релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматике установок, служащих для производства, распределения и потребления электрической энергии в трехфазных системах переменного тока. Подобная аппаратура выпускается отечественной промышленностью. Ее используют в пусковых и измерительных органах основных и резервных защит высоковольтных линий электропередачи, в резервных защитах силовых трансформаторов, линий питания собственных нужд электростанций и других электроустановок. В специальном исполнении она применяется в схемах защиты мощных генераторов и синхронных компенсаторов от сверхтоков обратной последовательности. Имеется такая аппаратура и в схемах АВР источников питания в распределительных сетях и установок собственных нужд электростанций. Она содержится также в отдельных устройствах блокировки защит и в схемах сигнализации о неисправностях источников трехфазного тока разного назначения.

Автор стремился отразить в данной книге основные положения метода симметричных составляющих в применении к анализу и расчетам характерных нарушений симметрии в трехфазных электрических сетях, и познакомить читателя с устройством и методами проверки промышленной аппаратуры, служащей для выделения симметричных составляющих токов и напряжений разной последовательности. Насколько это ему удалось, судить читателю.

Автор выражает искреннюю благодарность рецензенту доктору техн. наук Я.С.Гельфанду и канд.техн. наук Н.А.Дони за полезные замечания и рекомендации, высказанные при подготовке книги, позволившие углубить ее содержание.

Автор

Введение

Современные системы электроснабжения состоят из связанных симметричных сетей трехфазного переменного тока. Каждый из основных элементов, входящих в эти сети (генераторы, трансформаторы, линии и преобладающая часть нагрузки — электродвигатели), имеют равные пофазно сопротивления. Строго говоря, к линиям электропередачи, являющимся связующими элементами сети, это положение может быть применено только с определенным приближением. Дело в том, что расположение фазных проводов на опорах ЛЭП не является симметричным, и поэтому сопротивления отдельных фаз линий оказываются не равными между собой. Для устранения этого недостатка осуществляется транспозиция проводов по трассе длинных линий, а в протяженных распределительных сетях — переброска фаз проводов на линейных вводах при прохождении через промежуточные подстанции. Этим достигается выравнивание результирующих сопротивлений по фазам сети в целом.

Другим заслуживающим внимания обстоятельством является то, что некоторая сравнительно небольшая часть электроустановок, входящих в состав нагрузки сетей, тоже имеет неодинаковые по фазам сопротивления. Это — отдельные типы промышленных печей, электротяга, освещение и некоторые виды бытовой и производственной электроаппаратуры. Но в реальных условиях и эти нагрузки стараются распределить равномерно по фазам. В итоге образуется единая сеть, имеющая близкую к полной симметрии систему фазных сопротивлений.

Синхронные генераторы электростанций создают строго симметричную систему ЭДС, и поэтому при нормальном режиме в основной сети энергосистем соблюдается четко выраженная симметрия токов и напряжений по фазам.

Проблемы, связанные с несимметрией нагрузок в схемах электроснабжения, возникли еще на ранней стадии развития энергетики. В начале XX века в США начали быстро развиваться сети железных дорог, оснащенные однофазными тяговыми двигателями переменного тока. При их внедрении потребовалось решить многие вопросы, связанные с влиянием таких сетей на линии телефонной связи и другими особенностями работы электроустановок в условиях несимметрии, в том числе с определением характера и способов ликвидации возникающих повреждений. Осуществление расчетов токов и напряжений при несимметричных режимах традиционными методами оказалось

очень затруднительным. Выход из сложившегося положения был предложен К.Л.Фортескью в 1918 г., создавшим новый метод расчета токов и напряжений при несимметричных режимах в трехфазной сети переменного тока, который сам автор назвал методом симметричных координат.

В дальнейшем метод был усовершенствован и углублен специалистами фирмы Вестингауз К.Ф.Вагнером и Р.Д.Эвансом и изложен в книге, русский перевод которой был опубликован в 1936 г. под названием "Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей".

Метод симметричных составляющих быстро завоевал всеобщее признание. Он оказался особенно эффективным при исследованиях сложных случаев несимметрии в сетях трехфазного тока. Дальнейшие исследования подтвердили особую ценность этого метода, заключающуюся в том, что он хорошо согласуется с реальными электромагнитными процессами, происходящими во вращающихся электрических машинах, в том числе в генераторах переменного тока.

Очень существенно и то, что токи и напряжения нормального рабочего режима электрических сетей являются величинами, содержащими только одну симметричную составляющую.

Методом симметричных составляющих успешно решаются задачи определения токов и напряжений при процессах, происходящих при замыканиях на землю в элементах сети. Хотя специфика образования таких токов была установлена еще до возникновения рассматриваемого метода, его применение позволило решать эти задачи более эффективно.

При проведении расчетов методом симметричных составляющих широко пользуются способом наложения, так как в расчетах электромагнитных процессов принимают, что электрические системы являются линейными, пренебрегая насыщением магнитопроводов электрических машин и трансформаторов. При этом в практических расчетах определяют только периодические составляющие токов и напряжений рабочей частоты сети. Получающаяся погрешность измерений по отношению к действительным значениям, зафиксированным при повреждениях в сетях, находится в допустимых пределах и составляет не более 10 %. Основное достоинство метода — это возможность исключить из расчетов влияние взаимоиндукции между фазами элементов сети, которое вызывало наибольшие трудности. Это влияние учитывается путем дополнительного введения в расчетную схему эквивалентных сопротивлений взаимоиндукции в

соответствующую фазу сети. По своему характеру эквивалентные сопротивления подобны имеющимся сопротивлениям самоиндукции. В итоге решение задачи упрощается и вместо исследования явлений в трех фазах одновременно стало возможным вести расчет для одной, так называемой "первой" или "особой" фазы, применяя традиционные способы расчетов для симметричной сети.

В последующие годы метод был успешно использован при разработке целого класса устройств релейной защиты, в которых применены специальные фильтры симметричных составляющих напряжений или токов. Одним из главных преимуществ фильтровых защит является независимость от значений симметричных нагрузочных токов присоединения, что позволяет получить высокую чувствительность защиты.

В книге Вагнера и Эванса приводятся первые схемы фильтров симметричных составляющих, нашедших практическое применение в различных устройствах.

Производство аппаратуры релейной защиты, содержащей фильтры симметричных составляющих, началось в нашей стране в конце тридцатых годов этого века. Они использовались в защитах линий высокого напряжения и в защитах мощных электродвигателей. В России впервые была предложена оригинальная схема фильтра напряжения обратной последовательности, выполненная с помощью резисторов и конденсаторов. Эта схема успешно используется и в настоящее время. В фильтрах тока обратной последовательности того времени, заимствованных из зарубежной практики, применялись дроссели с ферромагнитными сердечниками в сочетании с резисторами. В качестве исполнительных органов служили обычные реле тока и напряжения серий ЭТ и ЭН. Фильтры были довольно громоздкими и имели значительное потребление. Оптимальные параметры фильтров достигались путем согласования внутреннего сопротивления фильтра и сопротивления нагрузки.

В последующие годы область применения фильтров симметричных составляющих заметно расширилась. Их стали широко применять в основных органах защит линий 110 кВ и выше, а также для защиты от несимметричных режимов работы и коротких замыканий синхронных генераторов, трансформаторов и электродвигателей. Началось производство специальных реле, в которых содержались простые и сложные фильтры симметричных составляющих, имеющие улучшенные параметры. В них широко использовались трансреакторы в сочетании с трансфор-

маторами и резисторами. Благодаря использованию в качестве исполнительных органов поляризованных реле с выпрямителями, а впоследствии магнитоэлектрических реле, было резко снижено потребление и получена высокая чувствительность защиты.

В 70-80-е гг. по мере внедрения в технику релейной защиты полупроводниковых приборов и микроэлектронной аппаратуры появились защиты, содержащие более совершенные схемы фильтров симметричных составляющих. Начался выпуск фильтров, в которых отсутствует зависимость напряжения небаланса на выходе фильтра от колебаний частоты сети, а также фильтров, в которых осуществляется компенсация емкостных токов линий 330 кВ и выше.

В конце 80-х годов появились реле защиты, содержащие фильтры новой конструкции на базе операционных усилителей. Вначале операционные усилители использовались только в исполнительных органах. Затем появились специальные активные фильтры симметричных составляющих, в которых применяются функциональные элементы с операционными усилителями.

Данная книга призвана помочь читателю разобраться в принципах действий современной отечественной аппаратуры релейной защиты, содержащей фильтры симметричных составляющих, познакомиться с областью их применения, а также изучить способы расчета, наладки и обслуживания устройств такого рода.

1. Основные понятия метода симметричных составляющих

Система векторов симметричных составляющих. В основе метода симметричных составляющих лежит представление, что любая несимметричная система векторов может быть показана в виде трех симметричных трехфазных систем векторов — прямой, обратной и нулевой последовательностей, называемых симметричными составляющими исходной несимметричной системы. Просуммировав пофазно соответствующие вектора симметричных составляющих, получим вектора исходной системы.

На рис. 1 показаны векторные диаграммы этих симметричных систем и кривые изменения во времени синусоидальных величин, отображаемых этими векторами. Направление вращения всех векторов одинаково против часовой стрелки. Для обозначения фаз векторов использованы буквенные обозначения A , B и C с цифровым индексом внизу, относящимся к соответствующей последовательности: индекс 1 — прямой; индекс 2 — обратной; индекс 0 — нулевой последовательностей.

В системе прямой последовательности (рис. 1, *a*) соседние вектора следуют друг за другом через 120° в порядке, соответствующем их буквенным обозначениям. Система обратной пос-

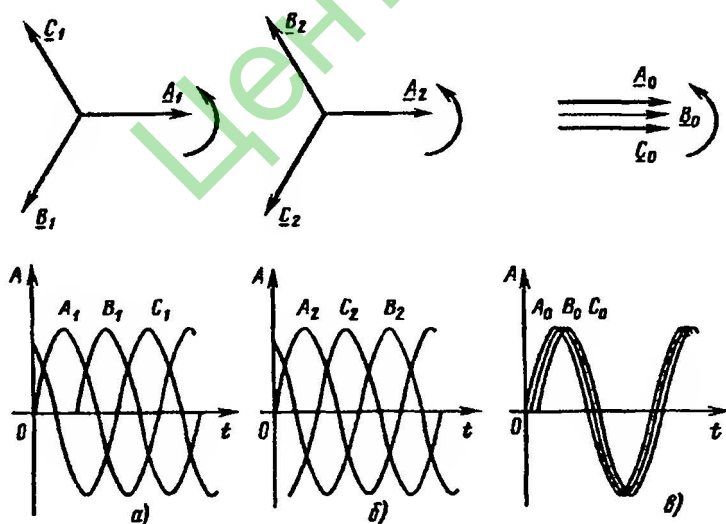


Рис. 1. Симметричные трехфазные системы векторов различной последовательности: *a* — прямой; *б* — обратной; *в* — нулевой

ледовательности (рис.1,б) отличается от прямой тем, что соседние вектора чередуются в противоположном порядке. Система нулевой последовательности (рис.1,в) характеризуется тем, что в ней отсутствует какой-либо сдвиг между векторами, т.е. они совпадают друг с другом по значению и по времени. Применительно к ней термин симметричная принят с некоторой натяжкой. Вектора этой системы возникают во всех трех фазах одновременно, имеют одинаковое значение, но не являются в полном смысле симметричными, хотя и совпадают по фазе.

Общим свойством систем прямой и обратной последовательностей является то, что в любой момент времени сумма мгновенных значений синусоидальных кривых изменения этих векторов всех трех фаз данной последовательности равна нулю, т.е. $\Sigma(A_1+B_1+C_1)=0$ и $\Sigma(A_2+B_2+C_2)=0$.

Если известны вектора симметричных составляющих рассматриваемой трехфазной несимметричной системы векторов, то полные значения векторов A , B и C этой системы получаются как суммы векторов одноименных фаз систем симметричных составляющих: $A = A_1+A_2+A_0$, $B = B_1+B_2+B_0$ и $C = C_1+C_2+C_0$.

Оператор a и его свойства. Любой из векторов симметричной трехфазной системы может быть выражен с помощью вектора другой фазы той же системы, если воспользоваться вспомогательным оператором a . Оператор a — это комплексный множитель, представляющий комплексное число следующего вида: $a = e^{j120^\circ} = -0,5 + j0,87$. Оператор a называют еще фазовым множителем, так как умножение любого вектора на a означает поворот этого вектора на угол 120° против часовой стрелки.

На рис. 2 показаны дополнительные комплексные множители, полученные с помощью арифметических действий над оператором a . Для наглядности эти дополнительные множители изображены в форме векторов. Из них можно выделить наиболее часто применяемую группу из трех симметричных множителей a , a^2 и 1 , где

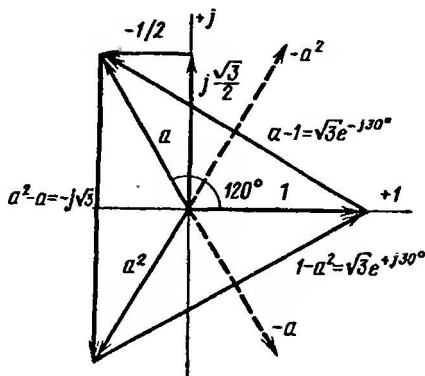


Рис. 2. Комплексные множители, создаваемые на базе оператора a

$a^2 = aa$ и $1 = aaa = a^3$. На этом же рисунке изображены комплексные множители, образующиеся при круговом попарном вычитании множителей a , a^2 и 1 , а также множители, находящиеся в противофазе к ним.

С учетом множителей, показанных на рис. 2, нетрудно записать зависимости между фазными векторами симметричных составляющих для любой последовательности. Система прямой последовательности может быть выражена с помощью вектора фазы A следующим образом: $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1$ и $\underline{C}_1 = a \underline{A}_1$. Аналогично система векторов обратной последовательности получит вид: $\underline{A}_2$, $\underline{B}_2 = a \underline{A}_2$ и $\underline{C}_2 = a^2 \underline{A}_2$. Для системы векторов нулевой последовательности очевидно, что $\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0$. Пользуясь этими зависимостями можно представить вектора $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ любой несимметричной системы с помощью векторов одной из фаз образующих ее систем симметричных составляющих $\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0$; $\underline{B} = a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0$ и $\underline{C} = a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0$. В этих уравнениях в качестве опорных использованы вектора симметричных составляющих фазы A . Подобным образом можно получить уравнения, выраженные с помощью векторов фазы B или C . Приведенные выше уравнения получили название *формул образования*.

Исходя из полученных выражений можно решить и другую задачу — разложить известную несимметричную систему векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ на симметричные составляющие. После преобразования вышеприведенных формул получаются следующие выражения для симметричных составляющих фазы A : $\underline{A}_1 = (\underline{A} + a \underline{B} + a^2 \underline{C})/3$, $\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2 \underline{B} + a \underline{C})/3$ и $\underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3$. Эти выражения называются *формулами разложения*.

Основной смысл формул разложения состоит в том, что при их применении мы исключаем из векторов исходной несимметричной системы вектора всех симметричных составляющих, кроме одного — вектора выделяемой последовательности. Если для примера подставить в формулу для выделения прямой последовательности любые системы векторов обратной или нулевой последовательности, то получим суммы, равные нулю. Так $(\underline{A}_2 + a \underline{B}_2 + a^2 \underline{C}_2)/3 = (\underline{A}_2 + a^2 \underline{A}_2 + a^4 \underline{A}_2)/3 = \underline{A}_2(1 + a^2 + a^4)/3 = 0$, $(\underline{A}_0 + a \underline{B}_0 + a^2 \underline{C}_0)/3 = \underline{A}_0(1 + a + a^2)/3 = 0$.

Только при вводе в указанное выражение системы векторов прямой последовательности получается сумма конечной величины $(\underline{A}_1 + a \underline{B}_1 + a^2 \underline{C}_1)/3 = \underline{A}_1(1 + a^3 + a^3)/3 = \underline{A}_1$.

На основе формул разложения разработано несколько способов графического построения векторов симметричных составляющих любой несимметричной системы. Эти способы отличаются

простотой и доступностью для пользователя. В качестве опорного в большинстве случаев построения берут вектор фазы A и соответственно определяют симметричные составляющие этого вектора A_1 , A_2 и A_0 .

Из формул разложения легче всего находится составляющая A_0 . Для ее получения достаточно произвести геометрическое сложение исходных векторов несимметричной системы $A+B+C$ и от полученного суммарного вектора взять $1/3$ часть. Это и будет искомый вектор A (рис.3,а).

Сумма фазных факторов A , B и C несимметричной системы может оказаться равной нулю. Это означает, что в ней отсутствуют составляющие нулевой последовательности. Очевидно, что система линейных векторов AB , BC и CA , образующая замкнутый треугольник, вообще не содержит составляющих нулевой последовательности.

Найти составляющие A_1 и A_2 способом, аналогичным построению A_0 , несколько сложнее, так как для этого необходимо вектора B и C рассматриваемой системы предварительно повернуть на угол 120° в одну или другую сторону, как это требуется по формулам разложения для получения вектора A_1 или A_2 соответственно. Поэтому для нахождения составляющих A_1 и A_2 были предложены более наглядные способы построения. Рис.3, б иллюстрирует один из таких способов.

При построении используется треугольник KLM линейных векторов AB , BC и CA исследуемой несимметричной системы, образованный из разностных векторов $AB=A-B$, $BC=B-C$ и

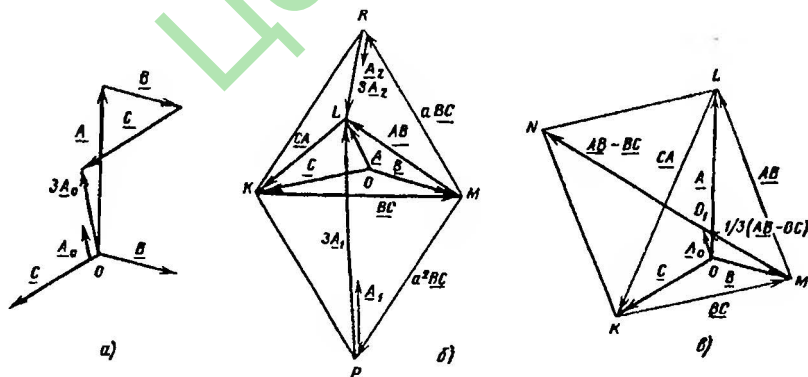


Рис. 3. Способы графического построения векторов симметричных составляющих:

а — нулевой последовательности (вариант 1); б — прямой и обратной последовательности; в — нулевой последовательности (вариант 2)

$\underline{CA} = \underline{C} - \underline{A}$ соответственно. На рис.3,б изображен треугольник линейных векторов $\underline{AB}$, $\underline{BC}$ и $\underline{CA}$, внутри которого показана исходная система фазных векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$. Из того же рисунка видно, что вектор $\underline{A}$ представляет собой сумму векторов $\underline{B} + \underline{AB}$, а вектор $\underline{C}$ является геометрической разностью векторов $\underline{B} - \underline{BC}$. Если подставить полученные выражения в формулы разложения для составляющих $\underline{A}_1$ и $\underline{A}_2$, то после несложных преобразований получим, что фазные значения векторов симметричных составляющих равны $\underline{A}_1 = (\underline{AB} - a^2 \underline{BC})/3$ и $\underline{A}_2 = (\underline{AB} - a \underline{BC})/3$. На рис.3,б у конца вектора $\underline{BC}$ построены вектора $a \underline{BC}$ и $a^2 \underline{BC}$. Вычитая по отдельности каждый из этих векторов из вектора $\underline{AB}$ мы получаем вектора $3\underline{A}_1$ и $3\underline{A}_2$. На приведенном рисунке они ограничены прямыми LP и LR . Симметричные составляющие $\underline{A}_1$ и $\underline{A}_2$ являются 1/3 частью соответствующего вектора.

В общем случае для нахождения векторов $3\underline{A}_1$ и $3\underline{A}_2$ нужно построить по обе стороны вектора $\underline{BC}$ треугольника линейных векторов исследуемой несимметричной системы равносторонние треугольники KPM и KRM , и затем соединить вершины P и R этих треугольников с концом вектора $\underline{AB}$ точкой L . Полученные при этом прямые LP и LR соответствуют искомым векторам $3\underline{A}_1$ и $3\underline{A}_2$. Заслуживают внимания некоторые выводы из этого построения.

Во-первых, значения составляющих прямой и обратной последовательностей определяются линейными векторами исследуемой системы и не зависят от взаимного расположения и значений фазных векторов, охваченных треугольником линейных векторов. Во-вторых, в случаях, когда система линейных векторов оказывается симметричной и представляет собой равносторонний треугольник, это означает, что такая система не содержит составляющих обратной последовательности. Несимметрия фазных векторов такой системы определяется только составляющими нулевой последовательности.

На данном обстоятельстве остановимся подробнее. Для этого рассмотрим еще один способ графического нахождения составляющих нулевой последовательности. Воспользуемся полученными ранее выражениями $\underline{A} = \underline{B} + \underline{AB}$ и $\underline{C} = \underline{B} - \underline{BC}$ и подставим их в формулу разложения для нахождения составляющей $\underline{A}_0$. В результате получается такое выражение $\underline{A}_0 = \underline{B} + (\underline{AB} - \underline{BC})/3$.

На основе этого выражения осуществим построение вектора $\underline{A}_0$ для произвольной несимметричной системы фазных векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$, изображенной на рис.3,в. Соединим вершины векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ треугольником KLM , стороны которого образуют систе-

му линейных векторов $\underline{AB}$, $\underline{BC}$ и $\underline{CA}$. Построим разность векторов $\underline{AB}-\underline{BC}$, которая изображается диагональю NM параллелограмма $KNLM$ со сторонами $NL \parallel KM$ и $KN \parallel ML$. Конец вектора разности лежит в точке N .

В заключение найдем вектор $\underline{A_0}$. Отделим $1/3$ часть вектора разности $\underline{AB}-\underline{BC}$, образованную отрезком O_1M с вершиной в точке O_1 . Складывая вектора $\underline{B}$ и $(\underline{AB}-\underline{BC})/3$, получаем результирующий вектор $\underline{A_0}$, конец которого находится в точке O_1 . Вектор $\underline{A_0}$ выходит из нулевой точки звезды фазных векторов, обозначенной буквой O . Из рис. 3, в видно, что точка O_1 удалена от вершины треугольника (точки M) на расстояние, равное $2/3$ длины медианы треугольника KLM . Отсюда следует еще один вывод.

Если точка O_1 совпадает с центром тяжести треугольника линейных векторов, то в фазных векторах исследуемой системы не содержится составляющих нулевой последовательности. По известной физической аналогии со свойствами центра тяжести треугольника такую систему векторов называют уравновешенной.

Заглядывая вперед отметим, что уравновешенная трехфазная система переменного тока характеризуется тем, что суммарное магнитное поле, создаваемое токами трех фаз, замыкается вокруг проводов той системы и не оказывает никакого влияния на расположенные поблизости объекты, как, например, соседние линии электропередачи и линии проводной связи. В реальных сетях полного отсутствия такого влияния достичь не удастся из-за несимметричного расположения фазных проводов на опорах линий. Однако это влияние не идет ни в какое сравнение с влиянием на близко проходящие линии токов замыкания на землю, образующих неуравновешенную систему токов в проводах линий.

2. Применение метода симметричных составляющих для определения токов и напряжений при повреждениях в трехфазных электрических системах

Трехфазные электрические системы переменного тока относятся к числу симметричных, так как собственные сопротивления входящих в нее основных элементов (генераторов, трансформаторов и двигателей) во всех трех фазах одинаковы. Для линий это равенство признается с учетом мер по выравниванию сопротивлений по фазам. При этом значения этих сопротивлений для напряжений различной последовательности могут существенно отличаться одно от другого. Для обозначения сопротивлений различной последовательности используют те же индексы, что и приведенные выше для векторов симметричных составляющих. Так, индуктивные сопротивления отдельных последовательностей записываются в виде X_1 , X_2 и X_0 . При вычислении аварийных токов и напряжений в сетях 6—220 кВ учитывают только индуктивные сопротивления основных элементов, так как активные сопротивления и емкостные проводимости у них невелики и не оказывают существенного влияния на результаты расчетов. Частный случай, когда требуется учет этих величин, всегда оговаривается особо.

Наиболее сильные расхождения между значениями индуктивных сопротивлений прямой и обратной последовательностей наблюдаются у вращающихся машин, генераторов и двигателей. Это объясняется тем, что во вращающихся машинах магнитное поле, создаваемое системой токов прямой последовательности, вращается в одном направлении с ротором, а поле, вызываемое системой токов обратной последовательности, вращается в противоположном направлении. Реакция ротора на воздействие поля статора получается различной. Так, у турбогенераторов в установившемся режиме сопротивление токам прямой последовательности оказывается довольно большим и равняется синхронному реактивному сопротивлению X_d . При внезапном КЗ оно падает и становится близким к сверхпереходному реактивному сопротивлению X'_d . Сопротивление обратной последовательности турбогенераторов приближается к этой же величине $X_2 = X_d$.

Сопротивление нагрузки, состоящей в основном из асинхронных двигателей, равняется в относительных единицах: $X_{1н}^* = 1,2$ — для прямой последовательности; $X_{2н}^* = 0,35$ — для обратной последовательности.

У статических элементов, трансформаторов и линий, значения сопротивления обратной последовательности не отличается от соответствующего сопротивления прямой последовательности.

Что касается сопротивлений нулевой последовательности, то для всех элементов сети они, как правило, сильно отличаются от сопротивлений двух других последовательностей. Исключением являются только отдельно стоящие реакторы, не связанные взаимоиנדукцией, для которых $X_{1p}=X_{2p}=X_{0p}$.

У вращающихся машин магнитные поля, создаваемые токами нулевой последовательности, никакого взаимодействия с ротором не создают, так как благодаря пространственному сдвигу статорных обмоток суммарное магнитное поле в расточке статора оказывается равным нулю. В результате сопротивление нулевой последовательности генераторов и двигателей определяется рассеянием в пазах и лобовых частях машин. Его значение получается намного меньше сопротивлений прямой и обратной последовательностей. В России сети генераторного напряжения работают с незаземленными нейтралями, и поэтому генераторы и двигатели не вводятся в расчетные схемы нулевой последовательности.

Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов зависят от их конструкции, схемы соединения обмоток и режима заземления нейтралей трансформаторов в сети. В тех случаях, когда магнитный поток нулевой последовательности замыкается по магнитопроводу, и токи нулевой последовательности протекают хотя бы по двум обмоткам трансформатора, сопротивление нулевой последовательности трансформатора равняется его сопротивлению прямой последовательности, т.е. $X_{0T}=X_{1T}$. При этом одна из обмоток может входить в соединение треугольником, из которого токи нулевой последовательности во внешние цепи выходить не будут. Если путь для токов нулевой последовательности через другие обмотки трансформатора отсутствует, то его сопротивление нулевой последовательности определяется конструкцией магнитопровода. В случае прохождения магнитного потока, обусловленного токами нулевой последовательности, по сердечнику трансформатора его сопротивление нулевой последовательности очень велико и принимается равным бесконечности, т.е. $X_{0T} = \infty$. Если же магнитное поле замыкается через окружающую среду и кожух трансформатора, то сопротивление нулевой последовательности получается намного меньшим и на практике составляет $X_{0T} = (10-20)X_{1T}$.

Сопротивление нулевой последовательности воздушных ЛЭП значительно отличается от сопротивлений прямой и обратной последовательностей за счет различного характера взаимоиנדукции между фазными проводами ЛЭП при протекании токов разной последовательности. При прохождении по ЛЭП токов прямой или обратной последовательности влияние взаимоиנדукции с соседними проводами вызывает снижение сопротивления фазы. Если по проводам линии текут токи нулевой последовательности, то взаимоиנדукция способствует увеличению сопротивления фазы линии и $X_{0л}$ становится больше, чем $X_{1л}=X_{2л}$. При наличии заземленных грозозащитных тросов на ЛЭП $X_{0л}$ заметно уменьшается за счет взаимоиנדукции между проводами линии и тросом. На двухцепных ЛЭП на $X_{0л}$ каждой фазы линии влияет направление токов нулевой последовательности в параллельной цепи. Так при внешних замыканиях на землю, когда токи нулевой последовательности текут по обеим цепям в одном направлении, магнитная связь между цепями вызывает значительное увеличение сопротивления нулевой последовательности каждой из фаз. При замыкании на землю соседней цепи и отключения ее выключателя на одном из концов, токи в параллельных цепях приобретают противоположные направления, что приводит к резкому снижению сопротивления нулевой последовательности. Подобный эффект получается при внешних замыканиях на землю, когда соседняя цепь выведена из работы и заземлена с обеих сторон. В качестве примеров соотношений $X_{0л}/X_{1л}$ фазы линии ниже приводятся усредненные данные, используемые при практических расчетах:

Одноцепная линия без троса	3,5
Одноцепная линия с заземленным стальным тросом	3,0
Двухцепная линия без тросов при параллельной работе обеих цепей	5,5
Двухцепная линия без тросов при отключенной и заземленной параллельной цепи	2,4

Конкретные значения сопротивления отдельных последовательностей для основных элементов электрических систем в достаточном объеме представлены в справочниках и специальной литературе по расчетам электромагнитных процессов в сетях [2]. Ограниченный объем данной книги не позволяет детально на этом остановиться. Однако конкретные сведения о сопротивлениях разной последовательности элементов сети, имеющие непосредственное отношение к вопросам, рассматриваемым в данной книге, даются по мере изложения материала.

Для дальнейшего изучения рассматриваемой темы весьма важно подчеркнуть, что в симметричной трехфазной системе сопротивлений напряжение любой из последовательностей вызывает протекание токов только той же последовательности. Поэтому такая система обладает свойством независимости симметричных составляющих различной последовательности. Другими словами, симметричные составляющие токов и напряжений любой из последовательностей не зависят от составляющих других последовательностей. Этот вывод и ранее принятое допущение о линейном характере сопротивлений элементов сети открывают путь к широкому применению при расчетах способа наложения. Сказанное выше является основой применяемой методики определения токов и напряжений при несимметричных повреждениях в электрических сетях трехфазного тока. При ее использовании полагают, что в месте повреждения действует несимметричная система напряжений, соответствующая характеру повреждения. После разложения этой системы напряжений на симметричные составляющие каждое из полученных напряжений симметричных составляющих должно быть приложено к соответствующему эквивалентному сопротивлению той же последовательности.

Так как каждая из систем этих напряжений симметрична, определение составляющих токов и напряжений данной последовательности производится для одной из фаз, находящейся, как правило, в более простых расчетных условиях по сравнению с другими фазами. Расчетные схемы замещения для каждой последовательности сводятся к эквивалентным схемам (рис.4), где E — эквивалентная ЭДС генераторов системы, $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$ — эквивалентные сопротивления системы для соответствующей последовательности, а U_1 , U_2 , U_0 , I_1 , I_2 и I_0 — симметричные составляющие напряжений и токов в месте повреждения.

Основным источником напряжения для схем всех последовательностей служат симметричные ЭДС генераторов системы. Они входят в схему прямой последовательности. Для эквивалентных схем обратной и нулевой последовательностей

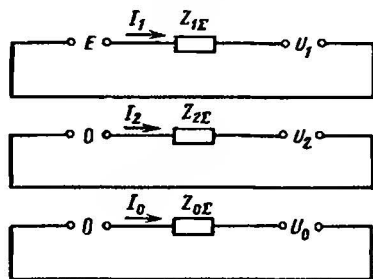


Рис. 4. Эквивалентные схемы замещения для определения токов и напряжений при несимметричных повреждениях в электрических сетях

источником являются симметричные составляющие напряжения соответствующей последовательности, значение которых также определяется ЭДС генераторов. В схеме прямой последовательности действуют два источника: эквивалентная ЭДС генераторов E и составляющая напряжения прямой последовательности в месте повреждения U_1 .

Наряду с расчетными схемами широко применяются основные расчетные уравнения, базирующиеся на тех же исходных расчетных условиях: $\underline{E} = \underline{I}_1 Z_{1\Sigma} + \underline{U}_1$; $0 = \underline{I}_2 Z_{2\Sigma} + \underline{U}_2$ и $0 = \underline{I}_0 Z_{0\Sigma} + \underline{U}_0$. Общее количество неизвестных в основных уравнениях равно шести (три тока и три напряжения). Недостающие три дополнительных уравнения составляются на основе зависимостей между напряжениями и токами в месте повреждения, характерных для каждого вида КЗ или нарушения симметричного режима. При дальнейшем изложении эти зависимости мы будем называть граничными условиями. Путем совместного решения основных и дополнительных уравнений определяют симметричные составляющие напряжений и токов в месте повреждения для выбранной опорной фазы. После этого, используя приведенные в предыдущем параграфе формулы образования или графический способ, находят полные величины несимметричных токов и напряжений для каждой фазы, сначала в месте повреждения, а затем их распределение по элементам сети.

С изложенных позиций рассмотрим, как соотносятся полные значения напряжений и токов и их симметричные составляющие при наиболее часто встречающихся или, как их обычно называют, типичных случаях несимметричных повреждений и нарушений нормального режима, возникающих в трехфазных электрических системах переменного тока.

Все виды несимметрии в такого рода сетях делятся на две категории — поперечной или продольной несимметрии. К первой категории относят КЗ. Это непредусмотренные нормальным режимом соединения между токоведущими частями разных фаз, а также соединения одной или двух фаз с "землей", которые сопровождаются протеканием больших токов повреждения. Ко второй категории относят аварийно образующиеся обрывы одной или двух фаз токопроводов в каком-либо элементе энергосистемы.

К основным относят случаи однократного нарушения симметрии системы. Если в системе имеют место одновременно несколько повреждений или нарушений симметрии одной или разных категорий, то такие случаи относят к категории многократной несимметрии.

рии. Таковыми являются сложные повреждения, как, например, КЗ с одновременным обрывом фазы в том же или другом месте. Для определения напряжений и токов при многократной несимметрии используют специальные приемы, с которыми частично познакомимся в конце следующего параграфа.

Для удобства анализа случаев однократной несимметрии часто выделяют так называемую особую фазу. Это фаза, состояние которой в условиях несимметрии отличается от состояния двух других.

Например, при замыкании между двумя фазами — это неповрежденная фаза, при однофазном замыкании на землю таковой является фаза, соединившаяся с "землей".

После сказанного можем перейти к разбору типичных случаев поперечной несимметрии, к которым относятся КЗ следующих трех видов:

- замыкание между двумя фазами, сокращенно двухфазное КЗ;
- замыкание одной из фаз на землю, сокращенно однофазное КЗ;
- замыкание двух фаз на землю в одном месте, сокращенно двухфазное КЗ на землю.

Возможны также такие замыкания двух фаз на землю, когда первая из фаз соединяется с "землей" в одной точке, а вторая фаза — в другой точке, удаленной на некоторое расстояние. Такой вид короткого замыкания мы рассмотрим отдельно. При дальнейшем разборе будем для наглядности специально вводить в буквенные обозначения напряжений токов и их симметричных составляющих специальные индексы, отражающие вид КЗ. Индексы размещаются вверх буквенного символа с правой стороны. Индекс состоит из одной или двух цифр, помещенных в скобки. Так, напряжения и токи при двухфазном КЗ обозначаются $\underline{U}_k^{(2)}$, $\underline{I}_k^{(2)}$, при однофазном КЗ $\underline{U}_k^{(1)}$, $\underline{I}_k^{(1)}$, при замыканиях двух фаз на землю $\underline{U}_k^{(1,1)}$, $\underline{I}_k^{(1,1)}$. По аналогии симметричному КЗ между тремя фазами присвоен индекс, содержащий цифру 3: $\underline{U}_k^{(3)}$, $\underline{I}_k^{(3)}$.

Отметим еще раз, что в действующих электрических сетях энергоснабжения активные сопротивления элементов системы намного меньше их индуктивных сопротивлений. Поэтому при дальнейшем изложении мы будем принимать в расчет только индуктивные сопротивления фаз.

3. Расчетные выражения и векторные диаграммы при основных видах несимметричных коротких замыканий

Двухфазные короткие замыкания. Первым рассмотрим характерный случай короткого замыкания, происшедший между двумя фазами на радиальной линии электропередачи (рис.5). Принципиальная схема такого двухфазного КЗ между фазами *В* и *С* показана на рис.5,а, где: $E_{сА}$, $E_{сВ}$ и $E_{сС}$ — эквивалентные ЭДС генераторов системы, $I_{кА}^{(2)}$, $I_{кВ}^{(2)}$ и $I_{кС}^{(2)}$ — фазные токи в месте возникновения КЗ. Из рисунка видно, что токам КЗ такого вида присущи следующие граничные условия: ток особой фазы *А* равен нулю, т.е. $I_{кА}^{(2)} = 0$, а токи фаз *В* и *С* равны по значению и противоположны по направлению $I_{кВ}^{(2)} = -I_{кС}^{(2)}$. Сумма фазных токов равна нулю:

$$I_{кА}^{(2)} + I_{кВ}^{(2)} + I_{кС}^{(2)} = 0 + I_{кВ}^{(2)} - I_{кВ}^{(2)} = 0.$$

Это свидетельствует об отсутствии в токах повреждения составляющих нулевой последовательности. Для определения сим-

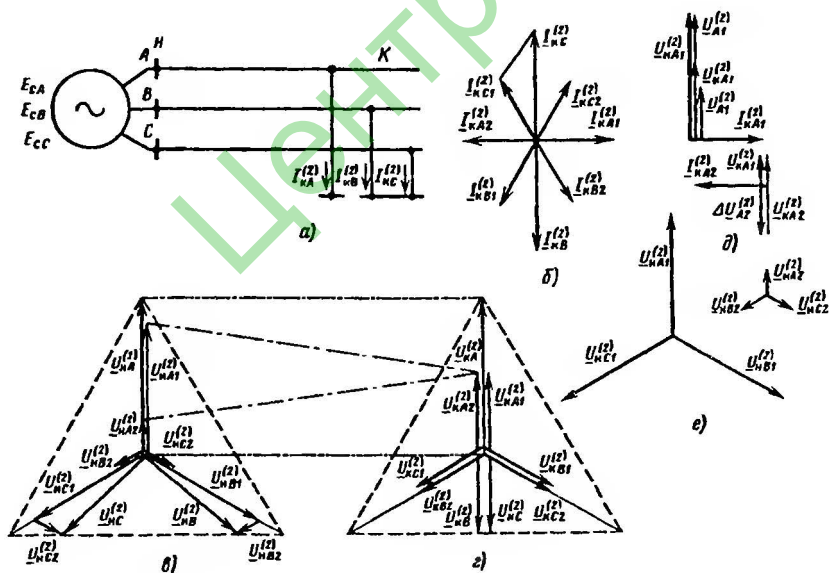


Рис. 5. Двухфазное короткое замыкание между фазами *В* и *С*.

а — поясняющая схема; б — векторная диаграмма токов КЗ; в — векторная диаграмма напряжений в начале линии; г — векторная диаграмма напряжений в месте КЗ; д — полученные симметричные составляющие напряжений фазы *А* в начале линии; е — системы векторов напряжений симметричных составляющих в начале линии

метричных составляющих токов прямой и обратной последовательностей воспользуемся формулами разложения:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} &= (\underline{I}_{\kappa A}^{(2)} + a \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} + a^2 \underline{I}_{\kappa C}^{(2)})/3 = (0 + a \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} - a^2 \underline{I}_{\kappa B}^{(2)})/3 = \\ &= \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} (a - a^2)/3 = j \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} / \sqrt{3}. \end{aligned}$$

Итоговое выражение получено с помощью рис. 2, из которого несложно установить, что $a - a^2 = j \sqrt{3}$.

Соответственно

$$\begin{aligned} \underline{I}_{\kappa A2}^{(2)} &= (\underline{I}_{\kappa A}^{(2)} + a^2 \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} + a \underline{I}_{\kappa C}^{(2)})/3 = (0 + a^2 \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} - a \underline{I}_{\kappa B}^{(2)})/3 = \\ &= \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} (a^2 - a)/3 = -j \underline{I}_{\kappa B}^{(2)} / \sqrt{3}. \end{aligned}$$

На рис.5, б показано взаимное расположение векторов $\underline{I}_{\kappa B}^{(2)}$ и $\underline{I}_{\kappa C}^{(2)}$ и систем векторов симметричных составляющих токов двухфазного КЗ.

Перейдем к построению векторной диаграммы напряжений в месте КЗ. Граничным условием для напряжений в этой точке является равенство нулю линейного напряжения между фазами В и С, т.е. $\underline{U}_{\kappa BC}^{(2)} = 0$. Чтобы найти симметричные составляющие напряжений в месте КЗ вспомним выражения, служащие для определения векторов симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей из линейных векторов несимметричной системы, которые были представлены в предыдущем параграфе: $3\underline{A}_1 = \underline{AB} - a^2 \underline{BC}$ и $3\underline{A}_2 = \underline{AB} - a \underline{BC}$. Примем их для определения симметричных составляющих искомых напряжений. соответственно запишем:

$$3\underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa AB}^{(2)} - a^2 \underline{U}_{\kappa BC}^{(2)} \quad \text{и} \quad 3\underline{U}_{\kappa A2}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa AB}^{(2)} - a \underline{U}_{\kappa BC}^{(2)}.$$

Но $\underline{U}_{\kappa BC}^{(2)} = 0$ и поэтому симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей будут равны: $\underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa A}^{(2)} / 2$. Перед тем как перейти к определению полных значений фазных напряжений в месте повреждения, отметим, в частности, что в связи с отсутствием в сети токов нулевой последовательности при таком виде КЗ, напряжение в нулевой точке фазных напряжений в месте КЗ совпадает с нулем эквивалентных ЭДС генераторов системы. Это позволяет

исключить из рассмотрения составляющие напряжений нулевой последовательности, возникновение которых возможно в сетях электрических систем с незаземленной нейтралью. В сетях 110 кВ и выше, работающих с глухим заземлением нейтрали, появление составляющих напряжений нулевой последовательности при данном виде КЗ невозможно.

На основании изложенного можно считать, что $\underline{U}_{\kappa A}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} + \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)}$. Из граничного условия $\underline{U}_{\kappa BC}^{(2)} = 0$ следует, что фазные напряжения $\underline{U}_{\kappa B}^{(2)}$ и $\underline{U}_{\kappa C}^{(2)}$ равны друг другу и направлены в одну сторону. Действительно, из $\underline{U}_{\kappa BC}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa B}^{(2)} - \underline{U}_{\kappa C}^{(2)} = 0$ следует, что $\underline{U}_{\kappa B}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa C}^{(2)}$. Используя формулы образования получаем:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{\kappa B}^{(2)} &= \underline{U}_{\kappa C}^{(2)} = a^2 \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} + a \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)} = (a^2 + a) \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \\ &= - \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = - \underline{U}_{\kappa A}^{(2)} / 2.\end{aligned}$$

Имея в виду, что в любой точке рассматриваемой сети напряжение фазы *A* остается равным фазной ЭДС эквивалентного генератора системы, можно изобразить векторную диаграмму напряжений в месте КЗ, как это показано на рис.5,в. На том же рисунке нанесены системы векторов симметричных составляющих напряжений в этой точке. Пунктиром показан треугольник линейных ЭДС эквивалентного генератора системы. Для анализа релейной защиты помимо векторной диаграммы напряжений в месте КЗ важно знать векторную диаграмму напряжений в начале линии, где устанавливается аппаратура релейной защиты. Построим диаграмму для рассматриваемого случая. Значение фазного напряжения в начале линии отличается от напряжения в месте КЗ на значение падения напряжения, вызванного протеканием тока КЗ через сопротивление линии. Эту разницу можно найти, определив, как изменяются симметричные составляющие напряжения при переходе из точки *K* в точку *H*. Выше было сказано, что сопротивления прямой и обратной последовательностей линии имеют индуктивный характер и одинаковы по значению, т.е. $X_{1л} = X_{2л}$. Поэтому падения напряжений от токов прямой и обратной последовательностей равны соответственно:

$$\Delta \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = j X_{1\Gamma} \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} \text{ и } \Delta \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)} = j X_{1\Gamma} \underline{I}_{\kappa A2}^{(2)} = -j X_{1\Gamma} \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}.$$

На рис.5,д произведено построение векторов $\Delta \underline{U}_{\kappa A1}^{(2)}$ и $\Delta \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)}$ и последующее их сложение с векторами $\underline{U}_{\kappa A1}^{(2)}$ и $\underline{U}_{\kappa A2}^{(2)}$, взятых из векторной диаграммы в месте КЗ. Полученные суммарные вектора представляют собой симметричные составляющие напряжения фазы A в начале линии $\underline{U}_{\text{н}A1}^{(2)}$ и $\underline{U}_{\text{н}A2}^{(2)}$. Из рис.5,е видно, что при переходе из точки K в точку H составляющие напряжений прямой последовательности возросли, а составляющие напряжений обратной последовательности уменьшились. Это свидетельствует о снижении несимметрии напряжений по мере приближения к источнику питания. На рис.5,в изображена векторная диаграмма фазных напряжений в начале линии, а также образующие их системы симметричных составляющих.

