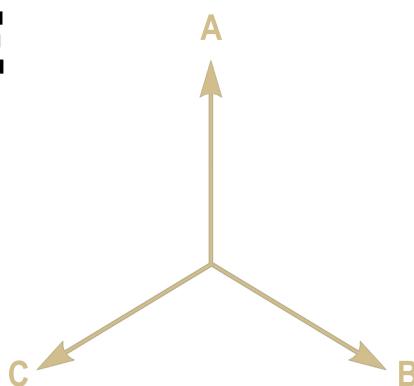


В.М. ЕЛФИМОВ

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ



БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Выпуск 233

В. М. ЕЛФИМОВ

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

Центрэнергиздат



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1967

6П2.13
Е 46

УДК 621.316.925:538.551.1(04)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Большам Я. М., Долгов А. Н., Ежков В. В., Каминский Е. А.,
Мандрыкин С. А., Синьчугов Ф. И., Смирнов А. Д., Устинов П. И.

Елфимов В. М.

Е 46 Векторные диаграммы в релейной защите. М.,
«Энергия». 1967.

72 с. с илл. 8 000 экз. 13 к. (Библиотека электромонтера. Вып. 233).

Показана возможность изображения переменных токов и напряжений в виде векторов, рассмотрены векторные диаграммы в цепях однофазного и трехфазного тока и даны примеры анализа устройств релейной защиты с помощью векторных диаграмм. Рассчитана на электромонтеров, знакомых с установками высокого напряжения, имеющих опыт наладки и проверки простых защт и знакомых с основами электротехники в объеме курса средней школы.

3-3-13
117-66

6П2.13

ЧентраМарк
Елфимов Виктор Михайлович
Векторные диаграммы в релейной защите

Редактор Семенов В. А.

Художественный редактор Д. И. Чернышев

Технический редактор Т. Г. Усачева Корректор З. Б. Штайфер

Сдано в набор 19/IV 1967 г.

Подписано к печати 9/VI 1967 г.

Т 06970

Формат 84×108^{1/2}з.

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 3,78

Уч.-изд. л. 3,83

Тираж 8 000 экз.

Цена 13 коп.

Заказ 193

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа поведения устройств релейной защиты в нормальных и аварийных режимах необходимо производить сравнение и расчет переменных токов, напряжений и магнитных потоков.

Для расчета токов, напряжений и магнитных потоков требуется их изображение. Одним из возможных видов изображения переменных величин является изображение их с помощью векторных диаграмм.

Токи, напряжения и магнитные потоки могут быть изображены по-разному, начиная с рисунка, изображающего электроны в проводе или силовые линии электрического и магнитного поля, и кончая символами i , u и Φ . Общим требованием при изображении электрической величины является его соответствие задаче, для решения которой это изображение используется. Для этого изображение должно содержать информацию (сведения), необходимую для решения рассматриваемой задачи.

Если изображение не будет содержать необходимой информации, то мы не получим от него интересующие нас сведения.

Если в изображении будут содержаться лишние сведения (лишняя информация), то, загромождая изображение, расчет и анализ, эти лишние сведения увеличивают затраты труда, вероятность различных ошибок и, главное, мешают вводить в изображение или считывать с изображения действительно необходимые нам сведения.

Рассмотрим, какая информация о токе необходима при решении той или иной задачи. Например, при определении теплового действия тока достаточно знать только его величину.

При рассмотрении взаимодействия двух токов информация об их величинах будет недостаточной. В этом случае необходимо знать также взаимное направление прохождения токов по проводам. В первом случае информация о направлении тока была бы излишней.

В брошюре рассмотрены способы изображения токов и напряжений в прямоугольной системе координат, аналитическом виде и в виде векторных диаграмм.

Предлагаемая брошюра дает основные понятия о векторном изображении токов и напряжений, которые необходимы для эксплуатации релейной защиты, и знакомит с методикой снятия и использования векторных диаграмм.

Материал по использованию векторных диаграмм для расчета и анализа конкретных защит читатель найдет в литературе по соответствующей защите.

В заключение необходимо отметить, что излагаемый ниже материал рассчитан на последовательное прочтение и усвоение.

1. ИЗОБРАЖЕНИЕ ТОКА

Для решения большого круга задач необходимо знать не только величину тока, проходящего по цепи, но и направление тока в проводе, точнее, в любом из его сечений.

Условно принято, что направление тока согласно движению положительных зарядов или встречно с движением отрицательных зарядов.

В каждом проводе геометрически возможны два направления тока. Для того чтобы отличать эти два направления, одно из них обозначается стрелкой возле сечения провода, где рассматривается прохождение тока.

Ток, направление которого совпадает со стрелкой, в расчетах принято изображать положительными числами или положительными отрезками. Само же геометрическое направление, обозначенное стрелкой, получило название **положительного направления**.

Соответственно ток, направление которого встречно со стрелкой, в расчетах изображается отрицательными числами или отрицательными отрезками. Само же геометрическое направление, встречное со стрелкой, получило название **отрицательного направления**.

Принятие одного из геометрических направлений положительным в общем случае произвольно.

Отсюда следует, что если мы захотим изобразить ток в двух сечениях одного провода и примем для каждого сечения встречные положительные направления, то ток в одном сечении будет изображаться положительным числом или положительным отрезком, а ток в другом сечении в это же время будет изображаться отрицательным числом или отрицательным отрезком.

Обычно принято считать, что, если около провода стрелкой указано одно геометрическое положительное направление для тока, то это положительное направление относится к току в любом сечении провода, если нет другого указания (другой стрелки).

Для примера изобразим в сечении S провода (рис. 1, а) изменение переменного тока во времени за отрезок времени, равный двум-трем изменениям направления тока.

Лучшим изображением для данной цели служит изображение переменного тока в прямоугольной системе координат.

По горизонтальной оси будем откладывать время протекания процесса, а по вертикальной — величины тока в принятом масштабе. При этом в те моменты времени, когда направление тока (движение положительных зарядов) совпадает с направлением стрелки, величина этого тока изображается положительным отрезком. Соответственно в те моменты, когда направление тока встречно с направлением стрелки, величина этого тока изображается отрицательным отрезком.

Мы можем начать изображать процесс прохождения тока по проводу (рис. 1, а) через сечение S в любой момент времени этого процесса. На рис. 1, б приведен пример такого изображения.

При этом момент $t=0$, с которого начато изображе-

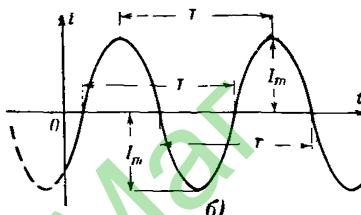
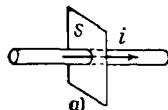


Рис. 1. Изображение одного тока.

ние процесса, не есть момент начала процесса. Мы рассматриваем установившиеся электромагнитные процессы, и момент начала изображения выбирается нами произвольно, когда электромагнитный процесс уже установленлся.

На рис. 1,б каждому значению времени t соответствует определенное мгновенное значение тока и определенное его направление.

Кроме того, изображение тока по рис. 1,б позволяет судить об амплитуде тока (максимальной величине) I_m и об отрезке времени T , по истечении которого значение тока повторяется. Это время T называется периодом. Величина, обратная периоду, называется частотой. Она равна числу периодов изменения тока в секунду (гц).

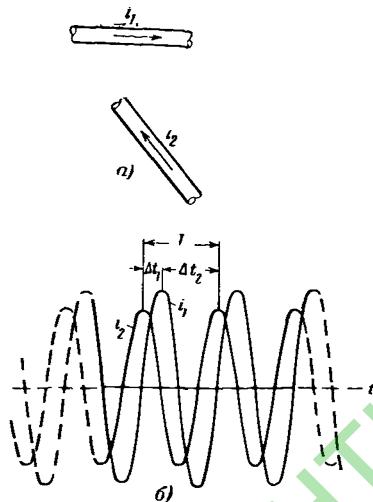
Допустим теперь, что имеются два провода, относящихся к двум разным цепям, по которым проходят переменные токи i_1 и i_2 , как показано на

Рис. 2. Изображение двух токов.

рис. 2,а, причем частоты этих токов одинаковы, т. е. они имеют одинаковые периоды T .

Для изображения этих токов в прямоугольной системе координат выберем положительные направления для каждого тока и обозначим их стрелками.

Рассматриваемые токи могут проходить так, что они будут одновременно достигать максимумов в принятых положительных направлениях, а могут достигать положительных максимумов и разновременно. На рис. 2,б рассмотрен случай, когда положительные максимумы тока i_2 наступают на Δt_2 позже или на Δt_1 раньше положительных максимумов тока i_1 . В таком случае, чтобы охарактеризовать процесс изменения тока i_2 во времени относительно процесса изменения тока i_1 , говорят, что ток i_2 отстает от тока i_1 на время Δt_2 или что ток i_2 опережает ток i_1 на время Δt_1 .



Какое же значение может иметь время Δt_1 и Δt_2 ? Очевидно, от 0 до T и от T до 0, так как через время, равное T , процесс изменения тока повторяется.

Характеристика двух процессов (в данном случае процессов изменения токов) по взаимному сдвигу во времени между одинаковыми состояниями процессов (между положительными максимумами, между моментами перехода через нуль и т. п.), т. е., как принято говорить, между одинаковыми фазами, является основной совместной характеристикой этих двух процессов.

Указанная характеристика, как мы увидим далее, является основой векторного изображения.

Изображение переменного тока графическим путем, как показано на рис. 2, а и б, хорошо отображает закон изменения тока в проводе по величине и направлению в зависимости от времени протекания процесса, наглядно отображаются амплитуда I_m , период T и смещение во времени одинаковых фаз. Однако такое изображение токов практически неприемлемо для математических действий над токами (для сложения, вычитания, умножения и т. д.).

Нетрудно видеть, как громоздко производить сложение или вычитание приведенных на рис. 2 токов i_1 и i_2 .

Для аналитических расчетов токи должны быть представлены в виде математический функций.

Синусоидальный переменный ток можно представить следующим образом как функцию амплитуды, времени и периода:

$$i = I_m \sin 360^\circ \frac{t + \Delta t}{T} \quad (1)$$

или

$$i = I_m \sin \alpha, \quad (2)$$

где

$$\alpha = 360^\circ \frac{t + \Delta t}{T}. \quad (3)$$

Из (2) следует, что мгновенное значение тока определяется, как произведение амплитуды тока I_m на синус угла α , который в свою очередь зависит от времени t при заданных, постоянных для данного тока величинах Δt и T .

Как видно из (2) и (3), угол α непрерывно увеличивается с течением времени. При изменении угла α от

0 до 360° синус угла α проходит все стадии своего изменения от нуля через $+1, 0, -1$ и до нуля. При больших значениях α член 360° синус α повторяет все свои стадии, которые были при изменении угла α от 0 до 360° . Таким образом, любая стадия синусоидального тока (напряжения) может характеризоваться углом α в пределах от 0 до 360° . Этот угол, характеризующий стадию синусоидальной величины, далее называется фазовым углом, или фазой. В этом смысле можно говорить о переменном токе, как о токе с непрерывно изменяющейся и периодически повторяющейся фазой.

При совместном рассмотрении двух синусоидальных величин одной частоты их важнейшей совместной характеристикой является разность их фаз, называемая углом сдвига фаз и обычно обозначаемая буквой φ .

Если в момент t фазовый угол одной величины $\alpha_1 = 360^\circ(t + \Delta t_1)$, а другой в тот же момент $\alpha_2 = 360^\circ \frac{t + \Delta t_2}{T}$, то угол сдвига фаз равен:

$$\begin{aligned}\varphi &= \alpha_1 - \alpha_2 = 360^\circ \frac{t + \Delta t_1}{T} - \\ &- 360^\circ \frac{t + \Delta t_2}{T} = 360^\circ \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T}.\end{aligned}\quad (4)$$

Из (4) видно, что при одинаковых частотах угол сдвига φ не меняется во времени и постоянен для двух данных синусоидальных величин. Если угол сдвига фаз двух синусоидальных величин равен нулю, то считают, что эти величины (токи, напряжения) совпадают по фазе; если угол сдвига фаз равен $\pm 180^\circ$, то считают, что синусоидальные величины противоположны по фазе.

Как правило, момент начала изображения токов может быть выбран произвольно. В этом случае для одного из токов величину Δt можно принять равной нулю. Изображение остальных токов должно включать соответствующие величины Δt , определяющие сдвиг фаз рассматриваемых токов относительно первого.

Таким образом, если $\alpha_1 = 360^\circ t$, а $\alpha_2 = 360^\circ \frac{t + \Delta t}{T}$, то $\varphi = \alpha_1 - \alpha_2 = -360^\circ \frac{\Delta t}{T}$. Принято величину $360^\circ/T$ (или $2\pi/T$) называть угловой частотой и обозначать ω .

Угловая частота (в радианах в секунду) рассчитывается по следующей формуле:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{1}{T} = 2\pi f.$$

При частоте 50 Гц ($T = 0,02$ сек) угловая частота $\omega = 3,14$ рад/сек, или $\omega = 1800$ град/сек.

Величину $360^\circ \cdot \frac{\Delta t}{T}$ (или $2\pi \frac{\Delta t}{T}$) принято называть начальной фазой и обозначать ψ .

При таких обозначениях общее аналитическое изображение тока имеет следующий вид:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (5)$$

или

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

где фазовый угол сдвига φ характеризует сдвиг во времени каждой фазы данного тока от аналогичной фазы тока (или другой синусоидальной величины той же частоты) с начальной фазой, равной нулю.

На практике обычно применяется второе выражение, т. е. (6).

Разница в изображении переменного тока в прямоугольной системе координат (рис. 1,б) и аналитически в виде

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

состоит в том, что на рис. 1 наглядно видны величины и направление тока для изображенного отрезка времени, а при аналитическом изображении эти величины и направления мгновенных токов могут быть подсчитаны для любого момента времени.

В заключение заметим, что на практике применяется еще одна характеристика переменного тока и других синусоидально изменяющихся величин. Это так называемое эффективное или действующее значение. Для нашего рассмотрения будет достаточным знать, что эффективное значение связано с амплитудным значением через постоянный коэффициент равный $\sqrt{2}$, а именно:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

2. ИЗОБРАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И Э. Д. С.

Так же как и изображение тока, изображение напряжения и э. д. с. должно включать в себя сведения о величине мгновенного значения и о направлении.

В существующей литературе, как правило, направление действия напряжения принимается по направлению перемещения положительного заряда под действием рассматриваемого напряжения. Например, на батарее постоянного тока от плюса к минусу.

Направление действия э. д. с. принимается также по направлению перемещения положительного заряда под воздействием этой э. д. с. Например, на батарее постоянного тока от минуса к плюсу.

В электрической схеме между двумя ее точками может существовать напряжение или э. д. с. двух направлений. Для того чтобы отличать эти два направления действия напряжения или э. д. с., одно из этих геометрических направлений между точками обозначают стрелкой.

Напряжение или э. д. с., направление действия которого совпадает с направлением стрелки, в расчетах принято изображать положительными числами, или положительными отрезками. Само же геометрическое направление, обозначенное стрелкой, называется положительным направлением.

Соответственно напряжение или э. д. с., направление действия которого встречно со стрелкой, изображается отрицательными числами, или отрицательными отрезками. Само же направление, встречное со стрелкой, называется отрицательным направлением. Таким образом, стрелка обозначает принятое положительное направление для напряжения по любому контуру от одной рассматриваемой точки до другой, в том числе и через источник э. д. с.

Положительное направление может обозначаться не стрелкой, а индексом. Например, принятому положительному направлению для напряжения от a к b будет соответствовать запись u_{ab} .

Положительное направление выбирается в общем случае произвольно.

Переменное напряжение и э. д. с. характеризуются так же, как и ток, величиной амплитуды или соответствующей величиной эффективного значения, а также углом фазового сдвига.

Общеприняты следующие обозначения:
 u, e — мгновенные значения напряжения и э. д. с.
 U_m, E_m — амплитудные значения напряжения и э. д. с.
 $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ — действующие (эффективные)
 значения напряжения и э. д. с.

3. ВЕКТОРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

В предыдущих разделах мы рассмотрели, как изображаются синусоидальные переменные величины в прямоугольной системе координат и в аналитическом виде.

Однако при решении электротехнических задач, когда требуется производить сложение или вычитание токов и напряжений, эти способы изображения неудобны.

Для примера приведем выражение для подсчета амплитуды и фазы сдвига результирующего тока i_3 от сложения двух токов i_1 и i_2 , имеющих соответственно амплитуды I_{m1} и I_{m2} и фазы сдвига φ_1 и φ_2 :

$$I_{m3} = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + 2I_{m1}I_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{I_{m1} \sin \varphi_1 + I_{m2} \sin \varphi_2}{I_{m1} \cos \varphi_1 + I_{m2} \cos \varphi_2}.$$

Как видно, для определения величины амплитуды результирующего тока I_{m3} и его угла φ_3 необходимо проделать весьма громоздкие вычисления. Гораздо проще эта задача решается графически с помощью так называемого векторного изображения токов.

Дело в том, что аналитическое изображение переменного тока или напряжения, несущее довольно обширную информацию об изображаемой величине, содержит некоторые сведения, именуемые при решении большого круга задач релейной защиты или, как говорят, содержит избыточную информацию.

Рассмотрим аналитические выражения для переменного тока и напряжения:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi_1);$$

$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi_2).$$

Первый символ в этих выражениях (I_m , U_m) — необходимая информация, так как мы должны знать, что это — ток или напряжение и с какой величиной мы имеем дело.

Второй символ (\sin) — избыточная и, следовательно, несущая информация, так как всем известно, что изменения во времени переменных токов и напряжений происходит по закону синуса.

Третий символ (ω — угловая частота) — также избыточная, несущая информация, так как все токи и напряжения в одной и той же электрической цепи изменяются с одинаковой частотой.

Четвертый символ — изображение времени t .

В целях упрощения расчетов и изображений момент начала отсчета процесса принимается одинаковым. Поэтому время для всех рассматриваемых величин всегда одинаково и, следовательно, составляет избыточную, несущую информацию.

Наконец пятый символ (ϕ — фазовый угол сдвига) — информация необходимая, нужная, так как является индивидуальной характеристикой каждой величины: тока или напряжения.