В заключение составим расчетное выражение для вычисления симметричной составляющей прямой последовательности тока фазы A в месте КЗ. Выше было установлено, что $\underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \underline{U}_{\kappa A2}^{(2)}$.

Из основных выражений имеем: $\underline{U}_{\kappa A1}^{(2)} = E_{сА} - jX_{1\Gamma} \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}$ и $\underline{U}_{\kappa A2}^{(2)} = -jX_{2\Gamma} \underline{I}_{\kappa A2}^{(2)}$, но $\underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} = -\underline{I}_{\kappa A2}^{(2)}$, и тогда

$$E_{сА} - jX_{1\Gamma} \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} = jX_{2\Gamma} \underline{I}_{\kappa A2}^{(2)}.$$

$$\text{Отсюда } \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} = E_{сА} / j(X_{1\Gamma} + X_{2\Gamma}).$$

В этом выражении $X_{1\Gamma}$ и $X_{2\Gamma}$ — результирующие сопротивления прямой и обратной последовательности между эквивалентным генератором системы и точкой КЗ. Штрихпунктирные линии, проведенные от рис.5,в к рис.5,з, могут рассматриваться как эпюры напряжений особой фазы и относящиеся к ней симметричные составляющие напряжений прямой и обратной последовательностей, показывающие характер их изменения при перемещении вдоль трассы линии.

Однофазное КЗ. Замыкания одной фазы на землю, сопровождающиеся значительными токами короткого замыкания, могут возникать только в сетях, в которых нейтрали всех или части трансформаторов постоянно соединены с землей. Такие сети

называют сетями с глухо заземленной нейтралью. В нашей стране к ним относят сети высокого напряжения 110 кВ и выше, а также большинство сетей напряжением до 1 кВ.

Разберем случай однофазного КЗ на радиальной линии высокого напряжения в подобной сети. Принципиальная схема такого КЗ показана на рис.6,а. Граничным условием для токов повреждения является, $I_{KB}^{(1)} = I_{KC}^{(1)} = 0$. Особой является фаза А, по которой проходит ток короткого замыкания. Так как токи в фазах В и С отсутствуют, симметричные составляющие тока КЗ в поврежденной фазе А в соответствии с формулами разложения получаются равными по значению и направлению: $I_{KA1}^{(1)} = I_{KA2}^{(1)} = I_{K0}^{(1)} = I_{KA}^{(1)} / 3$. Ток повреждения, поступающий в землю $I_3 = 3 I_{K0}^{(1)} = I_{KA}^{(1)}$.

На рис.6,б показана векторная диаграмма тока фазы А и системы токов симметричных составляющих при данном виде КЗ. Перед тем, как перейти к построению диаграммы напряжений, остановимся на одном весьма важном обстоятельстве.

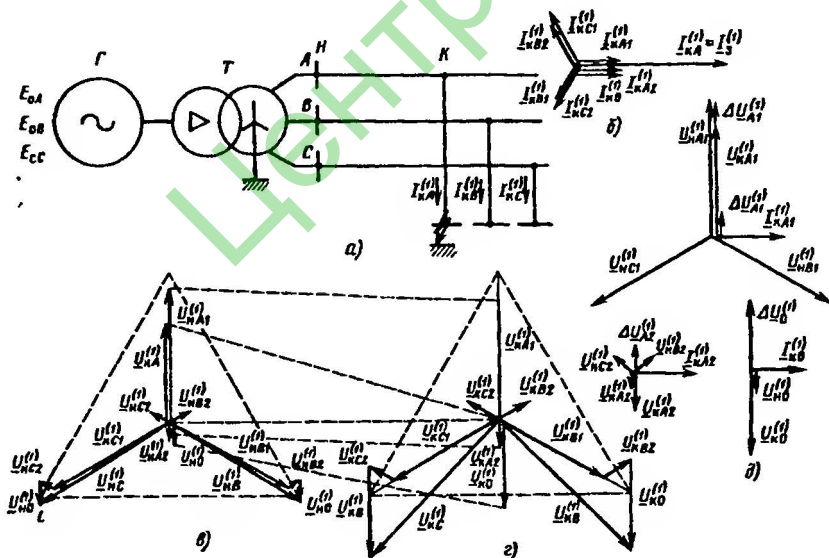


Рис. 6. Однофазное короткое замыкание на фазе А:

а — поясняющая схема; б — векторная диаграмма токов; в — векторная диаграмма напряжений в начале линии; г — векторная диаграмма напряжений в месте КЗ; д — построение симметричных составляющих напряжений в начале линии

При анализе коротких замыканий, вызванных соединением фаз линии с землей, нельзя забывать о том, что ток, поступающий в землю в месте КЗ, проходит не только через землю, но и по проводам близко проходящих параллельных линий и другим проводящим элементам, имеющим электрическую связь с землей, в том числе по защитным тросам, проводам телефонных линий связи, железнодорожным путям и металлическим трубопроводам. Возникающее при этом сопротивление токам нулевой последовательности, обозначаемое как $X_{0л}$, значительно превышает значение сопротивления прямой последовательности линии $X_{1л}$. Отношение $X_{0л} / X_{1л}$ зависит от многих факторов и практически может находиться в пределах 2 — 5,5. Для одиночных радиальных линий $X_{0л}$ принимается в среднем равным 3,5 $X_{1л}$. Для линий другого исполнения отношение $X_{0л} / X_{1л}$ дается в справочниках. Встречающиеся различия сопротивлений отдельных последовательностей для других элементов электрических систем также приводятся в справочной и технической литературе.

Приступим к построению диаграммы напряжений в месте КЗ. Граничное условие для напряжений в этой точке — это $\underline{U}_{кА}^{(1)} = 0$. Отсюда: $\underline{U}_{кА1}^{(1)} = -(\underline{U}_{кА2}^{(1)} + \underline{U}_{к0}^{(1)})$.

Из основных уравнений известно, что

$$\underline{U}_{кА2}^{(1)} = -jX_{2\Sigma} \underline{I}_{кА2}^{(1)} \text{ и } \underline{U}_{кА0}^{(1)} = -jX_{0\Sigma} \underline{I}_{к0}^{(1)}, \text{ но}$$

$$\underline{I}_{кА2}^{(1)} = \underline{I}_{к0}^{(1)} \text{ и тогда } \underline{U}_{к0} / \underline{U}_{кА2} = X_{0\Sigma} / X_{2\Sigma}, \text{ а}$$

$$\underline{U}_{кА1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \underline{I}_{кА1}^{(1)}.$$

На основе полученных выражений на рис.6,г построены векторная диаграмма фазных напряжений в месте КЗ и системы векторов симметричных составляющих этих напряжений. Продолжая составление диаграмм напряжений, определим напряжения в начале линии. Для этого на рис.6,д произведено построение векторов симметричных составляющих напряжений для начала линии путем сложения соответствующих векторов напряжений в точке КЗ и падений напряжения в линии от токов симметричных составляющих на всем ее протяжении. На рис.6,е даны суммарная диаграмма фазных напряжений в начале линии и систем векторов симметричных составляющих напряжений для той же точки. Штриховые линии, соединяющие рис.6,в с рис.6,г,

отражают характер изменения напряжения особой фазы и его симметричных составляющих при перемещении по трассе линии.

Внимательный читатель несомненно обратит внимание на то, что полные фазные напряжения неповрежденных фаз в месте КЗ превышают значения этих напряжений в начале линии. Заметно также, что угол между указанными фазными напряжениями в точке КЗ меньше, чем в начале линии, и в нашем конкретном случае близок к 90° . В то же время угол между соответствующими фазными напряжениями в начале линии приближается к 120° . Все это объясняется различиями в соотношении реактивных сопротивлений X_0/X_1 соответствующих участков сети между источниками питания и рассматриваемой точкой.

В заключение найдем выражение для вычисления значений симметричных составляющих тока КЗ при данном виде повреждения. Для этого обратимся к ранее полученному выражению для напряжения фазы A в месте КЗ:

$$\underline{U}_{KA1}^{(1)} = \underline{U}_{KA1}^{(1)} + \underline{U}_{KA2}^{(1)} + \underline{U}_{KA0}^{(1)} = 0.$$

Учитывая исходные общие выражения, для напряжений симметричных составляющих получаем, что

$$\underline{E}_{cA} = -j \underline{I}_{KA1}^{(1)} X_{1\Sigma} - j \underline{I}_{KA}^{(1)} X_{2\Sigma} - j \underline{I}_{K0}^{(1)} X_{0\Sigma} = 0$$

$$\text{но } \underline{I}_{KA1}^{(1)} = \underline{I}_{KA2}^{(1)} = \underline{I}_{K0}^{(1)},$$

$$\text{и тогда } \underline{I}_{KA1}^{(1)} = \underline{E}_{cA} / j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}).$$

Используя найденное значение можно вычислить значения полного тока КЗ и составляющих напряжений в любой точке сети.

Двухфазное КЗ на землю. Рассмотрим случай короткого замыкания между фазами B и C , сопровождающегося одновременно замыканием на землю в том же месте. Подобно ранее описанным видам повреждений имеется в виду такое КЗ на радиальной линии в сети с глухозаземленной нейтралью. Поясняющая схема рассматриваемого КЗ приведена на рис.7,а.

Особой фазой в рассматриваемом случае является фаза A . Граничными условиями для данного вида КЗ являются: $\underline{I}_{KA}^{(1,1)} = 0$, $\underline{U}_{KB}^{(1,1)} = 0$ и $\underline{U}_{KC}^{(1,1)} = 0$. Эти же условия можно представить с помощью симметричных составляющих токов и напряжений:

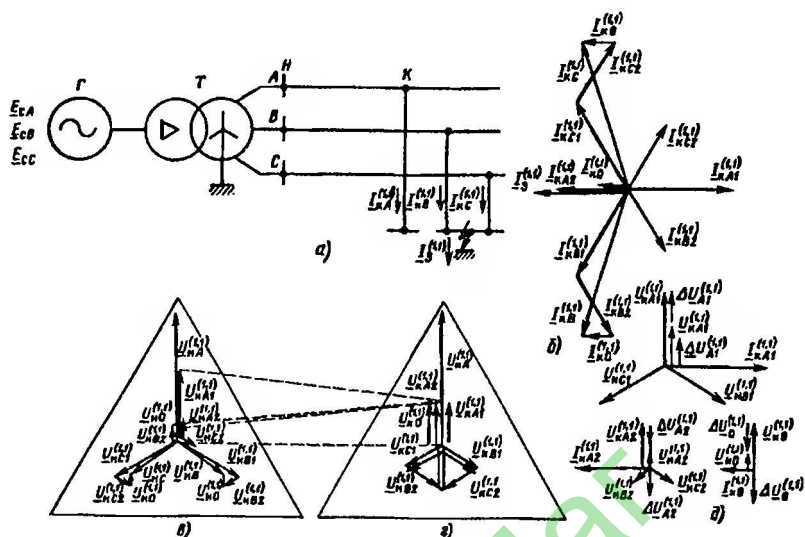


Рис. 7. Двухфазное короткое замыкание на землю в фазах В и С.

а — поясняющая схема; б — векторная диаграмма токов; в — векторная диаграмма напряжений в начале линии; г — векторная диаграмма напряжений в месте КЗ; д — построение симметричных составляющих напряжений в начале линии

$$\underline{I}_{KA1}^{(1.1)} + \underline{I}_{KA2}^{(1.1)} + \underline{I}_{K0}^{(1.1)} = 0 \text{ и } \underline{U}_{KA1}^{(1.1)} = \underline{U}_{KA2}^{(1.1)} = \underline{U}_{KA0}^{(1.1)} = \underline{U}_{KA}^{(1.1)} / 3.$$

Из последнего условия следует, что

$$\underline{I}_{KA2}^{(1.1)} j X_{2\Sigma} = \underline{I}_{K0}^{(1.1)} j X_{0\Sigma}, \text{ т.е. } \underline{I}_{KA2}^{(1.1)} / \underline{I}_{K0}^{(1.1)} = X_{0\Sigma} / X_{2\Sigma}.$$

На основе полученного равенства и граничного уравнения для симметричных составляющих тока фазы А, можно установить, что

$$\underline{I}_{K0}^{(1.1)} = - \underline{I}_{KA1}^{(1.1)} X_{2\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})$$

и

$$\underline{I}_{KA2}^{(1.1)} = - \underline{I}_{KA1}^{(1.1)} X_{02} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}).$$

Из этих выражений, используя основное уравнение

$$\underline{U}_{KA}^{(1.1)} = \underline{E}_{CA} - \underline{I}_{KA1}^{(1.1)} j X_{1\Sigma} \text{ и равенство } \underline{U}_{KA1}^{(1.1)} = \underline{U}_{K0}^{(1.1)},$$

найдем выражение для определения значения составляющей прямой последовательности тока КЗ при рассматриваемом виде повреждения:

$$I_{KA1}^{(1.1)} = E_{cA} / [X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} X_{0\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})] .$$

Зная эту составляющую можно определить другие симметричные составляющие тока КЗ, а с их помощью полные токи КЗ в фазах и нуле, а также значения всех напряжений в месте КЗ и других точках.

На основе полученных соотношений на рис.7,б построена векторная диаграмма токов для данного вида КЗ, а на рис.7,г и в показаны диаграммы напряжений в точке КЗ и в начале линии. На рис.7,д выполнено построение симметричных составляющих для начала линий. Как показывает анализ, модули токов поврежденных фаз могут отличаться от модуля тока $I_{KA1}^{(1.1)}$ в $1,5 - \sqrt{3}$ раз.

При $X_{0\Sigma} = X_{2\Sigma}$ эта величина равна 1,5, а при увеличении $X_{0\Sigma}$ может приближаться к $\sqrt{3}$. Угол между векторами токов поврежденных фаз может составлять от 60 до 180° и также зависит от значения $X_{0\Sigma}$. Этот угол возрастает при увеличении $X_{0\Sigma}$ и при $X_{0\Sigma} \rightarrow \infty$ становится равным 180°, что равносильно двухфазному КЗ без земли. Пунктирные линии, проведенные от рис.7,в к рис.7,г, служат эпюрами симметричных составляющих напряжения особой фазы. В табл.1 сведены расчетные выражения для вычисления токов при основных видах КЗ.

Наряду с рассмотренными выше основными случаями несимметричных КЗ являющимися примерами однократной поперечной несимметрии, в распределительных сетях 6—35 кВ часто наблюдается более сложное повреждение — КЗ двух фаз на землю в разных точках сети. Оно представляет собой пример двухкратной несимметрии.

Возможность такого КЗ обусловлена тем, что в таких сетях нейтраль трансформаторов либо совсем не заземляется, либо связывается с землей через специальные компенсирующие индуктивные сопротивления. Поэтому ток, возникающий при замыкании одной из фаз на землю, ограничивается единицами или десятками ампер. Значение этого тока зависит от емкости сети и степени компенсации емкостного тока с помощью упомянутых выше компенсирующих устройств. Подобные сети называют сетями с малым током замыкания на землю. Режим работы с замыканием одной фазы на землю допускается в них на определенное время, составляющее несколько часов и более. При этом напряжение на неповрежденных фазах относительно земли значительно повышается. Это нередко приводит к пробое изоляции в другой точке сети, и возникает короткое замыкание, сопровождающееся током большого значения.

Таблица 1

Вид повреждения	Симметричная составляющая прямой последовательности тока фазы А	Модули полных токов КЗ и симметричные составляющие тока КЗ обратной и нулевой последовательности			Составляющая нулевой последовательности
		Модуль полного тока КЗ	Составляющая обратной последовательности	Составляющая нулевой последовательности	
Двухфазное КЗ между фазами В и С	$I_{\text{кв1}}^{(2)} = \frac{E_{\text{сА}}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$	$ I_{\text{кв}}^{(2)} = I_{\text{кв}}^{(2)} = \sqrt{3} I_{\text{кв1}}^{(2)} $	$I_{\text{кв2}}^{(2)} = -I_{\text{кв1}}^{(2)}$	Отсутствует	
Однофазное КЗ на фазе А	$I_{\text{кв1}}^{(0)} = \frac{E_{\text{сА}}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$	$I_{\text{кв}}^{(0)} = 3I_{\text{кв1}}^{(0)}$	$I_{\text{кв2}}^{(0)} = I_{\text{кв1}}^{(0)}$	$I_{\text{кв0}}^{(0)} = I_{\text{кв1}}^{(0)}$	
Двухфазное КЗ на землю между фазами В и С	$I_{\text{кв1}}^{(0,1)} = \frac{E_{\text{сА}}}{j\left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)}$	$ I_{\text{кв}}^{(0,1)} = I_{\text{кв}}^{(0,1)} = (0,5-1,73) \times I_{\text{кв1}}^{(0,1)} $ $\times I_{\text{кв1}}^{(0,1)} = 1,73 I_{\text{кв1}}^{(0,1)} \times \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} - X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} - X_{0\Sigma})^2}}$	$I_{\text{кв2}}^{(0,1)} = I_{\text{кв1}}^{(0,1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	$I_{\text{кв0}}^{(0,1)} = I_{\text{кв1}}^{(0,1)} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	

Остается добавить, что в районах вечной мерзлоты на севере России, в таком же режиме работают сети 110 кВ.

В качестве примера разберем случай КЗ фаз *B* и *C* в разных точках на радиальной линии распределительной сети 35 кВ (рис.8,а). Нейтраль обмотки трансформатора *T*, связывающего сеть 35 кВ с энергосистемой, не заземлена.

Место замыкания на землю фазы *B* (точка *K1*) находится вблизи шин питающей подстанции. Место повреждения фазы *C* (точка *K2*) находится на некотором удалении, определяемом длиной участка линии между точками *K1* и *K2*. Из схемы видно, что на участке линии между шинами (точка *H*) и первым местом повреждения на фазе *B* (точка *K1*) ток КЗ протекает по проводам фаз *B* и *C* линии. При этом направление тока в фазе *C* противоположно току в фазе *B*, благодаря чему ток в земле на этом участке не возникает. Между точками *K1* и *K2* ток КЗ проходит только по проводу фазы *C* и возвращается в точку *K1* через землю.

Токи и напряжения для данного примера могут быть легко вычислены, даже без использования метода симметричных составляющих. Ток КЗ создается линейной ЭДС системы $\underline{E}_{сBC} = \underline{E}_{сB} - \underline{E}_{сC}$, которую в начальный момент КЗ можно с достаточной степенью точности считать равной линейному напряжению $\underline{U}_{BC}$ на шинах питающей подстанции.

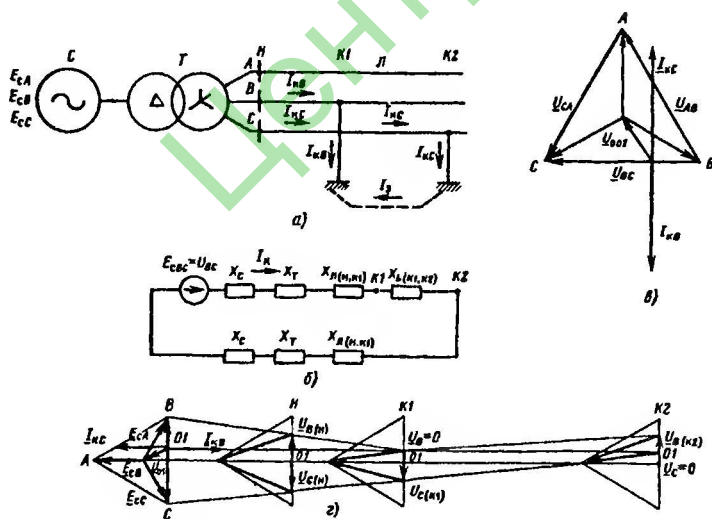


Рис. 8. Короткое замыкание двух фаз на землю в разных точках сети:

а — поясняющая схема; б — расчетная схема для определения тока КЗ; в — векторная диаграмма токов КЗ в линии и диаграмма напряжений в начале сети; г — векторные диаграммы напряжений в характерных точках на трассе линии

Сопротивление цепи КЗ образуется из суммы двух частей (рис.8,б). Первая часть — это удвоенная сумма сопротивлений системы, трансформатора T и участка линии до точки $K1$, совпадающая с расчетным сопротивлением для двухфазного КЗ без земли в той же точке $K1$. Оно, как известно, складывается из приравненных по значению сопротивлений прямой и обратной последовательностей системы, трансформатора T и начального участка линии L до точки $K1$, обозначенных X_c , X_T и $X_{л(Н.К1)}$. Вторая часть — это индуктивное сопротивление X_L петли провод — земля участка линии от точки $K1$ до точки $K2$, обозначенное $X_{L(K1.K2)}$.

Как показывает анализ отношение X_L/X_1 для одноцепной линии составляет примерно 1,8. Таким образом, результирующее расчетное сопротивление

$$X_{расч} = 2X_c + 2X_T + 2X_{л(Н.К1)} + 1,8X_{л(K1.K2)}.$$

Буквы в скобках обозначают граничные точки соответствующих участков линии. Модуль тока КЗ подсчитывается по формуле $I_k = I_{кВ} = I_{кС} = U_{BC} / X_{расч}$.

В связи с тем, что индуктивное сопротивление X_L линии мало отличается от удвоенного сопротивления прямой последовательности X_1 линии в практических расчетах ток КЗ часто определяют, как и ток двухфазного КЗ без земли в более удаленном месте от шин питающей подстанции (точка $K2$). При построении векторных диаграмм напряжений нужно учитывать то обстоятельство, что напряжения поврежденных фаз в обоих местах замыканий на землю равны нулю. Напряжение нейтрали трансформатора оказывается сдвинутым по отношению к земле на величину падения напряжения в фазе, связанной с ближайшим местом замыкания на землю. В нашем примере это фаза B (рис.8,в). Сдвиг нейтрали трансформатора T

$$U_{0.01} = I_{кВ} j(X_c + X_T + X_{л(Н.К1)}) - E_{сВ}.$$

На рис.8,г утолщенными линиями показаны векторные диаграммы треугольника напряжений в характерных точках — на шинах питающей подстанции (точка H) и в местах замыкания на землю фазы B (точка $K1$) и фазы C (точка $K2$).

Был рассмотрен вариант КЗ, когда оба места замыкания на землю находятся на одной линии. При наличии разветвленной сети линий весьма вероятно возникновение таких замыканий на разных линиях. В радиальных сетях, питающихся с шин одной подстанции расчет токов и напряжений мало отличается от рас-

смотренного выше. Различие вызвано тем, что путь тока КЗ, проходящего через землю, лежит не непосредственно от одной точки замыкания на землю к другой, а под проводами поврежденных фаз по трассе линий и под шинами питающей подстанции. Поэтому в формулу для расчета полного тока КЗ должна вводиться сумма индуктивных сопротивлений X_L участков обеих линий. Сопротивление каждого участка определяется расстоянием от шин подстанции до соответствующего места замыкания на землю.

Расчет токов замыкания двух фаз на землю в разных точках в сложной сети с несколькими питающими подстанциями простыми способами выполнить невозможно. Приходится применять специальные методы расчета с использованием симметричных составляющих, а также другие способы. Они описаны в соответствующей технической литературе [2], так как ограниченный объем не дает возможности изложить эти способы в данной книге.

Еще раз можно отметить, что для описанных выше примеров простейших случаев замыканий двух фаз на землю в разных точках сети, результаты расчетов по формулам для определения полного тока КЗ, выведенным с помощью метода симметричных составляющих, получаются точно такими же, как полученные нами без применения указанного метода.

4. Трансформация токов короткого замыкания

При наличии трансформаторов в цепи короткого замыкания токи повреждения на разных сторонах трансформатора могут различаться не только по значению, но и по фазе. Это зависит от схемы соединения обмоток трансформатора.

В сетях 6 кВ и выше применяется ограниченное число схем соединения обмоток трансформаторов; так для двухобмоточных трансформаторов — это схемы звезда-звезда, треугольник-треугольник и звезда-треугольник. При этом в сетях с большим током замыкания на землю у определенной части трансформаторов нулевая точка обмотки, соединенной в звезду, заземляется наглухо. У многообмоточных трансформаторов схемы соединения обмоток выполняются аналогично.

Следует иметь в виду, что изменение токов по фазе происходит только в случае соединения обмоток по схеме звезда-треугольник. В отечественной практике у таких трансформаторов используется 11 группа соединения обмоток. Остановимся на примерах трансформации токов КЗ через двухобмоточный трехфазный трансформатор, выполненный по схеме звезда-треугольник 11 группы с заземленной нейтралью со стороны звезды. Сначала рассмотрим, как трансформируются токи симметричных составляющих разной последовательности (рис.9).

Из рисунка видно, что при переходе токов со стороны звезды

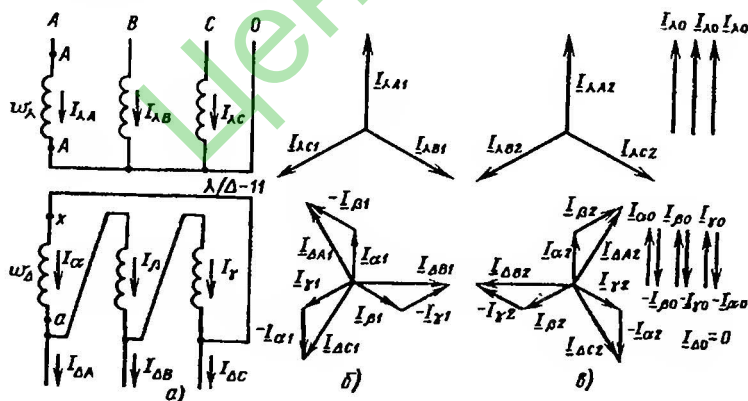


Рис. 9. Трансформация систем токов симметричных составляющих при соединении обмоток трансформатора по схеме $\Delta/\Delta-11$:

a — поясняющая схема; b — трансформация токов прямой последовательности; c — трансформация токов обратной последовательности; d — трансформация токов нулевой последовательности

на сторону треугольника ток прямой последовательности поворачивается на 30° против часовой стрелки. Ток обратной последовательности поворачивается также на 30° , но по часовой стрелке. Токи нулевой последовательности замыкаются в обмотке, соединенной в треугольник, и во внешние цепи не поступают. Из этого следует, что токи на стороне треугольника не содержат составляющих нулевой последовательности.

Трансформация симметричных составляющих напряжений разной последовательности проходит аналогично трансформации токов. Соотношение токов КЗ при трансформации зависит от коэффициента трансформации по напряжению K , который связан с числом витков соответствующих обмоток трансформатора следующим образом:

$K = U_{\lambda\Delta} / U_{\Delta\Delta} = w_\lambda \sqrt{3} / w_\Delta$, где w — число витков обмотки, а индексы звезда и треугольник относятся к соответствующей обмотке. С учетом этого соотношения определим значение токов $I_{\Delta A}$, $I_{\Delta B}$ и $I_{\Delta C}$, поступающих из обмотки, соединенной в треугольник, во внешнюю сеть

$$I_{\Delta A} = (I_{\lambda A} - I_{\lambda B}) w_\lambda / w_\Delta = (I_{\lambda A} - I_{\lambda B}) K / \sqrt{3};$$

$$I_{\Delta B} = (I_{\lambda B} - I_{\lambda C}) K / \sqrt{3};$$

$$I_{\Delta C} = (I_{\lambda C} - I_{\lambda A}) K / \sqrt{3}.$$

Перейдем к построению векторных диаграмм токов и напряжений для основных видов короткого замыкания за трансформатором по схеме звезда-треугольник 11 группы.

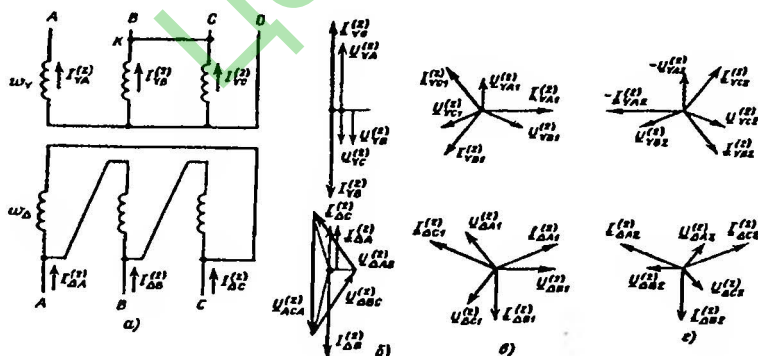


Рис. 10. Двухфазное КЗ между фазами В и С на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток λ/Δ - 11:

а — поясняющая схема; б — векторная диаграмма токов и напряжений на стороне звезды (вверху) и на стороне треугольника (внизу); в — то же прямой последовательности; г — обратной последовательности

Вначале остановимся на случае двухфазного КЗ между фазами *В* и *С* на стороне звезды, показанном на рис.10. Векторная диаграмма напряжений на стороне треугольника построена с учетом падения напряжения в обмотках трансформатора от протекающих токов КЗ. Соотношение между полными токами КЗ на разных сторонах трансформатора находится с помощью приведенных выше формул. В результате получим:

$$\underline{I}_{\Delta A}^{(2)} = -\underline{I}_{\Delta B}^{(2)} K / \sqrt{3};$$

$$\underline{I}_{\Delta B}^{(2)} = 2 \underline{I}_{\Delta B}^{(2)} K / \sqrt{3};$$

$$\underline{I}_{\Delta C}^{(2)} = -\underline{I}_{\Delta B}^{(2)} K / \sqrt{3}.$$

Подобно предыдущему на рис.11 построены векторные диаграммы токов и напряжений для двухфазного КЗ между фазами *В* и *С* на выводах треугольника.

Значения полных токов в фазах звезды по отношению к то-

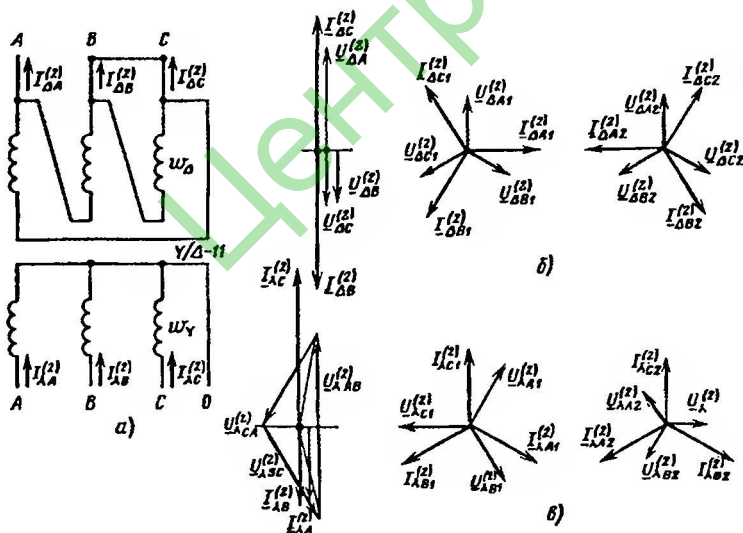


Рис. 11. Двухфазное КЗ между фазами *В* и *С* на стороне треугольника трансформатора с соединением обмоток $\Delta/\Delta-11$:

а — поясняющая схема; *б* — векторные диаграммы полных токов и напряжений и их симметричных составляющих на стороне треугольника; *в* — то же на стороне звезды

кам в месте КЗ выражаются следующим образом:

$$\underline{I}_{\Delta A}^{(2)} = \underline{I}_{\Delta B}^{(2)} / K \sqrt{3}, \quad \underline{I}_{\Delta B}^{(2)} = \underline{I}_{\Delta B}^{(2)} / K \sqrt{3} \text{ и}$$

$$\underline{I}_{\Delta C}^{(2)} = -2 \underline{I}_{\Delta B}^{(2)} / K \sqrt{3}.$$

Рассмотрим еще как проходит трансформация токов и напряжений при однофазном КЗ на фазе A со стороны звезды, нейтраль которой заземлена. Векторные диаграммы для этого случая КЗ изображены на рис.12. Из него видно, что составляющие нулевой последовательности тока КЗ трансформируются в обмотку, соединенную в треугольник, но при поступлении на внешние выводы трансформатора складываются в сумму, равную нулю. Поэтому в линейных токопроводах на стороне треугольника нет токов нулевой последовательности. Составляющие прямой и обратной последовательностей суммируются на выводах треугольника. При этом полные токи фаз A и C получаются равными по значению, но противоположными по направлению, а ток фазы B оказывается равным нулю. По отношению к току повреждения на стороне звезды токи на стороне треугольника составляют:

$$\underline{I}_{\Delta A}^{(1)} = \underline{I}_{\Delta A}^{(1)} K / \sqrt{3}, \quad \underline{I}_{\Delta B}^{(1)} = 0 \text{ и } \underline{I}_{\Delta C}^{(1)} = -\underline{I}_{\Delta A}^{(1)} K / \sqrt{3}.$$

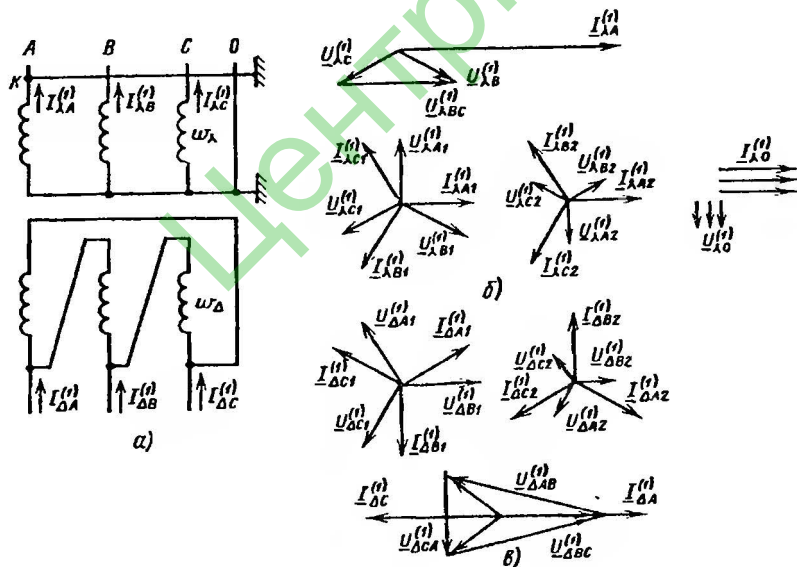


Рис. 12. Однофазное КЗ на фазе A со стороны звезды трансформатора с соединением обмоток Δ/Δ - II и заземленной нейтралью обмотки, собранной в звезду:

a — поясняющая схема; b — векторные диаграммы полных токов и напряжений и их симметричных составляющих на стороне звезды; c — то же на стороне треугольника

В разветвленных сетях высокого напряжения при однофазных КЗ может получаться такое распределение токов повреждения, когда они протекают не только по проводам поврежденной фазы, но и по проводам фаз, непосредственно не связанным с повреждением. Это зависит от режима заземления нейтралей трансформаторов в сети. На рис.13 показан предельный случай такого распределения, когда схема сети образована источником питания с повышающим трансформатором, нейтраль которого не заземлена, линией передачи и приемной подстанцией, оснащенной понижающим трансформатором с заземленной нейтралью. При однофазном КЗ на линии ток КЗ, протекающий в земле, возвращается к источнику питания и месту КЗ по проводам всех трех фаз линии. При этом токи в неповрежденных фазах на участке между приемной подстанцией и местом КЗ являются токами нулевой последовательности, а на участке между местом КЗ и источником питания те же токи представляют собой сумму составляющих токов прямой и обратной последовательностей; составляющие тока нулевой последовательности на этом участке отсутствуют. Подтверждением этих слов служит векторная диаграмма токов симметричных составляющих для каждого участка.

Рассмотренный случай относится к исключительным, так как по действующим правилам в нормальном режиме сетей 110 кВ и выше разземление нейтралей трансформаторов со стороны питающей части системы не допускается. Отсутствие токов нулевой последовательности в неповрежденных фазах линии наблюдается еще в таких весьма редких случаях, когда отношения X_0/X_1 по обе стороны от места повреждения оказываются одинаковыми.

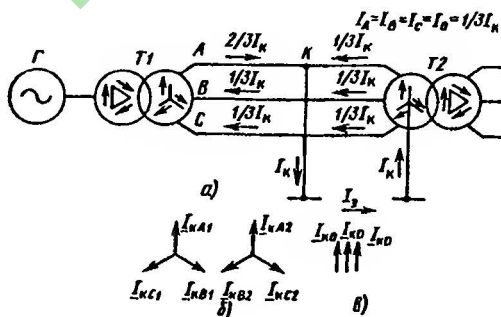


Рис. 13. Предельный случай распределения токов повреждения при однофазном КЗ:

а — поясняющая схема; б — векторные диаграммы симметричных составляющих токов на головном участке линии; в — то же со стороны приемного конца

5. Расчетные выражения и векторные диаграммы при разрывах фаз

Обрывы фаз относятся к часто встречающимся повреждениям в электрических сетях, хотя и более редким, чем короткие замыкания. Они представляют собой случаи продольной несимметрии. Наиболее типичными из них считаются разрывы одной или двух фаз, возникающие при обрывах проводов на линиях электропередачи, а также при неполнофазном включении или отключении выключателей высокого напряжения 110 кВ и выше. Иногда неполнофазные режимы применяют в плановом порядке для сохранения бесперебойного электроснабжения при осуществлении пофазного ремонта проводов линии электропередачи или одного из однофазных трансформаторов, входящих в трехфазную группу. Кратковременно неполнофазные режимы используются в цикле пофазного АПВ (ОАПВ) линий 220 кВ и выше.

При расчетах неполнофазных режимов пользуются основными уравнениями метода симметричных составляющих. Применительно к месту разрыва эти уравнения, полагая сопротивления отдельных последовательностей чисто индуктивными, могут быть записаны в следующей форме:

$$\Delta \underline{U}_{LA1} = \underline{E}_{A\Sigma} - jX_{L1\Sigma} I_{LA1}, \quad \Delta \underline{U}_{LA2} = 0 - jX_{L2\Sigma} I_{LA2}$$

$$\text{и } \Delta \underline{U}_{L0} = 0 - jX_{L0\Sigma} I_{L0},$$

где $\underline{E}_{A\Sigma}$ — результирующая ЭДС генераторов системы по концам электропередачи относительно места разрыва; $\Delta \underline{U}_{LA1}$, $\Delta \underline{U}_{LA2}$ и $\Delta \underline{U}_{L0}$ — падения напряжения отдельных последовательностей в месте разрыва; $X_{L1\Sigma}$, $X_{L2\Sigma}$ и $X_{L0\Sigma}$ — результирующие индуктивные сопротивления фаз относительно этого места, а I_{LA1} , I_{LA2} и I_{L0} — токи симметричных составляющих, протекающие по ним. Нижний индекс L показывает, что приведенные уравнения относятся к случаям продольной несимметрии.

Разрыв одной фазы. Граничными условиями для случая разрыва фазы A являются: $I_{LA}^{(1)} = 0$, $\Delta \underline{U}_{LB}^{(1)} = 0$ и $\Delta \underline{U}_{LC}^{(1)} = 0$.

Верхний индекс (1) обозначает обрыв одной фазы. Обращаясь к формулам разложения можно заключить, что в рассматриваемом случае: $\Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{LA2}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{L0}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{LA}^{(1)} / 3$.

После подстановки этих величин в основные уравнения найдем, что

$$\Delta \underline{I}_{LA2}^{(1)} = -\Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} / jX_{L2\Sigma} \quad \text{и} \quad \Delta \underline{I}_{L0}^{(1)} = -\Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} / jX_{L0\Sigma}.$$

Учитывая, что

$$\underline{I}_{LA}^{(1)} = \underline{I}_{LA1}^{(1)} + \underline{I}_{LA2}^{(1)} + \underline{I}_{L0}^{(1)} = 0$$

установим, что

$$\underline{I}_{LA1}^{(1)} = -\left(\underline{I}_{LA2}^{(1)} + \underline{I}_{L0}^{(1)}\right) \quad \text{или} \quad \underline{I}_{LA1}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} (1 / jX_{L2\Sigma} + 1 / jX_{L0\Sigma}),$$

$$\text{а} \quad \Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} = \Delta \underline{I}_{LA1}^{(1)} jX_{L2\Sigma} X_{L0\Sigma} / (X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}).$$

Если подставить это выражение в уравнение $\Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} = \underline{E}_{A\Sigma} - \Delta \underline{I}_{LA1}^{(1)} jX_{L1\Sigma}$, то после соответствующих преобразований получим, что $\underline{I}_{LA1}^{(1)} = \underline{E}_{A\Sigma} / j[X_{L1\Sigma} X_{L0\Sigma} / (X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})]$.

В последнем выражении в случае разрыва на линии электропередачи, связывающей две части энергосистемы, $\underline{E}_{A\Sigma}$ представляет собой разность ЭДС генераторов этих частей с разных концов линии. При разрыве на тупиковой линии $\underline{E}_{A\Sigma}$ равна эквивалентному значению ЭДС генераторов на стороне питания. Затем находят составляющие $\underline{I}_{LA2}^{(1)}$, $\underline{I}_{L0}^{(1)}$ и полные токи в фазах.

При упрощенных расчетах на тупиковых линиях иногда используют метод наложения. Для этого вводят в месте разрыва продольную ЭДС $\underline{E}_{\text{нп}}$, которую определяют по значению предшествующего тока нагрузки нормального режима с помощью выражения: $\underline{E}_{\text{нп}} = 3\underline{I}_{\text{нг}} / (1 / X_{L1\Sigma} + 1 / X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})$.

Соответствующие падения напряжения отдельных последовательностей берутся равными $\Delta \underline{U}_{LA1}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{L2}^{(1)} = \Delta \underline{U}_{L0}^{(1)} = \underline{E}_{\text{нп}}$ и по ним находят симметричные составляющие токов в месте разрыва. Входящие в суммарные сопротивления отдельных последовательностей в месте разрыва реактивные сопротивления нагрузки $X_{1\text{нг}}$ и $X_{2\text{нг}}$ вычисляют с помощью известных формул, Ом:

$$X_{1\text{нг}} = 1,2 U_{\text{ном}}^{(2)} / S_{\text{ном}} \quad \text{и} \quad X_{2\text{нг}} = 0,35 U_{\text{ном}}^{(2)} / S_{\text{ном}},$$

где $S_{\text{ном}}$ — номинальная полная мощность нагрузки, МВ·А; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, кВ. Эти сопротивления складывают с соответствующими сопротивлениями остальных элементов системы и вводят в расчет.