С учетом сказанного выше аналитические изображения токов и напряжений дают нам полезную информацию, которую можно было бы записать в таком условном виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_1), \quad u = U_m \sin(\omega t + \phi_2).$$

Эти последние выражения и являются основой для векторного изображения токов и напряжений.

Для этого на плоскости откладывается в произвольном направлении ось отсчета углов. Расположим ее вертикально, как показано на рис. 3.

Под углом ϕ_1 откладывается вектор (направленный отрезок), пропорциональный амплитуде I_{m1} или эффективному значению I_1 тока i_1 . Под углом ϕ_2 откладывается вектор, пропорциональный соответственно амплитуде I_{m2} или эффективному значению I_2 тока i_2 . Вектор, изображающий суммарный ток I_3 , получится как геометрическая сумма двух векторов, если построить параллелограмм со сторонами векторов, изображающих токи i_1 и i_2 , и из общей точки провести диагональ. Эта диагональ-вектор и будет вектором, изображающим ток i_3 . Амплитуда тока I_{m3} или соответственно эффективное значение I_3 тока i_3 находится как величина диаго-

или параллелограмма в принятом масштабе изображения. Фазовый угол сдвига φ_3 находится как угол между вектором I_3 и осью отсчета. Приведенное на рис. 3,а изображение токов I_1 , I_2 и I_3 получило название векторной диаграммы. Как правило, векторные изображения выполняют в эффективных значениях.

Таким образом, переменные токи (напряжения) могут изображаться в виде эффективных значений и как скалярная и как векторная величина. При алгебраических операциях необходимо отличать, с какими величинами производится действие. Для этого при алгебраических операциях с токами (напряжениями), изображаемых векторно, над соответствующими эффективными значениями токов (напряжений) подставляются точки.

Приведенное на рис. 3,а векторное изображение токов значительно проще, чем рассмотренные ранее аналитическое и графическое выражения.

Как видно из рис. 3,а, для определения суммы двух переменных токов нужно знать их величины и фазовый угол сдвига между ними. Поэтому на практике вектор одного из токов принимают за ось отсчета. На рис. 3,б за ось отсчета принят вертикально расположенный вектор тока I_1 . Вектор тока I_2 отстает от вектора тока I_1 на угол φ и поэтому строится на рис. 3,б под углом φ от I_1 в направлении движения часовой стрелки.

В этом случае и полученный в результате сложения векторов угол сдвига суммарного тока I_3 φ_3 отсчитывается от вектора тока I_1 .

Вычитание токов также может быть выполнено с помощью векторного изображения.

Для этого рассмотрим два тока i_1 и i_2 , равный $-i_1$:

$$i_1 = I_m \sin(\omega t - \varphi) \text{ и } i_2 = -I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Эти токи отличаются друг от друга только знаком перед изображением.

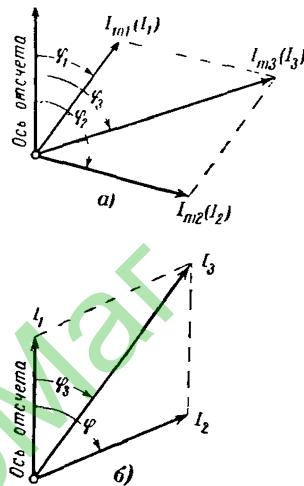


Рис. 3. Определение суммы двух векторов.

Преобразуем выражение для тока i_2 следующим образом, имея в виду, что $-\sin x = \sin(x - 180^\circ)$:

$$\begin{aligned} i_2 &= -I_m \sin(\omega t - \varphi) = I_m[-\sin(\omega t - \varphi)] = \\ &= I_m \sin(\omega t - \varphi - 180^\circ) = I_m \sin[\omega t - (180^\circ + \varphi)]. \end{aligned}$$

Таким образом, токи i_1 и i_2 будут изображаться двумя векторами, одинаковыми по величине, но сдвинутыми один относительно другого на 180° .

Отсюда, если мы хотим получить разность токов i и i_1 , можем записать это в следующем виде:

$$i_3 = i - i_1 = i + (-i_1) = i + i_2.$$

Таким образом, чтобы получить разность двух токов, надо к вектору, изображающему ток, из которого производится вычитание, прибавить вектор, равный но противоположно направленный вектору, изображающему вычитаемый ток. Результирующий ток будет векторным изображением тока, равного разности двух токов.

На рис. 4 показано построение вектора тока I_3 , равного разности векторов ($I_1 - I_2$).

Разность двух векторов можно определить и другим путем, соединив концы двух векторов: уменьшаемого и вычитаемого. Стрелка результирующего вектора должна быть направлена в сторону уменьшаемого вектора, как показано на рис. 4. Получившийся при этом вектор то-

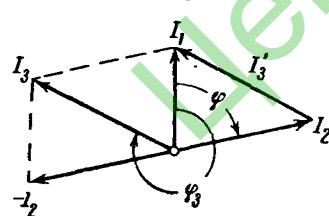


Рис. 4. Определение разности двух векторов.

ка I'_3 равен вектору тока I_3 (рис. 4), так как оба отрезка равны по величине и параллельны. Следует отметить, что термин «направление» встречается как в обозначениях на схемах, так и в векторных диаграммах. Для схемы «направление» означает одно из двух возможных геометрических направлений протекания

процесса. Для векторной диаграммы «направление» означает ориентацию вектора на плоскости и характеризует один синусоидальный процесс относительно другого синусоидального процесса как меру несовпадения во времени одинаковых фаз этих двух процессов (например, максимумов в принятом положительном геометрическом направлении).

4. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ

Элемент электрической цепи обладает постоянным сопротивлением z , если между эффективным значением подведенного к элементу напряжения U и эффективным значением проходящего по элементу тока I существует постоянное соотношение $z = U/I$.

Сопротивление называется активным R , если энергия, выделяемая на нем, безвозвратно переходит в тепловую.

Сопротивление называется реактивным x , если энергия, выделяемая на нем в одну часть периода, снова полностью возвращается в цепь в другую часть периода. Реактивные сопротивления бывают двух видов — индуктивные и емкостные и обозначаются соответственно x_L , x_C .

Для того чтобы разобраться в правилах построения векторных диаграмм, представим, что имеем идеальный безынерционный амперметр постоянного тока с нулем посередине шкалы и такой же идеальный вольтметр. Конструкция этих приборов такова, что их стрелки отклоняются вправо, когда ток внутри амперметра проходит от полярного зажима к неполярному, а направление действия напряжения на вольтметр — от полярного зажима к неполярному.

Когда мы к амперметру подведем переменный ток, стрелка его будет двигаться то вправо, то влево от нуля с частотой, равной частоте переменного тока. То же самое будет происходить и со стрелкой вольтметра, когда мы подведем к его обмотке переменное напряжение.

Векторные диаграммы цепей, содержащих сопротивления R , x_L и x_C . Рассмотрим изображенную цепь на

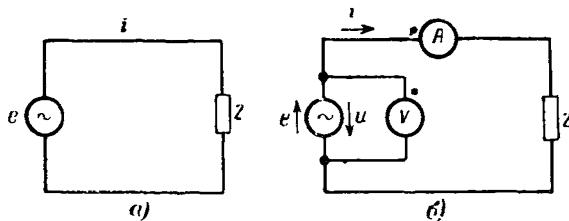


Рис. 5. К построению векторных диаграмм.
а — исходная схема; б — схема с принятыми положительными направлениями и включенными идеальными приборами.

рис. 5,а, которая состоит из источника переменного тока э. д. с. e и сопротивления Z . По цепи проходит переменный ток i . Для упрощения примем, что внутреннее сопротивление источника равно нулю. Тогда напряжение и на зажимах источника равно по величине э. д. с. e .

Прежде чем приступить к изображению напряжений и токов в цепи, изображенной на рис. 5,а, зададимся для них положительным направлением, обозначив эти направления стрелкой. Включим в рассматриваемую цепь наши идеальные приборы: амперметр и вольтметр, как показано на рис. 5,б.

Если сопротивление цепи чисто активное R , то сравнивая отклонение стрелок идеального амперметра и вольтметра, увидим, что стрелки обоих приборов одновременно достигают нулевого показания, затем начинают отклоняться вправо и одновременно достигают максимального отклонения, затем стрелки приближаются одновременно к нулю и начинают вместе отклоняться влево. Достигнув одновременно максимального отрицательного отклонения, стрелки снова вместе подходят к нулевому значению. Затем отклонения стрелок повторяются. Если графически представить то, что показали приборы, получится изображение, подобное приведенному на рис. 6,а. Значение э. д. с. при этом определяется косвенно, по напряжению на источнике. Так как направление действия на положительный заряд э. д. с. и напряжение на источнике взаимно противоположны, при принятых противоположных положительных направлениях для э. д. с. и напряжения обе величины достигают своего положительного максимума одновременно.

Поскольку все величины одновременно достигают своих положительных максимумов, то, следовательно, их векторное изображение соответствует рис. 6,б, т. е. все векторы изображают совпадающими.

Положительные направления для тока, э. д. с. и напряжения, приведенные на рис. 5,б, хотя и общеприняты, но необязательны.

Рассмотрим ту же самую цепь, приняв за положительное направление тока направление, встречное с положительным направлением для э. д. с. (рис. 7). На этом рисунке показаны те же приборы — вольтметр и амперметр, причем полярность включения обмотки последнего согласована с принятым положительным на-

правлением для тока. Полярный зажим обмотки амперметра включен так, чтобы стрелка, обозначающая положительное направление, входила в полярный зажим.

В этом случае мы увидим, что когда стрелка вольтметра, замеряющего мгновенные значения напряжения,

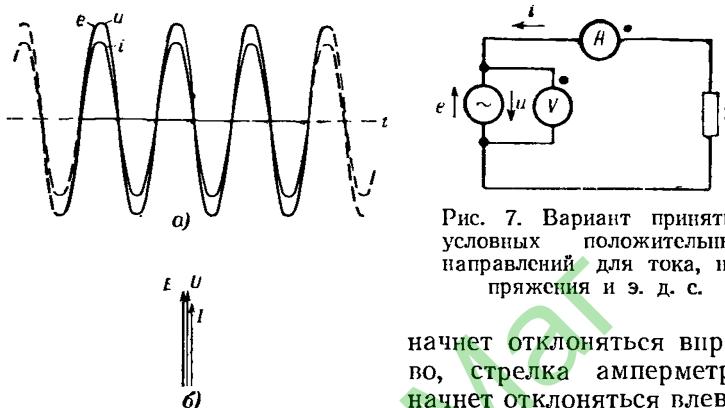


Рис. 6. Изображение тока, напряжения и э. д. с., когда сопротивление цепи чисто активное при условных положительных направлениях, указанных на рис. 5.
а — графическое; б — векторное.

максимальным отклонением вправо стрелки вольтметра и максимальным отклонением также вправо стрелки амперметра, то он оказался бы равным $T/2$.

Если графически представить, что показали наши идеальные приборы, то в прямоугольной системе координат это изобразилось бы кривыми, как показано на рис. 8, а, а в векторном изображении — на рис. 8, б.

Сравним кривые и векторные диаграммы, приведенные на рис. 6 и 8, которые изображают процесс в одной и той же электрической цепи.

Изображения кривых на рис. 6, а и б показывают, что, когда напряжение и э. д. с. достигают максимума в принятом для них положительном направлении, ток одновременно достигает максимума в принятом для него положительном направлении.

Изображения на рис. 8, а и б показывают, что, когда напряжение и э. д. с. достигают максимума в принятом

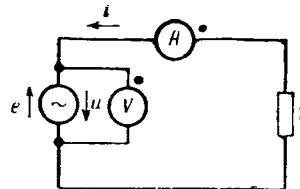


Рис. 7. Вариант принятия условных положительных направлений для тока, напряжения и э. д. с.

начнет отклоняться вправо, стрелка амперметра начнет отклоняться влево, и, наоборот, когда стрелка вольтметра начнет отклоняться влево, стрелка амперметра будет отклоняться вправо.

Если бы мы замерили интервал времени между

$$T/2$$

для них положительном направлении, ток достигает максимума в отрицательном направлении или, что то же самое, принятый положительный максимум тока наступает через время, равное $T/2$, или, в угловом масштабе, через 180° после наступления положительного максимума напряжения.

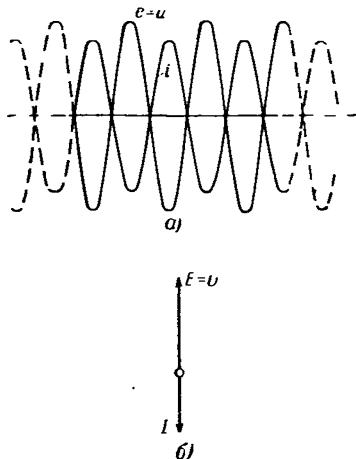


Рис. 8. Изображение тока, напряжения и э. д. с., когда сопротивление цепи чисто активное при условных положительных направлениях, указанных на рис. 7.
а — графическое; б — векторное.

На основании рассмотренного можно сделать вывод, что при принятых положительных направлениях векторная диаграмма (векторное изображение) переменных токов и напряжений однозначно изображает процессы, происходящие в электрической цепи и что для одной и той же цепи разным принятым положительным направлениям соответствует своя векторная диаграмма.

Рассмотрим векторную диаграмму тока, э. д. с. и напряжений для схемы, приведенной на рис. 5, а, когда сопротивление цепи чисто индуктивное x_L .

Если принять положительные направления для тока и напряжения, указанные на рис. 5, б, то получим изображение соответствующих величин в прямоугольной системе координат, как показано на рис. 9, а, и векторное изображение — на рис. 9, б. Эти изображения показывают (и это подтверждается нашими идеальными приборами), что положительный максимум тока наступает через время $T/4$ (или 90°) после того, как э. д. с. и напряжение достигнут своего положительного максимума.

Если бы приняли положительные направления для тока и напряжений согласно рис. 7, то кривые и векторные диаграммы рассматриваемого процесса имели бы вид кривых, показанных на рис. 9, в и г.

Эти изображения показывают (и это подтверждается показаниями наших идеальных приборов), что при принятых положительных направлениях после на-

ступления положительного максимума э. д. с. и напряжения положительный максимум тока наступает через $3/4 T$ (или 270°) или, иначе говоря, положительный максимум тока опережает положительный максимум напряжения и э. д. с. на время $1/4 T$ (или 90°).

Таким образом, утверждение, что ток, проходящий через индуктивное сопротивление, отстает на 90° от при-

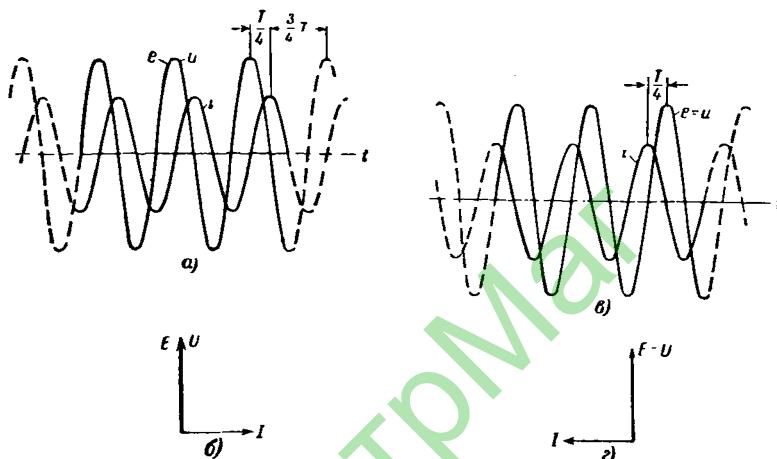


Рис. 9. Изображение тока, напряжения и э. д. с., когда сопротивление цепи чисто индуктивное.

а — графическое, при условных положительных направлениях, указанных на рис. 5,б; *б* — то же векторное; *в* — графическое, при условных положительных направлениях, указанных на рис. 7; *г* — то же векторное.

ложенного напряжения, справедливо только при условии, что положительные направления для напряжения и тока приняты совпадающими.

Рассмотрим векторную диаграмму тока, э. д. с. и напряжения в схеме, приведенной на рис. 5,а, когда сопротивление цепи чисто емкостное x_c .

Если примем общепринятые положительные направления для тока, э. д. с. и напряжения, указанные на рис. 5,б, то получим изображение соответствующих величин в прямоугольной системе координат, показанное на рис. 10,*а* и векторное изображение — на рис. 10,*б*.

Эти изображения показывают (и наши идентичные приборы это подтверждают), что положительный максимум тока наступает на время равное $1/4 T$ ранее наступи-

лении положительных максимумов э. д. с. и напряжения.

Если, так же как и в рассмотренных выше случаях, взять положительные направления по рис. 7, то соответствующие изображения тока, э. д. с. и напряжения в цепи рис. 5, а примут вид, как показано на рис. 10, в и г.

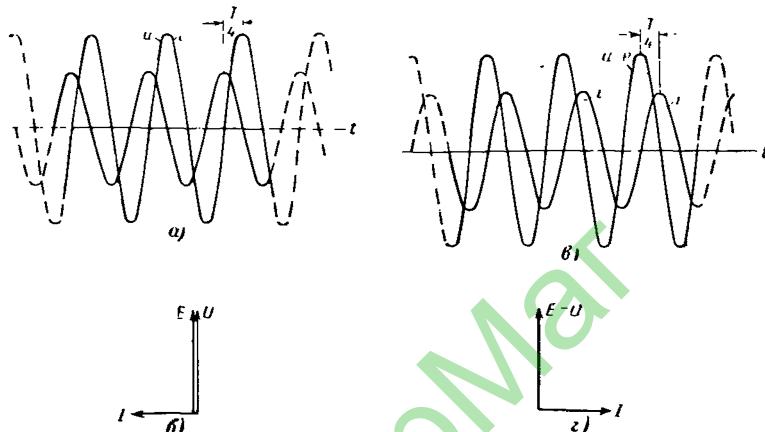


Рис. 10. Изображение тока, напряжения и э. д. с., когда сопротивление цепи чисто емкостное.

а — графическое, при условных положительных направлениях, указанных на рис. 5, б; *б* — то же, векторное; *в* — графическое, при условных положительных направлениях, указанных на рис. 7; *г* — то же, векторное.

Для того чтобы уменьшить разнообразие в изображении одного и того же процесса, обычно пользуются общепринятыми положительными направлениями. В дальнейшем мы будем использовать эти общепринятые направления, а именно:

а) положительное направление для тока принимается, как правило, совпадающим с положительным направлением для э. д. с.;

б) положительное направление для э. д. с. и для напряжения на источнике электрической энергии принимаются взаимно противоположными;

в) положительное направление для напряжения на сопротивлениях принимается совпадающим с положительным направлением для тока.

Следует иметь в виду, что на практике не всегда удается придерживаться рекомендаций, указанных выше, особенно в сложных цепях.

Рассмотрим векторную диаграмму тока, э. д. с. и напряжений для схемы, приведенной на рис. 11, а, когда в цепи последовательно включены два сопротивления R и x_L . Примем для изображаемых величин положительные направления, показанные на рис. 11, б. Примем за ось отсчета вектор тока I (рис. 11, в). Из предыдущего знаем, что если положительное направление для напряжения на активном сопротивлении принять совпадающим

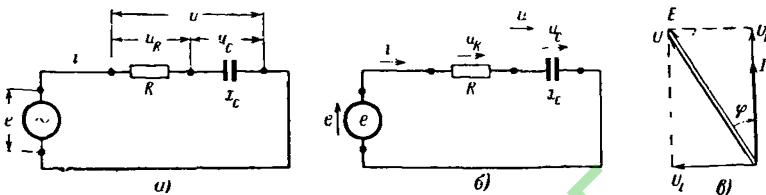


Рис. 11. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений.
а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма.

дающим с положительным направлением для тока, то вектор напряжения изобразится совпадающим по направлению с вектором тока. Поэтому на рис. 11, в построим вектор U_R совпадающим с вектором I .

Из предыдущих примеров мы также знаем, что если положительное направление для напряжения на индуктивном сопротивлении принять совпадающим с положительным направлением для тока, то вектор, изображающий напряжение, будет опережать вектор тока на 90° . Поэтому вектор U_L на рис. 11, в опережает вектор тока I на 90° . Поскольку положительные направления обоих напряжений взяты совпадающими с положительным направлением общего напряжения, то общее напряжение будет равно сумме указанных двух напряжений. Вектор U на рис. 11, в является суммой двух векторов U_R и U_L .

Из предыдущих примеров также известно, что при положительных направлениях для э. д. с. и напряжения, показанных на рис. 11, б, векторы э. д. с. и напряжения изображаются совпадающими по направлению (рис. 11, в).

По векторной диаграмме на рис. 11, в можно видеть, что ток отстает от напряжения на угол φ . Чем больше отношение R/X_L , тем меньше угол φ , и, чем меньше это отношение, тем ближе угол к 90° .

Рассмотрим векторную диаграмму тока, э. д. с. и напряжения для схемы, представленной на рис. 12,а, когда в цепи последовательно включены два сопротивления R и X_L . Примем для изображаемых величин положительные направления, указанные на рис. 12,б. Примем за ось отсчета вектор тока I (рис. 12,в). Вектор напряжения на активном сопротивлении U_R изобразится сов-

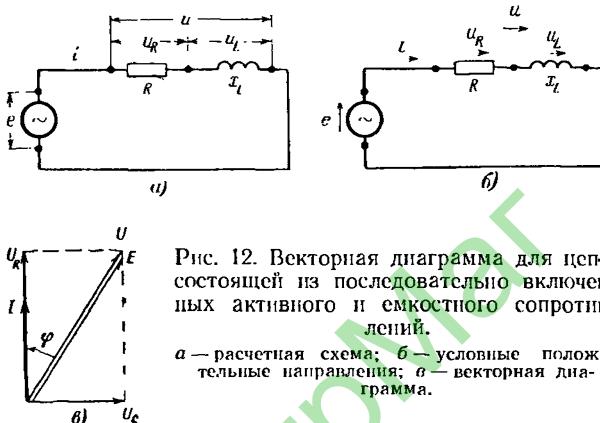


Рис. 12. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и емкостного сопротивлений.

а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма.

падающим по направлению с вектором тока, а вектор напряжения на емкостном сопротивлении U_C — отстающим от вектора тока на 90° . Для получения суммарного вектора U произведем сложение векторов U_R и U_C . Вектор э. д. с. E совпадает с вектором суммарного напряжения U .

Как видно из векторной диаграммы, ток опережает напряжение на угол φ . При этом чем больше отношение R/x_C , тем меньше этот угол φ , и, чем меньше это отношение, тем ближе угол к значению 90° .

Рассмотрим векторную диаграмму тока и напряжения для схемы, представленной на рис. 13,а, когда суммарное сопротивление цепи z равно сумме трех последовательно включенных сопротивлений R , x_L и x_C . Примем для изображаемых величин положительные направления, показанные на рис. 13,б. Примем за ось отсчета вектор тока I (рис. 13,в).

На векторной диаграмме изображены векторы напряжения U_R , совпадающего с вектором тока I , iU_L , опережающего его на 90° , и U_C , отстающего на 90° . Как видно из рис. 13,б, напряжение на всем сопротивлении z будет

равно сумме напряжений на сопротивлениях R , x_L и x_C . Для получения суммарного вектора U произведем сложение трех векторов U_R , U_L и U_C . Для этого сначала сложим два каких-либо вектора, например U_R и U_C , и полученный вектор сложим с третьим.

Вектор э. д. с. E совпадает с вектором напряжения U . Угол φ зависит от соотношения всех трех сопротив-

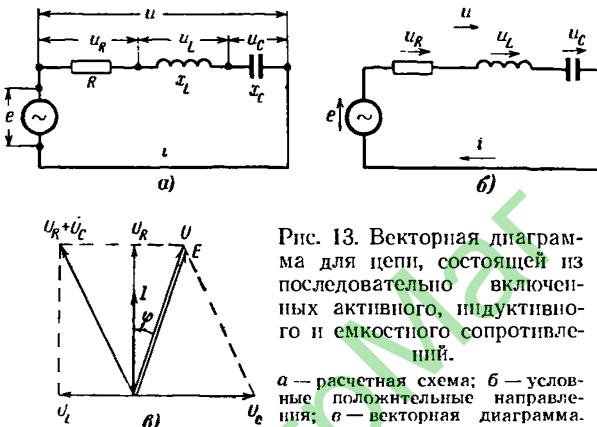


Рис. 13. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

a — расчетная схема; *б* — условные положительные направления; *в* — векторная диаграмма.

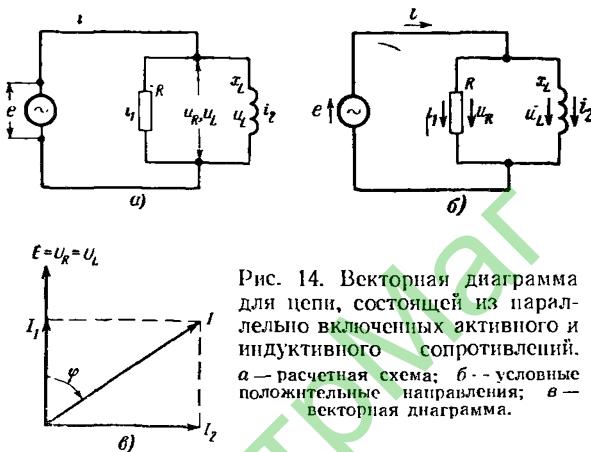
лений R , x_L и x_C . Однако можно сказать, что если индуктивное сопротивление превышает емкостное $x_L > x_C$, то ток отстает от напряжения. Соответственно при $x_C > x_L$ ток опережает напряжение, а при $x_L = x_C$ ток совпадает с напряжением ($\varphi = 0$). Последний случай имеет название резонанса напряжений, или последовательного резонанса.

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений для схемы, представленной на рис. 14, *a*, когда суммарное сопротивление цепи Z состоит из двух параллельно включенных сопротивлений R и x_L . Примем для изображаемых величин положительные направления, указанные на рис. 14, *б*. Примем за ось отсчета на рис. 14, *в* вектор напряжения U_R и равный ему вектор U_L . При принятых положительных направлениях векторы тока и напряжения на активном сопротивлении изображаются совпадающими, а на индуктивном сопротивлении вектор тока отстает от вектора напряжения на 90° . В соответствии с этим на рис. 14, *в* изображены векторы токов I_1 и I_2 . Вектор тока I находится как векторная сумма двух векторов I_1 и I_2 .

Вектор E совпадает с векторами напряжения на активном и реактивном сопротивлениях.

Угол φ определяется из соотношения сопротивлений R и x_L и может находиться в пределах от 0 до 90° .

Построим векторную диаграмму токов и напряжений для схемы, представленной на рис. 15,а, когда суммарное сопротивление рассматриваемой цепи состоит из двух



параллельно включенных сопротивлений R и x_L . Примем для изображаемых величин положительные направления, приведенные на рис. 15,б, а за ось отсчета на рис. 15,в вектор напряжения U_R и равный ему вектор U_C . Вектор э. д. с. E совпадает с векторами напряжений U_R и U_C .

Аналогично предыдущему примеру ток, проходящий по активному сопротивлению, изобразится вектором I_1 , совпадающим по направлению с вектором напряжения U_R , а ток, проходящий по емкостному сопротивлению, — вектором I_2 , опережающим вектор падения напряжения U_C на угол 90° . Вектор тока I , проходящего в общей цепи, равен сумме векторов токов I_1 и I_2 .

Угол φ между векторами суммарного тока I и э. д. с. E определяется соотношением сопротивлений R и x_C и может быть в пределах $0 \div -90^\circ$.

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений на схеме, представленной на рис. 16,а, когда суммарное сопротивление цепи z представляет собой последовательное соединение активного сопротивления R и

двух параллельных сопротивлений x_L и x_C . Примем для изображаемых величин положительные направления, указанные на рис. 16,б. Примем за ось отсчета на рис. 16,в вектор напряжения U_L и равный ему вектор

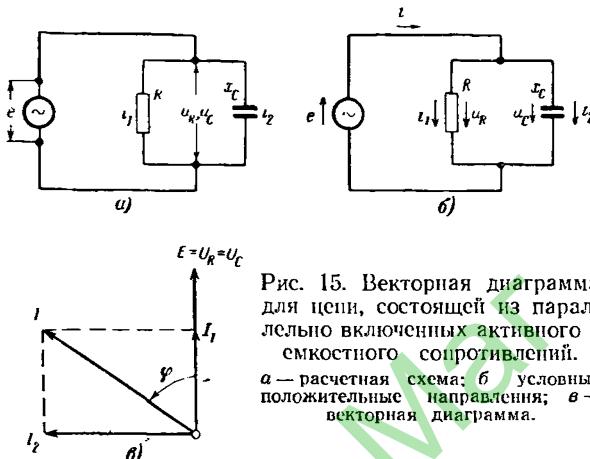


Рис. 15. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из параллельно включенных активного и емкостного сопротивлений.
а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма.

напряжения U_C . Вектор тока I_1 отстает, а вектор I_2 опережает вектор $U_L = U_C$.

Вектор тока I равен сумме векторов I_1 и I_2 . Положительное направление напряжения u_R и результирующего тока i принято на схеме рис. 16,б совпадающим, и по-

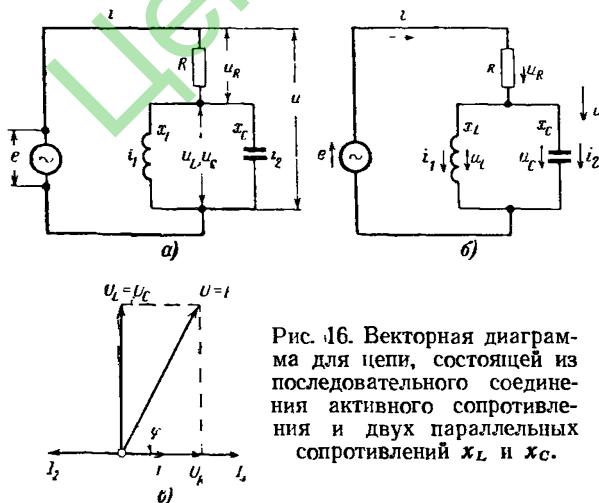


Рис. 16. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательного соединения активного сопротивления и двух параллельных сопротивлений x_L и x_C .

этому их векторы на рис. 16,*в* также совпадают по направлению.

Общее падение напряжения u является суммой напряжений u_R и $u_L = u_C$. Произведя сложение векторов этих напряжений, получим вектор напряжения на всем сопротивлении z и соответственно равный ему вектор E , изображающий э. д. с.

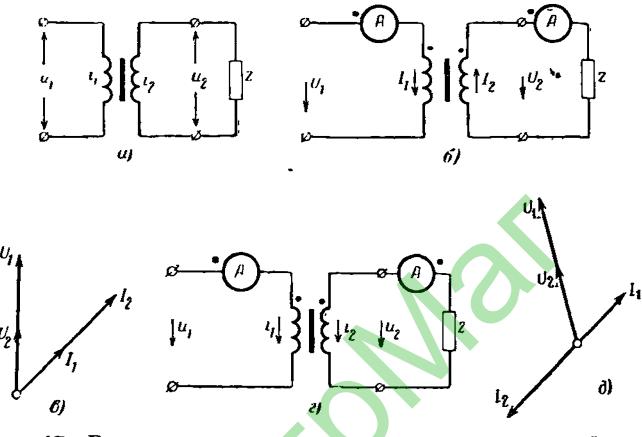


Рис. 17. Векторная диаграмма токов и напряжений для идеального трансформатора.

a — схема трансформатора; *б* и *г* — варианты условных положительных направлений для токов и напряжений; *в* — вторичная диаграмма при условных положительных направлениях согласно *б*; *д* — вторичная диаграмма при условных положительных направлениях согласно *г*.

Угол φ (см. рис. 16,*в*) зависит от всех сопротивлений R , x_L и x_C . Однако можно сказать, что когда $x_L > x_C$, ток опережает напряжение, когда $x_C > x_L$, ток отстает от напряжения. При $x_L = x_C$ ток в общей цепи равен нулю. Этот случай имеет название резонанса токов или параллельного резонанса.

Векторная диаграмма идеального однофазного двухобмоточного трансформатора. Трансформатор является устройством, вторичная и первичная обмотки которого связаны общим магнитопроводом и, следовательно, связаны общим электромагнитным процессом.

Для многих практических задач током намагничивания трансформатора и потерями в меди можно пренебречь. В этом случае можно считать, что во вторичной и первичной обмотках трансформатора напряжения и токи одновременно достигают максимального значения.

Для того чтобы охарактеризовать направление напряжения и тока во вторичной обмотке относительно напряжения и тока первичной обмотки, обозначаются так называемые полярные зажимы обмоток трансформатора. Выводы называются полярными и обозначаются точкой ● (раньше звездочки *), если стрелки идеальных, безынерционных амперметров, включенных, как показано на рис. 17,б, будут одновременно отклоняться вправо до максимального значения.

При положительных направлениях для токов и напряжений, показанных на рис. 17,б, векторная диаграмма трансформатора будет иметь вид диаграммы, представленной на рис. 17,в. Характерной особенностью этой диаграммы является то, что первичные токи и напряжения совпадают соответственно по направлению со вторичными током и напряжением.

Если же принять положительное направление для вторичного тока, как показано на рис. 17,г, то векторная диаграмма будет иметь вид, приведенный на рис. 17,д.

5. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, ИЗОБРАЖАЮЩИЕ ТОКИ, Э. Д. С. И НАПРЯЖЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Общепринятые положительные направления э. д. с., напряжений и токов в трехфазных цепях. Трехфазные цепи переменного тока состоят из трех одинаковых элементов на каждом участке цепи. Эти элементы обозначаются тремя буквами *A*, *B*, *C* и называются фазами. Здесь понятие «фаза» конструктивное, указывающее на часть электрической цепи. Применяются и другие обозначения фаз *Ж*, *К*, *З* (желтая, красная, зеленая), *Ж*, *З*, *К* и т. п. Эти обозначения относятся к элементам генератора, трансформатора, линии, двигателей и вторичных цепей.

В дальнейшем для удобства изображения токи и напряжения на схемах и векторных диаграммах будут обозначаться одинаково прописными латинскими буквами, с учетом, что положительные направления на схемах указаны не для эффективных, а для мгновенных значений.

Положительное направление для э. д. с. каждой фазы генератора, обмотки которого соединены в звезду, принято от нулевого вывода к линейному (рис. 18,а).

Положительное направление для э. д. с. между линейными выводами генератора принимается обычно от

фазы B к фазе A , от фазы C к фазе B и от фазы A к фазе C . Соответственно установлен и порядок подставления индексов E_{AB} , E_{BC} и E_{CA} . Для того чтобы запомнить это правило нужно знать, что первый индекс — это название фазы, к которой обращена стрелка на схеме, указывающая принятое положительное направление для э. д. с. генератора.

Электрический потенциал земли принимается за нулевой потенциал. Каждый элемент цепи имеет свой электрический потенциал, изменяющийся во времени по синусоидальному закону. Таким образом, между каждым элементом трехфазной цепи и землей имеется переменное напряжение.

Напряжения между элементами трехфазной цепи и землей называются фазными напряжениями и обозначаются U_A , U_B и U_C .

За положительное направление для напряжения любого элемента относительно земли принято направление от элемента к земле (рис. 18,а).

Напряжения между элементами трехфазной цепи на одном и том же участке называются междуфазными напряжениями и обозначаются U_{AB} или U_{BA} , U_{BC} или U_{CB} , U_{CA} или U_{AC} . Порядок следования фаз в индексах соответствует принятому положительному направлению между элементами цепи. Например, если положительное направление принимается от элемента фазы C к элементу фазы B , то принято обозначать это напряжение U_{CB} . При выборе положительного направления для напряжения между фазами B и C от фазы B к фазе C принято обозначать это напряжение U_{BC} . Для того чтобы запомнить это правило нужно знать, что второй индекс — это название фазы, к которой обращена стрелка на схеме, указывающая принятое положительное направление для напряжения.

Общепринятым положительным направлением считается для тока любой фазы:

генераторов — от нуля генератора к его выводам;
силовых и измерительных трансформаторов с питающей стороны — от вспинной цепи в выводы, для нагрузочной стороны — от выводов к нагрузке;
по линии — от шин в линию.