Полученные значения симметричных составляющих токов суммируют с исходными значениями предшествующего тока нагрузки и получают полные токи в фазах в условиях обрыва фазы A . Естественно, что суммарный ток в фазе A в этом случае должен равняться нулю.

На рис.14 показаны векторные диаграммы токов и напряжений в месте обрыва фазы A на тупиковой линии в сети с большим током замыкания на землю. Построение начинают с диаграммы токов, вычисляемых с помощью полученных выше уравнений. Сначала определяют симметричные составляющие токов $I_{L1}^{(1)}$, $I_{L2}^{(1)}$ и $I_{L0}^{(1)}$, а затем полные токи в фазах (рис.14,б). После

этого находят симметричные составляющие падений напряжения до места разрыва и строят векторную диаграмму напряжений на стороне питания. Определяют составляющие напряжений всех трех последовательностей в месте разрыва $\Delta U_{L1}^{(1)}$, $\Delta U_{L2}^{(1)}$ и $\Delta U_{L0}^{(1)}$. При-

бавляя их к соответствующим напряжениям построенной диаграммы перед местом обрыва, выстраивают векторную диаграмму напряжений по другую сторону от места обрыва.

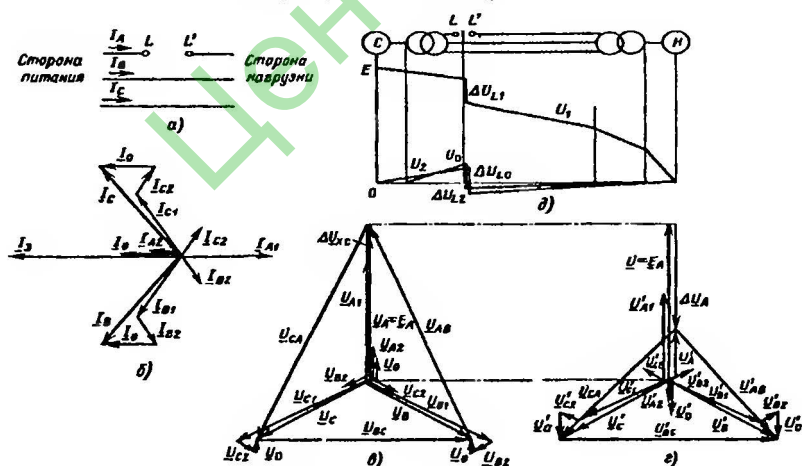


Рис. 14. Обрыв фазы A на радиальной линии:

a — поясняющая схема; b — векторная диаграмма токов в линии; c — векторная диаграмма напряжений в точке L со стороны питания; z — векторная диаграмма напряжений в точке L' со стороны нагрузки; d — эпюра напряжений разной последовательности

Полученные векторные диаграммы рис.14,в и г относятся к точкам L и L' , находящимся непосредственно в месте разрыва. Применяя методику, использовавшуюся при построении векторных диаграмм напряжений для типичных случаев КЗ (см. рис.5-7), можно определить симметричные составляющие напряжений по концам линии на шинах питающей и приемной подстанций. Подобным же образом находят составляющие напряжений на стороне низшего напряжения этих подстанций, приведенные к стороне высшего напряжения. С помощью полученных величин можно построить эпюры напряжений, показывающие как изменяются значения симметричных составляющих напряжений разной последовательности вдоль линии. Пример таких эпюр показан на рис.14,д. Вид эпюр относится к случаю, когда нейтрали трансформаторов заземлены наглухо, как на питающем, так и на приемном конце линии.

Разрыв двух фаз рассмотрен на примере такого повреждения на фазах B и C одного из элементов сети. Такому повреждению присущи следующие граничные условия: $I_{LB}^{(2)} = 0$, $I_{LC}^{(2)} = 0$ и $\Delta U_{LA}^{(2)} = 0$. Здесь верхний индекс (2) показывает, что эти граничные условия относятся к случаю обрыва двух фаз. Из формул разложения можно установить, что при протекании тока только по одной из фаз трехфазной системы симметричные составляющие этого тока связаны следующей зависимостью: $I_{LA1}^{(2)} = I_{LA2}^{(2)} = I_{L0}^{(2)} = I_{LA}^{(2)} / 3$. Из граничных условий следует, что $\Delta U_{LA}^{(2)} = \Delta U_{LA1}^{(2)} + \Delta U_{LA2}^{(2)} + \Delta U_{L0}^{(2)} = 0$ или $\Delta U_{LA1}^{(2)} = -(\Delta U_{LA2}^{(2)} + \Delta U_{L0}^{(2)})$. Заменяя в этих уравнениях слагающие падений напряжения на их выражения из основных уравнений и решая их относительно $I_{LA1}^{(2)}$, получаем:

$$I_{LA1}^{(2)} = \underline{E}_A / j(X_{L1\Sigma} + X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}),$$

а также

$$\Delta U_{LA1}^{(2)} = j(X_{L2} + X_{L0\Sigma}) I_{LA1}^{(2)}.$$

На рис.15 показаны векторные диаграммы¹ напряжений по обе стороны от места обрыва и диаграмма тока неповрежденной фазы и его симметричных составляющих, построенные для слу-

¹ На рисунках 14 и 15 у буквенных обозначений токов и напряжений не проставлены верхние индексы (1) и (2), а в нижних индексах отсутствует буква L , указывающая, что мы имеем дело с обрывом фаз. Это сделано для того, чтобы не перегружать и без того сложные обозначения на рисунках. В расчетных формулах эти знаки сохранены, чтобы подчеркнуть, к какому виду повреждения эти выражения относятся.

чая разрыва двух фаз на тупиковой линии. Порядок построения подобен принятому при создании диаграмм, показанных на рис.14. Аналогично выполнены и эпюры напряжений симметричных составляющих (рис.15,д).

В табл. 2 приведены основные расчетные выражения для определения симметричных составляющих токов при разрыве одной или двух фаз и падений напряжения по месту разрыва.

Такие повреждения, как обрывы фаз на линиях высокого напряжения приводят нередко к одновременному возникновению короткого замыкания на линии. Чаще всего оборвавшийся провод линии замыкается на провода других фаз или падает на землю. Такого рода повреждения относятся к случаям множественной несимметрии.

Расчет получающихся при этом токов и напряжений обычными приемами, которые используются для расчетов однократной несимметрии, не всегда возможен. Однако для отдельных случаев они применимы. В частности, к ним относится довольно распространенный вид повреждения — обрыв провода на радиальной линии с одновременным однофазным коротким замыканием в сети с большим током замыкания на землю.

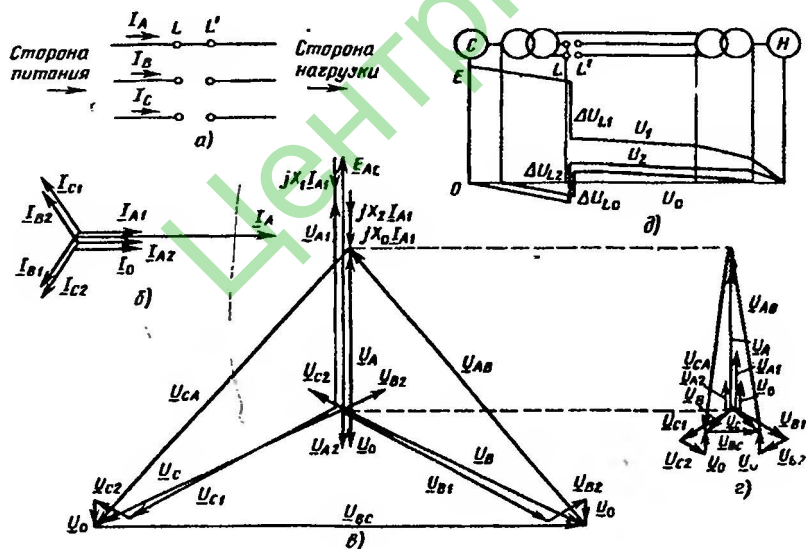


Рис. 15. Обрыв двух фаз В и С на радиальной линии:

а — поясняющая схема; б — векторная диаграмма токов; в — векторная диаграмма напряжений перед местом обрыва со стороны питания (точка L); г — векторная диаграмма напряжений за местом обрыва со стороны нагрузки (точка L'); д — эпюры напряжений разной последовательности

Таблица 2

Вид повреждения	Симметричная составляющая прямой последовательности тока фазы A			Падение напряжения в месте разрыва для фазы A	
	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность	Прямая последовательность	Полная величина падения напряжения
Разрыв одной фазы A	$I_{A1}^{(1)} = \frac{E_{cA}}{j \left(X_{L1\Sigma} + \frac{X_{L2\Sigma} X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}} \right)}$	$I_{A2}^{(1)} = -I_{A1}^{(1)} \times \frac{X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}$	$I_{A0}^{(1)} = I_{A1}^{(1)} \times \frac{X_{L2\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}$	$\Delta U_{LA}^{(1)} = j I_{A1}^{(1)} \times \frac{X_{L2\Sigma} - X_{L0\Sigma}}{X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma}}$	$\Delta U_{LA}^{(1)} = 3 \Delta U_{LA1}^{(1)}$
Разрыв двух фаз B и C	$I_{A1}^{(2)} = \frac{E_{cA}}{j(X_{L1\Sigma} + X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})}$	$I_{A2}^{(2)} = I_{A1}^{(2)}$	$I_{A0}^{(2)} = I_{A1}^{(2)}$	$\Delta U_{LA}^{(2)} = j I_{A1}^{(2)} \times (X_{L2\Sigma} + X_{L0\Sigma})$	$\Delta U_{LA}^{(2)} = 0$

Рассмотрим такой случай на конкретном примере, показанном на рис.16. На радиальной линии $Л$, питающей приемную подстанцию с одним трансформатором $Т$, произошел обрыв провода фазы A вблизи шин питающей подстанции. Оборвавшийся провод лег на землю, вызвав однофазное КЗ, подпитываемое через трансформатор $Т$ приемного конца.

Представим граничные условия для токов, поступающих со стороны системы, в виде уравнений $I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_0 = 0$, $I_B = a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_0 = -I_{L0}$ и $I_C = a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_0 = -I_{k0}$. Из них можно определить соотношения между отдельными симметричными составляющими, а именно $I_{A1} = I_{A2}$, $I_0 = -2I_{A1}$, $I_0 = -2I_{k0}/3$ и $I_{k0} = 3I_{A1}$. На рис.16 показано также распределение этих токов по схеме сети.

Граничным условием для напряжений в месте КЗ является равенство нулю напряжения фазы A , т.е. $U_{KA} = 0$. Учитывая это, составляющую напряжения нулевой последовательности в месте КЗ можно найти из равенства: $U_{k0} = (U_{KB} + U_{KC})/3$.

Подставим вместо U_{KB} и U_{KC} их выражения, полученные с помощью симметричных составляющих токов и напряжений, действующих в сети. ЭДС генераторов системы E_{cA} , E_{cB} и E_{cC} приняты равными напряжениям на шинах питающей подстанции U_A , U_B и U_C . Обозначим расчетные реактивные сопротивления системы на шинах питающей подстанции через X_{1c} , X_{2c} и X_{0c} , а соответствующие сопротивления линии и трансформатора — $X_{1л}$, $X_{2л}$, $X_{0л}$ и X_T . После подстановки всех величин получим такое выражение: $U_{k0} = (U_{KB} + U_{KC})/3 = (a^2 U_A - ja^2 I_{A1} X_{1c} - j I_{A2} X_{2c} - j I_0 X_{0c} + a U_A - ja I_{A1} X_{1c} - ja^2 I_{A2} X_{2c} - j I_0 X_{0c})/3 = -j I_{k0} (X_{0л} + X_T)$.

Подставим вместо I_{A2} , I_0 и I_{k0} их выражения через I_{A1} :

$$[(a^2 + a)U_A - j(a^2 + a)I_{A1}X_{1c} - j(a^2 + a)I_{A1}X_{2c} - 2 \cdot 2jI_{A1}X_{0c}]/3 = -j3 I_{A1}(X_{0л} + X_T).$$

После всех преобразований получим формулу для вычисления составляющей $I_{A1} = U_A / [X_{1c} + X_{2c} + 4X_{0c} + 9(X_{0л} + X_T)]$, а ток в месте КЗ $I_{k0} = 3I_{A1}$.

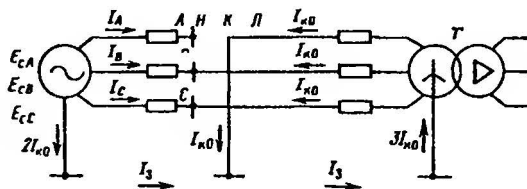


Рис. 16. Обрыв фазы A с одновременным однофазным КЗ на радиальной линии

6. Выполнение расчетов токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях и неполнофазных режимах

В данном параграфе приведены примерные расчеты токов и напряжений для нескольких характерных случаев коротких замыканий и обрыва фазы в радиальной схеме сети, изображенной на рис.17,а.

Рассматриваемая сеть состоит из тупиковой линии $Л$, работающей на напряжении 110 кВ, и приемной понижающей подстанции с одним трансформатором $Т$, к которому подключена в основном силовая нагрузка (электродвигатели). Питание сети осуществляется от энергосистемы, представленной на схеме эквивалентным генератором. Наличие заземления у этого генератора является условным отображением того факта, что сети 110 кВ энергосистемы работают в режиме глухого заземления нейтралей обмоток 110 кВ большинства трансформаторов.

Ниже приводятся основные исходные данные рассчитываемой сети. Питающая энергосистема характеризуется максимальной мощностью КЗ в месте подключения линии $Л$, равной $S_k^{(3)} = 3000$ МВ·А. Реактивное сопротивление нулевой последо-

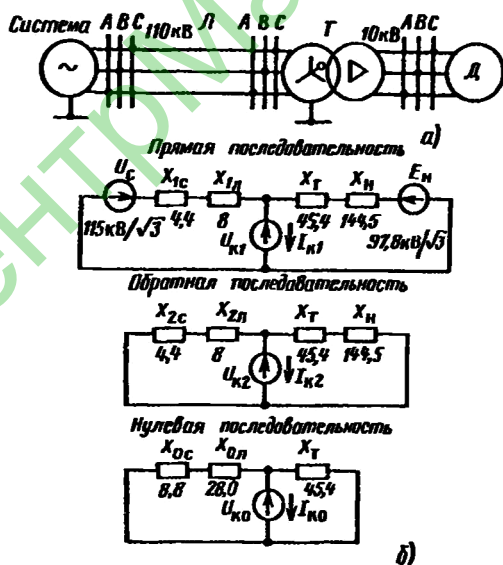
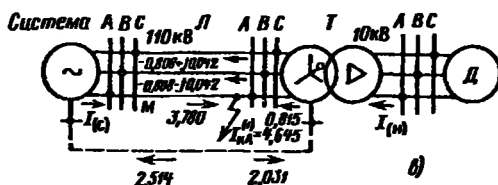


Рис. 17. К расчету несимметричного КЗ в радиальной сети 110 кВ:

а — упрощенная схема сети
б — расчетные схемы замещения сети для симметричных составляющих разной последовательности при КЗ в конце линии; в — распределение полных токов КЗ по пролетам линии при однофазном КЗ на фазе А вблизи приемной подстанции



вательности энергосистемы превышает в 2 раза соответствующее сопротивление прямой последовательности. Линия Л имеет длину 20 км. Удельное реактивное сопротивление прямой последовательности принято равным среднему статистическому значению и составляет $x_{1л}=0,4$ Ом/км. Удельное реактивное сопротивление нулевой последовательности также взято среднее, т.е. $x_{0л} = 1,4$ Ом/км.

Трансформатор Т на напряжение 110/10 кВ обладает пропускной мощностью 32 МВ·А, а его напряжение КЗ $e_k = 11$ %.

Нагрузка подключена к стороне 10 кВ, а полная мощность нагрузки равна мощности трансформатора Т. Индуктивное сопротивление нагрузки имеет среднестатистические значения, которыми считаются: для прямой последовательности в установившемся режиме $x_{1н} \% = 120$ %, а в начальном режиме $x''_{1н} \% = 35$ %, для обратной последовательности оно тоже взято равным $x_{2н} \% = 35$ %. Сверхпереходная ЭДС нагрузки составляет 85 % расчетного рабочего напряжения сети, принятого равным 115 кВ. Активные сопротивления элементов системы не учитываются.

Все расчеты ведутся в именованных единицах при рабочем напряжении, которое действует в расчетном месте сети, как это принято делать при выборе параметров релейной защиты. Все случаи КЗ рассчитываются для начального момента КЗ. Нагрузочные режимы при обрыве фазы определяются для установившегося режима сети.

В соответствии с изложенным исходные значения реактивных сопротивлений элементов сети получаются следующими:

питающая энергосистема: $X_{1с} = X_{2с} = jU^2/S_*^{(3)} = j115^2/3000 = j4,4$ Ом; $X_{0с} = 2 X_{1с} = j8,8$ Ом;
 линия Л: $X_{л1} = X_{л2} = j0,4 \cdot 20 = j8$ Ом; $X_{л0} = j1,4 \cdot 20 = j28$ Ом;
 трансформатор Т: $X_{1т} = X_{2т} = X_{0т} = j0,11 \cdot 115^2/32 = j45,4$ Ом;
 нагрузка: $X_{1н} = j1,2 \cdot 115^2/32 = j495$ Ом; $X''_{1н} = j0,35 \cdot 115^2/32 = j144,6$ Ом; $X_{2н} = j0,35 \cdot 115^2/32 = j144,6$ Ом; $E_n = 0,85 \cdot 115 = 97,8$ кВ.

Необходимые расчетные выражения, используемые для определения токов и напряжений и их симметричных составляющих, взяты из предыдущих параграфов данной книги.

Начнем с расчета замыкания на землю фазы А линии Л вблизи шин 110 кВ приемной подстанции.

Однофазное КЗ на фазе А линии Л. На рис.17,6 приведены расчетные схемы замещения сети для отдельных последовательностей, составленных относительно рассматриваемого места КЗ. Найдем значения тока КЗ для начального момента времени. Так как все сопротивления в схемах замещения являются индуктивными, все токи и их составляющие в поврежденной фазе будут располагаться на одной

оси. Поэтому на время вычисления их значений комплексный коэффициент j можно не учитывать. С помощью этих схем определим суммарные результирующие сопротивления отдельных последовательностей: $X_{1\Sigma} = 12,4 \cdot 190/202,4 = 11,6$ Ом, $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma} = 11,6$ Ом, $X_{0\Sigma} = 36,5 \cdot 45,5/82,2 = 20,3$ Ом.

Расчетное напряжение с учетом начальной ЭДС, создаваемой двигателями нагрузки, составляет $U_{\text{расч}} = (115 \cdot 190 + 97,8 \cdot 12,4)/202,4 = 114$ кВ. Определим величину составляющей прямой последовательности полного тока КЗ в месте повреждения: $I_{\text{кА1}}^{(1)} = 114/(11,6 +$

$+ 11,6 + 20,3) \sqrt{3} = 1,515$ кА, а $I_{\text{кА1}}^{(1)} = I_{\text{кА2}}^{(1)} = I_{\text{к0}}^{(1)}$. Полный ток в месте КЗ: $I_{\text{кА}}^{(1)} = 3 I_{\text{к0}}^{(1)} = I_3 = 3 \cdot 1,515 = 4,545$ кА. Перейдем к распределению токов по лучам схем замещения отдельных последовательностей.

Прямая последовательность. Ток со стороны питающей энергосистемы $I_{\text{кА1(с)}}^{(1)}$ зависит от разности между напряжением питания, задаваемым генераторами энергосистемы, и напряжением $U_{\text{кА1}}^{(1)}$ в месте КЗ.

Ток $I_{\text{кА1(н)}}^{(1)}$ со стороны нагрузки в свою очередь зависит от разности между ЭДС, создаваемой двигателями нагрузки, и напряжением $U_{\text{кА1}}^{(1)}$. Найдем значения этих токов. Напряжение прямой последовательности в месте КЗ $U_{\text{кА1}}^{(1)} = I_{\text{кА1}}^{(1)} (X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}) = 1,515(11,6 + 20,3) = 48,3$ кВ. Ток $I_{\text{кА1(с)}}^{(1)} = (115/\sqrt{3} - 48,3)/12,4 = 1,470$ кА. Ток $I_{\text{кА1(н)}}^{(1)} = (97,8/\sqrt{3} - 48,3)/190 = 0,045$ кА.

Из схем замещения видно, что составляющие обратной и нулевой последовательности тока КЗ распределяются по соответствующим лучам схемы обратно пропорционально сопротивлениям этих лучей.

Таким образом, $I_{\text{кА2(с)}}^{(1)} = 1,515 \cdot 190/202,4 = 1,422$ кА, $I_{\text{кА2(н)}}^{(1)} = 1,515 \cdot 12,4/202,4 = 0,093$ кА; $I_{\text{кА0(с)}}^{(1)} = 1,515 \cdot 45,4/82,2 = 0,838$ кА, $I_{\text{кА0(н)}}^{(1)} = 1,515 \cdot 36,8/82,2 = 0,677$ кА.

Полные токи, протекающие по земле, равны соответственно: в сторону системы $3I_{\kappa 0(c)}^{(1)} = 2,514$ кА, а в сторону нагрузки $3I_{\kappa 0(n)}^{(1)} = 2,031$ кА. При этом по проводу фазы *A* идут токи: со стороны системы $I_{\kappa A(c)}^{(1)} = 3,730$ кА, а со стороны нагрузки $I_{\kappa A(n)}^{(1)} = 0,815$ кА. Значения токов, текущих по неповрежденным фазам *B* и *C*, и их распределение находятся с помощью формул образования, приведенных в § 1. Получены следующие результаты. В фазе *B* протекает ток $I_{\kappa B}^{(1)} = (-0,5 - j0,867)1,470 + (-0,5 - j0,867)1,422 + 0,838 = (-0,608 - j0,042)$ кА. Ток в фазе *C* $I_{\kappa C}^{(1)} = (-0,5 + j0,867)1,470 + (-0,5 - j0,867)1,422 + 0,838 = (-0,608 + j0,042)$ кА.

На рис.17,в показано распределение токов по проводам линии при замыкании на землю фазы *A* вблизи шин приемной подстанции.

Приведенные расчеты показывают, что влияние подпитки места КЗ от двигателей нагрузки незначительно. Поэтому дальнейшие расчеты токов КЗ будем проводить, пренебрегая этой подпиткой. Это значительно упрощает выполнение всей работы.

Для того чтобы представить себе, как изменяется ток короткого замыкания при перемещении места однофазного КЗ на фазе *A* ближе к питающей энергосистеме, рассмотрим еще два случая такого КЗ. Первое место — это середина линии *Л*: однофазное КЗ в точке *N*, а второе место — однофазное КЗ непосредственно у шин питающей подстанции в точке *M*.

Схемы замещения для обоих случаев приведены на рис.18. Из схем замещения исключены элементы, относящиеся к подпитке места КЗ от двигателей нагрузки. В расчетах определялся только полный ток КЗ и его распределение по проводам фазы *A* в обе стороны. Это вызвано тем, что для выбора параметров настройки защиты от замыканий на землю, устанавливаемой по концам линии, требуется знание только токов нулевой последовательности I_0 . А они как известно составляют 1/3 полного тока однофазного КЗ в месте повреждения. Этот ток распределяется по проводам линии обратно пропорционально реактивным сопротивлениям нулевой последовательности каждого из лучей схемы замещения. Ниже приводятся результаты расчетов. Однофазные КЗ на фазе *A* в середине линии (точка *N*). Схемы замещения приведены на рис.18,а. Резуль-

даты расчета $X_{1\Sigma} = 8,4 \text{ Ом}$; $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$; $X_{0\Sigma} = 16,4 \text{ Ом}$, $X_{\text{расч}} = 33,2 \text{ Ом}$.

Полный ток в месте КЗ: $I_k = 3 I_{k0}^{(i)} = 3 \cdot 115 / \sqrt{3} \cdot 33,2 = 6,0 \text{ кА}$. Распределение тока $3 I_{k0}$ по лучам схемы нулевой последовательности:

$3 I_{k0(c)}^{(i)} = 6,0 \cdot 59,4 / 82,2 = 4,47 \text{ кА}$; $3 I_{k0(n)}^{(i)} = 6,0 \cdot 22,8 / 82,2 = 1,53 \text{ кА}$.

Однофазное КЗ на фазе А у шин питающей подстанции (точка М). Схемы замещения изображены на рис.18,б; $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 4,4 \text{ Ом}$; $X_{0\Sigma} = 8,8 \cdot 73,4 / 82,2 = 7,86 \text{ Ом}$; $X_{\text{расч}} = 16,7 \text{ Ом}$.

Полный ток в месте КЗ $I_k^{(i)} = 3 I_{k0}^{(i)} = 115 \cdot \sqrt{3} / 16,7 = 11,9 \text{ кА}$.

Распределение тока $3 I_{k0}^{(i)}$ по лучам схемы нулевой последовательности

$3 I_{k0(c)}^{(i)} = 11,9 \cdot 73,4 / 82,2 = 10,7 \text{ кА}$, $3 I_{k0(n)}^{(i)} = 11,9 \cdot 8,8 / 82,2 =$

1,2 кА. На графике рис.18,в показано, как изменяется значе-

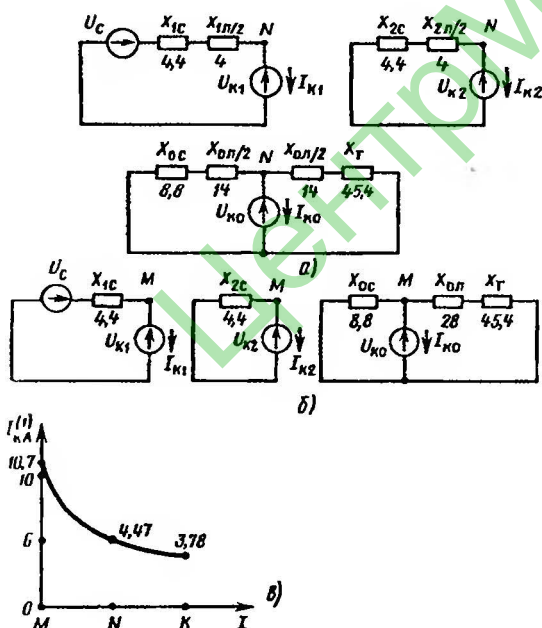


Рис. 18. К расчету однофазного КЗ по трассе линии:

а — схема замещения отдельных последовательностей для КЗ в середине линии; б — то же в начале линии; в — график изменения тока однофазного КЗ при перемещении места повреждения по длине линии

ние тока $3I_{\kappa 0(c)}^{(1)}$, текущего по поврежденной фазе со стороны системы в зависимости от места возникновения КЗ.

В качестве второго примера определим значения токов КЗ и их распределение при коротком замыкании между двумя фазами *В* и *С* на стороне 10 кВ трансформатора *Т*, а также построим векторную диаграмму напряжений на стороне 110 кВ приемной подстанции для этого случая. Подобное КЗ показано на рис.19. Как было принято выше, значения токов в месте КЗ определяются в именованных величинах соответственно среднему значению напряжения рассматриваемой стороны. В сети высшего напряжения токи приводятся в именованных величинах для этой стороны. В целях упрощения расчетов подпитка места КЗ от двигателей нагрузки не учитывается.

На рис.19,а приведены эквивалентные схемы сети для расчета составляющих прямой и обратной последовательностей тока КЗ, отнесенные к стороне высшего напряжения. Эквивалентную схему для составляющих нулевой последовательности составлять не нужно, так как рассматривается случай двухфазного КЗ без земли, при котором токи нулевой последовательности не возникают.

Эквивалентные сопротивления прямой и обратной последовательностей представляют собой сумму сопротивлений всех элементов сети. После приведения к напряжению стороны 10 кВ эти эквивалентные сопротивления составят: $X_{1\Sigma}=X_{2\Sigma}=(X_c+X_{л}+X_T) \cdot U_{нн}^2/U_{вн}^2=(4,4+8,0+45,4) \cdot 10,5^2/115^2=57,8 \cdot 110,25/13225 = 0,48 \text{ Ом}$ (рис.19,б). Найдем значение полного тока КЗ

$$I_{\kappa}^{(2)} = 10,5/(0,48 + 0,48) = 10,9 \text{ кА.}$$

Модули составляющих прямой и обратной последовательностей при данном виде КЗ одинаковы по значению, но меньше в $\sqrt{3}$ раз полного тока КЗ

$$I_{\kappa 1}^{(2)} = I_{\kappa 2}^{(2)} = 10,9/\sqrt{3} = 6,3 \text{ кА.}$$

По полученным данным построены векторные диаграммы токов и напряжений в месте КЗ (рис.19,в).

Найдем соответствующие им токи КЗ, протекающие по линии *Л*. Для этого вначале приведем составляющие токов прямой и обратной последовательностей в месте КЗ к стороне высшего напряжения:

$$I_{\kappa A1}^{(1)} = I_{\kappa a1}^{(2)} U_{\text{НН}}^2 / U_{\text{ВН}}^2 = 6,3 \cdot 10,5^2 / 115^2 = 0,575 \text{ кА. Тогда мо-}$$

дули трансформированных фазных токов в линии Л составят:

$$I_{\kappa A}^{(2)} = I_{\kappa B}^{(2)} = 0,575 \text{ кА и } I_{\kappa C}^{(2)} = 2 I_{\kappa A}^{(2)} = 1,15 \text{ кА.}$$

Векторные диаграммы этих токов показаны на рис.19,з. Затем найдем падение напряжения в обмотках трансформатора Т, вы-

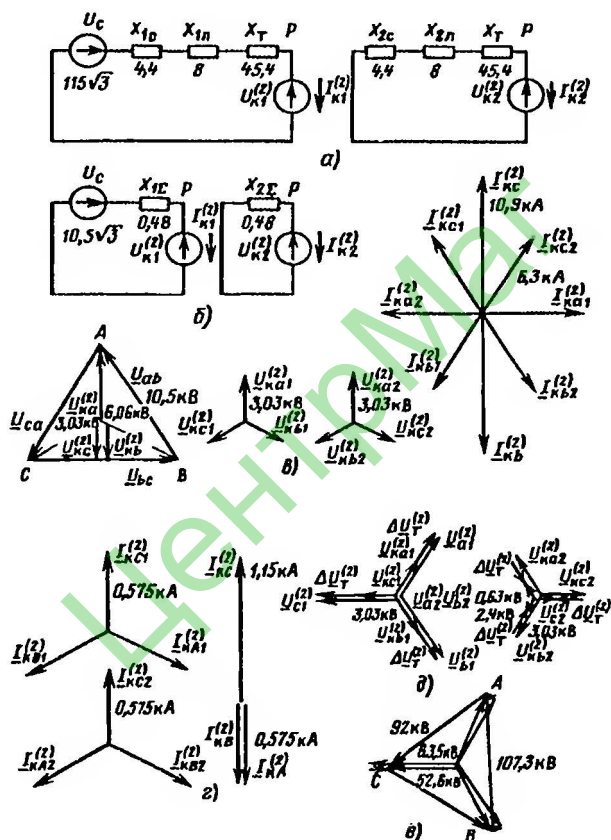


Рис. 19. К расчету двухфазного КЗ на стороне низшего напряжения двухобмоточного трансформатора, соединенного по схеме Δ/Δ - II:

а — эквивалентные схемы замещения прямой и обратной последовательностей, отнесенные к стороне высшего напряжения; б — то же, но проведенное к стороне низшего напряжения; в — векторные диаграммы токов и напряжений на стороне низшего напряжения; г — векторные диаграммы токов на стороне высшего напряжения трансформатора; д — построение векторов симметричных составляющих напряжений со стороны высшего напряжения, приведенных к стороне низшего напряжения; е — результирующая векторная диаграмма напряжений на стороне высшего напряжения трансформатора

раженные в долях напряжения стороны 10,5 кВ. Реактивное сопротивление трансформатора, отнесенное к этой стороне $X_T = 45,4 \cdot 10,52 / 1152 = 0,38$ Ом. Соответственно падение напряжения в обмотке трансформатора от составляющих токов прямой (обратной) последовательности $\Delta U_{T1}^{(2)} = \Delta U_{T2}^{(2)} = 6,3 \cdot 0,38 = 2,4$ кВ.

Сложим полученные падения напряжения в обмотках трансформатора T с векторами соответствующих составляющих напряжений прямой и обратной последовательностей в месте КЗ с учетом сдвига этих векторов после прохождения через обмотки трансформатора T , имеющие схему соединения $\Delta / \Delta - 11$ (рис.19,д). Результирующие вектора симметричных составляющих напряжений должны быть приведены к стороне высшего напряжения трансформатора. Результирующая диаграмма напряжений на стороне высшего напряжения трансформатора T показана на рис.19,е.

Следующим рассмотрим несимметричный нагрузочный режим линии L , вызванный обрывом провода фазы A в начале линии. Рабочее напряжение сети равно 110 кВ. Примем, что перед нарушением режима ток нагрузки линии был равен номинальному току трансформатора T , т.е. $I_{нг}^{yc} = S / U_{ном} \sqrt{3} = 32 / 110 \sqrt{3} = 0,168$ кА.

Данные сопротивлений элементов сети для установившегося режима приведены в начале данного параграфа. В целях упрощения расчетов воспользуемся принципом наложения. Расчетная схема замещения для дополнительного режима при обрыве фазы показана на рис.20,а. Результирующие сопротивления, входящие в эту схему: $X_{1\Sigma}^{доп} = 552,8$ Ом, $X_{2\Sigma}^{доп} = 202,4$ Ом; $X_{0\Sigma}^{доп} = 82,2$ Ом. Соответствующие этим сопротивлениям расчетные проводимости составляют:

$$1 / X_{1\Sigma}^{доп} = 0,0018 \text{ 1/Ом}; 1 / X_{2\Sigma}^{доп} = 0,0049 \text{ 1/Ом} \text{ и } 1 / X_{0\Sigma}^{доп} = 0,012 \text{ 1/Ом}.$$

Используя полученные величины, определяем симметричные составляющие тока дополнительного режима: $I_{1A}^{доп} = -0,168 \times 0,0018 / (0,0018 + 0,0049 + 0,012) = -0,016$ кА; $I_{2A}^{доп} = -0,168 \times 0,0049 / 0,0187 = -0,044$ кА; $I_0^{доп} = -0,168 \cdot 0,012 / 0,0187 = -0,108$ кА.

Для получения полных токов в неповрежденных фазах B и C построим векторную диаграмму токов, являющуюся результатом сложения фазных токов предшествующего полнофазного режима

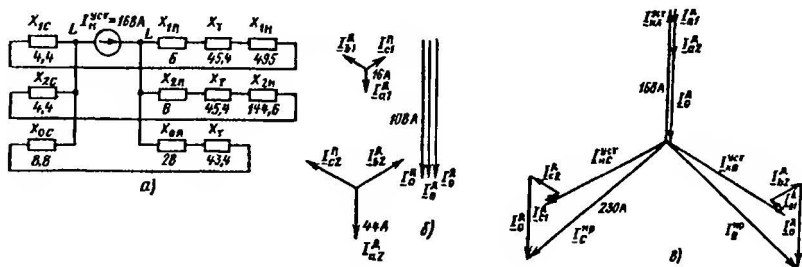


Рис. 20. К расчету токов нагрузки при обрыве фазы на радиальной линии 110 кВ:

а — расчетная схема замещения для дополнительного режима; *б* — векторная диаграмма симметричных составляющих токов в дополнительном режиме; *в* — векторная диаграмма полных токов нагрузки в фазах при неполнофазном режиме

с соответствующими симметричными составляющими дополнительного режима (рис.20,б и в).

В качестве последнего примера обратимся к характерному и одновременно наглядному случаю: трехфазное КЗ на стороне 10,5 кВ трансформатора *Т* в сети (рис.17) при одновременном обрыве одной фазы на стороне 115 кВ. Такое КЗ может возникнуть при подаче напряжения на трансформатор *Т* после ремонтных работ на ошиновке 10,5 кВ, если ошибочно останется неубранной специальная трехфазная закоротка, устанавливаемая для безопасности работающих.

Схема замещения для этого повреждения имеет вид, показанный на рис.21,а. Из нее видно, что $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 57,8$ Ом и $X_{0\Sigma} = 82,2$ Ом. Составляющая тока КЗ прямой последовательности, отнесенная к стороне 115 кВ $I_{KA1} = U_{ном} / \sqrt{3} [X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma} / (X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})] = 115 / \sqrt{3} [57,8 + 57,8 \cdot 82,2 / (57,8 + 82,2)] = 0,723$ кА. Найдем составляющие тока КЗ обратной и нулевой последовательностей $I_{KA2} = -0,723 \cdot 82,2 / 140 = -0,425$ кА и $I_{K0} = -(I_{KA1} - I_{KA2}) = -0,298$ кА.

Определим значения напряжений по обе стороны от места обрыва. Составляющие напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей со стороны нагрузки (точка *L'*): $U_{A1}(L') = -I_{KA1} X_T = 0,723 \cdot 45,4 = 32,8$ кВ, $U_{A2}(L') = I_{KA2} X_T = -0,425 \times 45,4 = -19,3$ кВ и $U_{K0}(L') = I_{K0} X_T = -0,298 \cdot 45,4 = -13,5$ кВ.

Вычислим составляющие напряжений тех же последовательностей в месте обрыва со стороны питания (точка *L*): $U_{A1}(L) = U_C / \sqrt{3} - I_{KA1} (X_{1c} + X_{1a}) = 66,4 - 0,723(4,4 + 8) = 57,4$ кВ, $U_{A2}(L) =$

$= -I_{\kappa A2}(X_{2c} + X_{2\lambda}) = 0,425 \cdot 12,4 = 5,3 \text{ кВ}$ и $U_{A0} = -I_{\kappa 0}(X_{0c} + X_{0\lambda}) = 0,298(6,8 + 28) = 11 \text{ кВ}$. При этом падение напряжения на месте обрыва для каждой из последовательностей составит:

$$\Delta U_{A1} = U_{A1(L)} - U_{A1(L')} = 57,4 - 32,8 = 24,6 \text{ кВ};$$

$$\Delta U_{A2} = U_{A2(L)} - U_{A2(L')} = 5,2 - (-19,3) = 24,5 \text{ кВ} \text{ и } \Delta U_{A0} = U_{A0(L)} - U_{A0(L')} = 11 - (-13,5) = 24,5 \text{ кВ}.$$

Равенство $\Delta U_{A1} = \Delta U_{A2} = \Delta U_{A0}$ подтверждает правильность произведенных расчетов. По полученным данным построены векторные диаграммы полных токов в проводах линии и диаграммы напряжений по обе стороны места обрыва (рис. 21, б и в).

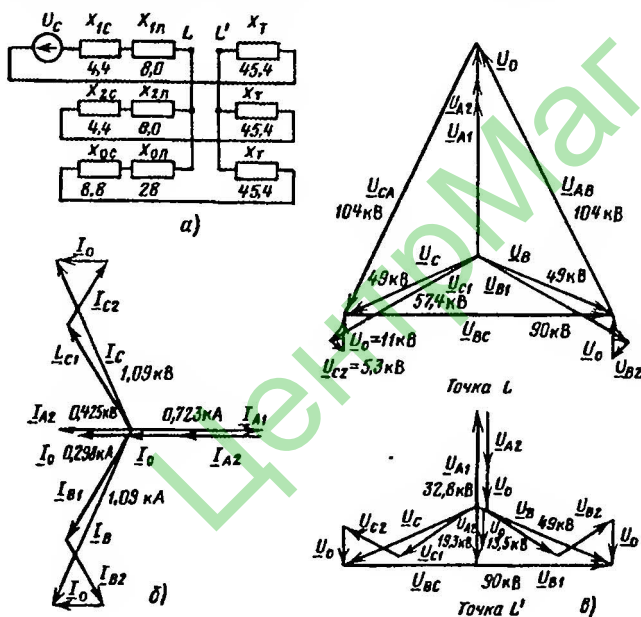


Рис. 21. К расчету трехфазного КЗ за трансформатором, питающимся по линии с обрывом одной из фаз:

а — расчетная схема сети; б — построение векторных диаграмм токов КЗ на стороне низшего напряжения; в — векторные диаграммы напряжений в месте разрыва; на стороне питания в точке L (вверху), со стороны нагрузки в точке L' (внизу)

7. Принципы построения фильтров симметричных составляющих

Фильтр симметричных составляющих представляет собой устройство, которое обеспечивает при подаче на его входные зажимы трехфазной несимметричной системы напряжений или токов появление на его выходе однофазного напряжения или тока, пропорционального симметричной составляющей одной из последовательностей (рис.22). Такие фильтры называют простыми.

Кроме того существуют так называемые комбинированные фильтры, на выходе которых получается электрическая величина, пропорциональная алгебраической сумме или разности двух симметричных составляющих, находящихся в определенном соотношении.

Фильтры симметричных составляющих подразделяют на фильтры напряжения и фильтры тока в зависимости от того, к какому источнику питания присоединяется фильтр. Для фильтров напряжения — это трансформаторы напряжения или сеть низкого напряжения, где они установлены. Для фильтров тока — это трансформаторы тока защищаемого присоединения. Различие в источниках питания обуславливает некоторые особенности исполнения фильтров, о чем будет сказано ниже.

Существует принятое повсеместно сокращенное буквенное обозначение простого фильтра симметричных составляющих, состоящее из четырех букв. Первая буква **Ф** указывает что данное устройство является фильтром. Вторая буква — это **Н** или **Т**, обозначающая, что рассматриваемый фильтр является фильтром напряжения, или фильтром тока. Третья буква выражает, какая из симметричных составляющих создает сигнал на выходных зажимах фильтра: **П** — прямая, **О** — обратная и **Н** — нулевая последовательности. Последней является буква **П**, соответствующая сокращению слова последовательность. Так, например, сокращенное обозначение **ФНОП** относится к фильтру напряжения обратной последовательности, а обозначение **ФТНП** — к фильтру тока нулевой последовательности.

Для комбинированных фильтров симметричных составляющих применяют другое сокращенное обозначение, выражае-

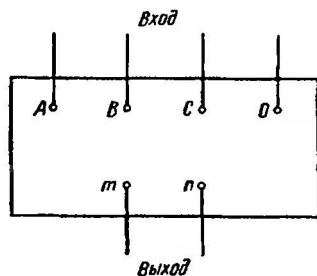


Рис. 22. Общее изображение простого фильтра симметричных составляющих произвольной трехфазной системы напряжений или токов

мое через напряжения или токи, комбинация которых создает выходной сигнал фильтра. Так, сокращение $I_1 + k_{\phi} I_2$ обозначает комбинированный фильтр токов прямой и обратной последовательностей.

Коэффициент комбинированного фильтра k_{ϕ} — число, представляющее собой отношение напряжений или токов на выходе фильтра, полученных при раздельном подводе к нему равных по модулю симметричных систем соответствующих последовательностей, которыми определяется выходной сигнал фильтра.

При оценке действия исполнительных органов, устанавливаемых на выходе фильтра, коэффициент k_{ϕ} показывает, во сколько раз исполнительный орган чувствительнее к одной из симметричных составляющих.

Устройство, состоящее из фильтра симметричных составляющих и подключенного к его выходу исполнительного органа, называют фильтр-реле.

Для создания фильтров симметричных составляющих используют возможность реализации электрическими средствами приведенных в §1 формул разложения, с помощью которых можно вычислить любую из симметричных составляющих несимметричной системы векторов:

$$\underline{A}_1 = (\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C})/3; \underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C})/3 \text{ и } \underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3.$$

Формула для выявления вектора составляющей нулевой последовательности не требует дополнительного поворота фазных векторов исходной несимметричной системы. Поэтому реализация ее электрическим способом получается довольно просто. Так, например, чтобы осуществить фильтр тока нулевой последовательности достаточно собрать вторичные обмотки трансформаторов тока, включенных в каждую из фаз первичной цепи, по схеме звезды с общим нулевым проводом (рис.23,а). Ток, текущий по нулевому проводу — это сумма вторичных токов трех фаз рассматриваемого присоединения, и, следовательно, этот ток равен утроенному значению вторичного тока нулевой последовательности, т.е. $I_a + I_b + I_c = 3I_0$. Эта схема применяется повсеместно при осуществлении релейной защиты от замыканий на землю любых присоединений в сетях 110 кВ и выше.

В сетях 6—35 кВ, в которых токи однофазного замыкания на землю сравнимы с токами намагничивания трансформаторов тока, установленных в первичной цепи присоединений, выполнение чувствительной защиты от замыкания на землю с током срабатывания, составляющим единицы или десятки ампер, связано с

очень большими трудностями. Поэтому на оборудовании 6—20 кВ для выполнения такой защиты применяют специальные кабельные или шинные трансформаторы тока, имеющие магнитопровод, который охватывает все три фазы присоединения одновременно. Вторичные обмотки таких трансформаторов тока, сокращенно именуемых ТНП, располагаются на магнитопроводе симметрично. Благодаря такому исполнению в нормальном режиме сети, когда магнитный поток, создаваемый токами нагрузки присоединения, уравновешен, напряжение, наводимое во вторичных обмотках ТНП, получается весьма малым и не влияет на действие защиты.

Для выявления составляющих напряжений нулевой последовательности чаще всего используют специальные схемы соединения обмоток однофазных трансформаторов напряжения или трехфазные трансформаторы напряжения особого исполнения. На подстанциях 35 кВ и выше обычно применяют группу из трех однофазных трансформаторов напряжения, включаемых в каждую фазу сети. Первичные обмотки этих трансформаторов напряжения собирают в звезду, а нейтраль заземляют. Вторичных обмоток у каждого из таких ТН как правило две. Одна из них соединяется вместе с соответствующими обмотками других ТН в звезду с выведенным нулем. Заземление обмоток, собранных в звезду, осуществляется путем присоединения к земле вывода одной из фаз. Иногда вместо этого заземляют общий нулевой вывод. Остаточные вторичные обмотки группы ТН собирают в

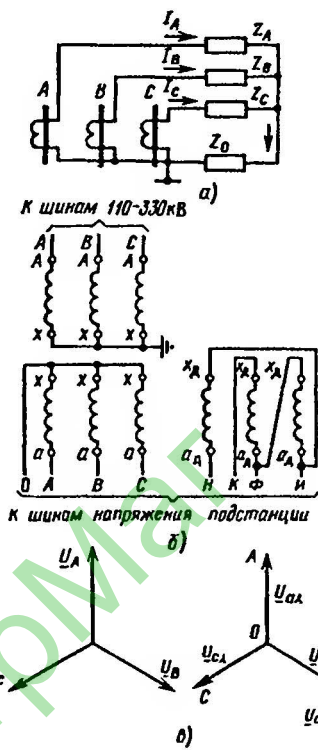


Рис. 23. Соединение измерительных преобразователей для выделения составляющих нулевой последовательности:

а — трансформаторов тока для составляющей тока; б — трансформаторов напряжения для составляющей напряжения; в — потенциальная диаграмма трансформаторов напряжения

схему разомкнутого треугольника. В качестве основного принят вариант размыкания треугольника между началом обмотки фазы *A* и концом обмотки фазы *B*, вывод которого заземляется.

При замыкании на землю в сети между указанными выводами фаз *A* и *B* разомкнутого треугольника возникает напряжение, пропорциональное утроенному значению составляющей напряжения нулевой последовательности $\underline{U}_0 + \underline{U}_0 + \underline{U}_0 = 3\underline{U}_0$. К шинкам напряжения, создаваемым в распределительных устройствах, кроме выводов разомкнутого угла треугольника дополнительно присоединяют и выводы двух остающихся углов треугольника. Они используются для целей измерения и в качестве испытательных при проверках.

Типовая схема описанного соединения ТН для сетей 110 кВ и выше и векторные диаграммы напряжений, образующихся в их обмотках при нормальном режиме сети, показаны на рис.23,б.

В сетях ниже 110 кВ наряду с описанной схемой применяют трехфазные трансформаторы напряжения специального исполнения. Фазные обмотки высокого напряжения у таких ТН соединены в звезду с заземленной нейтралью. Магнитопровод ТН имеет дополнительные стержни, обеспечивающие путь для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности. На дополнительные стержни наложены обмотки, служащие для выделения слагающих нулевой последовательности. В другом варианте исполнения подобных ТН для той же цели предусматривают дополнительные вторичные обмотки на фазных стержнях магнитопровода, соединенные в разомкнутый треугольник.

В защитах от замыканий на землю в сетях 110 кВ и выше каких-либо специальных исполнений реле и измерительных органов тока и напряжения в большинстве случаев не применяют. Для самых чувствительных ступеней применяют иногда измерительные органы, снабженные фильтром для подавления высших гармоник и апериодических составляющих, мешающих четкой работе этих органов.

В сетях 35 кВ и ниже с малым током замыкания на землю защиты от однофазных замыканий выполняют очень чувствительными. В них устанавливают реле и измерительные органы специального исполнения. Устройство и работа подобной аппаратуры является особой темой, выходящей за рамки данной книги. Релейная защита от замыканий на землю электроустановок 6—35 кВ рассматривается в технической литературе, посвященной этой теме [7,8].

О принципах работы реле направления мощности нулевой последовательности говорится ниже в § 12.

Выделение составляющих прямой и обратной последовательностей электрическими средствами, основываясь непосредственно на формулах разложения, является довольно сложной задачей, так как при этом нужно суммировать вектора, предварительно повернутые на угол 120° против или по часовой стрелке. Поэтому большинство из практически осуществленных фильтров базируется на более удобных для практики преобразованных математических выражениях для выделения симметричных составляющих, вывод которых дан в §1 при обосновании графического способа построения векторов симметричных составляющих. Вот эти выражения: $A_1 = (AB - a^2 BC)/3$ и $A_2 = (AB - a BC)/3$. Из них видно, что для определения симметричных составляющих требуется вычесть из вектора AB вектор BC , предварительно повернутый на 120° в ту или иную сторону. В §1 на рис.3,6 показано графическое отображение этих формул. На их основе осуществлено большинство существующих схем фильтров симметричных составляющих. В этих схемах получают токи или напряжения, пропорциональные электрическим величинам, подведенным к фильтру, но повернутые на заданный угол при помощи специальных фазоповоротных схем, в первую очередь, в виде различных RC - или RL -цепочек. Следует подчеркнуть, что в схемах фильтров часто применяют вместо поворота только одного вектора, пропорционального вектору BC , взаимный разворот обеих величин, пропорциональных векторам AB и BC , в разные стороны с тем, чтобы суммарный угол составлял 60° в требуемом направлении. Дело в том, что умножение вектора BC на минус a или минус a^2 означает его поворот на 60° соответственно против или по часовой стрелке.

Электрическое суммирование полученных величин обеспечивает появление на выходе фильтра сигнала, пропорционального вектору искомой симметричной составляющей в виде напряжения или тока, отнесенного к определенной фазе входного напряжения или тока. Как это решается на практике, читатель узнает из следующих параграфов. Иногда при создании фильтров применяют другие приемы разворота складываемых векторов, которые в конечном счете могут быть сведены к описанному выше.

8. Основные элементы схем и параметры фильтров симметричных составляющих

Фильтры симметричных составляющих, применяемые в серийной аппаратуре релейной защиты, имеют ряд схемных и конструктивных особенностей. Одной из существенных особенностей является различие в характере фазоповоротных цепочек, используемых в схемах фильтров.

Чаще всего встречаются следующие цепочки: RC , состоящая из резистора и конденсатора; RL , состоящая из резистора и индуктивного сопротивления, представляющего собой дроссель с разрезным ферромагнитным сердечником, и цепочка, в которой имеется трансреактор.

Трансреактор — это трансформатор тока, имеющий ферромагнитный сердечник с воздушным зазором. Обычно трансреактор имеет одну или две первичных обмотки с небольшим числом витков, которые включаются в токовые цепи соответствующего присоединения. Вторичная обмотка трансреактора служит в качестве источника напряжения, пропорционального произведению первичного тока на заданное реактивное сопротивление. В некоторых схемах фильтров вторичная обмотка нагружается на специально подобранный резистор, обеспечивающий заданное соотношение токов и угол сдвига между током в первичной обмотке трансреактора.

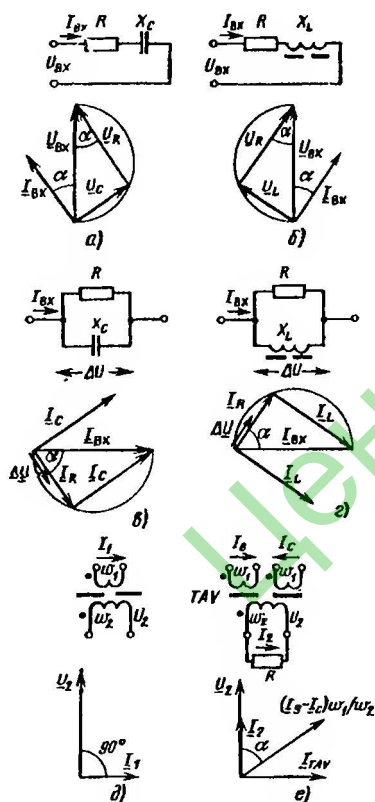


Рис. 24. Способы выполнения фазоповоротных цепочек:

а — последовательная RC -цепочка; б — последовательная RL -цепочка; в — параллельная RC -цепочка; г — параллельная RL -цепочка; д — трансреактор с разомкнутой вторичной обмоткой; е — трансреактор, нагруженный на резистор

На рис.24 показаны векторные диаграммы токов и напряжений для различных фазоповоротных цепочек.

Для получения напряжений, пропорциональных входному и сдвинутых по отношению к нему на заданный угол, применяют последовательные RC - и RL -цепочки. Векторные диаграммы таких цепочек изображены на рис.24,а и б. Из рисунков видно, что в RC -цепочке (рис.24,а) падение напряжения в резисторе $\underline{U}_R$ сдвинуто относительно входного напряжения $\underline{U}_{вх}$ в сторону опережения на угол α против часовой стрелки. В RL -цепочке (рис.24,б) падение напряжения $\underline{U}_R$ сдвинуто по часовой стрелке по отношению к $\underline{U}_{вх}$ и является отстающим.

На рис.24,в и г показано, как можно получить ток, пропорциональный входному, сдвинутый по отношению к нему по фазе на заданный угол. Для такого случая используются RC - и RL -цепочки с параллельным соединением резистора и соответствующего реактивного сопротивления X_C или X_L . Из полученных векторных диаграмм следует, что в RC -цепочке ток в резисторе $\underline{I}_R$ отстает от входного тока $\underline{I}_{вх}$ на угол α , а в RL -цепочке ток $\underline{I}_R$ опережает $\underline{I}_{вх}$.

На рис.24,д и е представлены векторные диаграммы токов и напряжений в цепях с трансреакторами. На первом из них мы видим диаграмму первичного тока $\underline{I}_1$ и вторичного напряжения $\underline{U}_2$ при разомкнутой вторичной обмотке трансреактора. При этом $\underline{U}_2 = \underline{I}_1 jX_M$. Ток $\underline{I}_1$ отстает от $\underline{U}_2$ на 90° . Приведенная формула подобна формуле для падения напряжения в дросселе, через который течет ток, равный $\underline{I}_1$, $\underline{U}_L = \underline{I}_1 jX_L$. Поэтому такое включение трансреактора используется во многих схемах фильтров для получения напряжения $\underline{U}_2$, равного падению напряжения в заданном индуктивном сопротивлении X_L путем подбора соответствующего X_M .

Сопротивление X_M зависит от размеров воздушного зазора в сердечнике трансреактора. Для характеристики сердечника используют коэффициент k_x , определяемый из выражения: $k_x = j\underline{U}_2/w_2w_1\underline{I}_1$. Значение k_x численно равно ЭДС, наводимой в одном витке вторичной обмотки трансреактора при первичном токе, равном 1А. Одновременно k_x можно рассматривать, как индуктивное сопротивление одного витка любой из обмоток трансреактора. Сопротивление взаимной индукции равняется $X_M = = k_x w_1 w_2$, а индуктивное сопротивление любой из обмоток $X_L = = k_x w_2$, где w — число витков рассматриваемой обмотки.

На рис.24,е показана схема трансреактора, нагруженного на резистор R . В большинстве схем фильтров применяют трансреакторы с двумя первичными обмотками, обтекаемыми фазными токами. Вторичное напряжение $\underline{U}_2$ создается разностью фазных

токов в соответствии с полярностью первичных обмоток. Это напряжение вызывает в резисторе R ток I_2 , опережающий разность токов $I_B - I_C$, проходящих по первичным обмоткам на заданный угол α . Ток I_2 определяется значением сопротивления R , так как индуктивное и активное сопротивления вторичной обмотки трансреактора намного меньше R , и их можно не учитывать. Таким образом, токи, поступающие в первичные обмотки трансреактора, распределяются между индуктивным сопротивлением самого трансреактора и резистором R . Это видно из векторной диаграммы токов и напряжений, приведенной на рис.24,е.

Схемы фильтров симметричных составляющих, выпускаемых промышленностью, набираются из комбинаций приведенных выше цепочек. При этом используются наборы как из однородных, так и из разных по характеру цепочек.

В некоторых схемах фильтров требуется получение электрических величин, сдвинутых по отношению к входным на 90° . Для этого наряду с трансреакторами используют конденсаторы, дроссели и частотные фильтры, настроенные на частоту сети. В конденсаторах и дросселях получается сдвиг на 90° между током и падением напряжения на них, а в фильтрах нижних и верхних частот обеспечивается на частоте настройки сдвиг на 90° между входным током и выходным напряжением. В частности частотные фильтры применяют в схемах активных фильтров симметричных составляющих, содержащих функциональные элементы на операционных усилителях. Более подробно об этом говорится в следующих параграфах.

Другим признаком, по которому различаются фильтры симметричных составляющих, является способ получения выходного сигнала. Один из способов заключается в суммировании напряжений, пропорциональных напряжениям или токам подведенной к фильтру трехфазной системы и сдвинутых по отношению к ним на заданные углы. Этот способ очень распространен и широко используется как в фильтрах напряжения, так и в фильтрах тока. Важным преимуществом этого способа является возможность применения одинаковых схем преобразования входных величин как в фильтрах напряжения, так и в фильтрах тока. Поворот и суммирование слагаемых напряжений осуществляется в схеме преобразования. Как правило схемы преобразования выполняются на пониженные входные напряжения. Поэтому в фильтрах напряжения они подключаются к входным зажимам фильтра через промежуточные трансформаторы.

В фильтрах тока подведенные к их входам токи сначала преобразуются для той же цели в пропорциональные им напряжения с помощью трансреакторов или промежуточных трансформаторов тока, вторичные обмотки которых нагружены на резистор. Для питания схемы преобразования используются падения напряжения, снимаемые с этих резисторов.

Другой способ получения выходного сигнала основан на сложении токов, пропорциональных подведенным к первичным входным зажимам фильтра напряжениям или токам. Складываемые токи сдвигаются по отношению к входным величинам на заданные углы при помощи соответствующих фазоповоротных цепочек. По этому способу выполнены в частности наиболее старые, считающиеся классическими, схемы фильтров тока обратной последовательности. Впоследствии этот способ возродился при создании фильтров тока или напряжения, содержащих сумматоры на операционных усилителях. Однако имеется некоторое различие от предыдущего, суть которого состоит в том, что поступающая на входы фильтра трехфазная система напряжений или токов преобразуется вначале с помощью промежуточных трансформаторов или трансреакторов в напряжения, значения которых удобны для получения управляющих токов ОУ. Это осуществляется аналогично описанному для первого способа. Затем эти напряжения подаются на специально подобранные фазоповоротные цепочки. В этих цепочках образуются управляющие токи с заданным углом сдвига относительно входных величин. На вход операционного усилителя приходит сумма управляющих токов, пропорциональная выделяемой симметричной составляющей. На выходе ОУ возникает соответствующее ей напряжение.

Существует довольно много показателей, по которым оценивается качество фильтров симметричных составляющих, приводимых в специальной литературе. Большинство из них представляет интерес только для разработчиков и изготовителей соответствующей релейной аппаратуры. Некоторые из этих показателей, имеющие значение для персонала, занимающегося наладкой и обслуживанием релейной аппаратуры, приводятся ниже.

К числу таких показателей можно отнести комплексный коэффициент преобразования, связывающий значение выходного сигнала фильтра с величиной входного сигнала выделяемой последовательности. Для большей наглядности рассмотрим такую связь на примере фильтра напряжения обратной последовательности, выходным сигналом которого является так же напряже-

ние. Для простоты примем, что никаких промежуточных трансформаторов в схеме фильтра не имеется. В подобном фильтре связь между линейным напряжением симметричной системы обратной последовательности, поданным на вход фильтра, и выходным напряжением может быть выражена в виде следующего уравнения: $\underline{U}_x = m \underline{U}_{2\text{лин}}$, где $\underline{U}_x$ — выходное напряжение ненагруженного фильтра (режим холостого хода); m — комплексный коэффициент преобразования, называемый также отношением холостого хода; $\underline{U}_{2\text{лин}}$ — линейное напряжение обратной последовательности, поступающей на входы фильтра системы напряжений. В предельном случае, когда в схеме фильтра реализуется в чистом виде приведенное выше расчетное напряжение: $\underline{U}_{2ф} = (\underline{U}_{AB} - a\underline{U}_{BC})/3$ модуль коэффициента преобразования получается равным $m = \sqrt{3} \underline{U}_{2\text{лин}}$. В практически применяемых фильтрах модуль m всегда меньше этой величины. Важно отметить, что коэффициент преобразования определяется исключительно схемой фильтра и не зависит от значений сопротивлений входящих в нее резисторов, конденсаторов и других схемных элементов.

Для фильтра тока обратной последовательности, у которого выходным сигналом является ток, коэффициент преобразования подсчитывается аналогичным образом. Его значение устанавливается при снятой нагрузке, т.е. при замкнутых накоротко выходных зажимах фильтра (режим КЗ).

Другим важным параметром является выходное (внутреннее) сопротивление фильтра $Z_{\text{вых}}$. Оно заметно сказывается на выходном сигнале при подключенной нагрузке фильтра. Особенно значительно это влияние в пассивных фильтрах симметричных составляющих с электромеханическими реле на выходе. Для таких фильтров требуется согласование нагрузки с выходным сопротивлением фильтра. В фильтрах, содержащих операционные усилители, учет нагрузки, как правило, не нужен.

Из остальных показателей качества, особенно для фильтров обратной последовательности, имеет значение коэффициент γ , характеризующий изменение величины небаланса на выходе при отклонении частоты сети от номинального значения. В нормальном режиме, когда на фильтр поступают электрические величины только прямой последовательности, значение небаланса на выходе у правильно настроенного фильтра должно быть близким к нулю. При отклонении частоты от нормы небаланс на выходе фильтра возрастает и может достигать недопустимых значений, достаточных для неправильного срабатывания чувстви-

ных фильтр-реле. Для оценки возможности отстройки чувствительных ступеней от получаемых значений небаланса определяют входной сигнал обратной последовательности, который нужно подать на фильтр, чтобы получить на выходе фильтра сигнал, равный ожидаемой величине небаланса при определенном отклонении частоты. У ненагруженного фильтра значение входного линейного напряжения обратной последовательности, нужно для получения ожидаемого $U_{\text{нб.х}}$ составит $U_{2\text{нб}} = U_{\text{нб.х}} / m$, где m — отношение холостого хода. Так как значение $U_{\text{нб.х}}$ зависит от значения поданного на фильтр напряжения прямой последовательности, коэффициент γ_f определяют из уравнения:

$$\gamma_f = \partial U_{\text{нб.х}} f_{\text{ном}} / \partial f m U_1.$$

Похожие выражения могут быть получены и для фильтров ока обратной последовательности.

Коэффициент γ_f зависит от принятой схемы фильтра. Поэтому с действительными значениями γ_f и способами их снижения познакомимся в следующих параграфах, когда будут рассматриваться конкретные схемы фильтров симметричных составляющих.

Помимо отклонения частоты на небаланс на выходе фильтра влияют изменения температуры окружающей среды, колебания питающего напряжения сети, неточность параметров комплектующих деталей и нестабильность их значений во времени (старение) и другие факторы.

Сведение влияния этих факторов к минимуму достигается за счет высокого качества проектирования и изготовления фильтров, а также при правильной их эксплуатации. Обслуживающий персонал должен следить за тем, чтобы условия работы фильтров соответствовали техническим требованиям изготовителя, проводить своевременную подстрой-

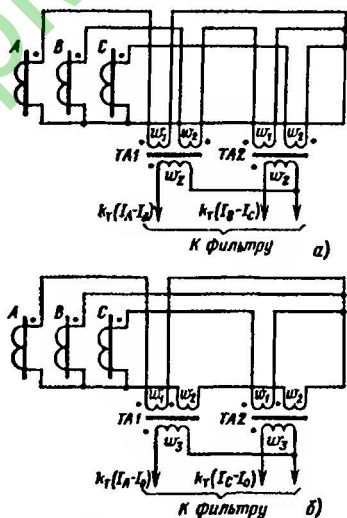


Рис. 25. Способы исключения слагающих нулевой последовательности с помощью промежуточных трансформаторов тока за счет различного включения из первичных обмоток:

а — на разность токов двух фаз; б — одной из обмоток на фазный ток, а другой — на ток в нулевом проводе

ку фильтров, а при необходимости замены отдельных деталей применять изделия того же типа, как в заводских спецификациях.

Заканчивая этот параграф, остановимся на вопросе исключения составляющих нулевой последовательности из несимметричной системы напряжений или токов, подаваемой на фильтры прямой и обратной последовательностей. Имеются типовые решения, применимые в большинстве схем фильтров. Таким решением является подача линейной системы напряжений на фильтры напряжения. В фильтрах тока нулевая последовательность исключается, если подсоединить фильтр через промежуточные трансформаторы, первичные обмотки которых включены на разность фазных токов, как показано на рис.25,а. При отсутствии возможности питать фильтр разностью фазных токов, используют схему компенсации тока нулевой последовательности, изображенную на рис.25,б. Для получения во вторичной обмотке промежуточного трансформатора тока, пропорционального разности фазного тока и тока нулевой последовательности, число витков первичной обмотки, включенной на фазный ток, должно быть в 3 раза больше числа витков обмотки, обтекаемой током, проходящим по нулевому проводу. В частности такая схема используется на присоединениях, у которых трансформаторы тока установлены в двух фазах (обычно А и С), а их вторичные обмотки соединены по схеме неполной звезды.

9. Фильтры симметричных составляющих, предназначенные для работы с электромеханическими реле

Характерной особенностью таких фильтров являются значительные размеры и довольно большая выходная мощность, требующаяся для действия электромеханического реле, устанавливаемого на выходе фильтра.

Первым рассмотрим весьма распространенный фильтр напряжения обратной последовательности, разработанный в нашей стране еще в 1941 г. Схема такого фильтра показана на рис.26,а. Фильтр выполнен с помощью двух RC -цепочек ($R1-C1$ и $R2-C2$), называемых плечами фильтра. К плечу $R1-C1$ подходит линейное напряжение $\underline{U}_{AB}$, а к плечу $R2-C2$ — линейное напряжение $\underline{U}_{BC}$. Зажим B является общим для обоих плеч. Выходные зажимы фильтра m и n находятся в местах соединения резистора и конденсатора каждого из плеч.

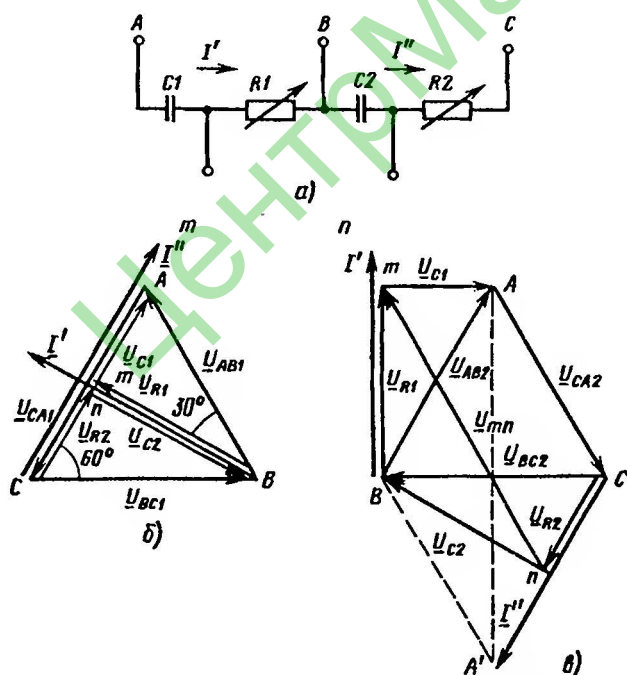


рис. 26. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов и напряжений при подаче на фильтр симметричной системы напряжений прямой последовательности; в — то же при подаче на фильтр симметричной системы напряжений обратной последовательности

Резисторы и конденсаторы в плечах фильтра подобраны так, чтобы соблюдались следующие соотношения между модулями сопротивлений: $R_1 = \sqrt{3} X_{C1}$ и $R_2 = X_{C2} / \sqrt{3}$.

Работу фильтра рассмотрим с помощью векторных диаграмм токов и напряжений, образующихся в фильтре, при поочередной подаче на его зажимы симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей. Из основных положений метода симметричных составляющих следует, что такой анализ закономерен, так как эти системы напряжений не зависят друг от друга. Результаты анализа при этом получаются более наглядными.

Представим себе, что на входные зажимы фильтра поступает симметричная система напряжений прямой последовательности (см. рис.26,б). При указанном выше подборе модулей сопротивлений в плече $R1C1$ возникает ток I' , опережающий напряжение $\underline{U}_{AB1}$ на угол 30° , а в плече $R2C2$ получается ток I'' , опережающий $\underline{U}_{BC1}$ на 60° . К напряжению $\underline{U}_{AB1}$ примыкает треугольник AmB падений напряжения в сопротивлениях $R1$ и $C1$ от тока I' . К напряжению $\underline{U}_{BC1}$ примыкает треугольник BnC падений напряжения в $R2$ и $C2$ от тока I'' . Вершины m и n этих треугольников сходятся в одной точке, и напряжение $\underline{U}_{mn} = \underline{U}_{\text{вых}} = 0$. Оно является суммой одинаковых по значению, но противоположных по направлению напряжений $\underline{U}_{R1}$ и $\underline{U}_{C2}$. Таким образом, когда к фильтру подведена симметричная система напряжений прямой последовательности, напряжение на выходе фильтра не возникает.

Если на этот же фильтр подать симметричную систему напряжений обратной последовательности, то на выходе появится значительное выходное напряжение. Как видно из векторной диаграммы рис.26, в взаимное расположение векторов напряжений $\underline{U}_{AB2}$ и $\underline{U}_{BC2}$ отличается от расположения векторов $\underline{U}_{AB1}$ и $\underline{U}_{BC1}$ на рис.26,б. Вместе с векторами напряжений $\underline{U}_{AB2}$ и $\underline{U}_{BC2}$ изменяется и положение жестко связанных с ним треугольников падений напряжения AmB и BnC в плечах фильтра. Между точками m и n возникает напряжение $\underline{U}_{\text{вых}}$, достигающее при отсутствии нагрузки 1,5-кратного значения линейного напряжения обратной последовательности. Направление вектора $\underline{U}_{\text{вых}}$ является противоположным вектору $\underline{U}_{CA2}$. Это означает, что для данного фильтра отношение холостого хода $m = \underline{U}_{\text{вых}} / \underline{U}_{2\text{лин}} = 1,5$. Такое значение отношения $\chi\chi$ считается достаточно высоким, и поэтому рассматриваемый фильтр относится к числу лучших. Коэффициент γ_f у него напротив довольно низкий и составляет 0,29, что также относится к достоинствам данного фильтра.

Сравнивая положение векторов $\underline{U}_{R1}$ и $\underline{U}_{C2}$ с положением векторов $\underline{U}_{AB2}$ и $\underline{U}_{BC2}$ можно заметить, что угол между $\underline{U}_{R1}$ и $\underline{U}_{C2}$ больше угла между линейными напряжениями $\underline{U}_{AB2}$ и $\underline{U}_{BC2}$ на 60° . При этом $\underline{U}_{R1}$ и $\underline{U}_{C2}$ равно пропорциональны линейным напряжениям, а положение вектора $\underline{U}_{C2}$ относительно $\underline{U}_{R1}$ равноценно сдвинутому положению вектора $\underline{U}_{BC2}$ по отношению к $\underline{U}_{AB2}$ на дополнительный угол 60° по часовой стрелке (см. пункт на рис.26,в); ΔmBn подобен $\Delta ABA'$. Такой результат совпадает с формулой для выделения обратной последовательности, приведенной выше.

В технике релейной защиты наряду с рассмотренными фильтрами обратной последовательности применяются также фильтры напряжения прямой последовательности (ФНПП), выполненные по аналогичной схеме. Для преобразования схемы рис.26,а в фильтре прямой последовательности достаточно изменить чередование фаз напряжений, подаваемых на входы фильтра. Это можно сделать, например, подавая на вход А фильтра напряжение фазы С, а на вход С — напряжение фазы А. Это приводит к изменению векторных диаграмм. При поступлении на фильтр системы напряжений прямой последовательности на его выходе возникает значительное напряжение, пропорциональное поданному. При поступлении системы напряжений обратной последовательности выходное напряжение определяется небалансом фильтра.

Чтобы представить себе, чем отличается действие фильтра тока от фильтра напряжения, разберем, как работает фильтр тока обратной последовательности, осуществленный с помощью фазосдвигающих RC-цепочек. Схема такого фильтра показана на рис.27,а. Питание фильтра производится через промежуточные трансформаторы тока ТА1 и ТА2, первичные обмотки которых включены соответственно на разность фазных токов $\underline{I}_A - \underline{I}_B$ и $\underline{I}_B - \underline{I}_C$. Резисторы и конденсаторы в плечах фильтра выбраны такими, чтобы между ними соблюдалось соотношение $R_1 = \sqrt{3} X_{C1}$ и $R_2 = X_{C2} / \sqrt{3}$. Токи $\underline{I}'$ и $\underline{I}''$, пропорциональные соответственно разностям токов $\underline{I}_A - \underline{I}_B$ и $\underline{I}_B - \underline{I}_C$, поступают из вторичных обмоток ТА1 и ТА2 в плечи фильтра. При этом значения токов в сопротивлениях, образующих плечи, обратно пропорциональны значениям этих сопротивлений. При принятом соотношении сопротивлений ток $\underline{I}'$ создает в конденсаторе C1 ток $\underline{I}_{C1}$, опережающий ток $\underline{I}'$ на угол 30° , а ток $\underline{I}''$ создает в резисторе R2 ток $\underline{I}_{R2}$, отстающий от тока $\underline{I}''$ на угол 30° . Токи $\underline{I}_{C1}$ и $\underline{I}_{R2}$, складываясь, обра-

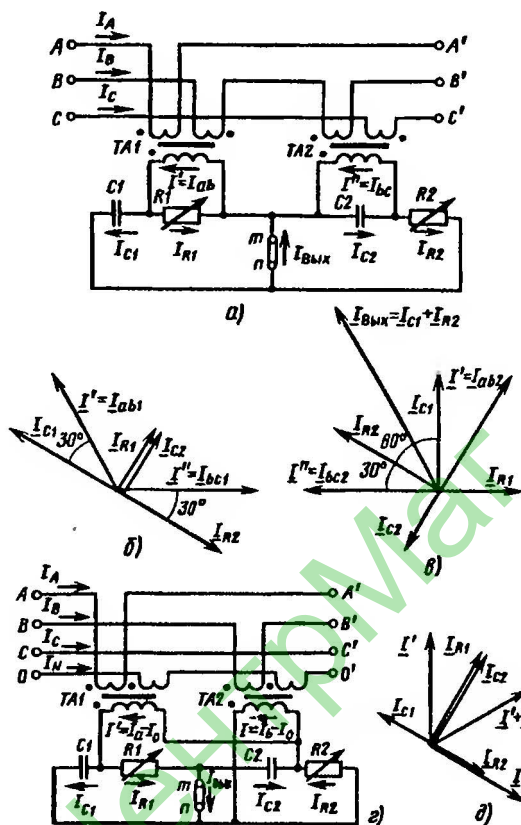


Рис. 27. Активно-емкостный фильтр токов обратной последовательности с промежуточными трансформаторами тока:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при питании фильтра симметричной системой токов прямой последовательности; в — то же при питании системой токов обратной последовательности; г — вариант схемы фильтра; д — векторная диаграмма при подаче на схему рис. 27,г системы токов прямой последовательности

зуют выходной ток фильтра $I_{\text{вых}}$, протекающий по перемычке mn . Складываемые токи одинаково пропорциональны токам I' и I'' , но повернуты относительно них на 30° в противоположных направлениях. Таким образом, дополнительный сдвиг между I_{C1} и I_{R2} по отношению к I' и I'' составляет в сумме 60° по часовой стрелке. Это соответствует условию выделения фильтром составляющих тока обратной последовательности. Токи I_{R1} и I_{C2} на выход фильтра в перемычку mn не поступают и сразу возвращаются в обмотки $TA1$ и $TA2$.

Продолжая изучение работы фильтра, проанализируем его действие при протекании через его первичные обмотки токов прямой и обратной последовательностей. На рис.27,б изображена векторная диаграмма токов в фильтре: по первичным обмоткам $TA1$ и $TA2$ течет симметричная система токов прямой последовательности I_{A1} , I_{B1} и I_{C1} . Из диаграммы видно, что в этом случае ток I_{C1} через конденсатор $C1$ и ток I_{R2} через резистор $R2$ находятся в противофазе. Сумма этих токов равна нулю. Поэтому ток $I_{\text{вых}}$ в перемычке mn отсутствует, т.е. при поступлении в фильтр симметричной системы токов прямой последовательности сигнал на выходе фильтра не появляется.

Теперь обратимся к рис.27,в, на котором показана векторная диаграмма токов в фильтре, когда по первичным обмоткам $TA1$ и $TA2$ течёт симметричная система токов обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} и I_{C2} . В этом случае взаиморасположение векторов I' и I'' изменяется. В результате угол между векторами токов I_{C1} и I_{R2} становится равным 60° , и в перемычке mn появляется ток $I_{\text{вых}}$, равный сумме этих токов. Как видно из векторной диаграммы значение тока $I_{\text{вых}}$ достигает $1,5I'$ и опережает его на 60° . А это означает, что при поступлении в фильтр симметричной системы токов обратной последовательности значение тока на выходе ФТОП пропорционально разности фазных токов обратной последовательности, а по направлению выходной ток противоположен вектору разности токов и $I_{C2} - I_{A2}$ на стороне питания. Составляющие нулевой последовательности в фильтр не попадают, так как питание фильтра осуществляется разностью фазных токов.

На рис.27,г представлен вариант схемы спisanного фильтра, примененный в устройствах блокировки при качаниях типа КРБ. Первичные обмотки промежуточных трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$ включаются по другому: на фазный ток и ток в нулевом проводе. Соотношение витков первичных обмоток $TA1$ и $TA2$ равно 3:1, благодаря чему обеспечивается компенсация слагающих нулевой последовательности в фазных токах. В $TA1$ подается ток фазы A , а в $TA2$ — ток фазы C . Соотношение сопротивлений конденсаторов и резисторов в плечах фильтра тоже изменено: $X_{C1}/R_1 = R_2/X_{C2} = \sqrt{3}$. Концы вторичных обмоток $TA1$ и $TA2$ соединены в общей точке. Как видно из рисунка по цепочке, образованной $R1$ и $C1$ течет ток I' , пропорциональный фазному току I_A с исключенной слагающей I_0 , а по цепочке из $R2$ и $C2$ течет ток I'' , пропорциональный сумме токов $(I_A - I_0) + (I_B - I_0)$.

Если подать на фильтр систему токов прямой последовательности то, как видно из векторной диаграммы токов рис.27,д, ток $I_{\text{вых}}$ в перемычке mn будет равняться нулю: $I'' + I_{C1} - I_{R2} = 0$. Это подтверждает, что схема рис.27,г представляет собой фильтр тока обратной последовательности.

Наряду с активно-емкостными фильтрами симметричных составляющих во многих устройствах релейной защиты, выпускавшихся отечественной промышленностью с 50-х гг., используются фильтры, базирующиеся на активно-индуктивных элементах.

На рис.28, а представлена схема ФТОП, в котором в качестве фазосдвигающего элемента используется трансреактор. Такие ФТОП применяются

в пусковых органах высокочастотных дифференциально-фазных защит транзитных линий 110—750 кВ и ряде других устройств.

Напряжение U_M на вторичной обмотке трансреактора ТАВ создается разностью токов $I_A - I_B$ и опережает ее на 90° . Значение сопротивления взаимной индукции X_M трансреактора равно $X_M = R/\sqrt{3}$.

Падение напряжения на резисторе R состоит из двух слагаемых: $2/3$ сопротивления R обтекается током I_C , а $1/3$ — суммарным током $-(I_A - I_B)$, возникающим во вторичной обмотке промежуточного трансформатора тока ТА, коэффициент трансформации которого равен 1.

При принятых полярностях выводов ТАВ и ТА выходное напряжение фильтра составляет

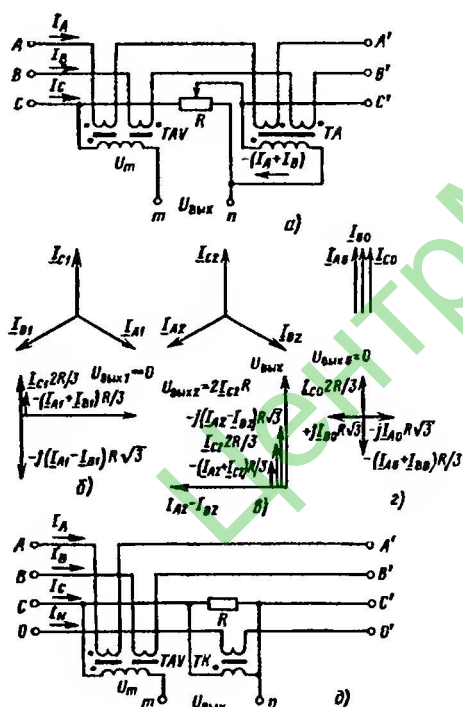


Рис. 28. Активно-индуктивный проходной фильтр токов обратной последовательности с трансреактором и промежуточным трансформатором тока в цепи компенсации составляющих нулевой последовательности:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при подаче на фильтр симметричной системы токов прямой последовательности; в — то же для системы токов нулевой последовательности; г — ранний вариант схемы фильтра

$\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{U}_R - \underline{U}_M$. На рис.28,б,в и г показаны векторные диаграммы токов и напряжений, полученные при раздельной подаче на фильтр симметричных токов прямой, обратной и нулевой последовательности. Там же приведены значения $\underline{U}_{\text{вых}}$ фильтра для каждого варианта подачи токов. Напряжение $\underline{U}_{\text{вых}}$ равно нулю при подаче систем токов прямой и нулевой последовательности, и составляет $2I_{C2}R$ при подаче токов обратной последовательности. Действительно, сумма складываемых векторов, образующих $\underline{U}_{\text{вых}}$, при подаче токов прямой последовательности (рис.28,б) составляет:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{вых1}} &= I_{C1}2R/3 - (I_{A1} + I_{B1})R/3 - j(I_{A1} - I_{B1})R/\sqrt{3} = I_{C1}2R/3 + \\ &+ I_{C1}R/3 - I_{C1}\sqrt{3}R/\sqrt{3} = 0. \end{aligned}$$

То же в случае подачи токов обратной последовательности (рис.28,в):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{вых2}} &= I_{C2}2R/3 - (I_{A2} + I_{B2})R/3 - j(I_{A2} - I_{B2})R/\sqrt{3} = I_{C2}2R/3 + \\ &+ I_{C2}R/3 + I_{C2}\sqrt{3}R/\sqrt{3} = 2I_{C2}R. \end{aligned}$$

Для токов нулевой последовательности $\underline{U}_{\text{вых0}} = 0$, так как $\underline{U}_M = 0$ благодаря питанию трансреактора разностью фазных токов $I_{A0} - I_{B0} = 0$, а также равенству нулю суммы падений напряжения на резисторе R : $I_{C0}2R/3 - (I_{A0} + I_{B0})R/3 = 0$. На рис.28,д показан ранний вариант схемы 28,а, примененный в фильтр-реле РТ-2 и ряде других (см.табл.3). В ней на месте трансформатора тока ТА стоял трансформатор тока ТК с соотношением 1:3 витков первичной и вторичной обмоток, включенный в нулевой провод фазных трансформаторов тока. Соотношение между X_M и R было таким же $X_M = R/\sqrt{3}$. Поэтому, обращаясь к рис.28,д можно, не прибегая еще раз к построению векторных диаграмм, заключить, что для токов прямой и нулевой последовательностей выходные напряжения $\underline{U}_{\text{вых1}}$ и $\underline{U}_{\text{вых0}}$ будут равны нулю, а для токов обратной последовательности $\underline{U}_{\text{вых2}} = 2I_{C2}R$.

В качестве другого примера фильтра, содержащего трансреактор, рассмотрим фильтр тока обратной последовательности, схема которого приведена на рис.29,а. Такой фильтр используется в реле тока обратной последовательности типа РТФ1, успешно действующих до настоящего времени. Фильтр содержит промежуточный трансформатор тока ТА, первичные обмотки которого

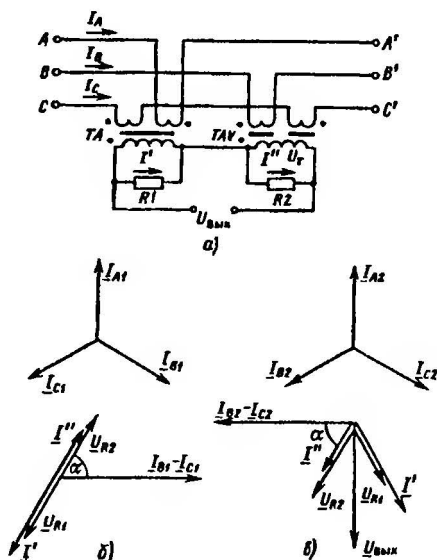


Рис. 29. Активно-индуктивный фильтр токов обратной последовательности с промежуточным трансформатором тока и трансреактором:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при прохождении через фильтр симметричной системы токов прямой последовательности; в — то же при прохождении через фильтр системы токов обратной последовательности

обтекаются разностью фазных токов $I_C - I_A$, и трансреактор TAV , представляющий собой трансформатор с воздушным зазором в магнитопроводе. По его первичным обмоткам протекает разность токов $I_B - I_C$. Ко вторичной обмотке TA подсоединен резистор $R1$, а ко вторичной обмотке TAV — резистор $R2$. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ фильтра является суммой падений напряжения U_{R1} в сопротивлении $R1$ и U_{R2} в сопротивлении $R2$ от вторичных токов I' и I'' соответственно. Падение $U_{R1} = I'R1$ совпадает по направлению с вектором разности токов $I_C - I_A$. Вектор разности токов $I_B - I_C$, протекающих по первичным обмоткам TAV , может быть представлен в виде

двух слагаемых токов, сдвинутых между собой на 90° . Один из них трансформируется во вторичную обмотку TAV , преобразуясь в ток I' , проходящий через резистор $R2$. Второй ток служит для создания магнитного потока в сердечнике TAV , имеющем воздушный зазор. Резистор $R2$ подобран так, что вектор тока оказывается сдвинутым по отношению к вектору разности токов $I_B - I_C$ против часовой стрелки на угол $\alpha = 60^\circ$. Сопротивление резистора $R1$ выбрано таким, чтобы при равных по модулю разностях токов в первичных обмотках трансформатора тока TA и трансреактора TAV получающиеся падения напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ имели одинаковые значения. Так как в рассматриваемой схеме опорным является вектор разности токов $I_B - I_C$, то поворот на 60° напряжения U_{R2} по отношению к нему обеспечивает при сложении с напряжением U_{R1} , определяемым разностью токов $I_C - I_A$, получение выходного напряжения, соответствующего выделяемой составляющей обратной последовательности.