Таким образом, положительные направления на одном конце линии встречны с положительным направлением тока на другом конце линии.

Векторная диаграмма э. д. с. и напряжений генератора.
Конструкция трехфазных генераторов такова, что э. д. с на его трех выводах в векторном изображении представляется тремя векторами, равными по величине, но сдвинутыми один относительно другого на 120° .

Один из трех выводов имеет название фазы *A*. Вывод, положительный максимум э. д. с. которого наступает через время, равное $T/3$ (что соответствует 120°)

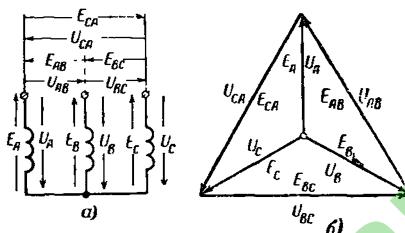


Рис. 18. Напряжение и э. д. с. на выводах трехфазного генератора.
а — условные положительные направления;
б — векторная диаграмма.

в угловом масштабе) после положительного максимума э. д. с. фазы *A*, получил название фазы *B*.

Вывод, положительный максимум э. д. с. которого наступает через время $T/3$ (или 120°) после положительного максимума э. д. с. фазы *B*, получил название фазы *C*.

Векторная диаграмма этих трех э. д. с. приведена на рис. 18,б.

При работе генератора на холостом ходу напряжение на его выводах будет одновременно с э. д. с. достигать максимального значения. При положительных направлениях, принятых для э. д. с. и напряжений (рис. 18,а), векторы напряжения и э. д. с. одноименных фаз совпадают.

Векторная диаграмма напряжений на выводах трансформатора. На питающую сторону трансформатора подается напряжение от генераторов и, следовательно, векторная диаграмма напряжений на питающей стороне представляет собой три вектора одинаковой величины, сдвинутых один относительно другого на 120° .

Векторная диаграмма напряжений на стороне нагрузки трансформатора, построенная на общей векторной диаграмме с векторами напряжений питающей стороны,

зависит от схемы соединений обмоток трансформатора, принятых положительных направлений для напряжений и принятых обозначений фаз.

Для определения взаимного расположения векторов одноименных напряжений стороны высшего и низшего напряжения трансформатора введено понятие о группах соединения. Номер группы соединений обмоток рассма-

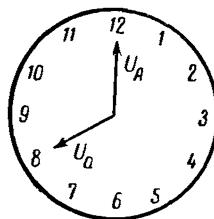


Рис. 19. Определение группы соединения обмоток трансформатора.

тавляемого трансформатора зависит от взаимного положения двух векторов одноименных напряжений при общепринятых положительных направлениях для этих напряжений. Это могут быть как междуфазные, так и фазные напряжения. При этом вектор напряжения стороны высшего напряжения мысленно располагается на циферблате часов так, чтобы вектор указывал цифру 12 (рис. 19). Положение вектора одноименного напряжения со стороны низшего напряжения трансформатора укажет на цифру часов, означающую номер группы соединения. Например, на рис. 19 показано расположение векторов напряжений фазы A для восьмой группы соединений обмоток трансформатора.

На рис. 20—23 приведены схемы соединений обмоток трансформатора, соответствующие разным группам соединений.

На рис. 20, a приведена схема соединений первичных и вторичных обмоток трансформаторов, их полярность и стрелками указаны общепринятые положительные направления для напряжений.

Подводимые к трансформатору первичные напряжения можно изобразить в виде трех векторов U_A , U_B и U_C . С учетом полярности и принятых положительных направлений на вторичной стороне получаются три напряжения, которые можно изобразить тремя векторами U_1 , U_2 и U_3 . Если вывод вторичной обмотки трансформатора, фазное напряжение которого изображается вектором U_1 , принять за фазу A , то векторы первичных и вторичных напряжений трансформатора одноименных фаз совпадут, что соответствует двенадцатой группе соединений (рис. 20, b). Если при той же схеме соединений обмоток принять за фазу A вывод, напряжение которого

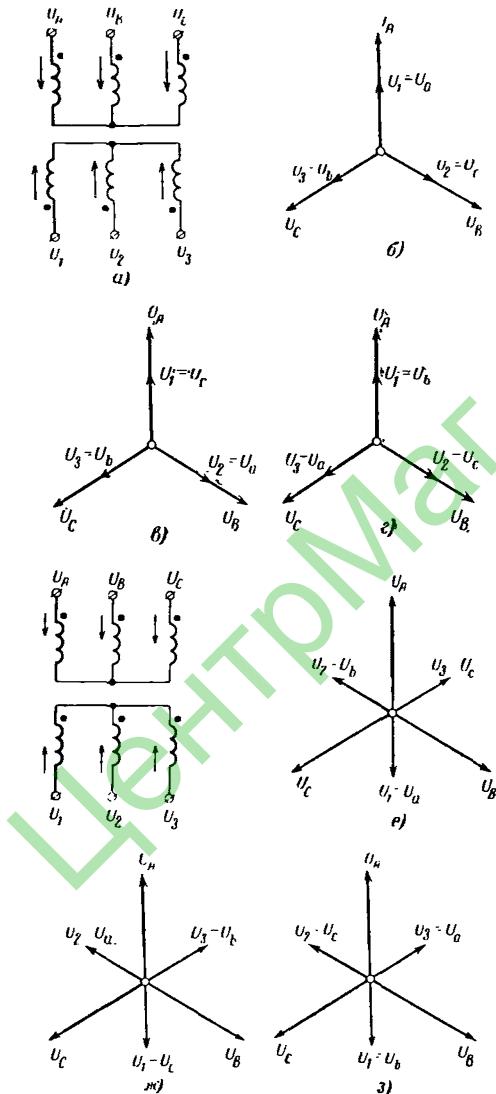


Рис. 20. Группы соединения обмоток трансформаторов, соединенных по схеме Y/Y .

a — схема соединения, когда звезда на обеих сторонах собрана на однополярных зажимах; *б* — векторная диаграмма при схеме соединения по *а* для двенадцатой группы соединения; *в* — то же четвертой; *г* — то же восьмой; *д* — схема соединения, когда звезда на обеих сторонах собрана на зажимах, имеющих разную полярность; *е* — векторная диаграмма при схеме соединения по *д* для шестой группы соединения; *ж* — то же десятой; *з* — то же второй.

изображается вектором U_2 , получим четвертую группу соединений (рис. 20,в). Восьмая группа соединений может быть получена, если за фазу A принять вывод, напряжение которого изображается вектором U_3 (рис. 20,г).

Схема соединения обмоток вторичной стороны трансформатора на рис. 20,д отличается от схемы на рис. 20,а тем, что звезда вторичной стороны собрана на выводах обмоток, обозначенных точками.

Аналогично рассмотренному выше, при разных обозначениях фаз вторичной стороны трансформатора, показанной на рис. 20,д, возможны три группы соединения: шестая, десятая и вторая. Соответствующие векторные диаграммы приведены на рис. 20,е—з.

На рис. 21,а изображена третья возможная схема соединений первичных и вторичных обмоток трансформатора и их полярность.

Подведенные к трансформатору первичные напряжения так же, как и раньше, изображены в виде трех векторов U_A , U_B и U_C . Вторичные обмотки соединены в треугольник, так что потенциалы конца одной обмотки и начала другой обмотки равны. Потенциалы выводов U_1 , U_2 , U_3 можно найти, если построить треугольник из векторов U'_A , U'_B и U'_C напряжений во вторичных обмотках трансформаторов. При этом вектор U'_A совпадает по направлению с вектором U_A , так как первичная и вторичная обмотки этой фазы трансформатора находятся на одном магнитопроводе, а положительное направление напряжений U_A и U'_A принято таким (по полярности), что они одновременно достигают своего положительного максимума. Совпадают и векторы U'_B с U_B и U'_C с U_C . При этом должны соблюдаться следующие условия:

$$U'_A = U_1 - U_3; \quad U'_B = U_2 - U_1; \quad U'_C = U_3 - U_2.$$

Векторы фазных напряжений U_1 , U_2 и U_3 находятся, как векторы, направленные из общей нулевой точки векторной диаграммы к соответствующим вершинам треугольника.

Если вывод вторичной обмотки, фазное напряжение которого изображается вектором U_1 , принять за фазу A , то векторная диаграмма фазных напряжений на первичных и вторичных выводах трансформатора будет иметь.

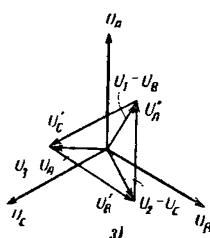
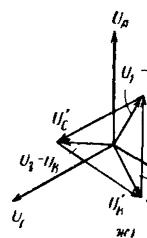
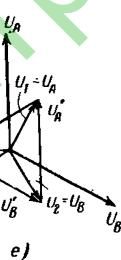
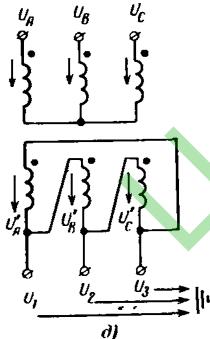
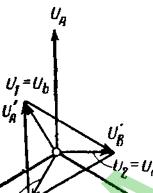
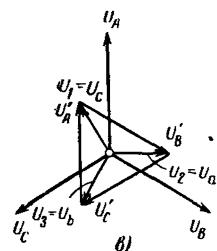
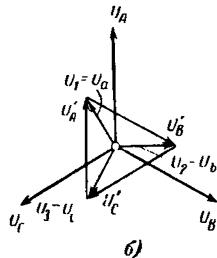
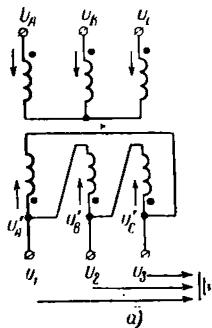


Рис. 21. Группы соединения обмоток трансформаторов по схеме Y/Δ.

a — схема соединения обмоток; *b* — векторная диаграмма при схеме соединения обмоток по *a* для одиннадцатой группы соединения; *c* — то же третьей; *d* — то же седьмой; *e* — схема соединения обмоток по *d* для первой группы соединения; *f* — то же пятой; *g* — то же девятой.

вид, показанный на рис. 21,б, что соответствует однинадцатой группе соединений.

Приняв за фазу A вывод, фазное напряжение которого изображается вектором U_2 , получим векторную диаграмму напряжений, соответствующую третьей группе соединений (рис. 21,в). Векторная диаграмма напряжений, соответствующая седьмой группе соединений, показана на рис. 21,г. Эта группа соединений будет иметь место, если за фазу A принять вывод, соответствующий фазному напряжению U_3 .

На рис. 21,д изображена четвертая возможная схема соединений первичных и вторичных обмоток трансформатора.

К трансформатору подведены первичные напряжения U_A , U_B и U_C . Вторичные обмотки соединены в треугольник, так что потенциалы конца одной обмотки и начала другой обмотки равны. Потенциалы выводов U_1 , U_2 и U_3 найдем так же, как в предыдущих случаях, если построим треугольник из векторов U'_A , U'_B и U'_C , соблюдая положительные направления по схеме и выдерживая следующие соотношения:

$$U'_A = U_3 - U_1; \quad U'_C = U_2 - U_3; \quad U'_B = U_1 - U_2.$$

Получив векторы фазных напряжений U_1 , U_2 и U_3 из построенного треугольника, можно определить группы соединений, если задано, какая из фаз принята за фазу A , или наоборот, если задана группа соединений, определить, какая из фаз должна быть принята за фазу A , B и C .

Векторные диаграммы, соответствующие первой, пятой и девятой группам соединений, приведены на рис. 21,е—з.

Векторные диаграммы нагрузочных режимов. При вычислении токов и напряжений элементы энергосистемы заменяют в расчетных схемах активными и реактивными сопротивлениями. Генераторы, трансформаторы и реакторы обычно заменяют индуктивными сопротивлениями, а линии — индуктивно-активными сопротивлениями. Большинство нагрузок электроприемников также заменяется индуктивно-активными сопротивлениями.

На рис. 22,а представлена в условных изображениях электрическая трехфазная система, которая состоит из генератора, линии и электроприемников. Поскольку ре-

жим симметричный, схема замещения для расчета может быть изображена для одной фазы по рис. 22,б.

На этой схеме генератор замещен э. д. с. и индуктивным сопротивлением x_g , линия — индуктивным сопротивлением x_L и активным сопротивлением R_L , а нагрузка — индуктивным сопротивлением x_H и активным сопротив-

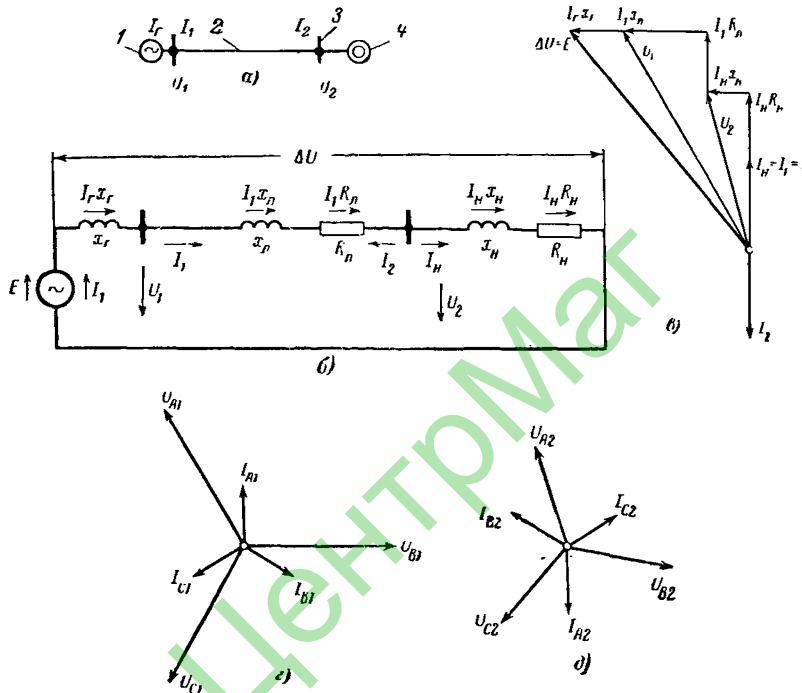


Рис. 22. Векторные диаграммы при нагрузочном режиме.

а — схема рассматриваемой сети; **б** — расчетная схема замещения; **в** — векторная диаграмма одной фазы для рассматриваемого нагрузочного режима; **г** — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; **д** — то же приемной подстанции; **1** — генератор; **2** — линия; **3** — подстанция; **4** — нагрузки.

лением R_H . На рис. 22,б указаны токи и напряжения, которые нужно изобразить на векторной диаграмме, и заданы положительные направления для токов и напряжений всех фаз. Построение векторной диаграммы для нагрузочного режима начинается с построения токов. Из схемы замещения видно, что токи нагрузки I_H по линии от станции I_L и генератора I_g равны по величине. Поэтому эти токи изображаются на векторной диа-

граммме совпадающими. Ток по линии от подстанции I_2 равен указанным выше токам по величине, но его положительное направление принято встречным. В тот момент, когда ток I_1 достигает положительного максимума, ток I_2 достигает своего отрицательного максимума. Поэтому вектор тока I_2 изображается сдвинутым на 180° относительно вектора тока I_1 .

Поскольку положительные направления токов I_r , I_1 и I_2 приняты совпадающими по контуру с положительным направлением э. д. с. E , а положительные направления падений напряжения от токов приняты совпадающими с положительными направлениями этих токов, то векторы падений напряжения на векторной диаграмме изобразятся совпадающими с этими токами на активных сопротивлениях и опережающими эти токи на 90° на индуктивных сопротивлениях.

Приведенная на рис. 22,*в* векторная диаграмма спрavedлива для любой фазы электрической системы, изображенной на рис. 22,*а*. Если построить совмещенную векторную диаграмму для всех трех фаз, то она изобразится тремя векторными диаграммами (рис. 22,*в*), которые сдвинуты одна относительно другой на 120° , так как исходные векторы токов разных фаз сдвинуты на 120° .

На практике обычно бывает нужна не вся векторная диаграмма, приведенная на рис. 22,*в*, а лишь ее часть, например токи по линии и напряжения на шинах подстанции. На рис. 22,*г* и *д* изображены две такие векторные диаграммы соответственно для станции и подстанции.

Как видно из диаграмм, на линиях без отпак основным отличием векторной диаграммы одного конца линии от другого является изображение векторов тока одноименных фаз под углом 180° .

Приведенные на рис. 22,*г* и *д* векторные диаграммы часто встречаются на практике и соответствуют случаю, когда активная и реактивная мощности направлены от станции к приемной подстанции. Однако необходимо иметь в виду, что в сложных сетях и в случаях, когда у потребителя имеются синхронные компенсаторы или двигатели или статические конденсаторы, векторные диаграммы могут иметь другой вид, когда вектор тока относительно вектора одноименного фазного напряжения может быть расположен под любым углом от 0 до 360° .

Векторные диаграммы при коротких замыканиях. Рассмотрим векторные диаграммы токов и напряжений при коротких замыканиях. В наших расчетах токами нагрузки пренебрегаем, что обычно допустимо из-за их относительно малой величины по сравнению с токами коротких замыканий.

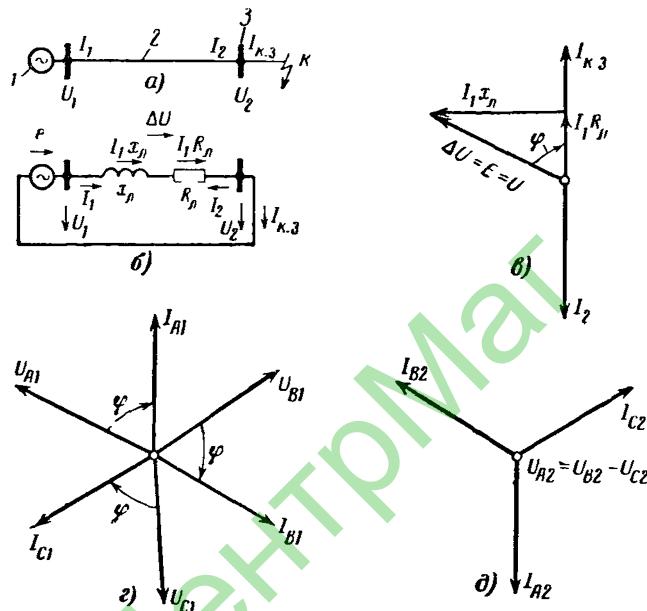


Рис. 23. Векторные диаграммы при трехфазном коротком замыкании.

а — схема сети; б — расчетная схема замещения; в — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д — то же приемной подстанции. 1 — энергосистема; 2 — линия; 3 — подстанция.

На рис. 23,а показана схема, состоящая из трехфазной системы, линии и подстанции, в точке К которой произошло трехфазное короткое замыкание.

Поскольку режим трехфазного короткого замыкания симметричен, т. е. одинаков для всех трех фаз, то для расчета достаточно рассмотреть одну fazу. На рис. 23,б приведена расчетная схема замещения для рассматриваемого случая. Для простоты изложения сопротивление системы принято равным нулю. На этой же схеме указаны принятые положительные направления интересую-

щих нас токов и напряжений. Построение векторной диаграммы для одной фазы начинаем с построения в произвольном направлении вектора тока $I_{k,z}$ и равного ему по величине и направлению вектора тока I_1 . Вектор тока I_2 изображен под углом 180° к вектору тока $I_{k,z}$. Напряжение на шинах подстанции вблизи места короткого замыкания равно нулю, напряжение на шинах системы равно сумме падений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях линии и изображается вектором U_1 и, наконец, напряжение фазной э. д. с. изображается вектором E . Вектор тока I_1 отстает от вектора напряжения на шинах станицы U_1 на угол φ , величина которого зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений линии.

Для воздушных линий угол φ лежит в пределах $60—83^\circ$. На рис. 23,*г, д* изображены векторные диаграммы токов и напряжений трех фаз соответственно для энергосистемы и приемной подстанции.

Поскольку рассмотрен случай трехфазного короткого замыкания вблизи шин подстанции, то напряжение на шинах подстанции равно нулю, что и отображает векторная диаграмма на рис. 23,*д*.

На рис. 24,*а* изображена такая же электрическая система, как на рис. 23,*а*, но в точке K показано двухфазное короткое замыкание. Для расчета на рис. 24,*б* приведена расчетная схема и указаны положительные направления для интересующих нас токов и напряжений. На рис. 24,*в* показана векторная диаграмма, изображающая токи и напряжения в режиме двухфазного короткого замыкания.

Построение векторной диаграммы производится в следующей последовательности. Сначала откладывается в произвольном направлении вектор тока $I_{k,z}$ и совпадающий с ним вектор тока I_{B1} . Вектор тока I_{C1} , равный по величине току I_{B1} , но имеющий с ним встречное положительное направление, изображается вектором, свинутым на 180° относительно вектора тока I_{B1} . Векторы падения напряжений $I_{B1}R_L$ и $I_{C1}R_L$ строятся совпадающими с соответствующими векторами токов.

Откладываются векторы падений напряжений на индуктивных сопротивлениях $I_{B1}x_L$ и $I_{C1}x_L$, опережающие векторы своих токов на 90° .

Таким образом, под действием тока на каждой фазе получается падение напряжений ΔU_{B1} и ΔU_{C1} как сумма

падений напряжений на активном и реактивном сопротивлениях.

Положительное направление для результирующего падения напряжения ΔU_{bc} совпадает с положительным направлением для падения напряжения ΔU_{b1} и встречено с положительным направлением для падения напряжения ΔU_{c1} . Поэтому вектор ΔU_{bc} должен изображаться как разность векторов ΔU_{b1} и ΔU_{c1} . Таким же вектором изобразится и действующая по контуру короткого замыкания э. д. с. E_{bc} , которая имеет положительное направление, совпадающее с положительным направлением э. д. с. фазы B и встречное с положительным направлением э. д. с. фазы C . Исходя из вектора междуфазной э. д. с. E_{bc} , строим звезду векторов фазных э. д. с. E_A , E_B и E_C .

Из векторной диаграммы видно, что угол φ между вектором тока $I_{k,z}$ и вектором междуфазного напряжения U_{bc} определяется соотношением индуктивного и активного сопротивлений линий, как и при трехфазном коротком замыкании.

Фазные напряжения в месте короткого замыкания равны: на фазе A (U_{A2}) значению величины фазной э. д. с., а на фазах B и C (U_{B2} и U_{C2}) половине величины фазной э. д. с. На практике при векторном изображении напряжения и токов при двухфазном коротком замыкании векторы токов и фазных напряжений изображают исходящими из одной точки. В этом случае векторную диаграмму при анализе поведения линейных защит со стороны системы изображают, как показано на рис. 24,г, и со стороны приемной подстанции — как показано на рис. 24,д.

На рис. 25 приведена схема и векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном коротком замыкании в точке K .

Сопротивления элементов электрической системы при однофазном коротком замыкании отличаются по величине от сопротивлений при трехфазном и двухфазном коротком замыкании. В расчетной схеме на рис. 25,б сопротивление линии изображено индуктивным и активным сопротивлениями x_{0l} и R_{0l} . На этой схеме показаны положительные направления для интересующих нас токов и напряжений.

На векторной диаграмме рис. 25,в сначала откладывается вектор тока $I_{k,z}$ и равный ему вектор тока I_1 .

Вектор тока I_2 откладывается под углом 180° относительно вектора тока I_1 , равного по величине, но имеющего встречное положительное направление.

Векторы падений напряжений на активных и индуктивных сопротивлениях линии откладываются по общим правилам.

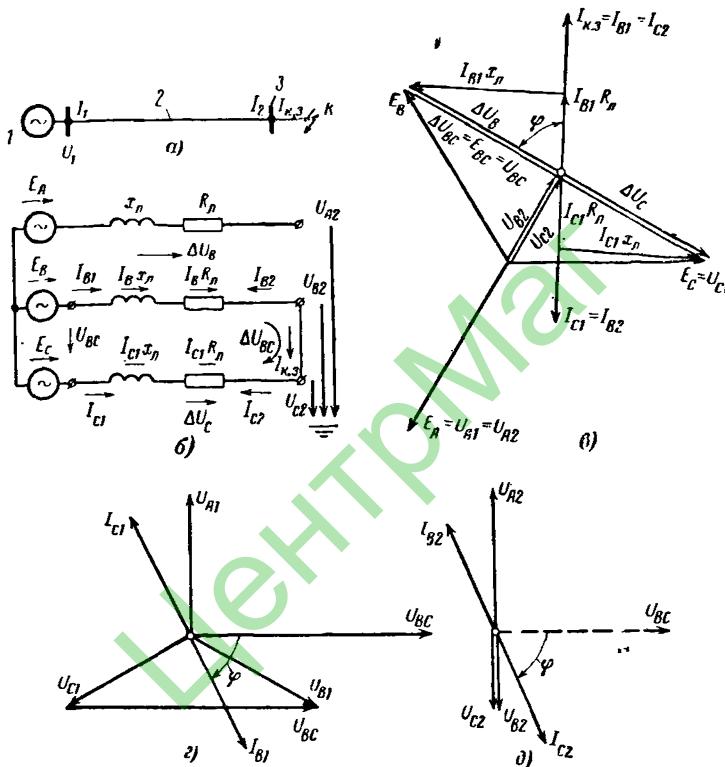


Рис. 24. Векторные диаграммы при двухфазном коротком замыкании.
а — схема сети; б — расчетная схема замещения; в — векторная диаграмма для поврежденных фаз; г — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д — то же приемной подстанции; 1 — энергосистема; 2 — линия; 3 — подстанция.

Вектор результирующего падения напряжения ΔU и равный ему вектор фазной э. д. с. E получаются как векторная сумма падений напряжений на отдельных сопротивлениях. Приведенная на рис. 25,в векторная диаграмма справедлива для короткого замыкания на любой фазе. На рис. 25,г и д приведены векторные диаграммы

для токов и напряжений по концам линии для случая однофазного короткого замыкания на фазе A .

Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник. На рис. 26,а изо-

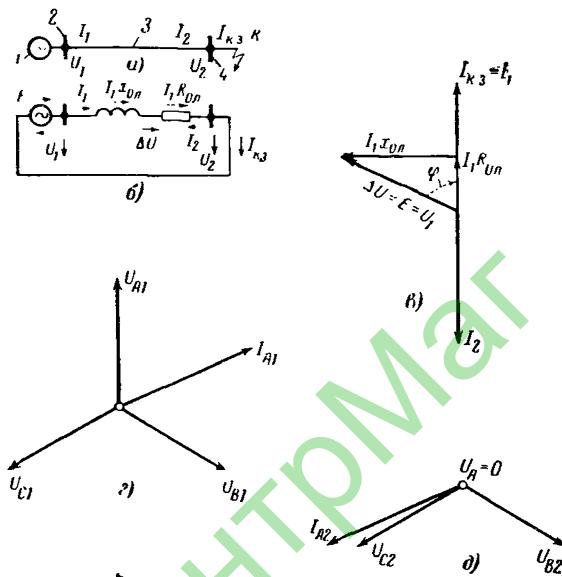


Рис. 25. Векторные диаграммы при однофазном коротком замыкании.

а — схема сети; *б* — расчетная схема замещения; *в* — векторная диаграмма для поврежденной фазы; *г* — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; *д* — то же приемной подстанции; *1* — энергосистема; *2* — подстанция № 1; *3* — линия; *4* — подстанция № 2.

брожен трансформатор, обмотки которого соединены по схеме звезда — треугольник. На этой же схеме указаны принятые положительные направления для напряжений и токов, а также указаны полярности первичных и вторичных обмоток трансформатора. Для упрощения примем, что сопротивление трансформатора равно нулю.

На рис. 26,б изображена векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора при двухфазном коротком замыкании на выводах обмоток, соединенных в треугольник. Часть диаграммы, которая состоит из векторов $I_{A\Delta}$, $I_{B\Delta}$, $I_{C\Delta}$, $U_{A\Delta}$, $U_{B\Delta}$ и $U_{C\Delta}$, ничем не от-

личается от векторной диаграммы ранее рассмотренного случая двухфазного короткого замыкания.

Для построения векторной диаграммы токов в обмотках, соединенных в треугольник и в звезду, рассмотрим, как будет растекаться ток $I_{B\Delta}$ на два тока I'_B и I'_C . Отметим, что ток I'_B равен току I'_A , так как ток $I_{A\Delta}$ равен нулю.

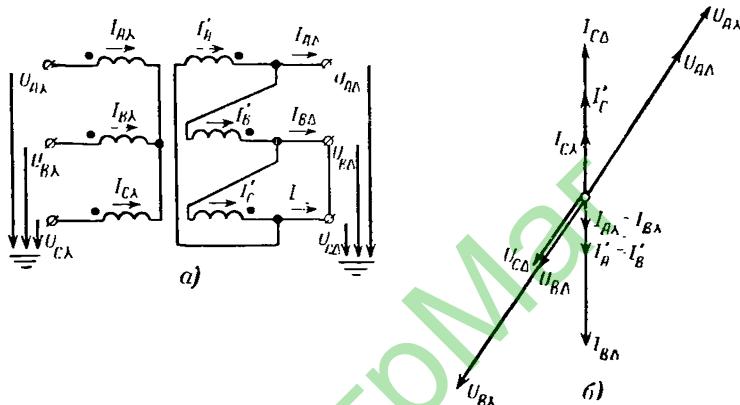


Рис. 26. Двухфазное короткое замыкание за трансформатором, соединенным по схеме Y/Δ .

a — исходная схема; *б* — векторная диаграмма.

Первичные и вторичные токи проходят по обмоткам, связанным общим магнитопроводом, и потому связаны пофазно следующим соотношением:

$$I'_A = \frac{k}{\sqrt{3}} I_A; \quad I'_B = \frac{k}{\sqrt{3}} I_B \text{ и } I'_C = \frac{k}{\sqrt{3}} I_C,$$

где k — коэффициент трансформации трансформатора.

Отсюда следует, что если $I'_B = I'_A$, то и $I_{AY} = I_{BY}$.

При принятых положительных направлениях для токов в обмотках, соединенных в звезду, согласно закона Кирхгофа сумма токов трех фаз равна нулю

$$I_{AY} + I_{BY} + I_{CY} = 0$$

или

$$I_{CY} = -(I_{AY} + I_{BY}).$$

Для рассматриваемого случая, когда $I_{AY} = I_{BY}$, величина тока фазы C со стороны звезды равна:

$$I_{CY} = -2I_{BY}.$$

Таким образом, первичный ток фазы C равен удвоенному значению тока фазы B и в векторном изображении сдвинут относительно вектора тока I_B на 180° .

Следовательно, магнитно-связанный с ним ток I'_C равен удвоенному значению тока I'_B и векторно направлен встречно с вектором тока I'_B . Таким образом, ток $I_{B\Delta}$ разделяется на два тока. Один из них I'_B равен $\frac{1}{3}I_{B\Delta}$, а второй $I'_C = \frac{2}{3}I_{B\Delta}$. Векторное изображение этих токов показывает, что в тот момент, когда ток $I_{B\Delta}$ достигает максимума в направлении, указанном на схеме стрелкой, ток I'_B также достигает максимума в направлении стрелки этого тока. В это же время ток I'_C также достигает своего максимума, но против направления своей стрелки.

Как видно из рис. 26, a , двухфазное короткое замыкание фаз B и C на выводах обмотки, соединенной в треугольник, приводит к тому, что вторичная обмотка трансформатора на фазе C оказывается закороченной.

Ввиду того что сопротивление трансформатора принято равным нулю, напряжение фазы C обмотки, соединенной в звезду, также равно нулю.

Как видно из рис. 26, a , при двухфазном коротком замыкании закороченной оказывается не только фаза C трансформатора, но и последовательно соединенные две вторичные обмотки фаз A и B . Соответственно должна быть равна нулю и сумма напряжений фаз A и B на стороне трансформатора, где обмотки соединены в звезду.

Это может быть только в случае, если вектор напряжения U_{AY} равен, но противоположно направлен вектору фазного напряжения U_{BY} . Величины этих векторов равны:

$$\dot{U}_{AY} = \frac{1}{k} \frac{\dot{U}_{A\Delta} - \dot{U}_{C\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{k} \dot{U}_{A\Delta};$$

$$\dot{U}_{BY} = \frac{1}{k} \frac{\dot{U}_{B\Delta} - \dot{U}_{A\Delta}}{\sqrt{3}} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{k} \dot{U}_{A\Delta}.$$

6. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ВО ВТОРИЧНЫХ ЦЕПЯХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Приборы и устройства релейной защиты подключают к первичным цепям с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения. С помощью векторного изображения токов и напряжений во вторичных цепях можно оценить исправность и правильность соединения

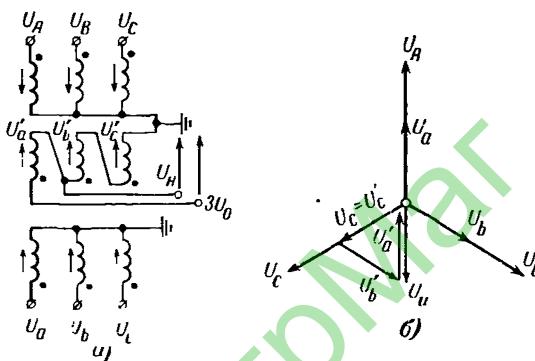


Рис. 27. Векторная диаграмма для трансформатора напряжения.

a — схема соединений обмоток трансформатора напряжения; *б* — векторная диаграмма напряжений.

цепей измерительных трансформаторов тока и напряжения, проанализировать поведение реле защиты в нормальных и аварийных режимах в первичных цепях и ответить на ряд других вопросов эксплуатации.

Векторные диаграммы, изображающие первичные и вторичные напряжения трансформаторов напряжения. Первичные обмотки измерительных трансформаторов напряжения соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой. Вторичные обмотки соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой и в разомкнутый треугольник, как показано на рис. 27,*а*.

На этом же рис. 27,*а* указаны полярности обмоток трансформатора напряжения и принятые положительные направления для изображаемых напряжений. При изображении напряжений трансформатора напряжения сперва строится звезда из трех векторов первичных на-

пряжений, подвёденных к обмотке высшего напряжения трансформатора напряжения U_A , U_B и U_C , как указано на рис. 27,б. Затем изображаются векторы вторичных напряжений. Принимая центр звезды за нулевой потенциал, откладываем вектор вторичного напряжения U'_c , совпадающий по направлению с вектором первичного напряжения фазы U_C , так как первичная и вторичная обмотки находятся на одном магнитопроводе трансформатора, а положительные направления изображаемых напряжений приняты такими, что согласно полярности обмоток оба напряжения одновременно достигают положительного максимума.

Аналогично вектор U'_b изображается совпадающим с вектором U_B , а вектор U'_a — с вектором U_A . Как видно из построения, конец вектора U'_a совпадает с началом вектора U'_c , т. е. напряжение $3U_0$ на выходе вторичных обмоток трансформатора напряжения, соединенных в разомкнутый треугольник, в нормальном режиме равно нулю. Такое соединение вторичных обмоток трансформатора напряжения используется для подключения приборов и реле, фиксирующих замыкания на землю одной из фаз первичной цепи.

Для целей проверок направлений защит от замыканий на землю конец вторичной обмотки фазы B , имеющий потенциал относительно земли, равный сумме вторичных напряжений фаз C и B , выводится на панели защит и называется испытательной жилкой. Вектор, изображающий напряжение испытательной жилки U_u , находится как сумма векторов U'_c и U'_b , если положительные направления приняты, как указано на рис. 27,а.

При указанной на рис. 27,а полярности обмоток и принятых положительных направлениях для напряжений вторичных обмоток, соединенных в звезду, векторы напряжений соответствующих фаз изображаются совпадающими с векторами одноименных фаз первичных напряжений.

Это совпадение в изображении относится не только к нормальнym режимам, но и к режимам повреждений в первичной сети, векторные диаграммы которых приведены в предыдущих разделах.

Векторные диаграммы, изображающие первичные и вторичные токи трансформаторов тока. Мы будем рассматривать идеальные трансформаторы тока, вторичный

ток которых равен первичному току, деленному на коэффициент трансформации.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в первичную цепь. Вторичные обмотки трансформаторов могут соединяться по-разному.