Как это получается, видно из векторных диаграмм токов для случаев раздельной подачи на входы фильтра симметричных систем токов: на рис.29,б — прямой, а на рис.29,в — обратной последовательности. Значение модуля $\underline{U}_{\text{вых}} = \sqrt{3} \underline{U}_{R1}$. Вектор $\underline{U}_{\text{вых}}$ направлен противоположно вектору фазного тока $\underline{I}_{A2}$ обратной последовательности фазы *A*.

Важным достоинством фильтров, показанных на рис.28 и 29, является достаточная нагрузочная способность, позволившая использовать на выходе фильтра обычные электромагнитные реле напряжения. Кроме того, благодаря отсутствию в схемах фильтров конденсаторов они обладают весьма стабильными характеристиками, не изменяющимися во времени. Поэтому такие токовые фильтры применялись в течение многих лет, пока не появились фильтры, содержащие операционные усилители. Для них, как и для фильтров напряжения, не требуется большая выходная мощность, и более простые фильтры на *RC*-цепочках используются здесь чаще.

Одним из первых ФТОП, в котором осуществлена компенсация небаланса при изменении частоты, был фильтр, показанный на рис.30,а. В схему фильтра входят два промежуточных трансформатора тока *TA1* и *TA2* и трансреактор *TAV*. В одну из первичных обмоток трансформатора *TA1* поступает ток фазы *A*, а во вторую — ток нулевого провода. Число витков обмотки, обтекаемой фазным током превышает в 3 раза число витков обмотки, включенной в нулевой провод. Таким путем обеспечивается исключение составляющей нулевой последовательности из вторичного тока $\underline{I}_A$. Нагрузкой *TA1* являются резисторы *R1* и *R2*, соединенные последовательно. Напряжение, получаемое на вторичной стороне *TA1* — это падение напряжения в резисторах *R1* и *R2* от тока $\underline{I}_1$, т.е. $\underline{U}_1 = \underline{I}_1(R1+R2)$, пропорциональное току $\underline{I}_A$, не содержащему слагающей нулевой последовательности. Трансреактор *TAV* включен на разность токов $\underline{I}_B - \underline{I}_C$ и его вторичное напряжение $\underline{U}_2 = -jX_m(\underline{I}_B - \underline{I}_C)$. Трансформатор *TA2* также обтекается с первичной стороны разностью токов $\underline{I}_B - \underline{I}_C$. Образующийся при этом вторичный ток $\underline{I}_3$ проходит через конденсатор *C1*. Падение напряжения на нем отстает от тока $\underline{I}_3$ на 90°: $\underline{U}_3 = -\underline{I}_3 jX_{C1}$. Напряжение на выходе фильтра, измеряемое между зажимами *m* и *n*, представляет собой сумму указанных напряжений $\underline{U}_{\text{вых}} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3$.

На рис.30,б и в показаны векторные диаграммы токов и напряжений, получающиеся при раздельной подаче на фильтр разных по величине систем токов прямой и обратной последовательностей. При конструировании фильтра значения реактивных

сопротивлений подобраны так, что при номинальной частоте и одинаковых токах в первичных обмотках $TA1$ и $TA2$ получаемые напряжения U_2 и U_3 равны между собой. Резисторы $R1$ и $R2$ подобраны такими, что в симметричном режиме $U_1 = 2U_2$. При таком подборе сопротивлений значение выходного напряжения при подаче на фильтр системы токов прямой последовательности будет равняться нулю. Напряжение небаланса на выходе фильтра не будет меняться при отклонении частоты от номинального значения за счет того, что реактивные сопротивления X_M и X_{C1} имеют взаимно обратную зависимость от частоты, благодаря чему сумма падений напряжения $U_2 + U_3$ остается неизменной при изменении частоты. Как видно из диаграммы рис.30, в выходное напряжение фильтра для токов обратной последовательности $U_{\text{вых}} = U_1 + U_2 + U_3 = 4I_{A2}X_M\sqrt{3}$. Равенство нулю выходного напряжения для токов нулевой последовательности предопределено самой схемой токовых цепей, исключаяющей возможность трансформации этих токов во вторичные обмотки $TA1$, TAV и $TV2$.

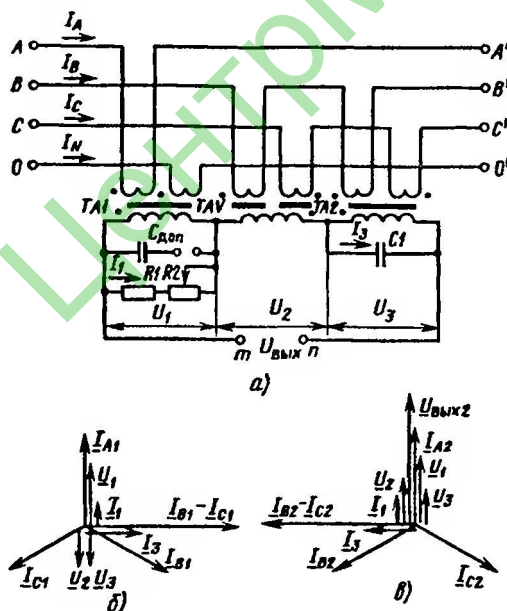


Рис. 30. Фильтр токов обратной последовательности с компенсацией небаланса при изменении частоты:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при поступлении в фильтр симметричной системы токов прямой последовательности; в — то же при подаче системы токов обратной последовательности

Конденсатор $C_{\text{доп}}$ заложен в схему для того, чтобы при необходимости скомпенсировать угловую погрешность фильтра.

Рассмотренный фильтр используется в реле тока обратной последовательности типа РТФ-6М, предназначенном для защиты мощных генераторов.

Комбинированные фильтры токов представляют собой либо искусственно собранные сумматоры из фильтров разной последовательности, либо односистемные устройства, полученные путем разбалансировки типового фильтра какой-либо одной последовательности. Примером фильтра такого рода может служить комбинированный фильтр токов $I_1 + k_{\phi} I_2$, применяемый в органе управления высокочастотным передатчиком дифференциально-фазной защиты линий высокого напряжения вместе с описанным выше ФТОП пускового органа (см. рис. 28).

На рис. 31, а изображена принципиальная схема такого комбинированного фильтра токов. Она отличается от схемы рис. 28 только включением элементов фильтра в другие фазы токовых цепей и отсутствием промежуточного трансформатора тока ТА. Особенностью фильтра является наличие отпаяек на вторичной обмотке трансреактора ТАВ, с помощью которых изменяется значение сопротивления взаимной индукции X_M . Это дает возможность получать несколько значений коэффициента фильтра k_{ϕ} . Дополнительно в схеме фильтра установлен промежуточный трансформатор ТВ.

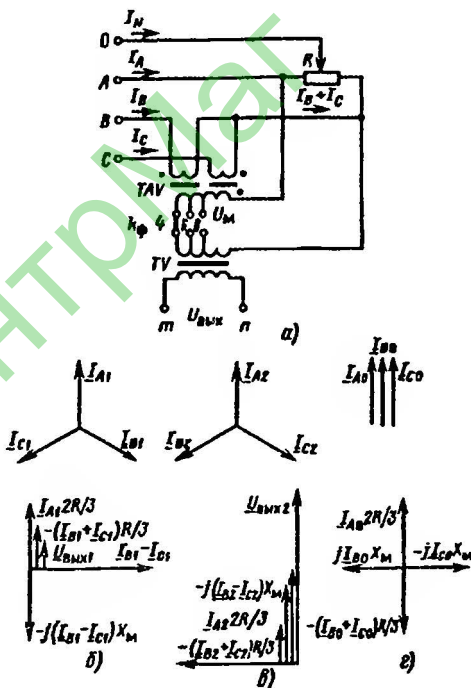


Рис. 31. Комбинированный фильтр токов прямой и обратной последовательностей $I_1 + k_{\phi} I_2$.

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при подаче в фильтр симметричной системы токов прямой последовательности; в — то же при подаче токов обратной последовательности; г — то же при подаче токов нулевой последовательности

Он нужен для согласования внутреннего сопротивления фильтра с сопротивлением нагрузки, которой является орган управления передатчиком.

В данном варианте исполнения комбинированного фильтра принято, что при подаче на входы фильтра несимметричной системы токов в выходном напряжении фильтра наряду с преобладающим значением составляющей, пропорциональной току обратной последовательности, будет содержаться некоторая доля напряжения, определяемая током нулевой последовательности. Как это получается можно уяснить из показанных на рис.31,б,в и г векторных диаграмм токов и напряжений, полученных при раздельной подаче на фильтр равных по модулю симметричных систем токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Диаграммы показывают, что выходное напряжение по подаче системы токов прямой последовательности намного меньше, чем при подаче токов обратной последовательности. Действительно, в первом случае $U_{\text{вых}}$ пропорционально разности $R - X_m\sqrt{3}$, а во втором $U_{\text{вых}}$ зависит от суммы $R + X_m\sqrt{3}$. В случае протекания через фильтр произвольной несимметричной системы токов напряжение $U_{\text{вых}}$ будет представлять собой сумму: $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}} = I_{A1}(R - X_m\sqrt{3}) + I_{A2}(R + X_m\sqrt{3}) = (R - X_m\sqrt{3})(I_{A1} + k_{\text{ф}}I_{A2})$, где $k_{\text{ф}} = (R + X_m\sqrt{3})/(R - X_m\sqrt{3})$. Так как принято, что $R > X_m\sqrt{3}$, то коэффициент $k_{\text{ф}}$ всегда имеет положительное значение. В упомянутой выше защите $k_{\text{ф}}$ может принимать следующие значения: 4, 6 и 8. Существует исполнение защиты, в которой допускается значение $k_{\text{ф}}$, равное 10.

Такой подбор допустимых значений $k_{\text{ф}}$ не случаен. Он обусловлен требованиями к чувствительности защиты при наиболее характерных видах КЗ в сетях 110—750 кВ с наглухо заземленной нейтралью. Чаще всего на линиях 110—750 кВ наблюдаются однофазные КЗ на землю, затем следуют замыкания между двумя фазами без земли. Реже встречаются двухфазные замыкания на землю в одной точке и симметричные трехфазные КЗ. Более подробный анализ поведения комбинированного фильтра при различных видах КЗ дается в § 11.

В заключение остановимся еще на одной схеме комбинированного фильтра токов прямой и обратной последовательностей, показанной на рис.32,а. Такие фильтры применяются в продольной дифференциальной защите линий 6—35 кВ типа ДЗЛ. В схеме фильтра имеется два регулировочных резистора $R1$ и $R2$ и трансреактор TAV с двумя первичными обмотками, имеющими отпайки, которые подсоединены к переключателю h .

Ток фазы A , протекая по резистору $R1$, создает на нем падение напряжения $\underline{U}_{R1} = \underline{I}_A R$, где R — часть резистора $R1$, через которую течет ток $\underline{I}_A$. Ток фазы B поступает в одну из первичных обмоток трансреактора TAV и наводит в его вторичной обмотке напряжение $\underline{U}_T = \underline{I}_B jX_M$, где X_M — сопротивление взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками трансреактора. Ток фазы C проходит по той части резистора $R2$, которая имеет такое же сопротивление R , как и часть сопротивления $R1$, обтекаемая током $\underline{I}_A$. При этом получается падение напряжения $\underline{U}_{R2} = \underline{I}_C R$. Другая первичная обмотка трансреактора TAV обтекается суммой фазных токов, поступающих в нулевой провод. Число витков этой первичной обмотки в 3 раза меньше, чем у первичной обмотки, обтекаемой током фазы B . Такой выбор витков первичных обмоток трансреактора TAV нужен для исключения влияния составляющих тока нулевой последовательности на работу фильтра. Соотношение модулей сопротивлений R и X_M принято таким, что всегда $X_M < R\sqrt{3}$.

Выходное напряжение фильтра $\underline{U}_\Phi = \underline{U}_{\text{вых}}$, образующееся между выводами m и n , представляет собой сумму из трех слагаемых: вторичного напряжения трансреактора $\underline{U}_T$, падения на-

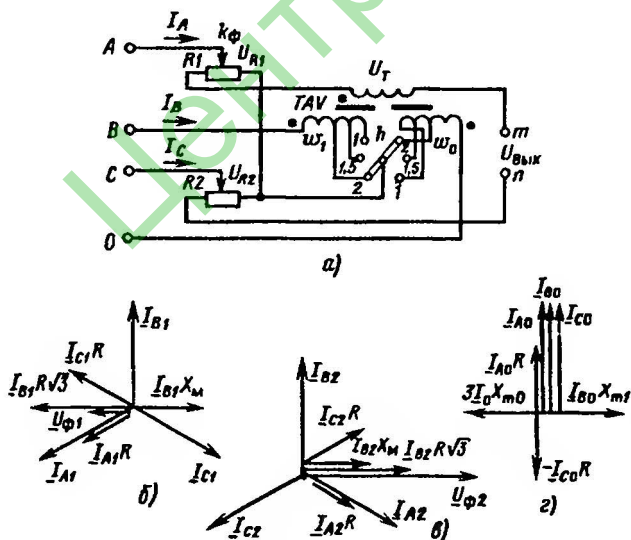


Рис. 32. Комбинированный фильтр токов прямой и обратной последовательностей:

a — принципиальная схема фильтра; b — векторная диаграмма токов при подаче в фильтр симметричной системы токов прямой последовательности; c — то же при подаче токов обратной последовательности; d — то же при подаче токов нулевой последовательности

пряжения в резисторе $R1$ от тока фазы A , равного $I_A R$, и падения напряжения в резисторе $R2$ от тока фазы C , равного $I_C R$. При суммировании слагаемых нужно учитывать, что к выводу m подсоединен конец вторичной обмотки трансреактора TAV , а начало этой обмотки, отмеченное точкой, связано с резистором $R1$. Падение напряжения в нем от тока фазы A согласуется с направлением обхода цепи суммирования, а падение напряжения в резисторе $R2$ от тока фазы C направлено навстречу пути обхода. Эти моменты должны приниматься во внимание при построении векторных диаграмм напряжений, действующих в схеме фильтра.

На рис.32,б,в и г представлены векторные диаграммы токов и напряжений в фильтре, получающиеся при поочередной раздельной подаче на фильтр одинаковых по величине симметричных систем токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. Пользуясь этими диаграммами, определим значения выходного напряжения U_ϕ для каждой последовательности. Для прямой последовательности это напряжение определяется из выражения $U_{\phi 1} = -(I_{A1} R - I_{C1} R) + I_{B1} X_m = I_{B1} (X_m - R \sqrt{3})$. То же для обратной последовательности $U_{\phi 2} = I_{A2} R - I_{C2} R + I_{B2} X_m = I_{B2} (X_m + R \sqrt{3})$. Для нулевой последовательности значение $U_{\phi 0} = 0$, так как равные вектора $I_{A0} R$ и $I_{C0} R$ противоположны по знаку, и их сумма равна нулю. Одновременно равна нулю и сумма напряжений, наведенных во вторичной обмотке TAV током I_{B0} и суммарным током $3I_0$, протекающим по другой первичной обмотке TAV . Отсюда следует, что при подаче на фильтр произвольной несимметричной трехфазной системы токов, мы получим следующее выражение для выходного напряжения фильтра $U_\phi = U_{\phi 1} + U_{\phi 2} = I_{B1} (X_m - R \sqrt{3}) + I_{B2} (X_m + R \sqrt{3}) = (X_m - R \sqrt{3}) \times (I_{B1} + k_\phi I_{B2})$, где $k_\phi = (X_m - R \sqrt{3}) / (X_m + R \sqrt{3})$.

Так как всегда $X_m < R \sqrt{3}$, то k_ϕ представляется отрицательной величиной. Нужное значение k_ϕ определяется путем установки движков резисторов $R1$ и $R2$ в соответствующее положение. Значение k_ϕ может приниматься от -4 до -10 .

Переключателем h выбранная уставка по току срабатывания исполнительного органа, подключенного к выходу фильтра, может быть заглублена в 1,5 или 2 раза. Выбор комбинированного фильтра с отрицательным k_ϕ обусловлен тем, что наиболее тяжелым распространенным видом КЗ в сетях 6—35 кВ являются двойные замыкания на землю, при которых составляющие токов прямой и обратной последовательностей I_1 и I_2 имеют противоположные знаки. Анализ работы фильтра для этого случая дается в § 11.

10. Фильтры симметричных составляющих, предназначенные для работы в схемах, выполненных на операционных усилителях

Одним из первых фильтров симметричных составляющих, в выходной части которых используются операционные усилители, является фильтр напряжения обратной последовательности, представленный на рис.33,а. В схеме фильтра имеется два промежуточных трансформатора $TV1$ и $TV2$. Вторичная обмотка у этих трансформаторов разделена на две равные части, и средняя часть обмотки соединена с нулевой шинкой. Напряжение, наводимое во вторичной обмотке, имеет в левой половине положительный сдвиг относительно нулевой шинки, а в правой половине сдвинуто относительно нее в отрицательном направлении.

На трансформатор $TV1$ поступает линейное напряжение $\underline{U}_{AB}$. Напряжение $+\underline{U}_{ab}$, наведенное на вторичной стороне $TV1$, создает на резисторах $R1$ и $R6$ падение напряжения, совпадающее по знаку с входным напряжением $\underline{U}_{AB}$. Это падение напряжения подается в цепочку, состоящую из конденсатора $C1$ и резисторов $R2$ и $R3$, сопротивления которых подобраны таким образом, что ток I_1 , возникающий в этой цепочке, опережает $+\underline{U}_{ab}$ на 30° .

На трансформатор $TV2$ подается линейное напряжение $\underline{U}_{BC}$. Вторичное напряжение $+\underline{U}_{bc}$, наведенное в левой части обмотки, со-

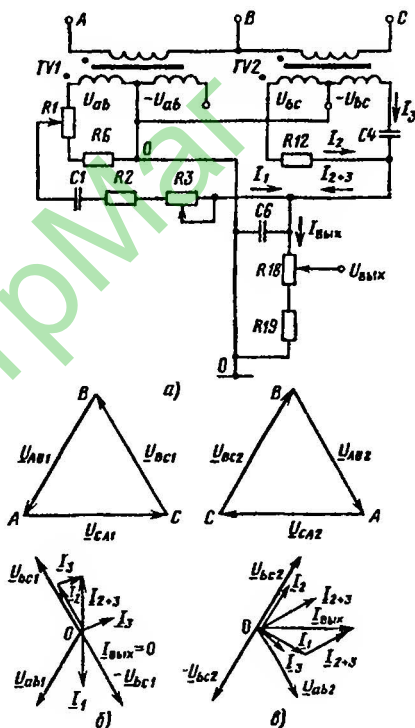


Рис. 33. Фильтр напряжения обратной последовательности с токовым выходом:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов и напряжений, получающаяся при подводе к фильтру симметричной системы напряжений прямой последовательности; в — то же при подводе к фильтру системы напряжений обратной последовательности

здает в резисторе $R12$ ток I_2 , совпадающий по фазе с входным напряжением $\underline{U}_{BC}$. Вторичное напряжение $-\underline{U}_{BC}$, образующееся в правой половине обмотки, создает в конденсаторе $C4$ ток I_3 , опережающий напряжение $-\underline{U}_{BC}$ на 90° . Естественно, что относительно напряжения $\underline{U}_{BC}$ в первичной обмотке этот ток является отстающим.

Выходной нагрузкой фильтра являются резисторы $R18$ и $R19$ и конденсатор $C6$. Значения сопротивлений $R18$ и $R19$ намного меньше сопротивлений, входящих в цепи токов I_1 , I_2 и I_3 , и практически не влияют на их значение. Выходной ток фильтра равняется сумме токов, т.е. $I_1 + I_2 + I_3 = I_{\text{ВЫХ}}$.

На рис.33,б и в показаны векторные диаграммы токов и напряжений в фильтре при отдельной подаче на него симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательности. Когда на фильтр подана симметричная система напряжений прямой последовательности $\underline{U}_{AB1}$, $\underline{U}_{BC1}$ и $\underline{U}_{CA1}$, из рис.33,б видно, что сумма токов $I_1 + I_2 + I_3$ равняется нулю, и выходной ток отсутствует, $I_{\text{ВЫХ}} = 0$. При поступлении на фильтр симметричной

системы напряжений обратной последовательности $\underline{U}_{AB2}$, $\underline{U}_{BC2}$ и $\underline{U}_{CA2}$ (рис.33,в) суммарный ток $I_{\text{ВЫХ}} = I_1 + I_2 + I_3$ превышает в $\sqrt{3}$ раз ток I_1 . Создаваемое $I_{\text{ВЫХ}}$ падение напряжения $\underline{U}_{\text{ВЫХ}}$ на резисторах $R18$ и $R19$ является управляющим для операционного усилителя, обеспечивающего действие исполнительного узла схемы.

Если изменить чередование фаз линейных напряжений, подаваемых на входные зажимы фильтра, то он преобразуется в фильтр напряжения прямой последовательности. Одним из первых токовых фильтров симметричных составляющих, на выходе которого установлен операционный усилитель, является фильтр тока обратной последовательности, изображенный на рис.34,а. Этот

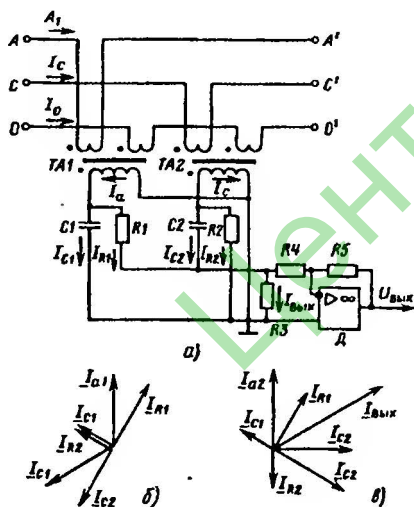


Рис. 34. Фильтр тока обратной последовательности с промежуточными трансформаторами, обеспечивающими компенсацию слагающих нулевой последовательности:

а — принципиальная схема фильтра; б — векторная диаграмма токов при протекании по присоединению симметричной системы токов прямой последовательности; в — то же при протекании токов обратной последовательности

фильтр имеет значительное сходство с показанным на рис.27, имеющим такие же составляющие элементы. Основное различие — это значительно меньшие габариты и потребляемая фильтром мощность, так как уровень выходного сигнала у рассматриваемого фильтра в десятки раз меньше, чем у фильтра на рис.27.

Первичные обмотки промежуточных трансформаторов тока фильтра, показанного на рис.34,а, включены не на разность фазных токов, как на рис.27,а соответственно: у $TA1$ — на ток фазы A и ток в нулевом проводе, у $TA2$ — на ток фазы C и то же на ток в нулевом проводе. Это обусловлено тем, что рассматриваемый фильтр может устанавливаться на присоединениях 6—10 кВ, имеющих трансформаторы тока только в двух фазах, вторичные обмотки которых собираются по схеме неполной звезды. Внимательный читатель обратит внимание и на то, что на рис.34 по сравнению с рис.27 несколько изменено и соединение резисторов и конденсаторов в схеме, а на выходе фильтра установлен резистор $R3$, с которого снимается напряжение, подаваемое на вход масштабного усилителя на операционном усилителе A . Соотношение модулей сопротивлений резисторов и конденсаторов в схеме рис.34,а: $X_{C1}=X_{C2}$; $R_1=X_{C1}/\sqrt{3}$ и $R_2=X_{C1}\sqrt{3}$. На рис.34,б и в приведены векторные диаграммы токов в фильтре при раздельной подаче на него симметричных систем токов прямой и обратной последовательностей. Они характеризуют наш фильтр, как фильтр тока обратной последовательности.

Рассмотренная схема фильтра не является единственной, содержащей операционные усилители. Наряду с ней существуют более совершенные схемы фильтров симметричных составляющих, в которых также применяются операционные усилители. Основной частью таких фильтров является схема выделения симметричной составляющей, представляющая по своему принципу действия фильтр напряжения. Такая схема пригодна для создания не только фильтра напряжения, но и фильтра тока. Это достигается за счет питания схемы от соответствующих датчиков напряжения или тока. В фильтрах напряжения такими датчиками являются трансформаторы напряжения, к которым подключается подобная схема. В фильтрах тока датчиками служат трансреакторы или промежуточные трансформаторы тока, нагруженные на резисторы. Питание схемы выделения симметричной составляющей осуществляется напряжениями, снимаемыми с этих резисторов. Эти напряжения пропорциональны токам, проходящим через первичные обмотки трансреактора или промежуточного трансформатора тока.

Следует отметить, что возможность применения одной и той же схемы выделения симметричной составляющей для получения как фильтра напряжения, так и фильтра тока является важным преимуществом подобных схем.

На рис.35,а представлена одна из применяемых схем выделения составляющей обратной последовательности. Питание схемы осуществляется напряжениями $\underline{U}_{ab}$ и $\underline{U}_{bc}$, поступающими от соответствующих датчиков. Эти напряжения связаны с общей нулевой шинкой. Напряжение $\underline{U}_{ab}$ создает в цепочке $R3, C1$ ток I_1 , опережающий $\underline{U}_{ab}$ на 60° . Напряжение $\underline{U}_{bc}$ образует в резисторе $R4$ ток I_2 , модуль которого равен модулю тока I_1 . Ток I_3 , равный

сумме токов $I_1 + I_2$, является выходным током схемы, поступающим на вход инвертирующего сумматора-усилителя на операционном усилителе $A1$ с фильтром высших гармоник в цепи обратной связи. Фильтр высших гармоник состоит из резисторов $R5$ и $R6$ и конденсаторов $C2$ и $C3$, собранных по типовой схеме заграждающего фильтра, настроенного на рабочую частоту сети. Подавление высших гармоник необходимо для исключения неправильного действия измерительного органа, содержащего рассматриваемую схему, при несинусоидальной форме входных сигналов.

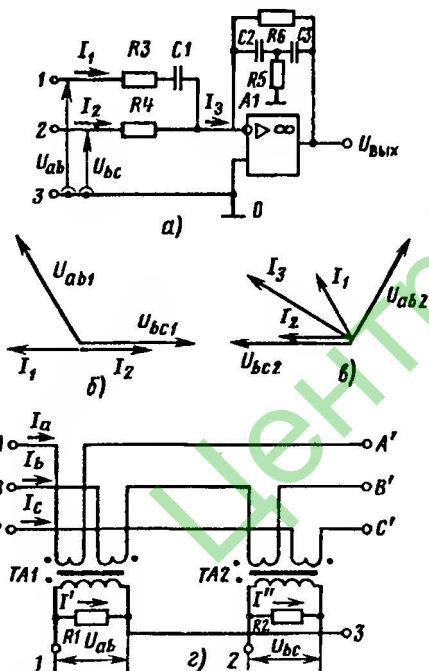


Рис. 35. Схема выделения составляющих обратной последовательности, используемая при создании соответствующих фильтров напряжения или тока:

а — принципиальная схема; б — векторная диаграмма токов в схеме при подаче на нее симметричной системы напряжений прямой последовательности от промежуточных трансформаторов; в — то же при аналогичной подаче напряжений обратной последовательности; г — один из вариантов включения промежуточных трансформаторов тока для получения фильтра токов обратной последовательности

На рис.35,б и в показаны векторные диаграммы напряжений и токов при раздельной подаче на входы схемы симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей. Из диаграмм следу-

ет, что при поступлении системы напряжений прямой последовательности напряжение $\underline{U}_{\text{вых}}$ на выходе $A1$ равняется нулю, а при поступлении напряжений обратной последовательности получающееся $\underline{U}_{\text{вых}}$ пропорционально напряжению фазы C и противоположно ему по направлению.

Рассмотренная схема легко преобразуется в схему для выделения прямой последовательности. Для этого достаточно переключить цепочку $R3, C1$ на напряжение $\underline{U}_{bc}$, а резистор $R4$ — на напряжение $\underline{U}_{ab}$, сохраняя при этом указанное выше соотношение между модулями их сопротивлений.

Для осуществления на базе схемы, показанной на рис.35,а, фильтра тока обратной последовательности можно воспользоваться схемой питания, изображенной на рис.35,г. В эту схему входят два промежуточных трансформатора тока $TA1$ и $TA2$, первичные обмотки которых обтекаются разностью фазных токов $\underline{I}_A - \underline{I}_B$ и $\underline{I}_B - \underline{I}_C$ соответственно. Вторичные токи $\underline{I}'$ и $\underline{I}''$, наводимые во вторичных обмотках $TA1$ и $TA2$, создают на резисторах $R1$ и $R2$ соответствующие падения напряжения $\underline{U}_{ab} = \underline{I}' R1 = k(\underline{I}_A - \underline{I}_B)$ и $\underline{U}_{bc} = \underline{I}'' R2 = k(\underline{I}_B - \underline{I}_C)$, которые поступают на схему выделения обратной последовательности (рис. 35,а).

Другой такой схемой, нашедшей широкое применение, является схема выделения составляющей обратной последовательности, показанная на рис.36,а. Она разработана во ВНИИ релестроения (автор Дони Н.А.).

Основным достоинством схемы является малая зависимость напряжения небаланса на выходе из-за отклонения частоты сети от номинального значения. На входы 1, 2 и 3 схемы поступают напряжения $\underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{bc}$ и $-\underline{U}_{bc}$, пропорциональные соответствующие линейным напряжениям или разностям фазных токов сети. Напряжения $\underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{bc}$ и $-\underline{U}_{bc}$ — создают в сопротивлениях схемы $R1, C1, R2$ и $C2$ соответствующие токи $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ и $\underline{I}_3$.

Выходной сигнал фильтра представляет собой сумму токов, протекающих через его плечи. Ввиду того, что значение выходного сопротивления во много раз меньше сопротивлений плеч, можно с достаточной степенью точности считать, что $\underline{I}_{\text{вых}} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$.

В нормальном режиме, когда на входы фильтра поступает симметричная система напряжений прямой последовательности, значение $\underline{I}_{\text{вых}}$ должно быть близким к нулю. Как видно из векторной диаграммы фильтра для этого случая, показанной на рис.36,б, ток $\underline{I}_1$ в цепи $R1-C1$ при номинальной частоте опережает напряжение $\underline{U}_{ab1}$ на 30° . Токи $\underline{I}_2$ и $\underline{I}_3$, определяемые соответственно напряжениями $\underline{U}_{bc1}$ и $-\underline{U}_{bc1}$, сдвинуты между собой на

90°, а суммарный ток $I_2 + I_3$ отстает от U_{bc1} тоже на 30° и по направлению противоположен току I_1 , но равен ему по модулю. Поэтому при номинальной частоте $I_{\text{ВЫХ}} = 0$. При допустимых отклонениях частоты от номинального значения $I_{\text{ВЫХ}}$ остается близкой к нулю ($\gamma_f = 0$). Это связано с тем, что изменение частоты сети влияет на значение сопротивлений X_{C1} и X_{C2} , которые снижаются при повышении частоты и возрастают при ее снижении. Соответственно изменяются и токи I_1 и I_3 . Однако ток I_1 и сумма токов $I_2 + I_3$ остаются по-прежнему сдвинутыми на 180° и близкими по модулю, а их разность близкой к нулю.

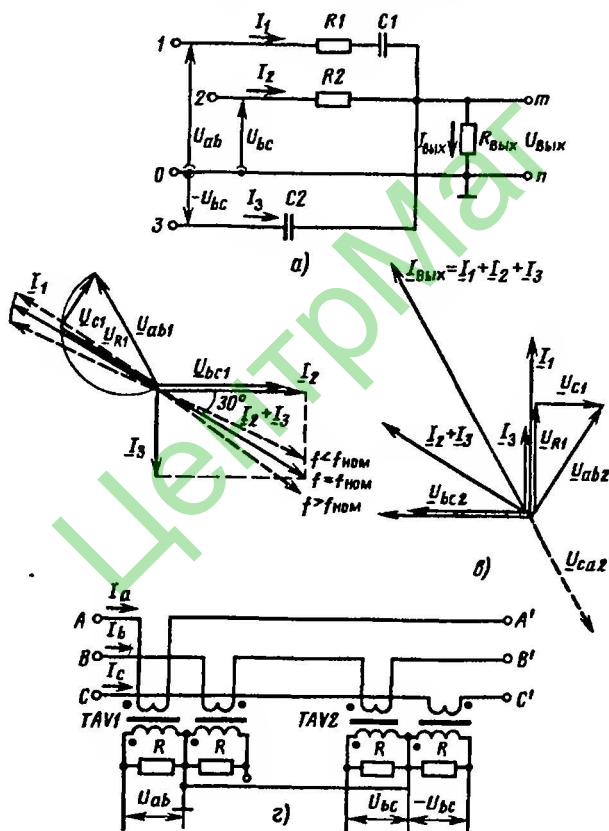


Рис. 36. Схема выделения составляющих обратной последовательности с компенсацией небаланса при изменении частоты:

a — принципиальная схема; b — векторная диаграмма напряжений и токов в схеме при поступлении на нее симметричной системы напряжений прямой последовательности; $в$ — то же при поступлении напряжений обратной последовательности; $г$ — один из вариантов включения промежуточных трансформаторов тока для получения фильтра токов обратной последовательности

При подаче на входы фильтра симметричной системы напряжений обратной последовательности (рис.36,в) на выходе получается значительный ток, который направлен противоположно вектору напряжения $\underline{U}_{ca2}$ (показан пунктиром), а по модулю больше тока I_1 в $\sqrt{3}$ раз. Как видно из этой же диаграммы, этот ток получается как результат сложения тока I_1 , пропорционального $\underline{U}_{ab2}$ с суммарным током $I_2 + I_3$, равно пропорциональным напряжению $\underline{U}_{bc2}$. При этом вектор суммарного тока $I_2 + I_3$ развернут дополнительно по сравнению с векторами напряжений на угол 60° по часовой стрелке. Это наглядно подтверждает, что данный фильтр действительно является фильтром обратной последовательности.

На рис.36,г показана принципиальная схема соединения датчиков тока, к которой может подключаться рассмотренный фильтр при использовании его в качестве фильтра тока обратной последовательности.

Одной из последних разработок ВНИИР является активный фильтр симметричных составляющих, упрощенная принципиальная схема которого показана на рис.37,а. Этот фильтр применяется в сложных устройствах релейной защиты линий высокого напряжения, выпускаемых на ЧЭАЗе. Изображенная схема служит для реализации фильтра обратной последовательности. Однако ее можно считать универсальной, так как путем несложных изменений она преобразуется в фильтр прямой последовательности или в комбинированный фильтр указанных последовательностей. Схема пригодна для осуществления как фильтров напряжения, так и фильтров тока.

На входные зажимы 1, 2 и 3 схемы подаются три напряжения, пропорциональные первичным линейным напряжениям сети или соответствующим разностям первичных токов. На вход 1 поступает напряжение $\underline{U}' = -M\underline{U}_{bc}$, на вход 2 приходит напряжение $\alpha\underline{U}_{ca}$, а на вход 3 — напряжение $-\alpha\underline{U}_{ab}$. Знак минус перед обозначением напряжения показывает, что по своему направлению вектор этого напряжения противоположен направлению соответствующего линейного напряжения или разности фазных токов контролируемой сети. Напряжения, поступающие на зажимы 2 и 3, создают в резисторах $R13$ и $R14$ токи I_1 и I_2 , которые складываются и образуют суммарный ток $I_3 = I_1 + I_2$, значение которого прямо зависит от алгебраической разности векторов $\alpha\underline{U}_{ca}$ и $\alpha\underline{U}_{ab}$. Эта разность пропорциональна фазному напряжению $\underline{U}_a$ с исключенной слагающей нулевой последовательности.

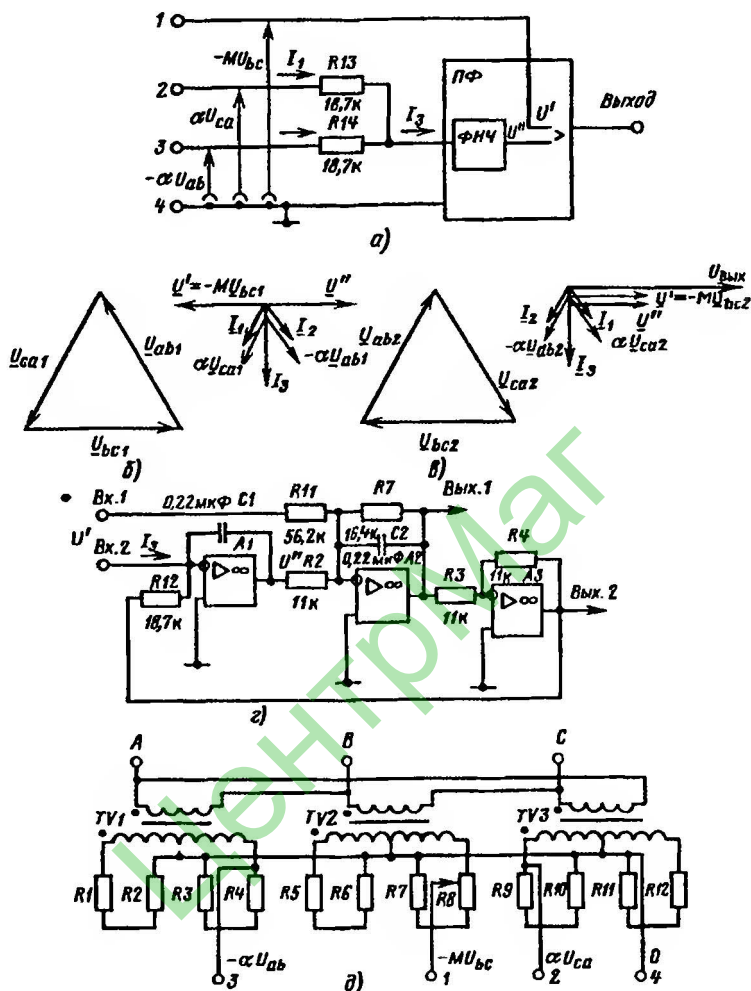


Рис. 37. Активный фильтр симметричных составляющих обратной последовательности:

а — схема узла выделения симметричных составляющих; б — векторная диаграмма напряжений и токов при подаче на входы фильтра симметричной системы напряжений прямой последовательности; в — то же для напряжений обратной последовательности; г — схема фазосдвигающего узла фильтра; д — схема включения датчиков напряжения

На рис.37,б и в приведены векторные диаграммы напряжений и токов, действующих в рассматриваемой схеме, при раздельной подаче на входные зажимы фильтра симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей. Из диаграмм видно, что вектор напряжения $\underline{U}'$ и вектор тока $\underline{I}_3$ сдвинуты

между собой на 90° . При изменении чередования фаз напряжения питания в сети вектор $\underline{U}'$ поворачивается на 180° , а положение вектора тока $\underline{I}_3$ остается неизменным.

В принятой схеме ток $\underline{I}_3$ подается на вход фазоповоротного звена, обеспечивающего получение на его выходе напряжения $\underline{U}''$, пропорционального току $\underline{I}_3$, но сдвинутого по отношению к нему на 90° против часовой стрелки. Благодаря этому при поступлении на фильтр системы напряжений прямой последовательности (рис.37,б) вектора напряжений $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$ оказываются противоположно направленными. Если сделать модули этих векторов равными по значению, то их сумма будет равняться нулю. При обратном чередовании фаз (рис.37,в) полученные напряжения $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$ сложатся, и на выходе возникнет напряжение, пропорциональное составляющей обратной последовательности. Таким образом, данная схема обладает свойствами фильтра обратной последовательности.

Несложно представить себе, что для того чтобы получить фильтр прямой последовательности достаточно изменить исходное направление вектора $\underline{U}'$ на противоположное. Для этого нужно подать на вход 1 схемы вместо напряжения $-M\underline{U}_{bc}$ напряжение $+M\underline{U}_{bc}$, совпадающее по фазе с линейным напряжением сети $\underline{U}_c$. Принимая модули векторов $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$ не равными по значению, получим комбинированный фильтр прямой и обратной последовательностей. В связи с тем, что складываемые напряжения $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$ располагаются по одной оси, коэффициент фильтра k_f будет являться действительной величиной.

В качестве фазоповоротного и суммирующего звеньев рассматриваемой схемы используется полосовой частотный фильтр, собранный из трех функциональных элементов на операционных усилителях: двух интеграторов $A1$ и $A2$ и масштабного усилителя $A3$ (рис.37,з). Через зажим $Bx1$ и резистор $R11$ на инвертирующий вход интегратора $A2$ поступает напряжение $\underline{U}'$. В эту же точку приходит напряжение $\underline{U}''$, пропорциональное току $\underline{I}_3$, но сдвинутое по отношению к нему на 90° против часовой стрелки. Поворот осуществляется в интеграторе $A1$, который является активным фильтром нижних частот в составе используемого полосового фильтра. Ток приходит в интегратор $A1$ через зажим $Bx2$, специально введенный в схему полосового фильтра. Напряжение $\underline{U}''$ создает в резисторе $R2$ ток, который также поступает в инвертирующий вход интегратора $A2$. Таким образом, интегратор $A2$ служит суммирующим звеном, в котором складываются токи,

пропорциональные $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$. Интеграторы $A1$ и $A2$ вместе с масштабным усилителем $A3$ образуют схему биквадратного полосового фильтра, обладающего весьма стабильными свойствами, высокой добротностью и возможностью установить желаемый коэффициент передачи. Фильтр настраивается на рабочую частоту сети и снабжен двумя выходными зажимами — $Вых1$ и $Вых2$.

Фильтр обеспечивает устранение из выходного сигнала гармонических составляющих, получающихся в процессе преобразования напряжений $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$. Составляющие, частота которых ниже сетевой, а также постоянное напряжение сдвига подавляются за счет связи масштабного усилителя $A3$ с интегратором $A2$ через интегратор $A1$. Сигнал, поступающий по этой цепи на инвертирующий вход $A2$, противоположен по знаку сумме сигналов таких гармоник, содержащихся в сигналах, поступающих через зажимы $Вх1$ и $Вх2$, и компенсирует ее полностью. Гармоники, превышающие по частоте основную слагающую напряжений $\underline{U}'$ и $\underline{U}''$, подавляются при прохождении через интеграторы $A1$ и $A2$. Таким образом, на выходные зажимы $Вых1$ и $Вых2$ сигнал рабочей частоты проходит беспрепятственно, а влияние гармоник других частот резко снижается.

На рис.37,д представлена схема многоцелевого набора датчиков напряжения, подключаемых к линейным напряжениям сети. К ним может быть присоединена рассмотренная выше схема при создании желаемого варианта фильтра симметричных составляющих. Набор содержит три трансформатора напряжения $TV1—TV3$. Средняя точка вторичной обмотки соединена с нулевой шинкой. Этим создается возможность получения на вторичной стороне напряжения как совпадающего по фазе с первичным, так и противоположного ему по направлению. С нагрузочных резисторов $R1—R2$ снимаются нужные значения вторичных напряжений. Одновременно датчики напряжения могут использоваться для питания других нагрузок. Для фильтров тока используется типовой набор датчиков тока с аналогично собранной схемой вторичных цепей. Датчиками тока служат трансреакторы с двумя первичными обмотками, что позволяет получать на вторичной стороне напряжения, пропорциональные соответствующей разности токов двух фаз на стороне питания.