Рассмотрим схему соединения вторичных обмоток трансформаторов тока трех фаз в звезду (рис. 28, а). Там же указаны полярности первичных и вторичных обмоток и принятые положительные направления для изображаемых токов.

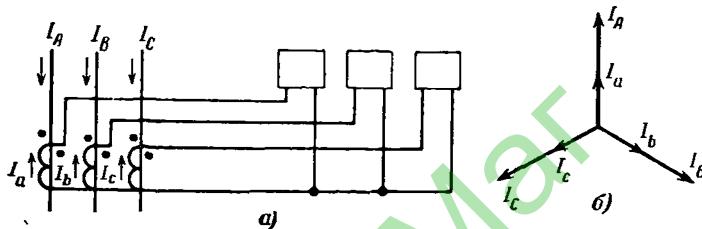


Рис. 28. Векторная диаграмма для трансформаторов тока, соединенных по схеме звезды.

а — схема соединения трансформаторов тока; б — векторная диаграмма токов.

На рис. 28, б приведена векторная диаграмма изображаемых токов для нормального режима и режима трехфазного короткого замыкания. Первичные токи изображают в виде трех векторов, сдвинутых на угол 120° . Вторичные токи должны быть изображены совпадающими с первичными токами, так как при приведенной на схеме рис. 28, а полярности обмоток и принятых положительных направлениях для токов одноименные токи достигают своего положительного максимума одновременно. При такой схеме соединения вторичных обмоток векторная диаграмма вторичных токов повторяет (в соответствующем масштабе) векторную диаграмму первичных токов и для других режимов, векторные диаграммы которых приведены в предыдущих разделах.

Рассмотрим схему соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в неполную звезду по схеме рис. 29, а.

Согласно приведенным в предыдущем примере векторы вторичных токов фаз A и C изображаются совпа-

дающими с соответствующими векторами, изображающими первичные токи фаз A и C во всех режимах.

На рис. 29, $b-g$ приведены диаграммы первичных и вторичных токов соответственно для разных видов коротких замыканий. Поскольку на фазе B отсутствует трансформатор тока, то при однофазном коротком замы-

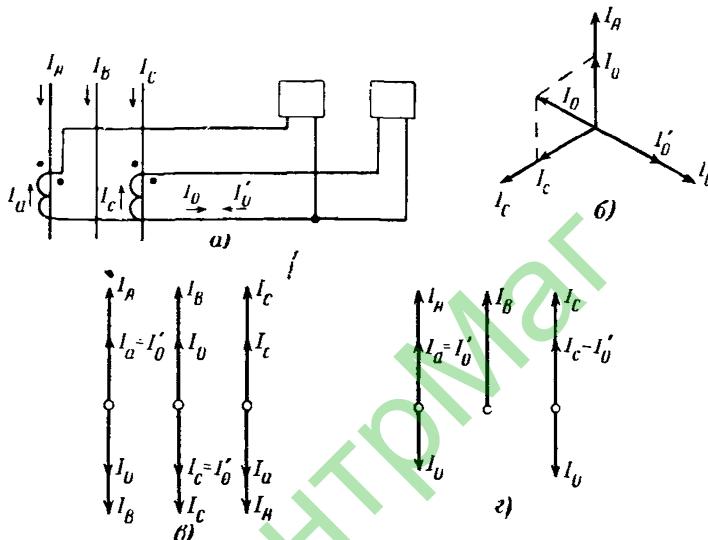


Рис. 29. Векторные диаграммы для трансформаторов тока, соединенных по схеме неполной звезды.

a — схема соединения трансформаторов тока; b — векторная диаграмма первичных и вторичных токов в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании; c — то же при двухфазных коротких замыканиях; d — то же при однофазных коротких замыканиях.

каний фазы B во вторичных цепях трансформаторов тока токи отсутствуют.

Особо следует остановиться на изображении тока, проходящего в общем проводе. Векторное изображение этого тока зависит от принятого для него положительного направления. Если принять положительное направление, совпадающее по контуру с положительными направлениями, принятыми для токов фаз A и C , то этот ток, назовем его I'_0 , будет равен сумме токов фаз A и C . Соответственно на векторных диаграммах он будет изображаться вектором I'_0 , исходя из суммы векторов I_a и I_c .

Если для тока, проходящего по общему проводу, принять положительное направление, встречное положительному направлению для тока I'_0 , то векторное изображение этого тока I_0 будет сдвинуто относительно вектора тока I'_0 на 180° , т. е. $I_0 = -(I_a + I_c)$.

Рассмотрим схему включения одного реле на разность токов двух трансформаторов тока (рис. 30, а). При

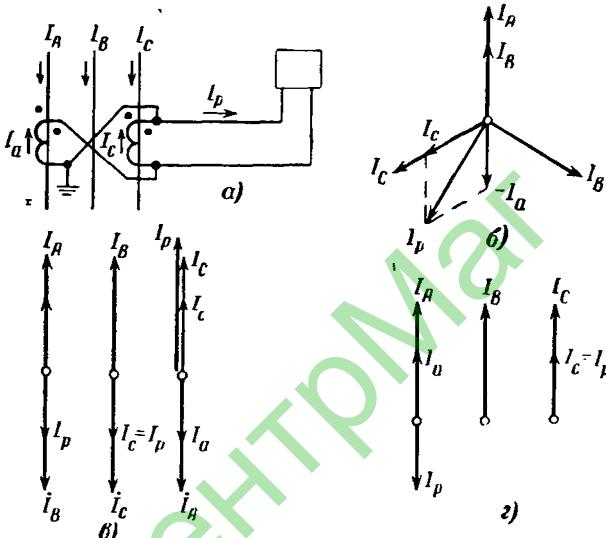


Рис. 30. Векторные диаграммы для трансформаторов тока, соединенных на разность токов двух фаз.

а — схема соединения трансформаторов тока; б — векторная диаграмма первичных токов и токов во вторичных цепях трансформаторов тока и в реле в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании; в — то же при двухфазных коротких замыканиях; г — то же при однофазных коротких замыканиях.

указанных на схеме полярностях обмоток и положительных направлениях для первичных и вторичных токов, векторы, изображающие вторичные токи трансформаторов тока, совпадают по направлению с векторами, изображающими первичные токи.

На рис. 30, б приведена векторная диаграмма при симметричной нагрузке или при трехфазном коротком замыкании. Проходящий в реле ток равен разности вторичных токов трансформатора тока фаз C и A . Соответственно вектор тока I_p изображается как разность

векторов I_c и I_a на рис. 30,б для трехфазного короткого замыкания, на рис. 30,в — для двухфазных коротких замыканий и на рис. 30,г — для однофазных коротких замыканий на разных фазах. Поскольку трансформатор тока на фазе B отсутствует, то при однофазном коротком замыкании на фазе B токи во вторичных цепях

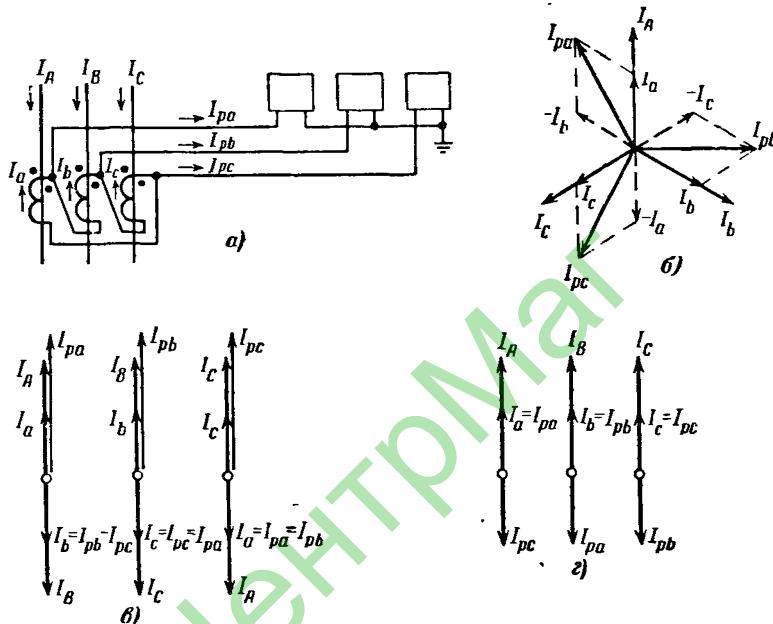


Рис. 31. Векторная диаграмма токов для схемы соединения трансформаторов тока в треугольник, а реле в звезду.

а — схема соединения; б — векторная диаграмма первичных и вторичных токов в обмотках трансформаторов тока и в реле в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании; в — то же при двухфазных коротких замыканиях; г — то же при однофазных коротких замыканиях.

трансформаторов тока отсутствуют. Следует также обратить внимание, что величина тока в реле меняется в зависимости от сочетания фаз при двухфазном коротком замыкании, что необходимо учитывать при выполнении релейной защиты.

Рассмотрим схему (рис. 31,а), на которой реле соединены в звезду, а трансформаторы тока — в треугольник. При указанных на схеме полярностях обмоток и положительных направлениях для первичных и вторичных токов трансформаторов тока векторы, соответствующие

первичным и вторичным токам одной и той же фазы, изображаются на векторной диаграмме совпадающими по направлению.

Токи в реле при указанных для них на рис. 31,*a* положительных направлениях определяются как разности токов двух соответствующих фаз, а именно: $I_{1a} = I_a - I_b$, $I_{1b} = I_b - I_c$, $I_{1c} = I_c - I_a$.

На векторных диаграммах (рис. 31,*b*—*г*) для разных видов коротких замыканий по известным векторам вторичных токов определены векторы токов в реле как разности соответствующих векторов фазных токов.

7. МЕТОДЫ СНЯТИЯ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

Изображение токов и напряжений в виде векторных диаграмм позволяет достаточно просто решать целый ряд практических задач.

В предыдущих разделах мы производили построение векторов токов и напряжений на основании расчета электрической схемы.

Однако выполнение таких расчетов для сложных схем дело чрезвычайно сложное и громоздкое. Поэтому на практике для изображения режимов повреждения, как правило, пользуются приближенными векторными диаграммами повреждений (см. рис. 23—26).

Для векторного изображения фактических токов и напряжений в нормальных режимах производятся измерения, для чего используют приборы и специальные методы, речь о которых пойдет ниже. Измерение токов и напряжений различными приборами и построение изображающих их векторов носят название снятия векторных диаграмм.

Построение векторной диаграммы напряжений трех фаз. Для построения исходной векторной диаграммы вторичных напряжений трех фаз необходимо:

а) путем замера вольтметром убедиться в равенстве по величине фазных напряжений. Допустимое отклонение напряжения должно быть не более $\pm 5\%$;

б) путем замера вольтметром убедиться в равенстве по величине междуфазных напряжений. Допустимое отклонение напряжений должно быть не более $\pm 5\%$;

в) вольтметром сформировать выводы, напряжение на которых будет изображено на векторной диаграмме, с известным источником напряжения.

При включении новой подстанции, на которой впервые производится проверка цепей напряжения, необходимо напряжение на подстанцию подавать пофазно от энергосистемы, т. е. сначала фазу *A*, затем *B* и, наконец, фазу *C*. Вторичные цепи трансформатора напряжения на новой подстанции маркируют в соответствии с появлением напряжения на соответствующей фазе трансформатора напряжения. Эта маркировка является основной. Где бы ни были выведены вторичные цепи этого трансформатора напряжения, должно быть проверено соответствие маркировки новых выводов основной маркировке.

При подключении второго трансформатора напряжения его вторичные выводы маркируют, сопоставляя их с уже известными цепями первого трансформатора напряжения.

Определение соответствия маркировки новых выводов основной маркировке называется фазировкой вторичных цепей напряжения. Фазировка, которая обычно производится вольтметром, может быть выполнена только в том случае, если фазируемые системы имеют электрическое соединение хотя бы в одной точке. Обычно такая точка уже имеется, так как у обоих трансформаторов напряжения заземлена нулевая точка или одна из соединенных в звезду фаз обмоток.

При фазировке напряжение между одноименными выводами должно быть равно нулю, а между разноименными — междуфазному напряжению.

Фазировка одной фазы обязательна. Фазировка двух других фаз может быть заменена проверкой чередования фаз напряжения новых выводов специальным прибором — фазоуказателем, как показано на рис. 32. При подключении к зажимам *1*, *2* и *3* прибора-фазоуказателя цепей напряжения в порядке *ABC* или *BCA*, или *CAB* его подвижная система должна вращаться по стрелке, напечатанной на приборе. Если подвижная система будет вращаться в противоположном указанному стрелкой направлении, значит, маркировка выводов неверная и следует поменять местами маркировку двух фаз.

После проверки цепей напряжения фазные и междуфазные напряжения могут быть изображены в виде векторов. Для этого задаются определенным масштабом изображения величины напряжения (например, 1 мм

соответствует 1 в). В соответствии с принятым масштабом изображают три фазных и, если нужно, три междуфазных напряжения, как показано на рис. 33, а или б.

Снятие векторной диаграммы напряжений вольтметром. Вольтметром можно снять векторную диаграмму неизвестной системы напряжений на известную звезду

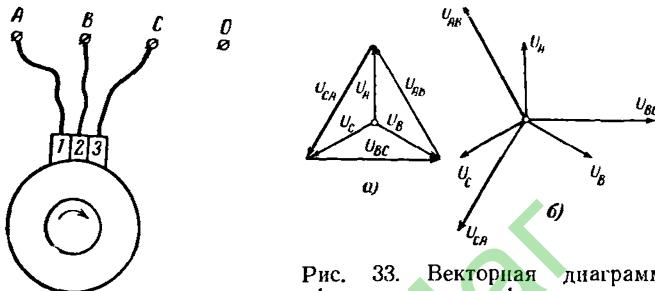


Рис. 32. Включение фазоуказателя для определения последовательности чередования фаз напряжений.

Рис. 33. Векторная диаграмма фазных и междуфазных напряжений.

векторов фазных напряжений. Условием для снятия векторной диаграммы таким методом является наличие хотя бы одной общей электрической точки в известной системе напряжений и неизвестной системе напряжений.

На рис. 34 показано построение одного неизвестного вектора с помощью трех известных. Представим по рис. 34, а, что мы имеем три вывода A , B , C и заземленную нулевую точку трехфазного известного нам напряжения и вывод X неизвестного нам напряжения. Векторная диаграмма трех известных нам напряжений изображается в виде трех векторов U_A , U_B и U_C в принятом масштабе и сдвинутых один относительно другого на 120° .

Измерив поочередно вольтметром напряжение между выводом X и выводами A , B и C , получим три показания вольтметра. Если все показания будут равны нулю, то это означает, что системы напряжений не связаны электрически ни в одной точке и снять векторную диаграмму напряжения методом вольтметра нельзя. В этом случае, если возможно, объединяют электрически в одной точке рассматриваемые системы напряжения (например, устанавливают заземление в обеих системах). Если этого

сделать нельзя, то для снятия векторной диаграммы нужно воспользоваться другим методом.

После того как определены показания вольтметра для всех трех случаев, из концов известных нам векторов радиусом, равным показанию вольтметра в принятом масштабе, проводят три окружности, как показано на рис. 34, б. Точка x на векторной диаграмме единственная, потенциал которой таков, что разность потенциалов

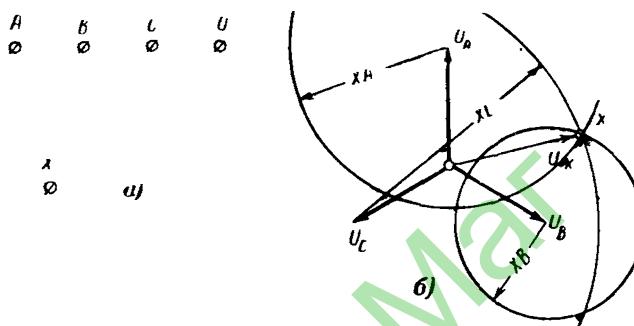


Рис. 34. Определение вектора неизвестного напряжения.

a - зажимы известных и неизвестного напряжений; *б* — построение вектора неизвестного напряжения.

между этой точкой и концами векторов U_A , U_B и U_C удовлетворяет всем трем показаниям вольтметра. Вектор, изображающий напряжение между выводом X и землей, изобразится вектором U_X , как показано на рис. 34, б.

Если необходимо снять векторную диаграмму напряжений нескольких выводов, то поочередно производятся измерения и строится на векторной диаграмме вектор напряжения каждого вывода, как указано выше.

Снятие векторной диаграммы ваттметром. Ваттметром производят снятие векторной диаграммы токов на векторную диаграмму исходных напряжений. Снятие и построение векторов, изображающих токи, производится поочередно для каждого тока в отдельности.

Для определения положения вектора, изображающего какой-либо ток, используется ваттметр, показания которого пропорциональны произведению эффективных величин тока и напряжения, подведенных к ваттметру, и косинусу фазового угла между ними.

На рис. 35, а показано подключение обмоток ваттметра при снятии векторной диаграммы. Ваттметр имеет два зажима для подключения цепи тока и два зажима для подключения напряжения. Кроме того, ваттметр имеет переключатель, который позволяет определять знак измеряемой мощности. Один из зажимов обмотки тока и один из зажимов обмотки напряжения ваттметра имеют маркировку в виде звездочек или точек. Эти зажимы

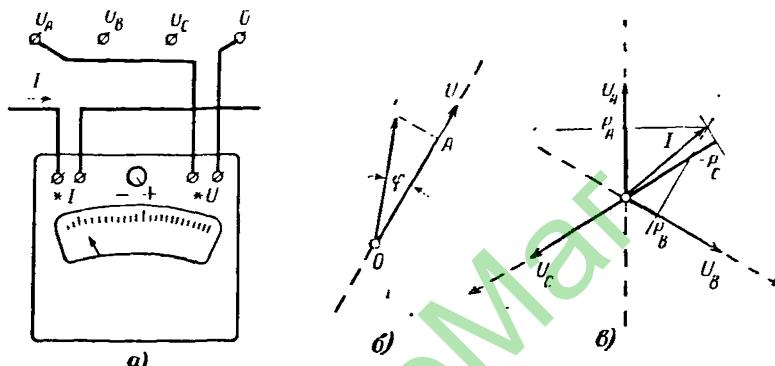


Рис. 35. Снятие векторной диаграммы токов однофазным ваттметром.
а — схема подключения прибора; б — построение проекции вектора тока на вектор напряжения; в — определение вектора тока.