11. Анализ работы комбинированных фильтров симметричных составляющих при разных видах КЗ

Комбинированные фильтры токов и напряжений применяются в качестве источника однофазного тока или напряжения, обеспечивающего действие специального измерительного органа релейной защиты линий высокого напряжения при наиболее характерных для них видах короткого замыкания. Такие источники устанавливаются в защитах, в которых производится сравнение токов КЗ по концам линии, а передача сравниваемых сигналов осуществляется по одиночным каналам связи. В высокочастотной дифференциально-фазной защите ВЛ 110—750 кВ, сокращенно ДФЗ, в качестве такого канала используется высокочастотная связь по проводам защищаемой линии. В продольной дифференциальной защите линий 6—35 кВ типа ДЗЛ таким каналом служит пара проводов кабельной (реже воздушной) телефонной линии связи.

Одним из основных требований к комбинированному фильтру является достаточная чувствительность к КЗ любого вида, возможного в пределах защищаемого присоединения.

Для качественного анализа показателей чувствительности комбинированного фильтра мы воспользуемся содержащимися в § 3 векторными диаграммами первичных токов при различных видах КЗ. Это допустимо, так как для питания защиты линии вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются в звезду. Поэтому векторные диаграммы вторичных и первичных токов совпадают друг с другом, differing лишь по масштабу значений токов, который определяется коэффициентом трансформации трансформаторов тока.

Если сравнить значения $\underline{U}_{\text{вых}}$ фильтра, полученные при равных по модулю первичных токов для различных видов КЗ на линии, то можно заключить, что результирующая величина $\underline{U}_{\text{вых}}$ зависит не только от вида КЗ, но и от фаз линии, на которых произошло повреждение. Рассмотрим это на отдельных примерах.

Так, при однофазном КЗ на фазе A , векторная диаграмма которого изображена на рис.6,б, вектора симметричных составляющих фазы A прямой и обратной последовательностей $I_{KA1}^{(1)}$ и $I_{KA2}^{(1)}$ равны по величине и совпадают по направлению. Очевидно, что векторная диаграмма вторичных токов будет ана-

логичной, и соответствующие токи $I_{\kappa a1}^{(1)}$ и $I_{\kappa a2}^{(1)}$ тоже будут одинаковыми по значению и направлению и равняться $1/3$ вторичного тока фазы A . Получаемое на выходе фильтра напряжение составит в этом случае $\underline{U}_{\text{вых}} = I_{\kappa a1}^{(1)} + k_{\phi} I_{\kappa a2}^{(1)} = I_{\kappa a1}^{(1)} (1 + k_{\phi})$. Возьмем минимальное из возможных значение $k_{\phi} = 4$. Тогда $\underline{U}_{\text{вых}} = 5 I_{\kappa a1}^{(1)}$.

Обратимся теперь к однофазному КЗ на фазе B . Векторная диаграмма вторичных токов для этого случая показана на рис.38,а. Из нее видно, что вектора симметричных составляющих фазы A прямой и обратной последовательностей $I_{\kappa a1}^{(1)}$ и $I_{\kappa a2}^{(1)}$ сдвинуты между собой на 120° , иначе говоря $I_{\kappa a2}^{(1)} = a I_{\kappa a1}^{(1)}$. Выходное напряжение оказывается равным $\underline{U}_{\text{вых}} = I_{\kappa a1}^{(1)} (1 + k_{\phi} a)$. При $k_{\phi} = 4$ это составит: $\underline{U}_{\text{вых}} = 3,62 I_{\kappa a1}^{(1)}$, т.е. на 38% меньше, чем при таком же первичном токе КЗ на фазе A . Такое же соотношение получается и при однофазном КЗ на фазе C .

Перейдем теперь к КЗ между двумя фазами B и C без земли. Векторная диаграмма первичных токов для такого КЗ показана на рис.5. Из нее видно, что вектора $I_{\kappa A1}^{(2)}$ и $I_{\kappa A2}^{(2)}$ равны по значению, но противоположны по направлению, т.е. $\underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} = -\underline{I}_{\kappa A2}^{(2)}$.

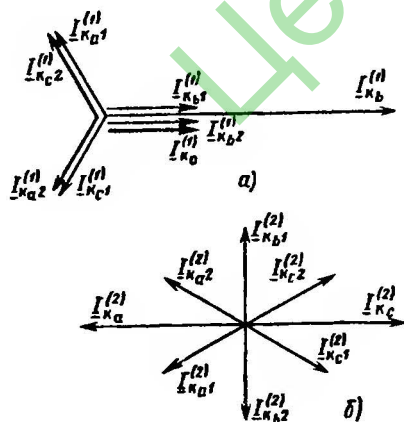


Рис. 38. Векторные диаграммы вторичных токов:
а — при однофазном КЗ на фазе B ; б — при двухфазном КЗ между фазами A и C

Очевидно, что выходное напряжение комбинированного фильтра в рассматриваемом случае будет равно $\underline{U}_{\text{вых}} = I_{\kappa a1}^{(2)} + k_{\phi} I_{\kappa a2}^{(2)} = I_{\kappa a1}^{(2)} (1 - k_{\phi})$. Для $k_{\phi} = 4$ это составит $3 I_{\kappa a1}^{(2)}$. Однако это еще не говорит о том, что чувствительность защиты будет хуже, чем при однофазном КЗ. Дело в том, что при однофазном КЗ модуль $I_{\kappa a1}^{(1)}$ равен $1/3$ модуля полного тока КЗ, а при двухфазном КЗ

модуль $\underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}$ в $\sqrt{3}$ раз меньше модуля полного тока $\underline{I}_{\kappa}^{(2)}$. При одинаковых значениях первичных токов однофазного и двухфазного КЗ составляющая $\underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} = \sqrt{3} \underline{I}_{\kappa A1}^{(1)}$. Поэтому значение $\underline{U}_{\text{вых}}$ фильтра оказывается при двухфазном КЗ без земли больше, чем при однофазном КЗ. При $k_{\phi} = 4$ это отношение составляет $\underline{U}_{\text{вых}}^{(2)} / \underline{U}_{\text{вых}}^{(1)} = 3\sqrt{3}/5 = 1,038$ или на 3,8% больше. При двухфазном КЗ между двумя другими фазами (AB и CA) выходное напряжение фильтра получается большим, чем при КЗ между фазами B и C . На рис.38,6 представлена векторная диаграмма вторичных токов для КЗ между фазами C и A . Действительно, тут $\underline{I}_{\kappa A2}^{(2)}$ отстает от $\underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}$ на 60° , т.е. $\underline{I}_{\kappa A2}^{(2)} = -a \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}$, и поэтому $\underline{U}_{\text{вых}}^{(2)} = \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)} + k_{\phi} \underline{I}_{\kappa A2}^{(2)} = \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}(1 - k_{\phi}a)$. При $k_{\phi} = 4$ получим $\underline{U}_{\text{вых}}^{(2)} = 4,54 \underline{I}_{\kappa A1}^{(2)}$ или на 54% больше, чем при КЗ между фазами B и C .

Наиболее тяжелым по условиям чувствительности измерительного органа с таким фильтром является двухфазное КЗ между фазами B и C с землей. В этом случае составляющие $\underline{I}_{\kappa A1}^{(1,1)}$ и $\underline{I}_{\kappa A2}^{(1,1)}$ направлены противоположно, как и в случае КЗ без земли, но значение $\underline{I}_{\kappa A2}^{(1,1)}$ при рассматриваемом виде КЗ меньше $\underline{I}_{\kappa A1}^{(1,1)}$ на величину составляющей нулевой последовательности $\underline{I}_{\kappa 0}^{(1,1)}$. Соотношение токов $\underline{I}_{\kappa A2}^{(1,1)}$ и $\underline{I}_{\kappa 0}^{(1,1)}$ обратно пропорционально результирующим сопротивлениям X_2 и X_0 . Практические расчеты показывают, что, как правило, значение k_{ϕ} должно выбираться на основе расчета такого КЗ и составлять не менее 6.

Для защиты линий, работающих в сетях 6—35 кВ с изолированной нейтралью, в которых не бывает однофазных КЗ, сопровождающихся большими токами, применяют комбинированные фильтры $\underline{I}_1 + k_{\phi} \underline{I}_2$, в которых k_{ϕ} имеет отрицательное значение. Благодаря этому при всех видах двухфазного КЗ между фазами B и C значение $\underline{U}_{\text{вых}}$ будет определяться не разностью, а суммой $\underline{I}_1 + k_{\phi} \underline{I}_2$, и задача достаточной чувствительности защиты решается легче.

12. Реле и измерительные органы защиты, реагирующие на симметричные составляющие токов и напряжений

Устройства релейной защиты, имеющие в своем составе аппаратуру и реагирующие на симметричные составляющие токов и напряжений различной последовательности, начали применяться в нашей стране еще в годы, предшествовавшие Великой Отечественной войне. Даже во время войны этот процесс не останавливался.

В первые годы после войны отечественная промышленность освоила изготовление ряда типов реле и панелей защиты, в которых содержатся фильтры симметричных составляющих. Работа по созданию и внедрению в производство новых видов аппаратуры, реагирующей на симметричные составляющие, продолжается и в настоящее время, в частности с использованием микроэлектроники и элементов вычислительной техники.

Число разных типов реле и отдельных измерительных органов, входящих в состав сложных шкафов и панелей релейной защиты, в которых применены фильтры симметричных составляющих, очень велико. Привести их схемы, описание и технические параметры в рамках одной книги не представляется возможным. Задача автора облегчается тем, что в существующей технической литературе можно найти достаточно подробную информацию о большинстве из них. В конце данного параграфа имеется сводная таблица наиболее распространенных видов подобной аппаратуры со ссылкой на литературу, в которой даются необходимые сведения о ней.

Реле тока и напряжения, упоминаемые в этой таблице, мало чем отличаются от реле, включаемых на полные токи и напряжения; различие состоит в том, что на входе рассматриваемых реле устанавливается соответствующий фильтр симметричных составляющих. Приведенные в таблице реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей по своей конструкции также во многом совпадают с конструкцией реле, реагирующих на полную мощность, обусловленную возникшим повреждением, однако принципиально отличаются от последних по условиям срабатывания.

В § 2 на рис.4 показаны эквивалентные схемы разных последовательностей, к которым может быть приведена любая трехфазная электрическая система при нарушении симметрии токов и напряжений. Источники напряжения в эквивалентных схемах обратной и нулевой последовательностей находятся в месте повреждения. Отсюда следует, что в отличие от мощности прямой последовательности, обусловленной повреждением, которая направлена от генерирующих источников системы к месту возникновения несимметрии, мощности обратной и нулевой последовательностей текут от места повреждения в сторону нейтральных точек системы. Для эквивалентной схемы обратной последовательности ими являются нулевые точки генераторов системы и двигателей нагрузки, а для схемы замещения нулевой последовательности — заземленные нейтрали трансформаторов сети. Наибольшее значение мощности обратной и нулевой последовательностей имеют в месте повреждения и спадают по мере удаления от него, достигая нулевых значений в нейтральных точках сети.

Реле направления мощности в основном используются в схемах защиты линий от разного вида коротких замыканий. При металлическом коротком замыкании угол между полным током КЗ и напряжением в начале линии равен углу φ_k , зависящим от ее сопротивления. Среднее значение φ_k для линий разного напряжения принимается равным 70° для ВЛ 110 кВ, 80° для ВЛ 220 кВ и 85° для ВЛ 330—1150 кВ с расщепленными проводами в фазах. Линии 110 кВ составляют большинство. Поэтому серийные реле направления мощности изготавливаются с учетом значений $\varphi_k = 70^\circ$. В связи с тем, что мощности обратной и нулевой последовательностей направлены противоположно мощности прямой последовательности, угол сдвига между составляющими тока и напряжения обратной или нулевой последовательности различается на 180° по сравнению с прямой. Это подтверждается векторными диаграммами токов и напряжений для различных видов КЗ (см. § 3). Поэтому характеристический угол $\varphi_{м.ч}$ между током и напряжением соответствующей последовательности, подводимыми к реле, при котором реле обладает наибольшей чувствительностью, у всех реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей выбран равным:

$\varphi_{м.ч} = \varphi_k - 180^\circ = 70^\circ - 180^\circ = -110^\circ$ (ток опережает напряжение). Зона срабатывания реле располагается симметрично $\varphi_{м.ч}$ и составляет примерно 150—170°.

К существенным достоинствам реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей относятся: независимость их действия от симметричной нагрузки, текущей по линии, и от величины переходного сопротивления в месте КЗ, а также отсутствие так называемой "мертвой" зоны.

С принципами устройства и работой современных реле этого типа, выполненных на микроэлектронной базе, можно ознакомиться в приложении 1. Там же дано подробное описание схемы и принципа действия нового реле направления мощности обратной последовательности типа РМОП-2-1, изготовление которых началось на Чебоксарском электроаппаратном заводе в 1992 г. Ознакомление с ним поможет при изучении других видов аппаратуры, реагирующей на симметричные составляющие.

В табл. 3 приведены основные данные реле, реагирующих на симметричные составляющие, производства Чебоксарского электроаппаратного завода. Они составляют подавляющую часть аппаратуры подобного назначения, находящейся в эксплуатации.

Помимо перечисленных в таблице трех реле, представляющих собой самостоятельные изделия, релестроительные заводы выпускают большое количество измерительных органов, реагирующих на симметричные составляющие, которые входят в состав сложных, так называемых комплексных реле, панелей и шкафов релейной защиты электроустановок. Обычно они выполняются в виде отдельных модулей, объединенных вместе с другими органами защиты в общие кассеты. Количество разновидностей таких органов весьма велико. Рассматривать их в данной книге нет смысла, так как они неотделимы от остальных органов, входящих в состав сложной защиты объекта. При ознакомлении с подобными устройствами релейной защиты данная книга поможет разобраться с устройством и работой различных измерительных органов, содержащих фильтры симметричных составляющих, так как последние, как правило, весьма редко отличаются от описанных в предыдущих параграфах.

Т а б л и ц а 3

Наименование реле и его основное назначение	Заводское обозначение	Краткая техническая характеристика	Литература	Примечание
Реле тока обратной последовательности широкого применения для защиты от несимметричных КЗ	РТФ-1, РТФ-1М, РТФ-8	$I_{ном} = 1$ или $0,5$ А, $f_{ном} = 50$ Гц. Диапазон уставок $(0,3-1,2) I_{ном}$ фазного тока обратной последовательности. Схема ФТОП: РТФ-1 и РТФ-1М — рис.29; РТФ-8 — рис.34. Реле РТФ-8 выполнены на операционных усилителях и рассчитаны на питание постоянным оперативным током 220 или 110 В	[5, 6, 9, 11]	Реле РТФ-1 снято с производства в начале 70-х гг., реле РТФ-1М — в начале 80-х гг.
Реле тока обратной последовательности для защиты турбогенераторов при перегрузке токами обратной последовательности и несимметричных КЗ	РТ-2, РТФ-7/1, РТФ-7/2, РТФ-9	Ток $I_{ном}$ для РТ-2 — 1 и 5 А; РТФ-2, РТФ-7/1, РТФ-7/2 — 5 и 10 А; РТФ-9 — 1, 5 и 10 А. Частота $f_{ном} = 50$ Гц. Диапазон уставок по фазному току обратной последовательности следующий: Тип реле Первый орган РТ-2, РТФ-7/2 $(0,1-0,2) I_{ном}$ РТФ-2, РТФ-7/1 $(0,04-0,08) I_{ном}$ РТФ-9 $(0,04-0,16) I_{ном}$ Второй орган $(0,3-1,2) I_{ном}$ $(0,4-0,8) I_{ном}$ $(0,4-1,6) I_{ном}$ Схема ФТОП: РТ-2 — рис.30,б; РТФ-2, РТФ-7/1, РТФ-7/2 — рис.27; РТФ-9 — рис.34. Реле РТФ-7/1, РТФ-7/2 и РТФ-9 рассчитаны на питание постоянным оперативным током 220 или 110 В. Реле РТФ-9 выполнено на операционных усилителях	[5, 8, 9, 11]	Реле РТ-2 снято с производства в начале 70-х гг., реле РТФ-7/1 и РТФ-7/2 — в начале 80-х гг.

Продолжение табл. 3

Наименование реле и его основное назначение	Заводское обозначение	Краткая техническая характеристика	Литература	Примечание
Блок-реле тока обратной последовательности для защиты мощных генераторов от повреждения при перегрузках токами обратной последовательности с зависимой характеристикой выдержки времени	РТФ-3, РТФ-6М, БЭ-1101	Ток $I_{ном} = 5$ или 10 А. Частота $f_{ном} = 50$ Гц. Для БЭ-1101 — $f_{ном} = 50$ или 60 Гц. Выдержка времени реле зависит от кратности тока I_2 по отношению к номинальному $I_{ср} = A / I_2$, где A — постоянная, присущая данному типу генератора и внесенная в его паспорт; I_2 — кратность токов $I_2 / I_{ном}$. Для реле РТФ-3 значения A могут устанавливаться от 5 до 15, а диапазон уставок по фазному току обратной последовательности равен $(0,2-0,4)I_{ном}$. Реле РТФ-6М имеет следующие три исполнения: 1-е 2-е 3-е Диапазон уставок по A 5—10 10—20 20—45 Диапазон уставок по I_2: сигнальный 0,05—0,15 0,05—0,15 0,1—0,3 пусковой 0,08—0,24 0,05—0,24 0,12—0,36 отсечка 1 0,4—1,2 0,4—1,2 0,4—1,2 отсечка 2 0,7—1,9 0,7—1,9 0,7—1,9 Блок защиты БЭ-1101 имеет следующие исполнения: Частота: 50 Гц А Б В 60 Гц Г Д Е Диапазон уставок по A 5—10 10—20 20—40 Диапазон уставок по I_2: сигнальный 0,05—0,35 0,05—0,35 0,05—0,35 пусковой 0,08—0,53 0,08—0,53 0,08—0,53 отсечка 0,4—1,6 0,4—1,9 0,4—1,9	[5, 9]	Реле РТФ-3 снято с производства в начале 70-х гг. Реле РТФ-6М — в начале 90-х гг.

Реле напряжения обратной последовательности широкого применения для защиты от несимметричных КЗ	РНФ-1, РНФ-1М, РСН-13	Схемы ФТОП: для реле РТФ-3 — рис.29, РТФ-6М — рис.30, БЭ-1101 — рис.36. Напряжение постоянного оперативного тока для РТФ-3 — 220 или 110 В, для РТФ-6М и БЭ-1101 — 220 В. Блок защиты БЭ-1101 выполнен на операционных усилителях и оснащен тестовым и функциональным контролем			Реле РНФ-2 снято с производства в начале 70-х гг., реле РНФ-1М — в начале 90-х гг.
Фильтр-реле напряжения прямой последовательности для форсировки возбуждения синхронных генераторов	РНФ-2	Напряжение $U_{ном} = 100$ В; для РНФ-1 и РНФ-2 $f_{ном} = 50$ Гц; для РСН-13 $f_{ном} = 50$ и 60 Гц. Диапазон уставок по линейному напряжению обратной последовательности: для реле РНФ-1 и РНФ-1М 6—12 В, для реле РСН-13 6—24 В. Схема ФНОП — рис.26. Реле РСН-13 выполнено на операционных усилителях и рассчитано на питание постоянным оперативным током 220 В	[5, 9, 11]		—
Реле направления мощности нулевой последовательности для защиты трансформаторов и линий при КЗ на землю	ИМБ-178, РБМ-177, РБМ-178, РБМ-277, РБМ-278, РМ-12	Ток $I_{ном} = 1$ или 5 А, $U_{ном} = 100$ В, $f_{ном} = 50$ Гц. Характеристический угол реле $\varphi_x = 70^\circ$. (После включения в схему защиты с измененной полярностью обмотки напряжения достигается угол максимальной чувствительности защиты $\varphi_{м.ч} = 110^\circ$). Реле РБМ-178 и РБМ-278 допускают лишь кратковременное включение на номинальное напряжение. Реле РМ-12 выполнено на операционных усилителях и рассчитано на питание постоянным оперативным током 220 В. Напряжение срабатывания реле РМ-12 имеет фиксированные значения $U_{ср} = 1, 2$ и 3 В	[5, 6, 11]		Реле ИМБ-178 снято с производства в начале 70-х гг., реле серии РБМ — в конце 80-х гг.

Продолжение табл. 3

Наименование реле и его основное назначение	Заводское обозначение	Краткая техническая характеристика	Литература	Примечание
Реле направления мощности обратной последовательности для защиты многообмоточных трансформаторов и линий при несимметричных КЗ	РМОП-1, РМОП-1М, РМОП-2, РМОП-2-1	Ток $I_{ном} = 1$ или 5 А, $U_{ном} = 100$ В. Частота $f_{ном}$ для РМОП-1, РМОП-1М и РМОП-2 — 50 Гц; для РМОП-2-1 — 50 или 60 Гц. Диапазон уставок токового пускового органа по фазному току обратной последовательности: РМОП-1, РМОП-1М и РМОП-2 — $(0,2-0,8)I_{ном}$; РМОП-2-1 — $(0,15-0,8)I_{ном}$. Угол максимальной чувствительности реле $\varphi_{м.ч} = -110^\circ$. Реле РМОП-2-1 выполнено на операционных усилителях и рассчитано на питание постоянным оперативным током 220 В. Схема ФНОП для реле РМОП-1, РМОП-1М, РМОП-2 — рис.26, схема ФТОП — рис.27,а; для РМОП-2-7 — см. приложение 1	[5, 9, 11]	Реле РМОП-1 и РМОП-1М сняты с производства в начале 70-х гг., реле РМОП-2 — в 1993 г.
Устройство блокировки при качаниях для предотвращения неправильных действий защиты при возникновении качаний из-за нарушения синхронизма между частями энергосистемы, реагирующие на напряжение или ток обратной и нулевой последовательности	КРБ-121, КРБ-122, КРБ-123, КРБ-124, КРБ-125, КРБ-126	Ток $I_{ном} = 1$ или 5 А, $f_{ном} = 50$ Гц; напряжение $U_{ном}$ КРБ-121, КРБ-123 и КРБ-125 — 100 В. Диапазон уставок по линейному напряжению обратной последовательности $U_{2ер}$ для КРБ-121 и КРБ-123 — 2, 3, 4 В; для КРБ-125 — 2, 3, 4, 6 и 8 В. Диапазон уставок по току нулевой последовательности $3I_{0ер}$ для всех, кроме КРБ-126 — $(0,2; 0,3 \text{ и } 0,4) I_{ном}$ для КРБ-126 — $(0,3; 0,6 \text{ и } 1,2) I_{ном}$. Диапазон уставок по фазному току обратной последовательности $I_{2ер}$ для КРБ-122 и КРБ-124 — $(0,1; 0,2 \text{ и } 0,3) I_{ном}$ для КРБ-126 — $(0,1; 0,15, 0,2 \text{ и } 0,3) I_{ном}$. Напряжение постоянного оперативного тока 220 или 110 В. Схема ФНОП: для КРБ-121, КРБ-123 и КРБ-125 — рис.26. Схема ФТОП: для КРБ-122 и КРБ-124 — рис.28, для КРБ-126 — рис.27,а	[5, 7]	КРБ-121 и КРБ-122 сняты с производства в начале 60-х гг., реле КРБ-123 и КРБ-124 — в начале 70-х гг.

13. Техническое обслуживание аппаратуры, содержащей фильтры симметричных составляющих

Аппаратура, включающая в себя фильтры симметричных составляющих, весьма разнообразна. Она выполняется как на базе различных электромеханических реле, в том числе электромагнитных, индукционных, поляризованных и магнитоэлектрических, так и на базе статических органов, осуществляемых с помощью операционных усилителей. В этом случае в исполнительной части соответствующего органа устанавливается выходное реле с магнитоуправляемыми контактами, называемого еще герконовым, или в виде малогабаритного электромагнитного реле клапанного типа.

При наладке и текущем обслуживании такой аппаратуры необходимо обеспечить выполнение всех специфических требований, предъявляемых к проверке базовых элементов, на которых осуществлен испытываемый аппарат. В задачу данной книги не входит изложение всех этих требований. Они подробно представлены в материалах заводов-изготовителей и специальной литературе, посвященной конкретным устройствам. В данном параграфе эти требования не излагаются, а главное внимание обращено на особенности наладки и обслуживания собственно фильтров и элементов, непосредственно с ними связанных.

Объем работы по наладке аппаратуры, реагирующей на симметричные составляющие токов и напряжений, мало чем отличается от объема проверок других устройств релейной защиты. Обычно эти работы осуществляются в такой последовательности:

- внешний осмотр и проверка состояния монтажа;

- чистка и механическая регулировка реле, их подвижных контактов переключателей и разъемных соединений;

- проверка электрических характеристик преобразователей и стабилизаторов оперативного тока, а также при необходимости встроенных измерительных преобразователей тока и напряжения и отдельных функциональных узлов и деталей;

- снятие электрических характеристик фильтров симметричных составляющих;

- снятие электрических характеристик реле (блока защиты) в полной схеме;

- проверка реле (блока защиты) рабочим током и напряжением¹.

¹ В связи с большим разнообразием способов проведения проверки эта часть работ выделена в отдельный параграф, заключающий эту книгу.

Эта проверка осуществляется в нагрузочном или искусственно созданном режиме путем подачи токов и напряжений от первичных измерительных преобразователей тока и напряжения. Возможно использование посторонних источников, имитирующих эти режимы.

Остановимся на важнейших общих моментах выполнения каждой из перечисленных выше работ.

Внешний осмотр предполагает устранение отдельных дефектов, выявляемых визуально, лицом, проводящим эту работу. Осмотр подразделяется: до снятия крышек и кожухов (оболочек) аппаратуры и после их удаления.

Вначале удостоверяются в целостности кожухов (оболочек) и цоколей (оснований) реле, определяют плотность их взаимного прилегания и состояние уплотнений, обеспечивающих пыленепроницаемость устройства.

Одновременно через прозрачные участки оболочек оценивают состояние видимых внутренних деталей, в частности контактов и подвижных систем реле. Затем проверяют качество крепления цоколя к опорной конструкции (панели, стенке шкафа и т.п.) и достаточность изоляционных расстояний между электрическими выводами реле и заземленными конструкциями. Производят подтяжку контактных соединений внешних проводов на выводах реле. Убеждается, что внешние провода не поддаются проворачиванию от руки.

Обтирают снаружи мягкой тряпкой съемные крышки и кожуха (оболочки) реле и снимают их.

Следующая операция — очистка внутренней части реле от пыли и загрязнений. Доступные места протирают чистой мягкой тряпкой, не оставляющей ворсинок и обрывков нити. Остальные детали чистят кистью и продувают несильной струей воздуха. При этом нужно соблюдать осторожность, чтобы не вызвать механических повреждений отдельных деталей и токопроводов, а также не нарушить фиксированного состояния установочных элементов (движков, поворотных головок и т.п.) и не изменить изгиб пружин и контактных пластин. Фиксация установочных элементов должна оставаться также неизменной.

Проверяют надежность механических креплений к внутренним конструкционным элементам реле (основания, кронштейны, приливы и т.п.) всех отдельно стоящих деталей реле и стяжку магнитопроводов. Производят подтяжку внутренних винтовых соединений и удостоверяются, что все монтажные провода закреплены прочно, не надломлены и не проворачиваются.

Печатные платы следует откинуть и с помощью лупы осмотреть все печатные проводники, обращая внимание на отсутствие обрывов и отслоений, а также на достаточность изоляционных промежутков между ними и плотность лакового покрытия. Нужно также убедиться в хорошем качестве паек всех радиокомпонентов, микросхем и отдельных проводников, идущих к установленным внутри реле промежуточным трансформаторам, трансреакторам и вынесенным резисторам и конденсаторам, связывающих их как с печатной платой, так и с внешними выводами реле. Осмотру труднодоступных мест может помочь маленькое зеркальце, снабженное длинной ножкой, которое позволяет увидеть отраженные поверхности контактов и просмотреть удаленные воздушные зазоры.

Обнаруженные дефектные пайки необходимо перепаять. Для этого используют специальные низковольтные паяльники. Припой применяют низкотемпературный. Пайку ведут с применением канфиоли. Чтобы не перегреть припаиваемый элемент нужно захватить ножку пинцетом выше места пайки, а время пайки свести к 2—3 с. Допускается применение обычных бытовых паяльников на 220 В мощностью не более 40 Вт, придав паяльному стержню продолговатую конусообразную форму с небольшим углублением на конце.

У электромеханических реле и ручных переключателей нужно проверить ход подвижной части и работу контактов. Подвижная часть — плунжер, клапан (якорь), барабан и т.п. — должна свободно перемещаться в установленных границах без затирания и задевания и возвращаться без помех в начальное положение. Проверяют состояние упоров и ограничителей хода, оценивают величину и равномерность воздушного зазора между подвижной частью и статистическими элементами. Для прочистки и проверки равномерности воздушного зазора можно воспользоваться плоским щупом, а при его отсутствии полоской плотной бумаги соответствующей толщины.

Определяют натяжение возвратных пружин. Для этой цели желательно использовать специальный моментометр.

Оси и подпятники подвижной части должны иметь хорошо отполированную поверхность. При необходимости подшлифования оси можно взять специальную шлифовальную пасту или порошок. После подшлифовки ось протирают чистой мягкой тряпкой до зеркального блеска. Чистку и проверку отсутствия трещин в подпятниках можно произвести с помощью обычной слегка заточенной спички. Смазывать оси какими-либо маслами или синтетическими мазями не допускается.

Воздушные зазоры и люфты осей подвижной части реле строго нормированы. Эти нормы приведены в заводских материалах на конкретные реле и типы переключателей, а также в специальной литературе.

Подгоревшие и загрязненные контакты реле и переключателей нужно почистить. Легкие загрязнения оттирают чистой бумагой. Сильный нагар нужно снять мелким надфилем или лезвием ножа, и затем отполировать зачищенную поверхность с помощью воронила или толстой иглы. Не рекомендуется применять для чистки контактов резину, наждачную бумагу, шлифовальную пасту, порошок или жидкость. Они могут образовывать на поверхности контакта изоляционный налет.

После осмотра и чистки контактов нужно еще раз проверить соответствие заводским нормам зазора между ними, угла встречи, нажатия и совместного хода. При оценке усилия нажима целесообразно воспользоваться специальным графометром.

Заканчивая эту часть работы, устанавливают на место и закрепляют откинутые ранее печатные платы, а также снятые лицевые таблички и другие детали, препятствовавшие осмотру. При последующем определении электрических характеристик аппарата в полной схеме крышки и кожуха (оболочки) реле должны быть плотно закрыты и закреплены.

Измерение сопротивления изоляции производится мегаомметром на 1000 В. Исключением являются статические реле и измерительные органы, содержащие интегральные микросхемы. Для измерения изоляции такой аппаратуры применяют мегаомметры на 500 В.

У всех устройств проверяется изоляция отдельных цепей относительно земли. У отдельно испытываемого реле роль земли осуществляют металлические части корпуса, крепежные скобы и кронштейны, которые связываются с заземленными конструкциями после монтажа реле на месте установки.

Перед испытанием внешние зажимы цепей одного назначения (переменного тока, напряжения, оперативного тока и др.) объединяют в отдельные группы, соединяют друг с другом и с "землей". Это особенно важно для статических реле, в которых могут повреждаться микросхемы от наведенных импульсных напряжений, возникающих при пробое изоляции в соседних цепях. Для испытания изоляции проверяемая группа отсоединяется от земли и измеряется сопротивление изоляции этой цепи относительно других цепей, остающихся заземленными.

Отдельно испытывается изоляция между разомкнутыми выходными контактами устройства. При наличии в схеме реле встроенных промежуточных трансформаторов тока или трансреакторов с разделенными первичными обмотками, включаемыми в разные фазы цепи переменного тока, должно быть измерено сопротивление изоляции каждой из первичных обмоток по отношению к заземленным другим первичным обмоткам и остальным цепям данного устройства. Выводы испытываемой первичной обмотки должны быть при этом закорочены. Выводы остальных групп цепей остаются закороченными и подсоединенными к земле.

По окончании испытаний изоляции реле приступают к снятию электрических характеристик налаживаемого аппарата. Среди них нужно выделить проверки, которые должны проводиться обязательно, и те из них, которые выполняются дополнительно или выборочно.

К числу обязательных относится проверка встроенных в реле собственных преобразователей и стабилизаторов оперативного тока, питаемых либо от общеобъектного источника постоянного оперативного тока 220 или 110 В, либо от первичных измерительных преобразователей напряжения или тока электроустановки. Такие преобразователи и стабилизаторы имеются во всех статических реле защиты, выполненных на базе полупроводников и интегральных микросхем. Подобные узлы питания встречаются у некоторых реле других типов, имеющих встроенные органы выдержки времени, либо выходные узлы, содержащие электромагнитные реле клапанного типа или реле с магнитоуправляемыми контактами (герконовые). С них и начинается работа по снятию электрических характеристик проверяемого устройства.

В объем проверки встроенных преобразователей и стабилизаторов включается, во-первых, измерение значений всех ступеней специально получаемых напряжений, требующихся для работы полупроводниковой части реле, в том числе на шинках плюса и минуса, на нулевой шинке, на шинке специального напряжения смещения и т.д. Измерения выполняются при номинальном значении напряжения основного источника оперативного тока. В узлах питания, подключенных к первичным измерительным преобразователям тока, измерение ступеней напряжений производится при изначально заданном значении тока или при номинальном вторичном токе устройства, оговариваемом в технических условиях. Напряжение следует измерить не только на шинках, но и в отдельных контрольных точках на печатных платах реле.

Во-вторых, необходимо проверить уровни напряжений тех же ступеней при пониженном напряжении со стороны основного питающего источника. Питающее напряжение постоянного тока понижают до $0,7 U_{\text{ном}}$. При переменном питающем напряжении оно снижается до $0,6 U_{\text{ном}}$. При этом уровни получающихся напряжений отдельных ступеней должны сохраняться в допустимых пределах. Для узлов питания, получающих энергию от трансформаторов тока, находят минимальное значение входного переменного тока, при котором уровни напряжений отдельных ступеней начинают выходить за допустимые пределы.

Для замера напряжений нужно пользоваться вольтметром постоянного тока с внутренним сопротивлением не ниже 20 кОм/В .

Следующая обязательная работа — это проверка выходных реле. Она требуется в тех случаях, когда у проверяемого устройства имеется выходной узел со своим исполнительным реле — электромагнитным или герконовым. У этого реле определяют его напряжение срабатывания, которое должно быть не более $0,5\text{--}0,6$ номинального значения напряжения оперативного тока, питающего обмотку реле при действии выходного узла. Кроме того, дополнительно следует измерить напряжение на обмотке исполнительного реле в нормальном режиме, когда устройство находится в несработавшем состоянии, и после действия устройства.

Необходимость в отдельных проверках, которые не являются всегда обязательными, и проводятся дополнительно, возникает, если во время проверки реле в полной схеме выявляется несоответствие отдельных параметров или неисправность каких-либо деталей. В некоторых случаях дополнительные проверки вводятся при обнаружении в схеме реле элементов с пониженной надежностью. Для более наглядного изложения способов таких проверок их описание дается ниже, после рассмотрения методики проверки фильтров симметричных составляющих и испытаний реле в полной схеме.

Снятие электрических характеристик фильтров симметричных составляющих. Настройка фильтров напряжения обратной последовательности (ФНОП). Обычно ее производят с подключенной нагрузкой фильтра. Цель настройки — получение минимального значения напряжения на выходе фильтра при подаче на его входы симметричной трехфазной системы линейных напряжений, близких по значению к номинальному. Сокращенно эту операцию называют настройкой на минимум небаланса. Полученное в результате настройки наименьшее выходное напряжение называют минимальным напряжением небаланса и обозначают $U_{\text{нб min}}$.

В качестве источника питающих напряжений предпочтение отдается трансформаторам напряжений, от которых должен питаться фильтр. Если по каким-либо причинам этим источником воспользоваться нельзя, то можно подать на фильтр систему напряжений прямой последовательности промышленной частоты от любого другого трехфазного источника. Необходимо только, чтобы содержание высших гармонических в этих напряжениях было не выше допустимого по ГОСТу. Разница в значениях подаваемых линейных напряжений не должна превышать 1 %. Для измерения напряжений нужно применять один и тот же вольтметр. При указанных выше значениях линейных напряжений добиваются с помощью регулировочных сопротивлений, имеющихся в плечах фильтра, чтобы напряжение на выходе фильтра достигло наименьшего значения и составляло не более 1,5 В, т.е. $U_{нб\ min} \leq 1,5\ В$.

Настройку выполняют не менее, чем двумя регулировочными сопротивлениями, входящими в разные плечи фильтра, так как иначе не удастся получить минимум небаланса.

В случае, если полученный минимум оказывается больше 1,5 В, нужно подключить к выходу фильтра электронный осциллограф и убедиться, что причиной такого превышения не являются содержащиеся в питающих напряжениях высшие гармоники. Если причина в этом, надо добиться, чтобы минимум небаланса для основной гармоники составлял не более 1,5 В. При невозможности получить такой результат с помощью имеющихся регулировочных сопротивлений следует выяснить причину этого явления путем проверки исправности отдельных компонентов схемы фильтра. После устранения дефекта настройки фильтра на минимум небаланса должна быть повторена.

Настройка фильтров напряжения прямой последовательности (ФНПП) на минимум небаланса производится аналогично описанному выше. Различие состоит лишь в том, что для этого на фильтр нужно подать симметричную трехфазную систему линейных напряжений обратной последовательности. Если для этой проверки используются трансформаторы напряжения, от которых постоянно питается фильтр, то для получения симметричной системы напряжений обратной последовательности достаточно на входных зажимах фильтра поменять местами любые два провода из проводов, по которым подаются напряжения.

Настройка фильтров тока обратной последовательности (ФТОП). Основной частью такой работы, как и для фильтров напряжения, является настройка на минимум небаланса. Она делается при подключенной нагрузке фильтра. Для ее выполне-

ния через входные зажимы нужно подать в фильтр симметричную трехфазную систему токов прямой последовательности, приближающихся к номинальному значению.

В отличие от схем ФНОП схемы фильтров тока обратной последовательности отличаются намного большим разнообразием. В зависимости от схемы настройка осуществляется либо на минимум тока небаланса $I_{\text{нб min}}$, либо на минимум напряжения $U_{\text{нб min}}$. В первом случае для измерения выходного тока нужно включить последовательно с нагрузкой фильтра миллиамперметр переменного тока. Во втором случае применяется милливольтметр, подсоединяемый параллельно нагрузке фильтра.

Задачу подачи симметричной системы токов в фильтр не всегда удастся просто решить. Весьма удобно использовать для этого рабочие токи электроустановки. Но это возможно только на действующих установках, несущих нагрузку, близкую к номинальной. В большинстве случаев такой вариант настройки нерезален, и приходится создавать требуемую систему токов искусственно. Ее можно получить от любого трехфазного источника напряжения достаточной мощности, подключив к нему фильтр через соответствующие управляемые резисторы, вводимые в каждую из фаз. Для измерения тока в каждую фазу нужно включить амперметр. Во избежание ошибок перед сборкой схемы амперметры нужно сверить. Для этого через все амперметры, включенные последовательно, пропускают один и тот же ток и сличают их показания. После сборки схемы проверки устанавливают одинаковые токи в фазах и производят настройку фильтра на минимум небаланса, осуществляемую подобно тому, как это делается для ФНОП. Допустимый небаланс в общем случае оценивается значением не более 5 % выходной величины, которая получается при поступлении на фильтр тока обратной последовательности, равного расчетному току срабатывания испытываемого устройства.

В тех случаях, когда схема фильтра позволяет настроить его на минимум небаланса, подавая в фильтр не три, а только два тока, сдвинутых на 120° , можно использовать для этой цели установку для проверки сложных защит типа У5053 или подобную ей. В качестве примера на рис.39 показана схема настройки ФТОП реле типа РТФ-8 на минимум небаланса, в которой применена установка У5053. Схема ФТОП, установленного в реле РТФ-8, изображена на рис.34. В зависимости от номинального тока фильтра выбирается реостат R (см.рис.31): при $I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$ берут реостат с сопротивлением 2—5 Ом, при $I_{\text{ном}} = 1 \text{ А}$ его со-

противление должно быть порядка 10—20 Ом. Блок К-515 используется для регулировки тока в фазе А, а блок К-513 — для регулировки тока в фазе С. С помощью фазоизмерителя, содержащегося в У5053, устанавливают угол сдвига между этими токами, равный 240°. При таком сдвиге имитируется система токов обратной последовательности. Это позволяет выполнить настройку

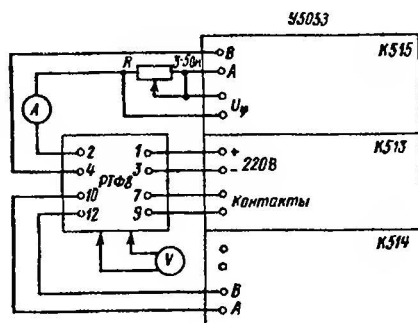


Рис. 39. Схема настройки ФТОП реле типа РТФ-8 на минимум небаланса

фильтра на минимум небаланса. При настройке следует иметь в виду, что по допустимому нагреву блок К-515 выдерживает ток 1—2 А в течение нескольких минут, а ток в 4—5 А только несколько секунд, достаточных для производства отсчета показаний приборов. Поэтому при номинальном токе фильтра 5 А его вначале регулируют при токах не выше 1—2 А и только в конце настройки кратковременно повышают токи примерно до 4 А, чтобы еще раз оценить величину небаланса.

Наладка ФТОП, включаемых на разность фазных токов, на этом заканчивается. У фильтров, в схему которых подаются фазные токи, а для исключения слагающих нулевой последовательности осуществляется их компенсация с помощью подаваемого в фильтр тока в нулевом проводе, необходимо проверить правильность выполнения цепей компенсации. Обычно эту работу отдельно не проводят, а совмещают с проверкой реле в полной схеме, так как для нее нужна аналогичная схема испытаний. Однако при необходимости проверку цепей компенсации можно осуществить предварительно. С ее помощью удостоверяются, что наличие слагающих нулевой последовательности в фазных токах не влияет на работу фильтра. Проверка осуществляется путем имитации возможных вариантов двух- и однофазного КЗ в сети. Для этого через входные зажимы фильтра поочередно все сочетания тока двухфазного питания АВ, ВС и СА и все сочетания тока однофазного питания АО, ВО и СО и замеряют значение выходного сигнала при всех вариантах питания. Величина подаваемого тока должна быть всегда одинаковой и составлять 20—40 % номинального тока фильтра. Выходной сигнал при

двухфазном питании должен получаться в $\sqrt{3}$ большим, чем при однофазном питании. Различие в значениях выходного сигнала при различных сочетаниях одного вида питания не должно превышать 5 %. Если эти требования не обеспечиваются, нужно выяснить причину несоответствия и устранить ее. В некоторых схемах ФТОП имеется возможность откорректировать компенсацию с помощью регулировочных сопротивлений.

На практике возможны случаи, когда по каким-либо причинам получить симметричную систему напряжений или токов обратной последовательности не удастся. Это делает настройку фильтра на минимум небаланса неосуществимой. Для наладки фильтров приходится использовать другие способы, названные косвенными. Суть их состоит в получении заданных соотношений между сопротивлениями, образующими плечи фильтра. Эти соотношения зависят от схемы фильтра и характера использованных в плечах фазоповоротных цепочек. Косвенный способ наладки для каждого типа фильтра приходится подбирать индивидуально. Это повышает вероятность ошибок при наладке. Чтобы быть уверенным, что фильтр налажен правильно, необходимо в обязательном порядке перед включением налаживаемого устройства в работу измерить величину небаланса под рабочим напряжением или током и, если нужно, подстроить фильтр. Допускается выполнять эту работу при комплексных испытаниях защиты присоединения от построенного источника в режиме трехфазного питания.