называют однополярными. Они означают, что ваттметр выполнен таким образом, что его показания справедливы для тока и напряжения, имеющих положительное направление по стрелке от полярного зажима к неполярному. Поэтому подводят к ваттметру токи и напряжения таким образом, чтобы принятые положительные направления для измеряемых токов и напряжений совпадали с положительными направлениями, принятыми на ваттметре.

Для построения вектора, изображающего неизвестный нам ток, необходимо подать ток на токовые зажимы ваттметра и известные нам напряжения, на которые мы снимаем диаграмму. Подавая их поочередно на зажимы цепи напряжения ваттметра, мы получим три показания ваттметра.

Величина измеряемой мощности ваттметром равна:

$$P=IU \cos \varphi.$$

Величины напряжений, которые подводятся к ваттметру при всех трех замерах, одинаковы, и их величину

можно принять за постоянный коэффициент. Тогда показание прибора оказывается пропорциональным величине тока, умноженной на косинус угла между неизвестным пока вектором и известным вектором напряжения. Если подвести к ваттметру ток, изображенный вектором I , и напряжение, изображенное вектором U , то показания ваттметра будут пропорциональны отрезку на оси, совпадающей с вектором напряжения, равному проекции вектора тока на указанную ось. В самом деле, величина отрезка OA на рис. 35,б может быть вычислена по формуле $OA = I \cos \phi$ или получена графически, если из конца вектора I опустить перпендикуляр на ось, совпадающую с вектором напряжения U . Этот способ и позволяет по проекциям определить вектор тока. На рис. 35,в показано, как по трем показаниям ваттметра построить вектор, изображающий ток.

Допустим, например, что при подаче на обмотки ваттметра определенного тока и напряжений U_A , U_B , U_C его показания равны P_A , P_B и P_C . На оси, совпадающей с направлением вектора U_A , в принятом масштабе откладываем отрезок, равный P_A . По оси, совпадающей по направлению с вектором U_B , откладываем в принятом масштабе отрезок, равный P_B . По оси, совпадающей по направлению с вектором U_C , в отрицательную сторону этой оси откладываем отрезок в принятом масштабе, равный показанию P_C . Из концов нанесенных на оси отрезков восстанавливаем три перпендикуляра и в точке их пересечения находим конец вектора, изображающий искомый ток.

Таким путем на векторной диаграмме напряжений поочередно строятся векторы, изображающие токи.

При снятии векторной диаграммы ваттметром на его цепь напряжения могут подаваться как фазные, так и междуфазные напряжения. Соответственно и изображение проекций и определение по ним векторов тока производятся по векторам фазных или междуфазных напряжений.

Следует отметить, что из-за погрешности в замерах и построениях, возможно, три перпендикуляра пересекутся не в одной точке, а образуют небольшой треугольник. В этом случае конец вектора тока располагают в центре треугольника.

Снятие векторной диаграммы фазометром производится значительно проще и быстрее, чем ваттметром. По

этому методу величина тока определяется амперметром, а угол между исходным вектором напряжения и вектором изображаемого тока определяется по показанию фазометра.

На рис. 36,а показано, как подключить фазометр к цепям тока и напряжения. Так же как и ваттметр, фазометр имеет однополярные зажимы цепи тока и напряже-

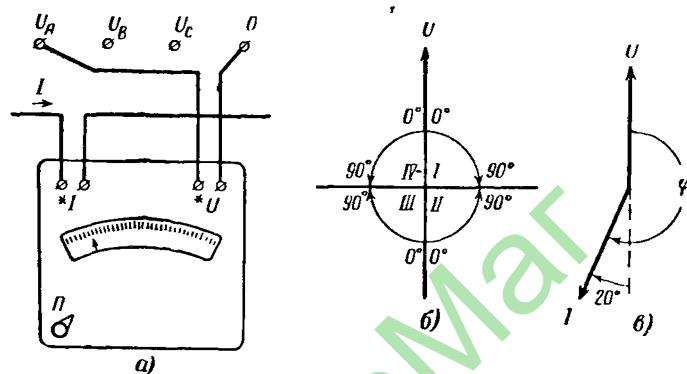


Рис. 36. Снятие векторной диаграммы токов фазометром.

а — схема включения прибора; б — обозначение квадрантов у фазометра; в — построение вектора тока.

ния, обозначенные звездочкой. Так же как у ваттметра, показания фазометра справедливы, когда положительное направление для тока и напряжения принято от полярного зажима к неполярному. Поэтому следует цепи тока и напряжения подключать к фазометру так, чтобы положительные направления измеряемых тока и напряжения соответствовали положительным направлениям, принятым в конструкции фазометра.

Конструкция фазометра такова, что исходным вектором, от которого производится отсчет углов, является вектор напряжения.

Если бы фазометр имел шкалу от 0 до 360° , то пользование фазометром было бы очевидным. К сожалению, шкала у большинства фазометров имеет градуировку от 0 до 90° , а вектор тока может занимать любое положение на плоскости относительно вектора напряжения. Поэтому в конструкции фазометра предусмотрен переключатель, который позволяет изменять схему обмотки цепи напряжения.

Благодаря этому фазометром, шкала которого охватывает 90° , можно измерять любой угол от 0 до 360° .

Полный угол 360° разбит условно на четыре угла по 90° , получившие название *I*, *II*, *III* и *IV* квадрантов (рис. 36,б). На фазометре эти квадранты имеют другие названия, а именно: *I*—индуктивный приемник, *II*—емкостный генератор, *III*—индуктивный генератор и *IV*—емкостный приемник.

Рассмотрим, как определить угол φ между вектором тока и напряжения в случае, показанном на рис. 36,в. Если подать ток и напряжение на обмотку фазометра, обнаружим, что стрелка прибора выходит за пределы шкалы во всех положениях, кроме одного—*индуктивный генератор*. Это означает, что вектор тока находится в *III* квадранте. Например, стрелка показывает 20° (рис. 36,б).

Как видно из рис. 36,в, в *III* квадранте отсчет ведется от оси, сдвинутой на 180° от условного направления вектора напряжения. Значит, угол φ будет равен $\varphi = 180^\circ + 20^\circ = 200^\circ$. Таким образом, определение угла между векторами тока и напряжения фазометром состоит в общем случае из трех этапов:

а) нахождение квадранта, в котором находится вектор тока. Поиск производится изменением положения переключателя;

б) уточнение положения вектора тока на плоскости по показанию стрелки фазометра. Отсчет производится либо от оси, совпадающей с направлением вектора напряжения, либо от оси сдвинутой на 180° от направления вектора напряжения. При этом в индуктивных квадрантах (*I* и *III*) отсчет углов производится по часовой стрелке, а в емкостных квадрантах (*II* и *IV*) — против часовой стрелки;

в) окончательный отсчет угла между вектором тока и вектором напряжения. При этом, если отсчет угла от вектора напряжения к вектору тока ведется по часовой стрелке, считают угол положительным. Если отсчет ведется против часовой стрелки, то величине угла придается знак минус.

Снятие векторной диаграммы вольтамперфазоиндикатором. Вольтамперфазоиндикатор (ВАФ) позволяет измерить величины тока и напряжения, а также углы между двумя токами, током и напряжением или между двумя напряжениями.

На приборе, изображенном на рис. 37,а, установлены два переключателя. Один из них имеет два положения: μA и I/U .

В положении μA прибор замеряет переменный ток до 250 мА, подведенный к соответствующим зажимам прибора.

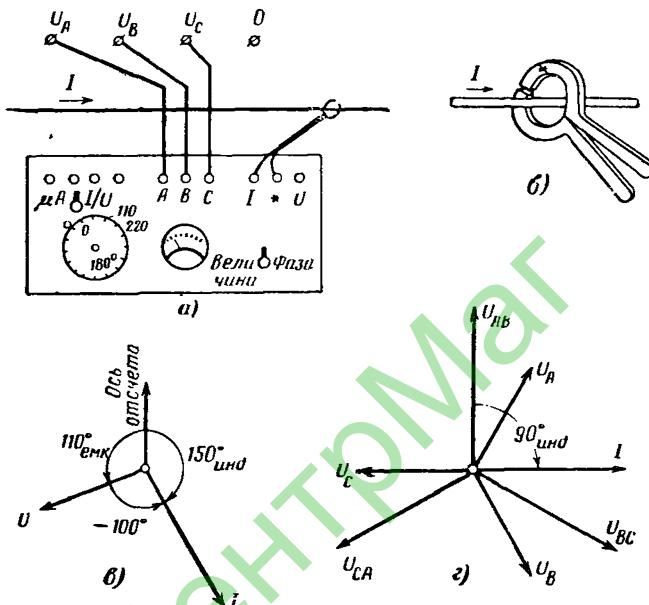


Рис. 37. Снятие векторной диаграммы прибором ВАФ.
а — схема включения прибора; б — охват клещами токовой цепи;
в — определение угла между векторами тока и напряжения; г —
определение угла между током и напряжением U_{AB} .

В положении I/U измерительный прибор ВАФ через второй переключатель с двумя положениями величина и фаза подключается соответственно для измерения величины тока (напряжения), подведенного к зажимам I или U прибора, или фазы угла тока (напряжения). Подвод тока к зажимам I следует производить только через токоизмерительные клещи. Кроме того, необходимо следить за соответствием пределов измерения, установленных на приборе, измеряемым величинам.

На магнитопроводе разъемных токоизмерительных клещей (рис. 37,б) и на входных зажимах цепи напряжения нанесена маркировка в виде звездочек, показы-

вающих, при каких положительных направлениях для тока и напряжения отградуирован прибор.

Для замера угла на специальные зажимы прибора, имеющие маркировку A , B , C , дополнительно подается трехфазное напряжение 110 или 220 в.

Для определения чередования фаз и для замера угла на крышке прибора установлена ручка с лимбом, на котором нанесены деления от 0 до 180° индуктивных и от 0 до 180° емкостных. На корпусе прибора установлены две отметки, соответствующие отсчету угла при питании от сети трехфазного тока напряжением 110 и 220 в.

Замер угла производится следующим образом:

а) проверяется, что трехфазное напряжение питания, подведенное к зажимам A , B , C , имеет прямое чередование. Для этого отжимают от лимба резиновый тормоз. Освобожденный лимб должен вращаться по часовой стрелке. При вращении лимба против часовой стрелки, что указывает на обратную последовательность чередования фаз, необходимо поменять местами два из трех подведенных концов сети трехфазного тока и проверить, будет ли после этого лимб вращаться по часовой стрелке. После этого резиновый тормоз подключается к лимбу;

б) переключатель μA и I/U устанавливается в положение I/\dot{U} ;

в) переключатель *величина-фаза* устанавливается в положение *величина*;

г) на прибор подается ток или напряжение, относительно которого мы хотим произвести отсчет углов. При этом ток подается через токоизмерительные клещи и положительное направление для него принимается по проводу, охватывающему клещами, входящим в торец клещей, обозначенный звездочкой. Если подается напряжение, то оно подводится к зажимам, обозначенным звездочкой и индексом U . При этом положительное направление принято на приборе от зажима со звездочкой к зажиму U .

Для повышения точности замера величины и угла переключатель пределов измерения должен стоять в положении, обеспечивающем наибольшее допустимое отклонение стрелки;

д) переключатель *величина-фаза* устанавливается в положение *фаза*. Поворотом рукоятки лимба следует добиться нулевого показания стрелки прибора. Этого

можно добиться в двух положениях лимба. Остановившись следует на таком положении, когда при движении лимба по часовой стрелке стрелка прибора проходит нуль слева направо. Когда стрелка прибора находится на нуле, отсчитываются показания угла на лимбе по отметке, нанесенной на корпусе (110 или 220 в):

с) отключается измеряемый ток или напряжение, а переключатель *величина-фаза* устанавливается в положение *величина*;

ж) подается на прибор следующий ток или напряжение и производятся замеры его величины и угла согласно пп. «г» и «д».

Угол между двумя подаваемыми на прибор токами или напряжениями (или током и напряжением) определяется как разность углов, отсчитанных по лимбу при двух замерах.

Например, допустим, что первый раз подали на прибор напряжение и замерили угол 110° смкостных. От условию принятой оси отсчета на рис. 37,в откладываем против часовой стрелки 110° и в принятом для напряжения масштабе откладываем вектор напряжения U .

Отключаем измеряемое напряжение и на фазометр подаем ток с помощью клещей, магнитопровод которых охватывает проводник с измеряемым током.

Предположим, по лимбу мы отсчитали угол 150° индуктивных. От оси отсчета откладываем 150° по часовой стрелке и в масштабе, принятом для тока, откладываем вектор тока I . Как видно из рис. 37,в, угол между током I и напряжением U составляет 100° . Как следует из описанного выше метода, отсчет угла по лимбу может приниматься по любой отметке 110 или 220 в и независимо от величины трехфазного напряжения, подаваемого на зажимы A , B , C . Две отметки на приборе ВАФ служат для прямого отсчета угла тока или напряжения от вектора напряжения, подаваемого на зажимы A , B прибора от сети трехфазного тока. В этом случае отсчет ведется по отметке 110 в, если междуфазное напряжение равно 110 в, и по отметке 220 в, если междуфазное напряжение равно 220 в.

Чтобы замерить угол между током и напряжением, подаваемыми на зажимы A и B прибора от сети трехфазного тока, величина которого равна 110 в, необходимо, подавая токоизмерительными клещами ток на прибор, отсчитывать по лимбу угол на отметке 110 в.

На векторной диаграмме рис. 37,г показано положение вектора напряжения U_{AB} , вектора замеренного тока, если замер показал, например 90° индуктивных, и векторов фазных и междуфазных напряжений, если напряжение U_{AB} есть одно из напряжений трехфазной симметричной системы ABC .

8. АНАЛИЗ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗАЩИТ

Данный раздел посвящен проверке исправности и правильности соединения вторичных токовых цепей, начиная от вторичных обмоток трансформаторов тока и кончая сборкой зажимов панели релейной защиты.

В качестве исходных положений при проверке токовых цепей будем принимать, что первичные нагрузочные токи во всех трех фазах по величине примерно равны и что векторы, изображающие эти первичные токи, сдвинуты один относительно другого на 120° .

При исправных трансформаторах тока и правильно собранных вторичных цепях векторные диаграммы для различных участков трехфазной вторичной цепи должны иметь вполне определенный вид.

Задачей анализа является определение расчетного вида векторной диаграммы для конкретного места цепи, сравнение ее с фактически снятой векторной диаграммой, оценка исправности и правильности собранных цепей либо определение характера и места дефекта.

Необходимо заметить, что одного сравнения векторных диаграмм недостаточно, чтобы судить о полной исправности и правильности соединения вторичных токовых цепей. Для окончательной оценки исправности необходимо анализировать и величины токов, проходящих в фазах, и токи небаланса в нулевом проводе. Таким образом, совпадение фактически снятой векторной диаграммы с расчетной векторной диаграммой лишь частично свидетельствует об исправности и правильности соединения токовых цепей. В этом смысле будем в дальнейшем говорить об исправности и правильности соединения токовых цепей по совпадению расчетной и фактической векторных диаграмм.

Анализ простейших токовых цепей. Дефекты в аппаратуре и ошибки в монтаже могут быть самыми разно-

образными. На приведенных ниже примерах покажем только некоторые из них.

При анализе будем в основном рассматривать векторные диаграммы во вторичных цепях трансформаторов тока на двух участках вторичной цепи, а именно во вто-

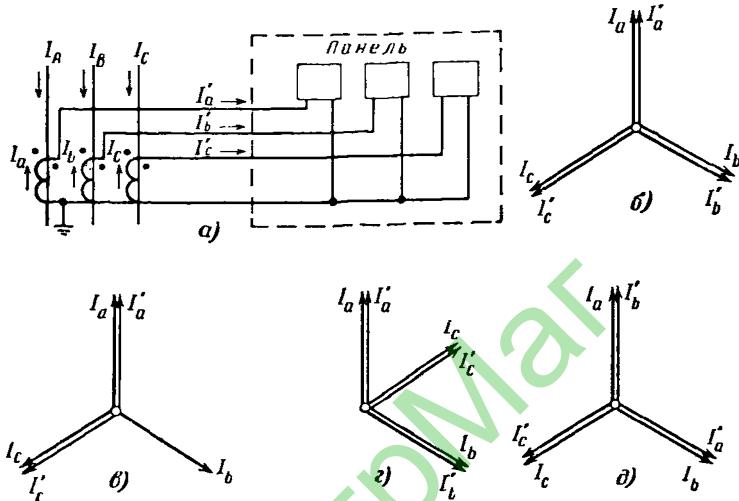


Рис. 38. Проверка исправности и правильности соединения токовых цепей при схеме соединения трансформаторов тока и реле в звезду.
а — схема соединения; б — векторная диаграмма вторичных токов при исправных и правильно соединенных токовых цепях; в — то же при открытии или замыкании цепи фазы В; г — то же при неправильной полярности трансформатора тока фазы С; д — то же при неправильной маркировке фаз А и В.

ричных обмотках трансформаторов тока и на сборке захватов панели защиты после соединения вторичных обмоток трансформаторов тока.

На рис. 38,а приведена схема максимальной токовой защиты, которая состоит из трех токовых реле, включенных на вторичные обмотки трансформаторов тока, соединенные в звезду. На этой же схеме указаны положительные направления для токов, которые изображаются на векторных диаграммах рис. 38,б—д. На рис. 38,б изображена расчетная векторная диаграмма для исправных и правильно собранных цепей.

Токи, проходящие после сборки захватов и в реле, обозначены со штрихами.

Если фактически снятая векторная диаграмма соответствует расчетной, то это свидетельствует о правильности сборки вторичных цепей тока.

Если фактически снятая векторная диаграмма на зажимах панели подобна приведенной на рис. 38,*в*, то это означает либо обрыв токовой цепи фазы *B*, либо ее замыкание на нулевой провод или на землю на трассе от трансформатора тока до сборки зажимов.

Если фактически снятые векторные диаграммы на выходе вторичных обмоток трансформаторов тока и на сборке зажимов подобны приведенным на рис. 38,*г*, то это означает, что начало и конец вторичной или первичной обмотки трансформатора тока на фазе *C* включены во вторичную или первичную цепь не так, как это сделано на фазах *A* и *B*. Это может произойти из-за ошибки в монтаже или вследствие ошибочной маркировки.