Наиболее простым из способов косвенной проверки правильности настройки простых фильтров тока и напряжения прямой или обратной последовательности является способ, получивший название проверки симметричности фильтра. При его осуществлении на входы фильтра подают три комбинации одинакового по значению тока или напряжения однофазного питания, поступающего поочередно на разные пары входных зажимов. Это значение берется близким к номинальному.

Для фильтров тока, включенных на разность фазных токов, достаточно трехкратной подачи тока поочередно через зажимы сначала *A* и *B*, затем *B* и *C* и в заключение *C* и *A*. Для фильтров тока, включаемых на фазные токи, ток дополнительно пропускают через входной зажим каждой из фаз в нулевой вывод, чтобы убедиться в правильности выполнения компенсации нулевой последовательности.

У фильтров напряжения однофазное напряжение подается в трех возможных сочетаниях: на вход каждой из фаз и на объединенные входы двух других фаз: *A* и *BC*, *B* и *CA*, *C* и *AB*.

В каждом случае подачи тока или напряжения измеряют значение выходного сигнала фильтра. В зависимости от схемы фильтра им будет являться соответствующий ток или напряжение. При правильной настройке фильтра значение выходного сигнала должно быть одинаковым при всех трех вариантах однофазного питания фильтра.

Способ проверки симметричности фильтра является одним из наиболее эффективных для оценки качества его настройки.

Остановимся на отдельных примерах, иллюстрирующих другие методы косвенной наладки фильтров симметричных составляющих обратной последовательности разного исполнения.

Начнем с ФНОП, показанного на рис.26, каждое плечо которого состоит из последовательно соединенных резистора и конденсатора. Для нормальной работы фильтра нужно, чтобы модули сопротивлений в плечах находились в следующих соотношениях: $R_1 = \sqrt{3} X_{C1}$ и $X_{C2} = \sqrt{3} R_2$. В итоге при наладке фильтра требуемое соотношение должно выдерживаться с точностью порядка 2—3 %. Для этого на соответствующее плечо фильтра подают однофазное напряжение, по значению близкое к номинальному. С помощью вольтметра измеряют падение напряжения на конденсаторе. Затем переключают вольтметр параллельно резистору и перемещают движок или хомутик, предназначенный для изменения сопротивления резистора, до тех пор, пока отношение падения напряжения на резисторе к падению напряжения на конденсаторе не достигнет требуемого значения. Окончательно это соотношение должно подтвердиться при замере, выполняемом после закрепления движков или хомутиков регулируемых резисторов.

В активно-емкостных фильтрах тока обратной последовательности возможно применение аналогичного способа косвенной наладки. Различие состоит в том, что здесь через проверяемое плечо фильтра пропускают ток заданного значения и измеряют распределение токов между конденсатором и резистором. Изменяя сопротивление резистора, нужно добиться, чтобы величина, обратная отношению тока через резистор к току через конденсатор, равнялась требуемому соотношению между их сопротивлениями. Сложность состоит в том, что после каждого перемещения движка (хомутика) нужно измерять оба тока, что усложняет наладку. Поэтому для наладки ФТОП такого типа косвенный метод применяют редко.

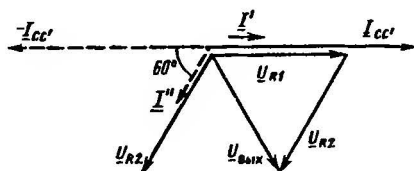


Рис. 40. Векторная диаграмма напряжений, получаемых при косвенном способе наладки ФТОП реле типа РТФ-1

$2I_{\text{ном}}$. Регулируемым резистором $R2$ добиваются, чтобы падение напряжения на нем опережало ток, поступающий в первичную обмотку фильтра, на 60° . Для измерения угла можно применить фазовольтметр типа ВАФ-85 или ему подобный. С помощью вольтметра измеряют падение напряжения U_{R2} на резисторе $R2$. Переключают вольтметр на резистор $R1$, и, регулируя его сопротивление, делают падение напряжения на нем U_{R1} равным падению напряжения U_{R2} с точностью 3—5%. Затем измеряют напряжение между выходными зажимами фильтра $U_{\text{вых}}$. Оно должно совпасть по значению с падениями напряжения U_{R1} и U_{R2} , т.е. эти три напряжения образуют равносторонний треугольник. Это видно из векторной диаграммы, показанной на рис.40. На ней сплошными линиями показаны вектора первичного тока, поступающего в фильтр, и напряжений, входящих в упомянутый треугольник. Пунктиром показано направление вектора вторичного тока I' в резисторе $R2$.

Идентичность и правильность соединения других первичных обмоток трансформатора тока TA и трансформатора TAV определяют при подаче в них тока через входные зажимы A и B' при соединенных между собой зажимах A' и B . После установки тока $I_{AB'}$, равного подававшемуся в первом случае, измеряют U_{R1} , U_{R2} и $U_{\text{вых}}$. Результаты замеров не должны практически отличаться от полученных при пропуске через фильтр тока I_{CC} .

Ознакомление с приведенными примерами поможет читателю наметить пути косвенной проверки фильтров симметричных составляющих, выполненных по иным схемам.

Настройка комбинированных фильтров симметричных составляющих состоит в получении заданного значения коэффициента комбинированного фильтра $k_{\text{ф}}$. Наиболее точно этот коэффи-

В качестве последнего примера познакомимся с косвенным способом наладки ФТОП (рис.29), в схеме которого имеется трансреактор TAV , нагруженный на резистор. Сначала в фазу C фильтра через зажимы C и C' подают ток $I_{CC'}$, равный примерно

ент определяется при поочередной подаче на фильтр симметричных трехфазных систем токов и напряжений, на сочетания которых он реагирует. Как находится коэффициент k_{ϕ} рассмотрим на примере весьма распространенного комбинированного фильтра токов прямой и обратной последовательностей, показанного на рис.31. Выходное напряжение такого фильтра пропорционально сумме $I_1 + k_{\phi} I_2$. Для определения k_{ϕ} требуется вначале подать на фильтр симметричную трехфазную систему токов обратной последовательности, близких по значению к номинальному, и измерить напряжение на выходе фильтра $U_{\text{вых}2}$. После этого нужно подать на фильтр симметричную систему токов прямой последовательности такой же величины и замерить получившееся напряжение на выходе фильтра $U_{\text{вых}1}$. Отношение этих двух напряжений равняется коэффициенту комбинированного фильтра $k_{\phi} = U_{\text{вых}2} / U_{\text{вых}1}$. Как получают токи, требующиеся для такой проверки, описано выше при изложении основного способа настройки ФТОП на минимум небаланса.

При отсутствии возможности получить трехфазную систему токов можно применять косвенный способ определения коэффициента фильтра k_{ϕ} . Его находят по двум значениям выходного напряжения фильтра, получаемым при поочередной подаче в фильтр однофазного тока по двум вариантам питания. Сначала в фильтр подается через входные зажимы *B* и *C* ток двухфазного питания I_{BC} , близкой к номинальному току фильтра, измеряется напряжение на его выходе $U_{\text{вых}BC}$. Затем через входные зажимы *A* и *O* в фильтр подают ток однофазного питания I_{AO} и доводят его до значения, по которому напряжение на выходе фильтра $U_{\text{вых}AO}$ получается равным измеренному ранее напряжению $U_{\text{вых}BC}$.

Из § 9 известно, что напряжение на выходе такого комбинированного фильтра можно определить с помощью выражения: $U_{\text{вых}} = (I_{A1} + k_{\phi} I_{A2})(R - X_m \sqrt{3})$. Найдем симметричные составляющие токов I_{A1} и I_{A2} в токах I_{BC} и I_{AO} , подававшихся в фильтр при выполнении проверки, и подставим их в это выражение. Как известно из § 3 модули симметричных составляющих тока двухфазного питания I_{BC} равны, т.е. $I_{A1} = I_{A2} = I_{BC} / \sqrt{3}$, а для тока однофазного питания I_{AO} : $I_{A1} = I_{A2} = I_{AO} / 3$. После подстановки, учитывая, что $k_{\phi} > 1$, получим $U_{\text{вых}BC} = (k_{\phi} - 1)(R - X_m \sqrt{3}) \times I_{BC} / \sqrt{3}$ и $U_{\text{вых}AO} = (k_{\phi} + 1)(R - X_m \sqrt{3}) I_{AO} / 3$.

При подаче токов I_{BC} и I_{AO} мы добивались равенства этих напряжений. Поэтому $(k_{\phi}-1)I_{BC}/\sqrt{3} = (k_{\phi}+1)I_{AO}/3$. Отсюда после необходимых преобразований имеем: $k_{\phi}=(\sqrt{3}I_{BC}+I_{AO})/(\sqrt{3}I_{BC}-I_{AO})$. В случае отклонения полученного значения k_{ϕ} по отношению к заданному более, чем на 10%, нужно произвести подрегулировку фильтра.

После включения под нагрузку электроустановки, в которой используется налаживаемый комбинированный фильтр, нужно еще раз проверить, что значение k_{ϕ} соответствует заданному, используя рабочие токи присоединения. Если схема вторичных токовых цепей смонтирована правильно, то поступление в фильтр рабочих токов равнозначно подаче в него симметричной системы токов прямой последовательности. Поэтому измеренное напряжение на выходе фильтра будет соответствовать $U_{\text{вых1}}$.

Для измерения $U_{\text{вых2}}$ нужно при том же значении рабочего тока поменять без разрыва цепи на выходных зажимах фильтра любые два из трех проводов, по которым токи присоединения поступают в фильтр. Этим имитируется подача в фильтр системы токов обратной последовательности. Отношение полученных напряжений $U_{\text{вых2}} / U_{\text{вых1}}$ представляет собой действительное значение k_{ϕ} . Как было отмечено выше, оно не должно отличаться от заданного более, чем на 10 %. По окончании замеров переключенные провода приворачивают на свои постоянные места, не разрывая цепь токов.

После настройки фильтров симметричных составляющих можно начинать основную часть проверки — снятие электрических характеристик реле (блока защиты) в полной схеме. Эта работа имеет много общего с проверкой в полной схеме реле, реагирующих на полные токи или напряжения. Как известно, объем проверки таких реле во многом зависит от того, на какой базе они выполнены. Базой могут быть электромеханические реле различного исполнения, в том числе с поворотным якорем, индукционные с вращающимся барабанчиком, магнитоэлектрические или поляризованные, включенные через выпрямители, а в последнее время полупроводниковые, микроэлектронные и микропроцессорные элементы. На них строятся современные статические реле защиты с выходными узлами, содержащими малогабаритные промежуточные реле клапанного типа или реле с магнитоуправляемыми контактами. Отсюда возникает необходи-

мость в специальных испытаниях реле (блока защиты), диктуемых механическими или электрическими свойствами используемой базы. На основных моментах таких проверок мы вкратце остановимся ниже в конце параграфа. В первую очередь необходимо ознакомиться со специфическими способами проверки в полной схеме реле, реагирующих на симметричные составляющие токов и напряжений. У реле тока и напряжения это настройка или проверка заданных уставок срабатывания. Для реле тока обычно задается ток срабатывания соответствующей последовательности. Для реле напряжения прямой или обратной последовательности задается линейное напряжение нужной последовательности. Для реле, содержащих комбинированные фильтры, кроме токов и напряжений срабатывания той или иной последовательности задают еще коэффициент фильтра.

Проверка параметров срабатывания производится, как правило, однофазным током или напряжением применительно к типу реле. Обычно имитируют условия КЗ между двумя фазами или однофазного короткого замыкания на землю. Току двухфазного КЗ соответствует режим подачи тока двухфазного питания через входные зажимы любых двух фаз токов цепей реле. Как было показано в § 3 модуль составляющих прямой и обратной последовательностей для данного случая питания $I_1 = I_2 = I_{\text{изм}}/\sqrt{3}$, где I_1, I_2 — токи соответствующих последовательностей, а $I_{\text{изм}}$ — ток, подаваемый в реле от поверочной установки. Такая проверка является достаточной для токовых реле, включаемых на разность фазных токов.

У токовых реле, включаемых на фазные токи с компенсацией составляющих нулевой последовательности, имеющих входной зажим для нулевого провода, дополнительно имитируют режим однофазного КЗ. Ток однофазного питания подают в реле через входной зажим какой-либо фазы и входной зажим нулевого провода. Составляющие токов прямой и обратной последовательностей в данном случае получаются равными, т.е. $I_1 = I_2 = I_{\text{изм}}/3$.

В цепях напряжения для имитации двухфазного КЗ у шин подстанции нужно соединить накоротко входные зажимы тех двух фаз напряжения, между которыми осуществляется КЗ. На свободный входной зажим третьей фазы и объединенные ранее входные зажимы двух других фаз цепей напряжения подают регулируемое однофазное напряжение от поверочной установки.

На рис. 41,а показана схема имитации напряжений при близком двухфазном КЗ между фазами В и С. Из поясняющих векторных диаграмм (рис. 41,б) видно, что модули фазных составляющих прямой и обратной последовательностей составляют $U_{\phi 1} = U_{\phi 2} = U_{изм}/3$, а линейная составляющая соответственно $U_{A1} = U_{A2} = U_{изм}/\sqrt{3}$. Здесь $U_{\phi 1}$, $U_{\phi 2}$, $U_{л1}$, $U_{л2}$ — фазные и линейные симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей, а $U_{изм}$ — напряжение, подаваемое на реле от поверочной установки.

Существует исполнение органов напряжения обратной последовательности, в которых схема ФНОП неотделима от трехфазной схемы питания реле переменным оперативным током. Они объединены на общих входных зажимах. В этом случае приходится проверять напряжение срабатывания реле в режиме трехфазного питания. Для получения требующихся для действия реле симметричных составляющих напряжения обратной последовательности искусственно нарушают симметрию напряжений, подаваемых на реле. Одна из распространенных схем получения несимметричных напряжений показана на рис. 42,а. С ее помощью можно плавно изменять значения напряжений, поступающих на реле. Регулируемым является напряжение, подаваемое на реле с движков двух последовательно соединенных лабораторных автотрансформатора типа ЛАТР-1, подключенных своими внешними входными зажимами к одному из линейных напряжений

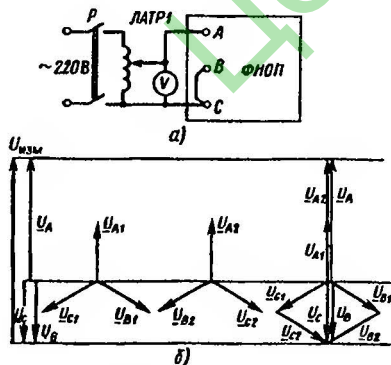


Рис. 41. Способ имитации напряжений при близком двухфазном КЗ:

а — схема проверки; б — поясняющие векторные диаграммы

сети. Два других линейных напряжения образуются между соответствующим движком ЛАТР и свободным зажимом сети. Когда движки ЛАТР раздвинуты полностью в противоположных направлениях, на реле приходит симметричная трехфазная система линейных напряжений. Когда движки сдвинуты к объединенным выводам ЛАТР, регулируемое линейное напряжение становится равным нулю. В промежуточном положении движков линейную составляющую напряжения обратной последователь-

ности можно найти из выражения, В:

$$U_{2\text{лин}} = U_{AB} - U_{A'B'}/2,$$

где $U_{2\text{лин}}$ — линейное напряжение обратной последовательности; U_{AB} — линейное напряжение фаз AB подводимой симметричной системы напряжений; $U_{A'B'}$ — напряжение, поступающее в реле с движков ЛАТР. Это подтверждается векторной диаграммой напряжений, изображенной на рис. 42,б.

Если наладка реле производится на установке У5053, то описанной выше схеме проверки соответствует подача на реле регулируемой несимметричной трехфазной системы напряжений, заложенная в этой установке для имитации режима двухфазного КЗ. Существует еще один, весьма простой способ создания регу-

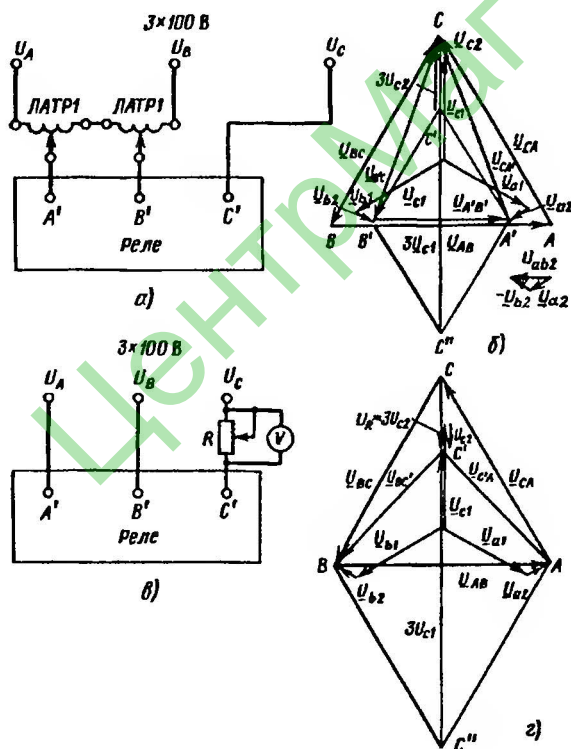


Рис. 42. Способы получения несимметрии в питающей трехфазной системе напряжений 3×100 В:

а — схема проверки (вариант 1); б — векторная диаграмма, поясняющая получение нужной несимметрии при схеме проверки по варианту 1; в — схема проверки (вариант 2); г — поясняющая векторная диаграмма к схеме проверки по варианту 2

лируемой несимметрии напряжений, подаваемых на реле. Для этого достаточно включить регулировочный реостат в цепь одного из трех проводов, по которым подаются напряжения на реле (рис. 42, в). Падение напряжения на этом реостате U_R пропорционально составляющей обратной последовательности системы напряжений, получающейся на входных зажимах реле. Модуль линейной составляющей напряжения обратной последовательности можно определить по формуле $U_{2\text{лин}} = U_R / \sqrt{3}$. На рис. 42, г представлено графическое построение векторов симметричных составляющих напряжений для этого способа. Читатель ознакомился с наиболее распространенными способами получения токов и напряжений, применяемыми при проверках реле (блоков защиты), реагирующих на токи или напряжения обратной последовательности. Если в реле имеется фильтр прямой последовательности, то для его проверки можно использовать схемы, подобные описанным. Что касается реле, реагирующих на слагающие нулевой последовательности, то они проверяются однофазным напряжением. При этом слагающая нулевой последовательности равняется 1/3 поступающей величины.

Определение параметров срабатывания реле (блока защиты) производится при плавном изменении подаваемого тока или напряжения до момента появления выходного сигнала. Обычно таким сигналом является замыкание выходных контактов испытываемого аппарата. Рекомендуется проверять параметры срабатывания при подключенной к выходу реле нагрузки. После срабатывания реле соответствующий ток или напряжение изменяют в противоположном направлении и фиксируют параметры возврата реле. Возврат реле оценивается по размыканию выходных контактов и возврату подвижной системы реле в исходное положение.

Проверку параметра срабатывания реле тока и напряжения следует проводить при всех трех возможных комбинациях фаз подаваемых электрических величин, соответствующих двухфазному КЗ между фазами *AB*, *BC* и *CA*. Совпадение получаемых параметров срабатывания является подтверждением правильной настройки фильтра симметричных составляющих испытываемого реле.

У токовых реле, включенных на фазные токи с компенсацией слагающих нулевой последовательности, нужно дополнительно проверить параметры срабатывания при подаче тока однофазного питания для трех вариантов имитации КЗ на землю одной из фаз *A0*, *B0* и *C0*. Это необходимо для подтверждения исправности схемы компенсации и одновременно правильности настройки фильтра.

Если реле (блок защиты) выполнено на базе электромагнитного реле с поворотным якорем, требуется проверить не наблюдается ли у него опасная вибрация контактов и подвижной системы, угрожающая его отказом. Проверку проводят в широком диапазоне токов или напряжений, начиная от срабатывания до ожидаемых наибольших расчетных значений этих величин. Вибрация не должна проявляться как при плавном изменении подводимых токов или напряжений, так и при подаче их толчком.

У статических реле, выполненных на интегральных микросхемах и т.п., рекомендуется при наладке измерить напряжение в контрольных точках, а также на выводах обмоток выходных реле перед действием реле и после него.

Проверка реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей имеет много общего с проверкой серийных реле направления мощности других типов, включаемых на полные токи и напряжения защищаемого присоединения. Для любых реле направления мощности к числу обязательно снимаемых электрических характеристик относятся, во-первых, определение зоны срабатывания, угла максимальной чувствительности и соответствия полярности выводов обмоток реле в ходе совмещенной проверки, и, во-вторых, определение зависимости напряжения срабатывания реле мощности от изменения тока, подаваемого в реле, при угле максимальной чувствительности. Эту характеристику реле называют вольт-амперной. Ее используют для оценки чувствительности реле при расчете защиты и анализе поведения реле при реальных КЗ.

В некоторых исполнениях реле направления мощности предусмотрена возможность дискретной установки фиксированных значений токов и напряжений, начиная с которых реле может действовать. При проверке реле следует определить соответствие начальных параметров срабатывания реле задаваемым значениям этих токов и напряжений.

У электромеханических реле индукционной системы с цилиндрическим ротором (барабанчиком) помимо указанных выше проверок нужно обязательно проверить, что реле не обладает так называемым самоходом, т.е. не может действовать неправильно при поступлении на реле одной из электрических величин — только тока или только напряжения. Причиной самохода является недопустимая несимметрия магнитной системы реле, которую следует устранить. У этих же реле нужно проверить отсутствие вибрации контактов и подвижной системы при подаче больших токов и напряжений, а также отброса подвижной системы при

включении и снятии большой мощности. Проверка и устранение причин, вызывающих самоход, вибрацию и отбросы механической части должны осуществляться до снятия основных электрических характеристик реле. Подробные указания по устранению этих дефектов приводятся в заводских материалах и специальных инструкциях по наладке реле индукционной системы.

Статические реле направления мощности этих недостатков не имеют, и в подобных проверках не нуждаются. У них дополнительно измеряют напряжения в контрольных точках на печатной плате и выводах обмоток выходного реле перед его срабатыванием и после него.

До начала проверки реле направления мощности обратной последовательности в полной схеме должны быть настроены фильтры симметричных составляющих тока и напряжения, являющиеся составными частями таких реле. Способы настройки ФТОП и ФНОП описаны выше. Все характеристики реле должны сниматься вместе с фильтрами.

При снятии основных характеристик реле направления мощности пользуются известной испытательной схемой, показанной на рис. 43. Эта схема дает возможность получить однофазные ток и напряжение, значения которых можно плавно регулировать. Одновременно она позволяет устанавливать желаемый угол сдвига между ними. В установках для проверки сложных защит промышленного изготовления, таких как УПЗ-2 или У-5053 и т.п., испытательная схема для проверки реле направления мощности, подобная показанной на рис. 43, набирается с помощью переключателей, имеющихся в таких установках. При сборке схемы нужно руководствоваться инструкцией по пользованию такой установкой.

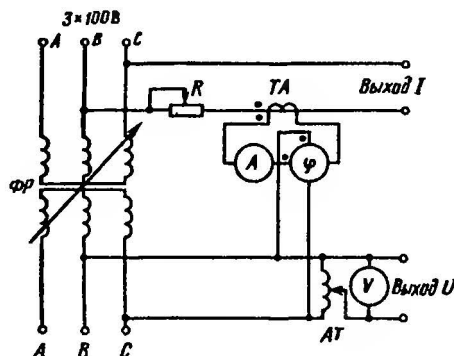


Рис. 43. Схема проверки реле направления мощности

При проверке реле направления мощности нулевой последовательности схему рис. 43 рассматривают как источник токов и напряжений нулевой последовательности $3I_0$ и $3U_0$. При проверке реле направления мощности обратной последовательности эта же схема используется для имитации двухфазного КЗ без земли вблизи места установки реле. Ток от испы-

тательной схемы подается в реле через входные зажимы двух фаз токовых цепей. В цепях напряжения реле одноименные зажимы тех двух фаз, в которые подается ток, должны быть объединены закорачивающей перемычкой. Напряжение от испытательной установки подается по одному соединительному проводу к этим объединенным зажимам, а по другому проводу — к входному зажиму напряжения третьей фазы, свободной от КЗ. Подсоединение проводов, связывающих испытательную схему с реле, должно осуществляться в строгом соответствии с заводской маркировкой фаз и полярности, имеющейся у входных зажимов реле.

Определение зоны срабатывания реле начинается с установки заданных значений тока и напряжения, подаваемых в реле от испытательной схемы. Убедившись в правильности сборки соединительных проводов, проверяющий включает испытательную схему и устанавливает ток и напряжение нужных для проверки значений. Если в заводских материалах нет указаний по выбору значений задаваемых тока и напряжения, то обычно зона срабатывания определяется при токе, равном $1 \div 2 I_{\text{ном}}$ реле, и напряжении, близком к номинальному. У реле, обмотки напряжения которых обладают ограниченной термической стойкостью, значение подаваемого напряжения устанавливается не выше 0,3—0,5 номинального значения. В течение всей проверки установленный ток и напряжение должны поддерживаться на принятом уровне.

Графическое построение зоны срабатывания осуществляется от оси, условно принимаемой за направление вектора напряжения, подведенного к реле. Продолжая проверку, проверяющей с помощью фазорегулятора плавно изменяет угол между этим напряжением и током, фиксируя значения углов, при которых реле срабатывает и затем возвращается. Проверка выполняется дважды: сперва при вращении ручки фазорегулятора в каком-либо одном направлении, а затем еще раз при ее вращении в противоположном направлении. В каждом случае фиксируются упомянутые выше углы. Зона срабатывания ограничивается двумя линиями, проведенными из начала координат. Одна проводится под углом, соответствующим переходу реле из несработавшего состояния в положение срабатывания при вращении фазорегулятора в одном направлении, а вторая — под углом, соответствующим такому же переходу, но при противоположном направлении вращения фазорегулятора. Ширина зоны срабатывания представляет собой сумму этих двух углов. Она получается ненамного

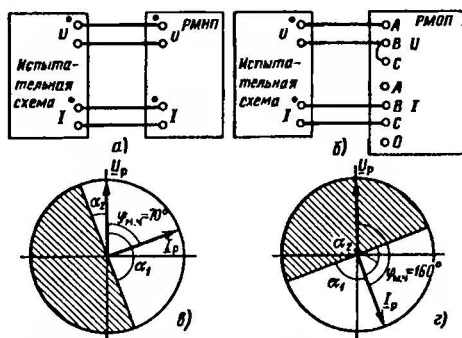


Рис. 44. Схема подключения реле направления мощности к испытательной схеме:

а — реле нулевой последовательности; б — реле обратной последовательности; в — характеристика зоны срабатывания для реле нулевой последовательности; г — то же для реле обратной последовательности

меньше 180° , доходя у отдельных типов статических реле направления мощности до 140° – 160° . Линия максимальной чувствительности реле проходит через середину зоны срабатывания, совпадая с биссектрисой угла, представляющего ее ширину. Угол между осью отсчета и этой линией представляет собой угол максимальной чувствительности реле и обозначается $\varphi_{м.ч.}$. Его значение не должно отличаться от паспортного больше, чем на 4 – 6° . Это соответствие подтверждает одновременно правильность обозначений полярных выводов реле. На рис. 44 приведены типовые примеры характеристик зоны срабатывания реле направления мощности нулевой и обратной последовательностей.

Вторая часть проверки реле направления мощности — это определение его чувствительности путем снятия вольт-амперной характеристики. Оно проводится при угле сдвига между подведенными к реле напряжением и током, равном углу максимальной чувствительности. При отсутствии каких-либо дополнительных условий по снятию такой характеристики, приводимых в заводской информации, начальное значение тока, используемого в качестве первой точки характеристики, принимается близким к 20% номинального тока реле. Последующие точки характеристики снимаются через равные интервалы до значения тока в 5 – 6 раз превышающего номинальный. Для каждой точки характеристики определяют напряжения срабатывания и возврата реле, а также мощность, требующуюся для срабатывания. Эта мощность зависит от конструкции и номинального тока реле и составляет у реле индукционной системы при $I_p = I_{ном} = 1\text{ A}$ $0,2$ – $0,6\text{ В}\cdot\text{А}$, при $I_p = I_{ном} = 5\text{ A}$ 1 – $3\text{ В}\cdot\text{А}$, а у статических реле, выполненных на интегральных микросхемах, для $I_{ном} = 1\text{ A}$ $0,02\text{ В}\cdot\text{А}$, а при $I_{ном} = 5\text{ A}$ $0,1\text{ В}\cdot\text{А}$.

14. Способы и схемы проверки отдельных частей аппаратуры, содержащей фильтры симметричных составляющих

Проверка конденсаторов. Необходимость в ней чаще всего возникает тогда, когда не удается настроить на минимум небаланса фильтр симметричных составляющих, в плечах которого имеются емкости. Для определения значения емкостного сопротивления конденсатора X_C пользуются известным методом амперметра-вольтметра, подавая на конденсатор напряжение промышленной частоты порядка 100—220 В. Сопротивление X_C подсчитывают по формуле $X_C = U/I$ [Ом]. Зная X_C можно определить емкость конденсатора, пользуясь выражением $C = 3180/X_C$ [МкФ]. Исправность такого конденсатора можно оценить по способности длительно удерживать заряд. Для этого отсоединенный из схемы или новый конденсатор заряжают с помощью мегаомметра на 500 В. Затем, соблюдая меры предосторожности, чтобы не разрядить конденсатор на себя, закорачивают вывода конденсатора. У исправного конденсатора в момент закорачивания происходит искровой разряд, сопровождающийся сухим потрескиванием.

Проверка промежуточных трансформаторов. Наиболее распространенная неисправность промежуточного трансформатора — это витковое замыкание в его обмотках. Реже наблюдаются заводские дефекты. В их числе несоответствие схем соединения обмоток монтажным чертежам и ошибки, допущенные при намотке и сборке трансформатора. Во время испытания промежуточного трансформатора нужно измерить активные сопротивления всех его обмоток, проверить изоляцию каждой обмотки относительно земли и других обмоток трансформатора, а также определить коэффициент трансформации между первичной и вторичной обмотками.

При проверке коэффициента трансформации промежуточного трансформатора напряжения на его первичную обмотку подают напряжение, равное расчетному номинальному напряжению питания. Одновременно измеряют ток намагничивания трансформатора. Полученный ток следует сравнить с приведенным в заводских материалах или с измеренным при тех же условиях у заведомо исправного аналогичного трансформатора. Если ток намагничивания проверяемого трансформатора превышает принятую норму более, чем на 20 %, то это свидетельствует о его непригодности.

У промежуточного трансформатора тока, имеющего несколько первичных обмоток, коэффициент трансформации проверяется между каждой из первичных обмоток и вторичной обмоткой,

замкнутой на свою нагрузку или закороченную. Значение тока, подаваемого в первую обмотку, должно составлять $1 \div 2 I_{\text{ном}}$. При одинаковом числе витков первичных обмоток совпадение коэффициентов свидетельствует об идентичности первичных обмоток данного трансформатора тока. Для проверки промежуточного трансформатора тока на отсутствие витковых замыканий в обмотках снимают кривую намагничивания трансформатора. При ее снятии напряжение подается во вторичную обмотку, и одновременно измеряется возникающий ток намагничивания. Первичные обмотки трансформатора должны оставаться разомкнутыми.

Напряжение на вторичной обмотке поднимают плавно, фиксируя 5—10 значений напряжения и соответствующих токов намагничивания до достижения насыщения сердечника трансформатора тока. Свидетельством насыщения является резкое нарастание тока намагничивания при небольшом увеличении подаваемого напряжения. У исправного трансформатора тока начало насыщения наступает при напряжениях в несколько десятков вольт. У трансформатора, имеющего короткозамкнутые витки, ток намагничивания начинает быстро возрастать с самого начала подъема напряжения.

Рекомендуется полученную при проверке кривую намагничивания сравнить со справочными данными или с кривой намагничивания заведомо исправного трансформатора тока, подобного испытываемому.

Проверка трансреакторов. Кроме измерения активного сопротивления всех обмоток трансреактора и испытания изоляции, в объем проверки входит определение его сопротивления взаимной индукции X_m . Оно производится методом амперметра-вольтметра при подаче в первичную обмотку тока, близкого к номинальному. При этом измеряют напряжение на вторичной обмотке. Сопротивление X_m находят из выражения $X_m = U_2 / I_1$, где I_1 — ток в первичной обмотке трансреактора, а U_2 — напряжение на его вторичной обмотке. Отклонение измеренного значения X_m от расчетного не должно превышать 10 %. При большем отклонении X_m нужно подрегулировать путем изменения воздушного зазора или перемещения магнитного шунта, вводимого в зазор магнитопровода. При наличии у трансреактора нескольких первичных обмоток значение X_m определяется для каждой обмотки в отдельности.

В некоторых схемах фильтров симметричных составляющих в качестве фазосдвигающего звена используют трансреактор, нагруженный на резистор. Такое звено нужно проверять в сборе. Определяют соответствие падения напряжения на вторичной обмотке по отношению к току в первичной обмотке заданным значениям. Для измерений можно использовать серийный фазо-

вольтметр типа ВАФ-85 или другой прибор такого же назначения. Необходимую подстройку звена осуществляют как путем изменения воздушного зазора в магнитопроводе, так и регулировкой активного сопротивления резистора.

Возникающие ошибки в подключении поллярных выводов обмоток трансформаторов и трансреакторов наиболее эффективно выявляются в полной схеме устройства. Для этой цели применяют известные способы с использованием фазовольметра или поляромера, а также прибегая к построению потенциальных или векторных диаграмм. В цепях статических реле, если действующие напряжения измеряются в единицах и даже десятых долях вольт, приходится для определения сдвига напряжений обращаться к более сложным способам измерения углов, описанным в специальной литературе [12]. Можно также воспользоваться высокочувствительными цифровыми вольтметрами и измерителями сдвига фаз. Для определения сдвига токов в подобных цепях удобно при наличии в схеме устройства резистора, обтекаемого исследуемым током, измерять угол сдвига падения напряжения в этом резисторе по отношению к выбранному опорному напряжению. Иногда эту задачу решают, измеряя падение напряжения на конденсаторе, через который проходит исследуемый ток. Тут необходимо помнить, что этот ток опережает измеряемое напряжение на 90° .

Фильтры нижних частот, собранные на операционных усилителях, находят применение в схемах фильтров симметричных составляющих как фазосдвигающие звенья, в которых выходное напряжение опережает входной ток на 90° . Такой фильтр должен точно настраиваться на рабочую частоту сети. Правильность настройки фильтра проверяют с помощью электронного осциллографа. При этом входное напряжение, поступающее на фильтр, не должно превышать 30 % нормального значения напряжения оперативного тока, используемого для питания полупроводниковой части реле. Горизонтальная развертка осциллографа отключается, и на пластины горизонтального отклонения подают входное напряжение фильтра. Выходное напряжение фильтра подключают к усилителю вертикального отклонения. При этом у правильно настроенного фильтра нижних частот на экране осциллографа возникает изображение окружности или эллипса, свидетельствующее о сдвиге в 90° между входным и выходным напряжениями.

У правильно настроенного селективного (полосового) фильтра, служащего для подавления гармонических составляющих в выходном сигнале фильтра симметричных составляющих, при таком же испытании на экране осциллографа получается наклонная прямая линия, указывающая на отсутствие сдвига фаз между входным и выходным сигналами.

15. Проверка и анализ работы релейных устройств, реагирующих на симметричные составляющие, рабочим напряжением и током

Эта проверка является обязательной завершающей фазой наладочных работ и эксплуатационных испытаний аппаратуры, рассматриваемой в данной книге. Она не может быть заменена никакими косвенными методами проверки защит первичным током, к которым относятся:

испытание от постороннего источника, создающего в первичных цепях присоединения токи, имитирующие различные виды КЗ;

специальный подъем напряжения от выделенного генератора на искусственное КЗ;

подача пониженного напряжения в первичную обмотку силового трансформатора при закороченной обмотке на стороне другого напряжения и др.

Все эти методы не дают полной гарантии от ошибок в сборке цепей привязки реле, действие которых определяется симметричными составляющими напряжения или тока, к трансформаторам напряжения и тока. Поэтому даже после проведения косвенных испытаний нужно при включении защищаемой электроустановки в сеть обязательно выполнять описанные ниже измерения и испытания в рабочем режиме. Только они могут подтвердить, что схема подсоединения проверяемой аппаратуры ко вторичным цепям выполнена правильно [13, 14].

До начала проверки рабочим напряжением и током должны быть полностью закончены все монтажные и наладочные работы, относящиеся как к самой аппаратуре, так и к цепям, связывающим ее со вторичными обмотками первичных измерительных преобразователей напряжения и тока.

Перед постановкой защищаемого объекта под рабочее напряжение нужно опробовать действие испытываемой защиты на отключение выключателей и предусмотренное ее схемой взаимодействие с другими устройствами защиты, электроавтоматики, блокировки и сигнализации.

Вся проверка рабочих напряжением и током должна осуществляться при строгом соблюдении работающими соответствующих требований Правил техники безопасности и Правил технического обслуживания устройств РЗА.

На стадии проверки испытываемое присоединение должно находиться под независимой, надежно действующей релейной защитой, удовлетворяющей пунктам Правил технической

эксплуатации, касающихся гарантий ликвидации КЗ на этом присоединении в случае вывода всех или части собственных устройств защиты.

Рассмотрим, в какой последовательности и объеме проводится проверка реле (блоков защиты) рабочим напряжением и током. Начнем с первого этапа, проводимого сразу же после сборки первичной схемы присоединения до включения его под нагрузку. Цель этого этапа — убедиться, что на сборки зажимов панели или шкафа нормально поступают все напряжения от измерительных трансформаторов, служащих для питания проверяемого устройства защиты. При новом включении в этот этап входит также проверка правильности сборки цепей напряжения и соответствия маркировки зажимов исполненному монтажу. Вначале непосредственно на входе панели защиты измеряют значения всех фазных и междупазных напряжений, приходящихся от вторичных обмоток трансформаторов напряжения, соединенных в звезду. Затем измеряют эти же напряжения относительно земли. Если схема соединения обмоток используемых трансформаторов напряжения соответствует типовой (см. рис.23), то напряжение на зажиме, относящемся к фазе *B*, будет равно нулю, так как он в этом случае должен быть заземлен. Затем подключают указатель чередования фаз к земле и двум другим фазам. Правильное чередование фаз, наблюдаемое по направлению вращения стрелки указателя, при соединении зажимов указателя с одноименными зажимами на входной сборке панели является прямым подтверждением соответствия маркировки зажимов панели проектной схеме.

По окончании проверки цепей от обмоток *ТН*, собранных в звезду, приступают к проверке цепей напряжения, идущих от вторичных обмоток *ТН*, соединенных в разомкнутый треугольник. Вначале измеряют напряжение между зажимами панели, соединенными с разомкнутым углом треугольника, выводы которого обозначены на типовой схеме буквами *H* и *K*. Полученное напряжение должно практически совпадать со значением напряжения небаланса, измеренным непосредственно на сборке зажимов в ячейке трансформаторов напряжения. Обычно оно составляет 1-3 В. Затем на панели защиты нужно измерить напряжение между каждым из зажимов, относящихся к разомкнутому углу *ТН*, и землей. При типовой схеме *ТН* напряжение на зажиме, относящемся к началу *H* схемы разомкнутого треугольника должно равняться ранее измеренному напряжению небаланса, а напряжение на зажиме, связанном с концом *K* той же схемы, должно быть близким к нулю.

На отдельных подстанциях наблюдаются случаи, когда за счет наведенных напряжений при замере напряжений на обоих указанных зажимах относительно земли получаются близкие значения. В таком случае нужно проверить правильность монтажа цепей следующим способом. Отбрасывают от сборки зажимов панели защиты жилу контрольного кабеля, связанную с выводом H трансформаторов напряжения. На сборке зажимов панели через резистор 50-100 Ом соединяют зажим, связанный с испытательным выводом I с зажимом, относящимся к выводу K . При этом в жиле контрольного кабеля, идущего от панели защиты к заземленному в ячейке трансформаторов напряжения на подстанции выводу K , должен появиться ток порядка 1-2 А. В этом нужно убедиться, произведя замер этого тока в ячейке $ТН$ непосредственно в жиле, идущей к заземленному выводу K , с помощью токоизмерительных клещей.

В тех случаях, когда на панель защиты приходят также провода от двух остающихся углов разомкнутого треугольника, вывода которых обозначены на типовой схеме буквами Φ и I , следует измерить три напряжения между парами зажимов на сборке панели соответствующих выводам $ТН - K$ и Φ , Φ и I , H и I . Затем проверяют чередование фаз на зажимах панели защиты, соединенных с разомкнутым треугольником. Правильному чередованию фаз отвечает подключение вывода первой фазы (A) указателя чередования фаз к зажиму H , вывода второй фазы (B) — к зажиму Φ и вывода третьей фазы (C) — к зажиму I .

Завершением первого этапа проверки является построение потенциальной диаграммы для испытательного вывода I на сборке зажимов панели защиты.

Вначале измеряют фазные напряжения, приходящие со стороны звезды $ТН$, и строят векторную диаграмму этих напряжений. Затем на той же сборке измеряют отдельно три напряжения между зажимом, относящимся к выводу H треугольника, и зажимами A , B и C звезды. По данным замеров методом засечек определяют на векторной диаграмме положение интересующего нас вектора напряжения $U_{ик}$. Пример такого построения для типовой схемы $ТН$ показан на рис.45. Из него видно, что направление вектора $U_{ик}$ противоположно вектору напряжения фазы A звезды. Поэтому его можно использовать для имитации напряжения нулевой последовательности, соответствующего однофазному КЗ на фазе A , подавая на проверяемое реле напряжения от вывода I вместо напряжения от вывода H . Напряжение $U_{ик}$ у $ТН$ 110 кВ и выше получается в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения, образующегося на стороне звезды.

При последующих эксплуатационных проверках первый этап ограничивается измерением на сборке панели защиты значений напряжений между зажимами, относящимися к звезде и треугольнику, а также напряжения небаланса на зажимах *H* и *K*, относящихся к разомкнутому углу треугольника.

Снятие векторной диаграммы токов нагрузки и определение соответствия сборки токовых цепей заданной схеме являются задачей следующего этапа проверки. Мы рассмотрим, как выполняется этот этап при соединении трансформаторов тока защищаемого присоединения по схеме полной звезды. При других схемах соединения трансформаторов тока работа выполняется подобным же образом, учитывая особенности используемого соединения трансформаторов тока.

Для правильной оценки результатов проверки нужно с достаточной определенностью знать характер и нагрузку присоединения во время проведения проверки. Для этого используют показания заведомо исправных измерительных приборов своего и смежных присоединений и данные, получаемые от дежурного персонала, по перетокам активной и реактивной мощностей и их балансу с разных сторон электроустановки. Если достоверные сведения получить затруднительно, нужно создать такую первичную схему работы установки, которая позволила бы четко определить ее режим.

Векторная диаграмма токов строится относительно фазных напряжений звезды *ТН* с помощью фазовольтметра (вольтамперфазо-индикатора) ВАФ-85 или других приборов аналогичного назначения. Полученная диаграмма сопоставляется со сведениями о режиме работы присоединения. Определяется соответствие измеренных вторичных токов токам первичным, значение и направление которых устанавливается на основе информации о режиме работы объекта. Совпадение измеренных токов с данны-

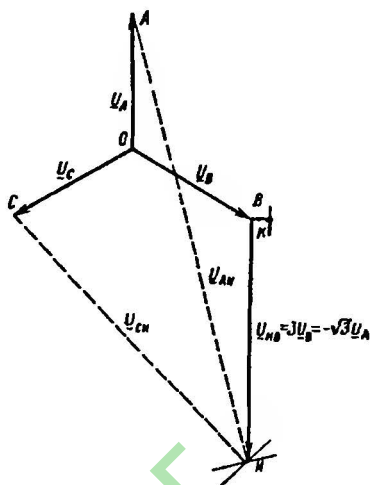


Рис. 45. Построение вектора испытательного напряжения между выводами *H* и *K* разомкнутого треугольника ТН, имитирующего близкое КЗ на фазе *A*

ми о режиме считается основным свидетельством правильности полученной диаграммы. Одновременно должна быть подтверждена и правильность маркировки зажимов на сборке панели. Заканчивается этот этап проверки измерением тока небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока.

При эксплуатационных проверках не требуется столь тщательный анализ режима работы объекта, и снятую векторную диаграмму токов можно беспрепятственно использовать для оценки поведения реле. Ток небаланса в нулевом проводе целесообразно измерять при любых проверках, так как по его значению можно судить не только о целости схемы соединения токовых цепей, но и об исправности самих измерительных трансформаторов.

Дальнейший ход проверки рабочим напряжением и током определяется видом реле (блока защиты).

Реле тока нулевой последовательности нуждаются в весьма небольшом объеме проверки под нагрузкой. Нужно убедиться, что ток небаланса, протекающий по нулевому проводу, проходит и через обмотку этого реле. При новом включении имеет смысл пропустить через обмотку реле один из фазных токов и установить, что подключение реле не сказывается на значении и форме этого тока.

У реле напряжения нулевой последовательности достаточно измерить напряжение на его выводах, которое должно равняться напряжению небаланса на выходе разомкнутого треугольника трансформаторов напряжения.

Реле напряжения и тока обратной последовательности требуют подрегулировки фильтров обратной последовательности на минимум небаланса в режиме нагрузки. Перед подстройкой фильтра следует измерить в зависимости от вида реле линейные напряжения или фазные токи, поступающие на него, и убедиться, что расхождение между полученными значениями не превышает 1-2 %. После этого фильтр подстраивают, добиваясь наименьшего значения небаланса. После подстройки нужно проверить поведение реле при измерении чередования фаз рабочих напряжений или токов. Это осуществляется посредством перекрестного переключения двух фаз на входе панели непосредственно на сборке зажимов или с помощью испытательных блоков. Такое переключение равнозначно подаче на реле симметричной системы величин обратной последовательности. В большинстве случаев при этом реле должно срабатывать. Однако при небольшой нагрузке рабочие токи присоединения могут оказать-

ся недостаточными для срабатывания реле с уставкой по току срабатывания, превышающей действительный ток нагрузки. В этом случае нужно измерить ток или напряжение на выходе фильтра симметричных составляющих, и удостовериться в том, что получающийся выходной сигнал соответствует поступающему на входы фильтра току обратной последовательности. По окончании замеров нужно восстановить исходную схему токовых цепей на входе панели.

Комбинированные фильтры токов прямой и обратной последовательностей типа $I_1 + k_{\phi} I_2$ проверяются под рабочим током на соответствие коэффициента k_{ϕ} заданному значению. Для этого сначала измеряют напряжение на выходе фильтра в нормальном рабочем режиме $U_{\text{вых1}}$ соответствующее прямому чередованию фаз токов. Затем изменяют чередование фаз токов, поступающих в фильтр, путем перекрещивания двух проводов цепей тока, идущих к реле, на сборке зажимов панели. После этого снова измеряют напряжение на выходе фильтра $U_{\text{вых2}}$, относящееся к обратному чередованию фаз токов. Отношение $U_{\text{вых2}}/U_{\text{вых1}}$ представляет собой действительный коэффициент фильтра k_{ϕ} . Он не должен отличаться от заданного более, чем на 20 %. Объем проверки комбинированных фильтров, в которых складываются другие комбинации электрических величин симметричных составляющих, определяют применительно к его схеме, основываясь на заводской информации.

Проверка реле направления мощности нулевой и обратной последовательностей рабочим напряжением и током должна проводиться особенно внимательно, так как от качества этой проверки зависит правильное действие реле при КЗ в сети после ввода защиты в работу. Это требование относится и к начальным общим этапам проверки, описанным выше, которые касаются определения правильности сборки цепей напряжения и тока между измерительными датчиками и панелью защиты, завершающегося снятием векторной диаграммы напряжений и токов на сборке входных зажимов панели.

Ниже рассматривается последняя часть проверки реле, заключающаяся в создании с помощью рабочих напряжений и токов условий, аналогичных подаче в реле симметричных составляющих напряжений и токов, которые появляются при реальных КЗ в зоне действия реле. Это дает возможность осуществить анализ поведения реле в этих условиях и дать заключение о способности реле правильно действовать при повреждениях в сети.

Эта часть проверки рассматривается отдельно, сначала для реле направления мощности нулевой последовательности, а потом для реле мощности обратной последовательности. При новом включении в ходе проверки попутно уточняют правильность подсоединения и маркировки цепей переменного напряжения и тока, идущих от реле к сборке входных зажимов панели (шкафа).

Известны два варианта использования реле направления мощности в схемах защит от замыканий на землю. Один из них, считающийся основным, — применение реле в качестве разрешающего. В этом варианте при срабатывании реле собирается цепь, открывающая возможность для действия определенных ступеней собственной защиты от замыканий на землю при КЗ на самом присоединении и в прилегающей сети, когда мощность нулевой последовательности протекает через присоединение в направлении сборных шин своей подстанции. Пример схемы такого включения реле показан на рис. 46. Ее можно применять, когда обмотка напряжения реле запитывается от *ТН*, собранных по типовой схеме, показанной на рис. 23, а токовая обмотка — от трансформаторов тока, собранных в схему полной звезды с "согласным" включением первичных и вторичных обмоток. Сразу отметим, что при одновременном изменении полярности обеих обмоток реле в схеме рис. 46 оно остается разрешающим.

Другой вариант использования реле, применяемый реже, получил наименование блокирующего. В таком качестве реле применяется для вывода из работы какой-либо из ступеней защиты

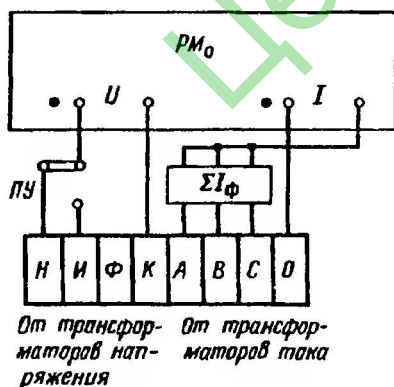


Рис. 46. Вариант схемы подсоединения разрешающего реле направления мощности нулевой последовательности к цепям переменного тока и напряжения

присоединения при КЗ на смежных присоединениях, отходящих от тех же сборных шин подстанции, когда мощность нулевой последовательности течет через присоединение в направлении от сборных шин. Вариант подсоединения реле как блокирующего используется также в схеме резервной защиты от замыканий на землю питающих трансформаторов, предназначенный для ближнего резервирования аналогичных защит отходящих линий. При реализации подсоединения реле в качестве

блокирующего, когда его питание осуществляется от $TН$ и $ТТ$, соединенных аналогично примеру, описанному выше, достаточно изменить полярность подсоединения проводов к одной из обмоток реле по сравнению с рис. 46.

При новом включении реле в начале проверки рабочим напряжением и током нужно уточнить, как осуществлен подвод напряжения от разомкнутого угла треугольника $TН$ к обмотке напряжения реле. Сначала измеряют напряжение между выводами этой обмотки непосредственно у реле. Оно должно равняться напряжению небаланса, существующему между зажимами входной сборки панели, соединенными с выводами H и K разомкнутого треугольника $TН$. Затем определяют, с каким зажимом входной сборки связан полярный вывод обмотки напряжения реле. Для этого поочередно измеряют напряжение между этим выводом и зажимами H и K на упомянутой сборке. Нулевое показание вольтметра относится к связанному зажиму. Этот результат нужно сравнить с проектной схемой защиты и удостовериться в совпадении фактического соединения со схемным.

Следующая задача — это правильно подать на реле такую комбинацию рабочих напряжений и токов, которая соответствовала бы поступлению в реле напряжений и токов, подобных возникающим при реальных КЗ на землю в первичной сети.

Разберем, как подается на реле требуемая комбинация напряжений и токов на примере проверки разрешающего реле, запитанного по схеме, изображенной на рис. 46. На время проверки на обмотку напряжения реле вместо напряжения, поступающего по проводу, связанному с выводом H разомкнутого треугольника $TН$, подается испытательное напряжение из другого угла треугольника, вывод которого обозначен буквой I . Раньше (см. рис. 45) при проверке правильности сборки цепей напряжения было установлено, что подача на реле этого испытательного напряжения равнозначна поступлению на него напряжения $3U_0$, возникающего при близком однофазном КЗ на фазе A вблизи шин подстанции. Переключение рекомендуется осуществлять с помощью испытательных блоков. На многих панелях защиты для этой цели устанавливают специальное переключающее устройство (накладку), которое показано на рис. 46. При наличии накладки выполнение требуемого переключения упрощается.

Продолжением проверки является подача рабочих токов в токовую обмотку реле. Ее нужно производить без разрыва токовой цепи. Переключения выполняют либо на сборке входных зажимов панели, либо с помощью испытательных блоков, когда они

имеются на панели. В ходе переключений нужно обеспечить поочередное прохождение через токовую обмотку реле: сначала тока фазы A , за ним тока фазы B и в заключение тока фазы C . При этом каждый из пропускаемых через реле токов равнозначен току нулевой последовательности $3I_0$, повернутому относительно напряжения на напряженческой обмотке реле на присущий каждому из них угол. При подаче в реле тока выбранной фазы токи двух других фаз должны проходить прямо в нулевой провод трансформаторов тока, минуя токовые цепи, размещенные на панели. На рис. 47, a показано, как нужно соединить выводы на крышках испытательных блоков для цепей напряжения и для всех случаев подачи фазных токов в реле, требуемых при проверке.

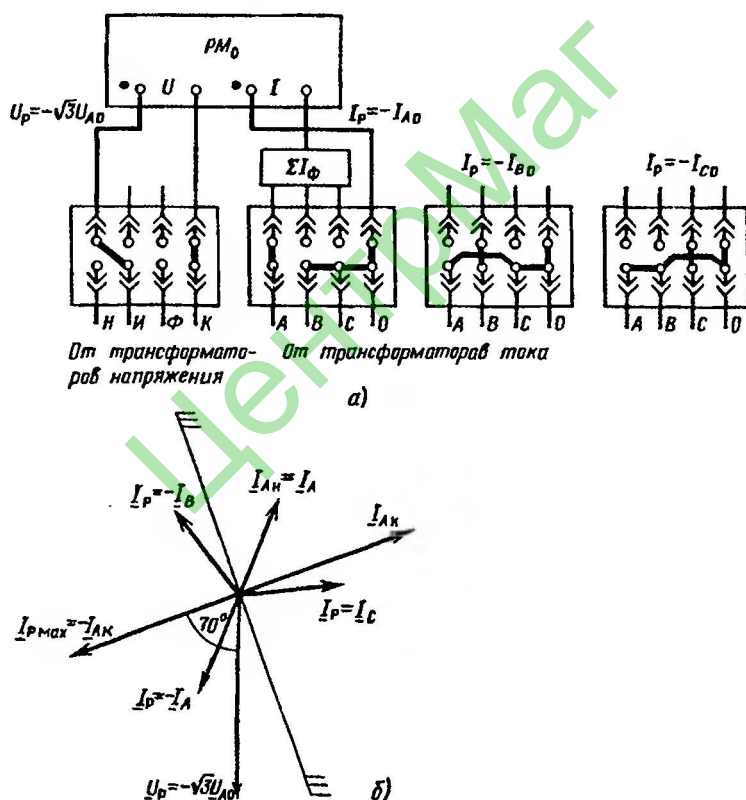


Рис. 47. Проверка реле направления мощности нулевой последовательности рабочим напряжением и током:

a — соединение выводов на крышках испытательных блоков; b — векторная диаграмма для анализа работы реле

При подаче каждого из токов нужно следить за состоянием реле и фиксировать случаи, когда оно срабатывает. Для оценки правильности поведения реле нужно, используя результаты проверки, построить векторную диаграмму напряжений и токов, подававшихся в реле во время проверки. Пользуясь ею, можно установить соответствует-ли поведение реле току, как оно будет вести себя при действительных коротких замыканиях в сети. При новом включении, если в течение всей проверки режим работы присоединения не изменялся, можно воспользоваться векторной диаграммой токов, снятой на этапе проверки правильности подвода цепей переменного напряжения и тока к панели. Если проверка поведения реле производится в других условиях, а также при эксплуатационных проверках, нужно снять новую векторную диаграмму токов в ходе проверки во время подачи каждого из фазных токов в токовую обмотку реле. Способ снятия векторной диаграммы для удобства измерений и последующего анализа может быть несколько изменен. Для этого перед подачей рабочих токов нужно подготовить прибор для измерения значения пропускаемого через реле тока и угла сдвига между ним и испытательным напряжением, приходящим на обмотку напряжения реле. Чаще всего для этой цели берут прибор типа ВАФ-85. Полярный конец обмотки напряжения прибора подсоединяют к выводу реле, соединенному с зажимом *И* цепей напряжения. Подаваемый в реле ток можно измерять как в соответствующем фазном проводе, так и в проводе, соединяющем токовую обмотку реле с зажимом на входной сборке панели, который связан с нулевым выводом звезды трансформаторов тока. В нашем варианте схемы подключения реле этот провод подходит к полярному выводу токовой обмотки реле. Это место измерения обладает тем преимуществом, что при переключениях в токовых цепях оно не затрагивается. Полярный конец прибора в этом месте должен находиться на стороне реле. Для контроля правильности измерений при проверке, проводимой впервые, рекомендуется произвести измерение одного из токов дважды: в фазном проводе и в указанном месте вблизи реле и удостовериться, что оба результата измерений идентичны, как по значению, так и по фазе. Такое сопоставление убережет от возможных ошибок при измерениях.

По окончании всех измерений нужно восстановить исходное состояние цепей переменного напряжения и тока и заняться

анализом результатов последнего этапа проверки. Для этого нужно на специальном бланке или в рабочей тетради построить векторную диаграмму токов, подававшихся в реле при проверке, ориентированную относительно вектора испытательного напряжения реле. Векторная диаграмма строится в описанной ниже последовательности. Из точки в середине листа, принимаемой за начальную, проводят вектор, соответствующий испытательному напряжению. Обычно его направляют вниз вдоль вертикальной оси. От этого вектора под углом $\varphi_{м.ч}$ проводят прямую линию, являющуюся линией наибольшей чувствительности реле. Перпендикулярно ей проводят прямую, которая делит плоскость рисунка на две части: зону срабатывания и зону несрабатывания реле. После этого по данным измерений из общей начальной точки строят вектора токов, протекающих через токовую обмотку реле, располагая их соответственно углом сдвига по отношению к вектору испытательного напряжения.

Если построенные вектора токов, при подаче которых реле срабатывало, попадают в зону срабатывания, то можно считать, что реле включено правильно, и оно будет действовать нормально при КЗ в сети. В случаях, когда место расположения таких векторов оказывается вне зоны срабатывания, нужно выяснить причину этого несоответствия и устранить ее.

Примерный вид векторной диаграммы, полученной при проверке правильно включенного разрешающего реле, показан на рис.47,б. При ее построении учтены некоторые особенности подсоединения реле к цепям переменного напряжения и тока. На ней нарисован также вектор тока короткого замыкания $I_{Ак}$ получающийся при однофазном КЗ на фазе *A* присоединения. Он лежит вне зоны срабатывания реле. Из-за этого полярный конец токовой обмотки реле подсоединен со стороны нуля трансформаторов тока, благодаря чему для самого реле ток КЗ $I_{Ак}$ может быть представлен в виде вектора $I_{рmax} = -I_{Ак}$, направленного вдоль линии наибольшей чувствительности реле в зоне срабатывания. По тем же соображениям рабочие токи $I_{An} = I_A$ и соответственно I_B и I_C отображены на диаграмме векторами I_p противоположного направления. Из диаграммы следует, что реле должно срабатывать при пропускании через его токовую обмотку рабочих токов фаз *A* и *B*. При пропускании через реле рабочего тока фазы *C* реле не должно действовать.

Проверка рабочим напряжением и током реле направления мощности обратной последовательности должна выполняться на основе тех же подходов, как и реле направления мощности нулевой последовательности. Общие требования одинаковы, и поэтому их не повторяем.

Рассматриваемое реле может использоваться в схемах защиты и как разрешающее, и как блокирующее. Заводская маркировка реле предусмотрена для включения его как разрешающего при том условии, что обмотки напряжения подсоединены к линейным напряжениям трансформаторов напряжения, собранным по типовой схеме звезды или открытого треугольника, а токовые обмотки включены в цепи трансформаторов тока, собранным по схеме полной или неполной звезды с "согласным" включением первичных и вторичных обмоток. Если реле требуется включить как блокирующее, то либо изменяют полярность подачи токов в токовые обмотки реле, либо пересоединяют звезду вторичных обмоток трансформаторов тока на "встречное" включение.

Проверка поведения реле при подаче на него рабочих напряжений и токов производится за счет таких переключателей во вторичных цепях переменного напряжения и тока, которые обеспечивают условия имитации несимметричных КЗ или поступление в реле трехфазных систем напряжений и токов обратной последовательности. Последнее предпочтительнее, так как проще в исполнении и гарантирует более четкое поведение реле.

На рис.48,а показано как должны соединяться зажимы на крышках испытательных блоков для получения системы напряжений и трех систем токов обратной последовательности, подаваемых поочередно в токовые обмотки реле, для проверки его поведения. Получающиеся системы токов сдвинуты между собой на 120° , так как начальными этих систем являются соответственно рабочие токи I_A , I_B и I_C .

На рис.48,б показан пример векторной диаграммы напряжений и токов, построенной при проверке реле направления мощности обратной последовательности, используемого как разрешающее по одному из типовых вариантов. Вектор $I_{2\text{рmax}}$ изображает ток обратной последовательности, если ток КЗ совпадает по направлению с линией наибольшей чувствительности реле. Из диаграммы видно, что реле должно срабатывать, когда начальными токами подаваемых систем обратной последовательности является ток фазы *В* или *С*.

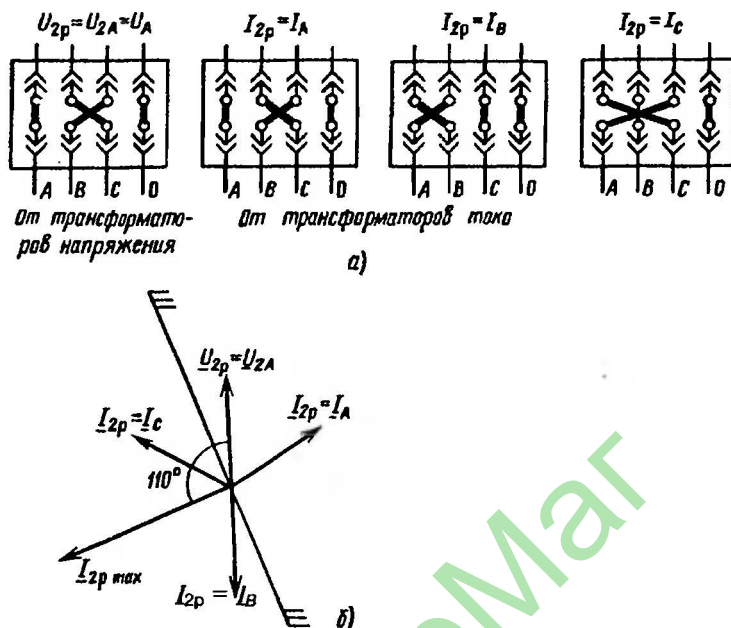


Рис. 48. Проверка реле направления мощности обратной последовательности рабочим напряжением и током:

а — соединение выводов на крышки испытательных блоков; б — векторная диаграмма для анализа работы реле

Ознакомившись с книгой, можно себе представить определенную сложность технического обслуживания аппаратуры, содержащей фильтры симметричных составляющих. В последнее время благодаря широкому внедрению персональных ЭВМ появилась возможность создавать поверочную аппаратуру, позволяющую в значительной мере автоматизировать процесс проверки. Управление большинством операций по установке и измерению подаваемых токов и напряжений и обработке результатов проверки могут передаваться управляющим ЭВМ, сочлененным с регулируемыми источниками токов и напряжений. Это дает значительный выигрыш в затратах времени на проведение работ, гарантирует полноту объема испытаний, обеспечивает более глубокий анализ результатов и качественное оформление документации. В результате облегчается работа персонала и улучшается качество проверок. Опыт, накопленный автором при внедрении устройств и создания программ для автоматизированной проверки сложной аппаратуры релейной защиты, убеждает, что будущее развитие техники обслуживания релейной защиты принадлежит таким установкам.

Приложение. Реле направления мощности обратной последовательности РМОП-2-1

В состав реле входят два органа, объединенных общими входными цепями переменного тока и блоком питания: орган максимального тока обратной последовательности и орган направления мощности той же последовательности. При этом токовый орган может использоваться независимо, а также одновременно в качестве пускового элемента для органа направления мощности. На рис.П.1 представлена структурная схема реле РМОП-2-1.

Цепь переменного тока реле содержит фильтр тока обратной последовательности, образованный из двух трансреакторов $TAV1$ и $TAV2$ и описанной в § 10 схемы выделения составляющей обратной последовательности (см.рис.36). Питание трансреактора $TAV1$ обеспечивается разностью токов $I_A - I_B$ фаз A и B , а питание трансреактора $TAV2$ — разностью токов $I_B - I_C$ фаз B и C , получаемых от трансформаторов тока защищаемого присоединения. Вторичные обмотки трансреакторов разделены на две одинаковые секции с общей точкой, подключенной к нулевой шинке 0. Напряжения, наводимые в каждой из секций трансреактора, пропорциональны соответствующим разностям токов, но противоположны по знаку. Нагрузкой трансреактора служат резисторы $R5-R9$. На схему выделения составляющей обратной последовательности подаются снимаемые с этих резисторов соответствующие падения напряжения нужного знака. Как работает трансреактор, подобный примененному в реле РМОП-2-1, подробно описано в § 8 (см.рис.24,е). Вторичный ток, протекающий по резисторам, служащим нагрузкой трансреактора, сдвинут относительно разности токов, проходящих по его первичным обмоткам на заданный угол. Забегая вперед отметим, что это сделано в целях обеспечения требуемого угла максимальной чувствительности органа направления мощности. Подробно об этом будет сказано ниже.

Настройка фильтра тока обратной последовательности на минимум небаланса в нормальном симметричном режиме осуществляется с помощью резисторов $R5$ и $R12$. Уровень выходного сигнала фильтра для точной подстройки токового органа на заданный ток срабатывания устанавливается при помощи резистора $R14$, включенного по схеме потенциометра. Напряжение, снимаемое с резистора $R14$, поступает через резисторы $R19-R23$, параллельно которым подключены переключатели $SB1-SB5$, и резистор $R24$ на вход инвертирующего масштабного усилителя, собранного на операционном усилителе $DA2.1$. С помощью переключателей $SB1-SB5$ набирается задаваемая уставка по току срабатывания токового органа.

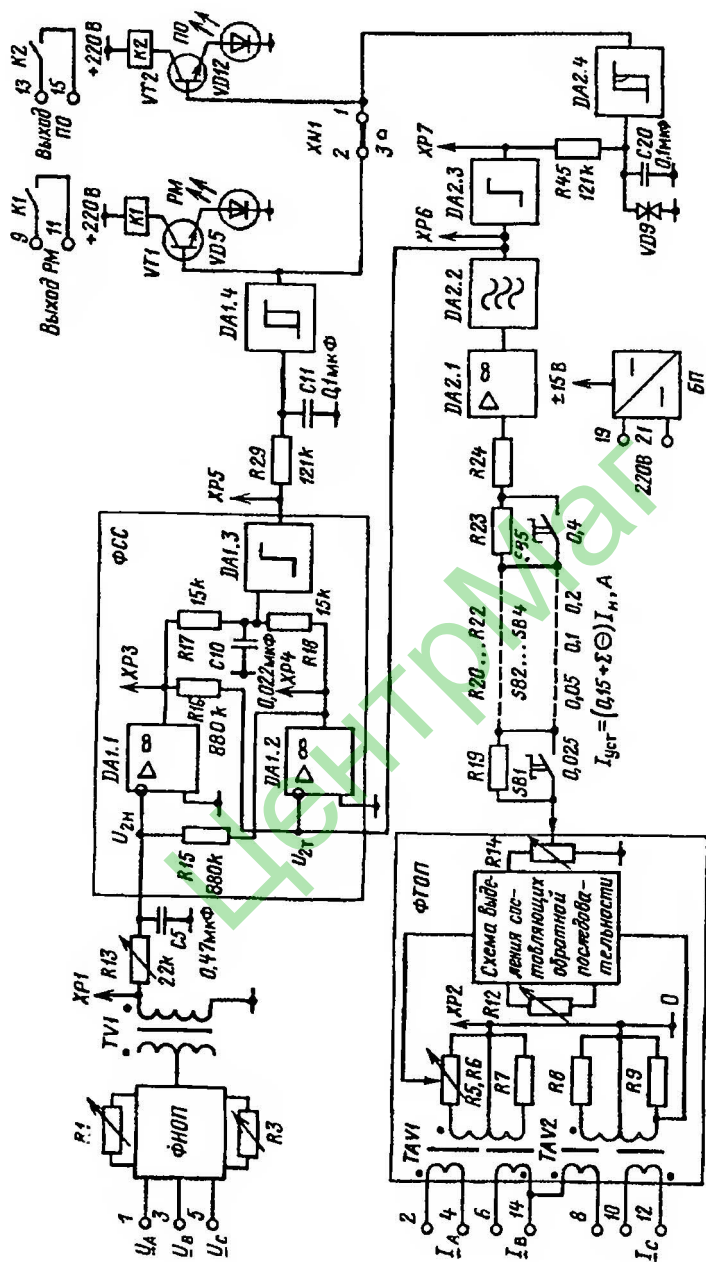


Рис. П.1. Структурная схема реле направления мощности обратной последовательности типа РМОП-2-1

Сигнал возникающий на выходе масштабного усилителя, пропускается через полосовой частотный фильтр, выполненный на операционном усилителе *DA2.2*. Фильтр собран по известной типовой схеме с многопетлевой обратной связью [Л4]. Он настроен на рабочую частоту сети и обеспечивает подавление гармонических составляющих, содержащихся в проходящем через него сигнале. За счет этого обеспечивается четкая работа реле при больших значениях токов *K3*, вызывающих насыщение трансформаторов тока присоединения. Напряжение основной гармоники с выхода частотного фильтра поступает по двум направлениям: на пороговый компаратор токового органа и на фазосравняющую схему (ФСС) органа направления мощности.

В двухпороговом компараторе токового органа это напряжение сопоставляется с опорным напряжением, которое устанавливается заранее на делителе напряжения, подключенном к напряжению оперативного тока +15 В. При отсутствии сигнала со стороны частотного фильтра на выходе компаратора держится положительное напряжение несколько ниже +15 В. Это напряжение заряжает конденсатор *C20*, образующий вместе с резистором *R45* схему интегратора, до напряжения положительного знака, достаточного для удержания выходного триггера, выполненного на операционном усилителе *DA2.4*, в несработанном состоянии.

На выходе триггера сохраняется отрицательный сигнал, который поступает на базу выходного транзистора *VT2*, обеспечивая его закрытое состояние.

Когда поступающее на вход компаратора переменное напряжение начинает превышать опорное, то независимо от знака полуволн его синусоид на выходе компаратора устанавливается отрицательное напряжение. Это влечет за собой перезаряд конденсатора *C20*. Если в течение полупериода рабочей частоты длительность отрицательных импульсов начинает превышать длительность положительных, то напряжение на конденсатора *C20* становится отрицательным. При достижении отрицательным напряжением на конденсаторе *C20* значения, превышающего порог срабатывания выходного триггера, напряжение на его выходе сменяется на положительное. Открывается транзистор *VT2* и приходит в действие выходное реле токового органа *K2*.

Выходной триггер охвачен положительной обратной связью, создающей "релейный эффект", работы токового органа с коэффициентом возврата не ниже 0,8. Временная диаграмма работы токового органа показана на рис. 50. Реле выпускаются на но-

минальный ток 1 или 5 А. Установка требуемого тока срабатывания органа осуществляется путем изменения переключателей уставок на лицевой плате реле. Уставки могут устанавливаться в пределах от 0,15 до 0,8 номинального тока реле со ступенью регулирования $0,025 I_{\text{ном}}$. Максимальному току срабатывания соответствует отжатое положение всех переключателей (переключатели разомкнуты). Если нужно установить другую уставку по току, то находится требуемая сумма цифр у головок разомкнутых переключателей по выражению: $\sum N_i = I_{\text{ср.зад}} - 0,15 I_{\text{ном}}$. Остальные переключатели переводятся в утопленное (замкнутое) положение путем нажатия на головку и поворота ее на 90° для фиксации положения.

Теперь обратимся снова к структурной схеме изучаемого нами реле РМОП-2-1. Орган направления мощности этого реле имеет две входных цепи — цепь тока и цепь напряжения. Как формируется входной сигнал цепи тока $\underline{U}_{2т}$, приходящий от трансформаторов тока присоединения, было показано выше при описании токового органа.

Цепь напряжения реле состоит из типового активно-емкостного фильтра напряжения обратной последовательности, описанного в § 7 (см. рис.26). Выходное напряжение ФНОП поступает на разделительный трансформатор TVI , обеспечивающий гальваническую развязку между цепями напряжения присоединения и полупроводниковой частью реле.

Напряжение, получающееся на вторичной обмотке TVI , ложится на фазосдвигающую цепочку, образованную резистором $R13$ и конденсатором $C5$.

Падение напряжения на конденсаторе $C5$ используется в качестве входного сигнала цепи напряжения $\underline{U}_{2н}$ органа направления

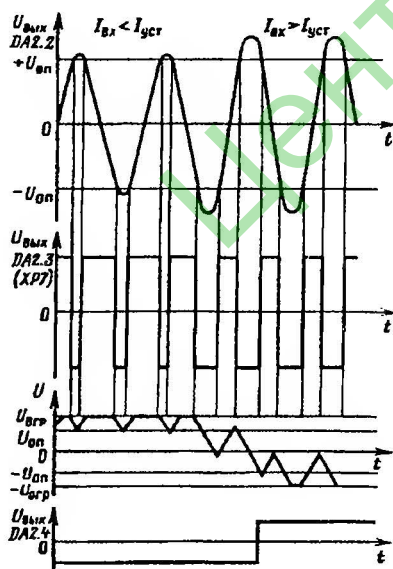


Рис. П.2. Временная диаграмма работы токового органа реле РМОП-2-1

Функциональными элементами органа направления мощностности, обеспечивающими требуемую ширину зоны срабатывания органа и его наибольшую чувствительность при угле $\varphi_{м.ч.}$, являются фазосравнивающая схема, сокращенно $\Phi СС$, и интегратор, состоящий из резистора $R29$ и конденсатора $C11$. $\Phi СС$, примененная в реле РМОП-2-1, обладает наибольшей чувствительностью, если поступающие на ее входы сигналы переменного напряжения $U_{2н}$ и $U_{2т}$ совпадают по фазе. Чтобы использовать это свойство $\Phi СС$ параметры элементов токовой цепи и цепи напряжения подобраны таким образом, что при сдвиге между составляющими обратной последовательности тока и напряжения одноименной фазы, поступающими на входные зажимы реле, равном углу максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$ сдвиг между напряжениями $U_{2н}$ и $U_{2т}$ на входах $\Phi СС$ равнялся нулю. Это достигнуто за счет соответствующего согласования всех фазоповоротных цепочек, содержащихся в схеме реле. В их числе: нагрузки вторичных обмоток трансреакторов $TAV1$ и $TAV2$, сами схемы ФТОП и ФНОП, инвертирующее свойство масштабного усилителя на $DA2.1$ и подбор значений $R13$ и $C5$. Поясняющая векторная диаграмма токов и напряжений, действующих в реле, при угле $\varphi_{м.ч}$ между U_{ρ} и I_{ρ} на его входных зажимах показана на рис.П.3.

143

резисторов $R17$ и $R18$. К общей точке делителя подключен конденсатор $C10$ и вход двухпорогового компаратора на операционном усилителе $DA1.3$, третьем из используемых в ФСС. Схема компаратора аналогична примененной в токовом органе. При напряжении в общей точке делителя, близком к нулю, на выходе компаратора держится положительное напряжение, значение которого немного ниже $+U_{\text{пит}}$. Знак напряжения на выходе компаратора становится отрицательным при появлении на общей точке делителя напряжения достаточной величины любого знака.

Последующая часть схемы органа направления мощности выполнена подобно имеющейся в токовом органе. Она содержит упомянутый выше интегратор на $R20$ и $C11$ и узел выхода, включающий триггер с положительной обратной связью на операционном усилителе $DA1.4$ и выходной транзистор $VT1$, при открывании которого срабатывает выходное реле $K1$ органа направления мощности.

Разберем возможные состояния органа направления мощности. При отсутствии сигналов на обоих входах ФСС режим операционных усилителей $DA1.1$ и $DA1.2$ устанавливается произвольно под действием случайных факторов. При этом на выходе одного из них возникает положительное напряжение, которое через соответствующий резистор попадает на вход другого операционного усилителя, вызывая на его выходе отрицательное напряжение такого значения. В этом режиме потенциал общей точки делителя напряжения на резисторах $R17$ и $R18$ остается близким к нулю. На выходе компаратора держится положительное напряжение. Конденсатор $C11$ заряжен этим напряжением, выходной триггер находится в несработанном состоянии: транзистор $VT1$ закрыт отрицательным напряжением, имеющимся на выходе $DA1.4$, выходное реле $K1$ обесточено.

При появлении переменного напряжения только на одном из входов ФСС на выходе соответствующего операционного усилителя возникает периодический сигнал из прямоугольных импульсов, знаки которых противоположны знакам полуволн синусоид входного сигнала. Сигналы с выхода запущенного операционного усилителя передаются на вход другого усилителя, и на его выходе получается периодический сигнал из прямоугольных импульсов противоположного знака. Потенциал общей точки делителя на резисторах $R17$ и $R18$ по-прежнему остается близким к нулю, и орган пребывает в несработанном состоянии.

Это свойство фазосравнивающей схемы исключает возможность "самохода", т.е. неправильного действия органа при наличии только одного переменного напряжения на ее входе.

При возникновении переменных напряжений на обоих входах ФСС действие органа направления мощности зависит от сдвига фаз между ними. При угле между этими напряжениями, равном 180° , состояние схемы остается таким же, как и при описанном выше случае подачи одного из переменных напряжений, и орган не действует. При изменении угла сдвига фаз между поступающими входными напряжениями в сторону уменьшения появляются промежутки времени, когда знаки импульсов на выходах *DA1.1* и *DA1.2* совпадают. Эти импульсы складываются, и на общей точке делителя на резисторах *R17* и *R18* появляются на это время импульсы напряжения, знак которых меняется с каждым полупериодом поступающих сигналов. В промежутках времени, когда на общей точке делителя присутствует напряжение любого знака, выходное напряжение компаратора становится отрицательным. Конденсатор *C11* начинает перезаряжаться.

Однако изменение знака напряжения на нем происходит только тогда, когда угол между входными напряжениями становится близким к 90° . В этом положении длительность отрицательных сигналов на выходе компаратора приближается к длительности положительных. При некотором превышении длительности отрицательных импульсов над положительными отрицательное напряжение на *C11* достигает порога срабатывания выходного триггера. Напряжение на его выходе делается положительным, *VT1* открывается, и работает выходное реле органа направления мощности *K1*. Этому моменту соответствуют границы зоны срабатывания органа.

Наибольшая чувствительность органа направления мощности получается, когда сдвиг фаз между напряжениями, приходящими на входы ФСС, делается равным нулю. Знаки полуволн синусоид обоих сигналов совпадают в течение всего времени, и на конденсаторе *C11* быстро устанавливается достаточное для срабатывания узла выхода отрицательное напряжение. Для поступающих на входы реле слагающих обратной последовательности тока и напряжения это состояние органа соответствует сдвигу между ними на угол $\varphi_{м.ч.}$

Рассмотренные процессы наглядно иллюстрируются временными диаграммами работы органа направления мощности, представленными на рис.П.4.

Если требуется, чтобы орган направления мощности срабатывал после действия токового органа, иначе говоря, имел пуск по току, то нужно поставить накладку *XN1*, размещенную на лицевой плате реле, в замкнутое положение 1-2. В этом случае отрицательное напряжение с выхода триггера токового органа будет

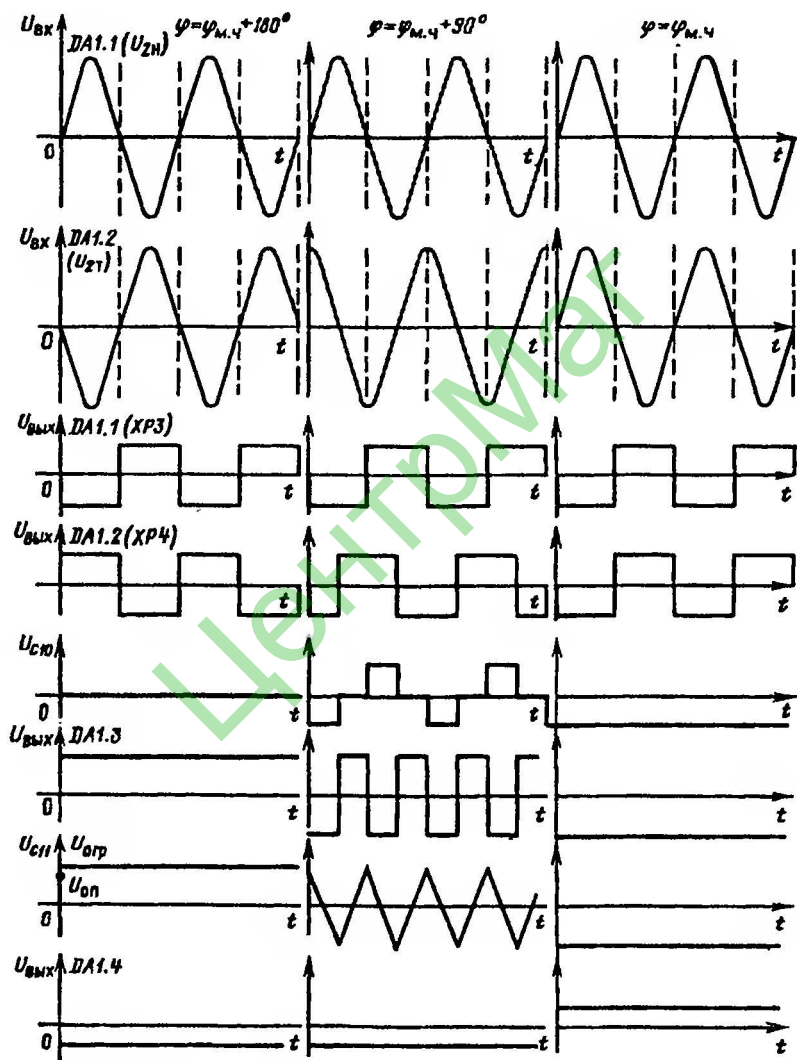


Рис.П.4. Временная диаграмма работы органа направления мощности реле РМОП-2-1

запирать транзистор *VT1* независимо от состояния самого органа направления мощности. В случае срабатывания токового органа запирающий сигнал снимается, и открывается возможность для действия выходного реле органа направления мощности *K1*.

Реле РМОП-2-1 изготавливаются на напряжение постоянного тока 220 В. Напряжения ± 15 В для питания полупроводниковой части реле получают с помощью параметрического стабилизатора, подсоединенного к зажимам постоянного тока +220 В через добавочный резистор.

Для того чтобы не допускать повреждения реле в случае подачи напряжения оперативного тока 220 В не в соответствии с полярностью зажимов, в этой цепи установлен защитный диод.

Сигнализация срабатывания каждого из выходных реле осуществляется с помощью светодиодов, снабженных соответствующими надписями. Светодиоды смонтированы на лицевой плате реле.

Список литературы

1. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей. М.-Л.: ОНТИ, 1936.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. М.: Энергия, 1970.
3. Фабрикант В.Л. Фильтры симметричных составляющих. М.: ГЭИ, 1962.
4. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Реле защиты/В.С.Алексеев, Г.П.Варганов, Б.И.Панфилов, Р.З.Розенблюм. М.: Энергия, 1976.
6. Темкина Р.В. Измерительные органы релейной защиты на интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992.
8. Гельфанд Я.С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Коковин В.Е. Фильтры симметричных составляющих в релейной защите. М.: Энергия, 1968.
10. Коковин В.Е. Реле направления мощности обратной последовательности. М.: Энергия, 1970.
11. Линт Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Лысенко Е.В. Функциональные элементы релейных устройств на интегральных микросхемах. М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Типовая инструкция по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики электростанций и подстанций. М.: СПО ОРГРЭС, 1991.
14. Инструкция по проверке правильности включения реле направления мощности. М.-Л.: Энергия, 1966.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	4
1. Основные понятия метода симметричных составляющих	8
2. Применение метода симметричных составляющих для определения токов и напряжений при повреждениях в трехфазных электрических системах.....	14
3. Расчетные выражения и векторные диаграммы при основных видах несимметричных коротких замыканий.....	20
4. Трансформация токов короткого замыкания.....	33
5. Расчетные выражения и векторные диаграммы при разрывах фаз	38
6. Выполнение расчетов токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях и неполнофазных режимах.....	45
7. Принципы построения фильтров симметричных составляющих.....	55
8. Основные элементы схем и параметры фильтров симметричных составляющих.....	60
9. Фильтры симметричных составляющих, предназначенные для работы с электромеханическими реле.....	67
10. Фильтры симметричных составляющих, предназначенные для работы в схемах, выполненных на операционных усилителях.....	81
11. Анализ работы комбинированных фильтров симметричных составляющих при разных видах КЗ.....	91
12. Реле и измерительные органы защиты, реагирующие на симметричные составляющие токов и напряжений	94

13. Техническое обслуживание аппаратуры, содержащей фильтры симметричных составляющих.....	101
14. Способы и схемы проверки отдельных частей аппаратуры, содержащей фильтры симметричных составляющих.....	123
15. Проверка и анализ работы релейных устройств, реагирующих на симметричные составляющие, рабочим напряжением и током	126
Приложение. Реле направления мощности обратной последовательности РМОП-2-1.....	139
Список литературы.....	148

ЦентрМаг

Производственно-практическое издание

Линт Георгий Эммануилович

Симметричные составляющие в релейной защите

Редактор А.В. Волковицкая

Художественный редактор В.А. Гозак - Хозак

Технический редактор Н.М. Брудная

Корректор Е.В. Кудряшова

ИБ 3844

ЛР № 010256 от 07.07.92.

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинал-макета 15.05.96. Формат 60х88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,80. Усл. кр.-отт. 10,04. Уч.-изд. л. 10,08. Тираж 3500 экз. Заказ 859. С028.

Энергоатомиздат. 113114. Москва М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 9 Комитета Российской Федерации по печати 109033, Москва, Вopочаевская ул., 40.

ЦентрМаг