Если фактически снятые векторные диаграммы на выходе с вторичных обмоток трансформаторов тока и на сборке зажимов подобны приведенным на рис. 38,*д*, то это означает, что перепутана маркировка жил кабеля на фазах *A* и *B*.

На рис. 39,*а* приведена схема максимальной токовой защиты, которая состоит из трех токовых реле, включенных на трансформаторы тока, соединенные в треугольник.

На рис. 39,*б* приведена расчетная векторная диаграмма токов, проходящих во вторичных обмотках трансформаторов тока и после сборки зажимов (в реле).

Если фактически снятые векторные диаграммы совпадают с расчетными, то это свидетельствует о правильности сборки вторичных цепей тока.

На рис. 39,*в* приведены векторные диаграммы, снятые на выходе вторичных обмоток трансформаторов тока и на сборке зажимов панели в случае неправильной сборки схемы треугольника во вторичных цепях трансформаторов тока, как показано на рис. 39,*г*.

В этом случае токи в фазах на сборке зажимов панели защиты будут по величине соответственно равны:

$$I_a = I'_a = I'_b; \quad I'_c = \sqrt{3} I_a.$$

Если произвести сложения и вычитания на векторной диаграмме 39,*в*, то получится векторная диаграмма, соответствующая неправильно собранным трансформаторам тока.

Исправность и правильность соединения токовых цепей могут быть проверены и другими способами, однако

приведенный метод с помощью векторных диаграмм более нагляден. Для проверки более сложных токовых цепей, таких как дифференциальная защита трансформатора, анализ с помощью векторных диаграмм становится необходимым.

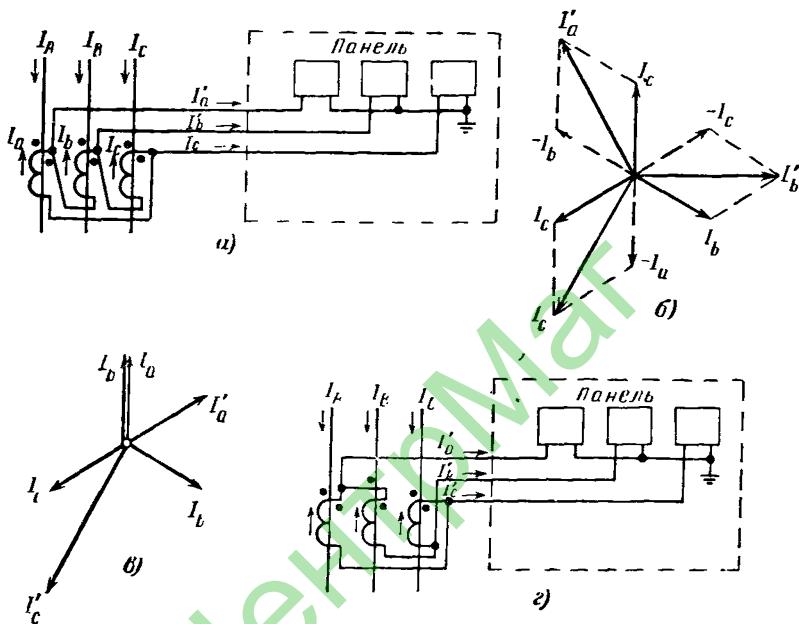


Рис. 39. Проверка исправности и правильности соединения токовых цепей при схеме соединения трансформаторов тока в треугольник и реле в звезду.

a — схема соединения; *б* — векторная диаграмма вторичных токов при исправных и правильно соединенных токовых цепях; *в* — то же при неправильном соединении трансформаторов тока, показанном на схеме *г*.

Анализ схемы соединения токовых цепей дифференциальной защиты трансформатора. На силовых трансформаторах наиболее часто встречается одинарная группа соединения звезда — треугольник. Ниже приведен анализ правильности соединения токовых цепей дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора со схемой соединения звезда — треугольник, изображенной на рис. 40,*а*. На этой же схеме указаны полярности обмоток и принятые положительные направления для изображаемых на векторной диаграмме токов.

Начинать построение векторной диаграммы на рис. 40,б следует с построения векторов токов нагрузки первичной цепи со стороны обмоток силового трансформатора, соединенных в звезду I_{A1} , I_{B1} и I_{C1} . В соответствии с полярностью обмоток и принятыми положительными направлениями векторы токов I_{A2} , I_{B2} и

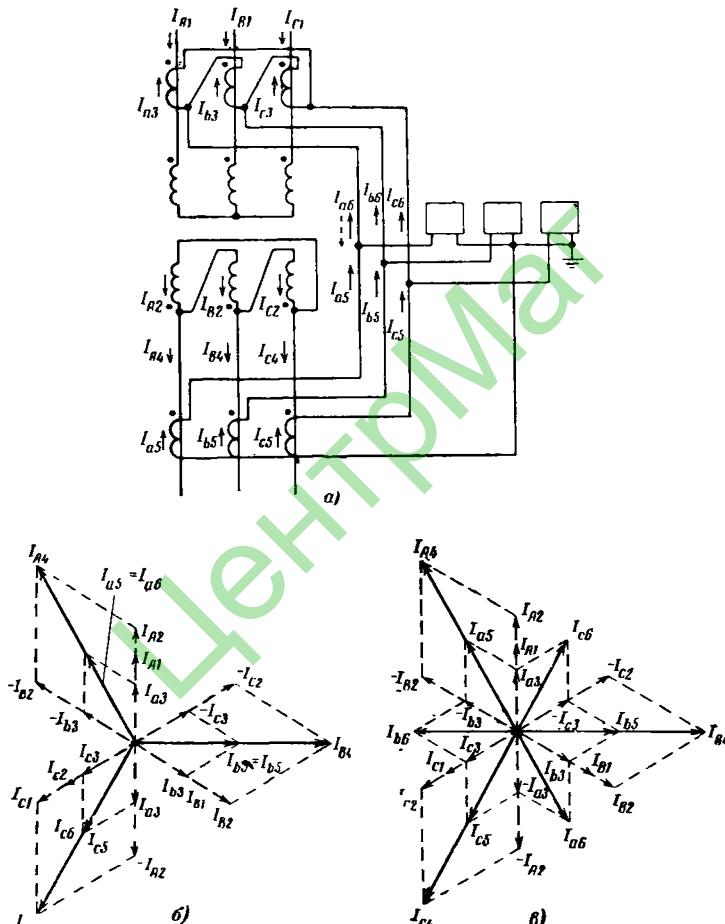


Рис. 40. Анализ правильности соединения токовых цепей дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора $Y/\Delta-11$.

а — схема соединения токовых цепей; *б* — векторная диаграмма первичных, вторичных токов и токов в плечах защиты при согласных положительных направлениях токов в плечах защиты; *в* — то же при встречных положительных направлениях для токов.

I_{c2} вторичных обмоток силового трансформатора, а также векторы токов I_{a3} , I_{b3} и I_{c3} вторичных обмоток трансформаторов тока с первичной стороны силового трансформатора изображаются совпадающими по направлению с векторами токов I_{A1} , I_{B1} и I_{C1} .

В соответствии с выбранными положительными направлениями вектор тока I_{A4} изобразится в виде разности векторов токов I_{A2} и I_{B2} , т. е. $\dot{I}_{A4} = \dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}$. Аналогично и для других фаз токи равны $\dot{I}_{B4} = \dot{I}_{B2} - \dot{I}_{C2}$ и $\dot{I}_{C4} = \dot{I}_{C2} - \dot{I}_{A2}$.

Векторы вторичных токов трансформаторов тока со вторичной стороны силового трансформатора I_{a5} , I_{b5} и I_{c5} совпадают по направлению с векторами токов I_{A4} , I_{B4} и I_{C4} согласно полярностям трансформаторов тока и принятым положительным направлениям.

Рассмотрим, как должны быть изображены векторы токов, проходящих в плече защиты от трансформаторов тока, соединенных в треугольник: I_{a5} , I_{b5} , I_{c5} , I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} .

Для токов, подтекающих к реле от трансформаторов тока, соединенных в звезду, принимаем те же положительные направления, что и для токов, проходящих во вторичных обмотках трансформаторов тока. Поэтому они изображаются теми же векторами; оставим их прежнее обозначение.

Положительное направление для токов, проходящих по соединительным проводам от трансформаторов тока, соединенных в треугольник, может быть принято любым из двух возможных. Ниже доказывается, что принятие любого направления не меняет электрической схемы соединения токовых цепей. Для начала примем для токов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} положительное направление, совпадающее с положительными направлениями токов I_{a5} , I_{b5} и I_{c5} , как показано сплошными стрелками на рис. 40,а.

Условием правильной сборки цепей дифференциальной защиты является отсутствие токов в дифференциальных цепях в нормальном режиме, когда через силовой трансформатор проходят токи нагрузки. При принятых положительных направлениях для токов это означает, что разности токов $I_{a5} - I_{a6}$, $I_{b5} - I_{b6}$ и $I_{c5} - I_{c6}$ должны быть равны нулю. Это значит, что вектор тока I_{a6} должен быть равным и одинаково направленным с вектором тока I_{a5} .

Соответственно вектор тока I_{b6} должен совпадать с вектором тока I_{b5} , а вектор тока I_{c6} — с вектором I_{c5} .

Таким образом, положение векторов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} оказывается определенным. Остается определить, как нужно соединить в треугольник трансформаторы тока на схеме рис. 40,а, чтобы векторы токов в плечах защиты совпадали с указанными векторами токов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} .

Как видно из векторной диаграммы 40,б, чтобы получить вектор I_{a6} из векторов I_{a3} , I_{b3} и I_{c3} , надо из вектора тока I_{a3} вычесть вектор тока I_{b3} . Чтобы получить вектор I_{b6} , надо из вектора тока I_{b3} вычесть вектор тока I_{c3} , и, чтобы получить вектор тока I_{c6} , надо из вектора I_{c3} вычесть вектор тока I_{a3} . Соответственно с этим и производится соединение верхних трансформаторов тока в треугольник и подсоединение к ним проводов дифференциальной защиты.

Разберем тот же случай, задавшись положительными направлениями для токов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} , встречными с положительными направлениями для токов I_{a5} , I_{b5} и I_{c5} , как показано пунктирной стрелкой на рис. 40,а. В этом случае условием правильной сборки дифференциальной защиты является равенство нулю суммы токов $I_{a5} + I_{a6} = 0$; $I_{b5} + I_{b6} = 0$ и $I_{c5} + I_{c6} = 0$. Это означает, что вектор тока I_{a6} должен быть сдвинут на 180° относительно вектора тока I_{a5} , вектор тока I_{b6} должен быть сдвинут на 180° относительно вектора I_{b5} и, наконец, вектор тока I_{c6} должен быть сдвинут на 180° относительно вектора тока I_{c5} . Имея три вектора токов I_{a5} , I_{b5} и I_{c5} , можем построить векторы токов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} , которые должны поступать от трансформаторов тока, соединенных в треугольник, как это показано на векторной диаграмме рис. 40,в.

Чтобы получить токи I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} от трансформаторов тока, соединенных в треугольник, можем использовать три тока, изображаемых векторами I_{a3} , I_{b3} и I_{c3} . Как видно из векторной диаграммы рис. 40,в, для того чтобы получить вектор тока I_{a6} , надо взять разность векторов токов $I_{b3} - I_{a3}$, чтобы получить вектор тока I_{b6} , надо взять разность векторов тока $I_{c3} - I_{b3}$, и чтобы получить вектор тока I_{c6} , надо взять разность векторов токов $I_{a3} - I_{c3}$.

Как видно из рис. 40,а, соединение трансформаторов тока и подключение к ним проводов для получения токов I_{a6} , I_{b6} и I_{c6} при принятых положительных направле-

ниях, обозначенных пунктирной стрелкой, приводят к той же электрической схеме соединения, что и для первого случая.

Изложенная выше методика проверки дифференциальной защиты трансформатора применима для проверки любых дифференциальных защит: трансформаторов, генераторов, шин и т. д.

В случае, когда дифференциальная защита имеет много комплектов трансформаторов тока (число плеч), следует проанализировать соединение токовых цепей, считая что в работе по первичной цепи находится одно основное плечо, и по одному поочередно из остальных плеч. При этом токи будут проходить только в двух плечах защиты. Сопротивление вторичных обмоток трансформаторов тока отключенных присоединений в этом случае следует считать очень большим.

Анализ схемы соединений токовых цепей и цепей напряжения реле направления мощности. На рис. 41,*a* показан участок сети, на котором установлено реле направления мощности.

Реле направления мощности, используемое в схеме защиты линии, должно замыкать контакты при повреждении на защищаемой линии. Если первичные токи и напряжения, подведенные к реле направления мощности через измерительные трансформаторы, могут быть изображены векторными диаграммами, как показано на рис. 41,*b* или *c*, то реле направления мощности должны замкнуть свои контакты и разрешить защите отключить линию 1, так как такая диаграмма первичных токов и напряжений, подводимых к защите, соответствует короткому замыканию на линии 1 в точке K_1 соответственно при трехфазном и однофазном коротких замыканиях.

Если первичные токи и напряжения, подведенные к реле через измерительные трансформаторы, могут быть изображены векторными диаграммами, как показано на рис. 41,*г* или *д*, то реле направления мощности должны держать контакты разомкнутыми и не разрешать защите отключать линию 1, так как такая векторная диаграмма первичных токов и напряжений, подводимых к защите, соответствует короткому замыканию на линии 2 в точке K_2 соответственно для трехфазного и однофазного коротких замыканий.

В настоящее время в схемах направленных токовых защит используют, как правило, однофазные реле на-

правления мощности. Поведение такого реле определяется положением на векторной диаграмме вектора тока, подведенного к токовой цепи реле относительно вектора напряжения, подведенного к цепи напряжения реле.

Рассмотрим для примера, как действует в защите от междуфазных коротких замыканий реле направления мощности, к токовой цепи которого подведен ток фазы A .

При использовании в схеме защиты реле направления мощности типа РБМ-171, к токовой цепи которого

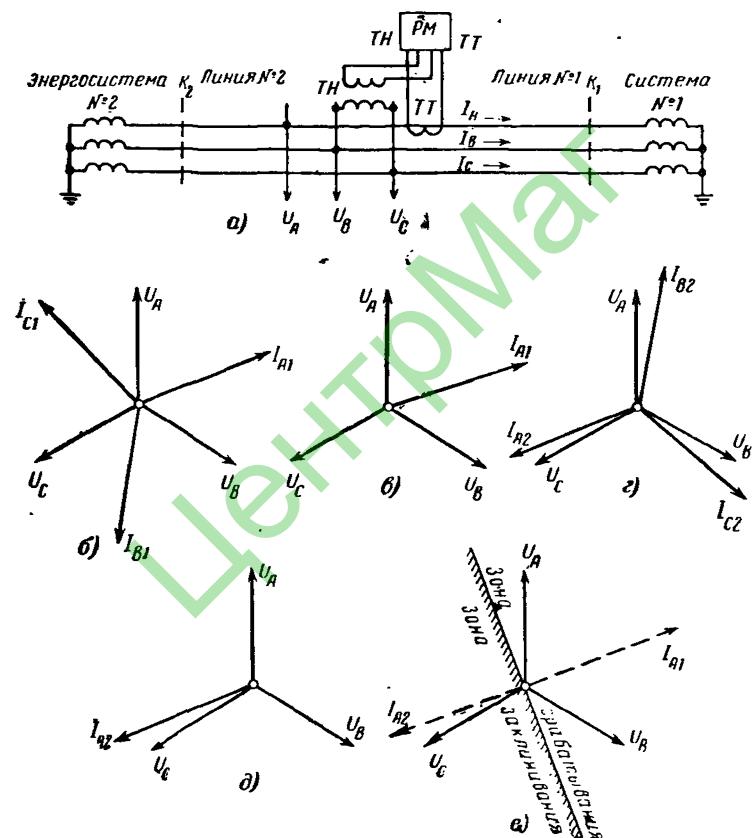


Рис. 41. Включение реле направления мощности в схеме защиты линии от междуфазных коротких замыканий.

a — схема сети; *b* — векторная диаграмма при трехфазном коротком замыкании в зоне действия защиты (точка K_1); *c* — то же однофазном; *d* — векторная диаграмма при трехфазном коротком замыкании вне зоны действия защиты (точка K_2); *e* — то же однофазном; *e* — характеристика реле направления мощности.

подведен ток фазы A , цепь напряжения этого реле подключена через измерительный трансформатор напряжения к напряжению U_{bc} .

Реле направления мощности имеет такую конструкцию, что на векторной диаграмме первичных напряжений на рис. 41, e можно провести линию, разграничитывающую плоскость на две зоны для тока, подводимого к реле,— зону срабатывания и зону заклинивания реле направления мощности.

Из векторных диаграмм на рис. 41 ясно, что такая линия перехода от зоны срабатывания к зоне заклинивания (линия нулевых моментов) должна проходить перпендикулярно ожидаемым положениям вектора тока фазы A при коротком замыкании в зоне защиты в точке K_1 и при коротком замыкании «за спиной» в точке K_2 .

В нормальном режиме по трем фазам линии проходят токи, которые могут быть изображены тремя векторами. Если в реле направления мощности будет подан первичный ток, векторное изображение которого находится в зоне срабатывания реле, реле должно замкнуть свои контакты. В проверке этого положения и состоит суть анализа правильности включения реле направления мощности.

Для того чтобы знать, где располагаются векторы первичных нагрузочных токов, необходимо проделать следующие проверки и измерения во вторичных цепях измерительных трансформаторов:

а) проверить исправность вторичных цепей напряжения на зажимах панели. Для этого производятся замеры фазных и междуфазных напряжений, фазировка и проверка чередования фаз напряжения, а для защиты от замыкания на землю еще и снятие вектора напряжения испытательной жилы;

б) проверить исправность вторичных цепей трансформаторов тока. Для этого на зажимах панели производятся замеры фазных вторичных нагрузочных токов и токов небаланса в нулевом проводе, а также снятия векторной диаграммы вторичных токов на зажимах панели на звезду фазных или междуфазных вторичных напряжений панели защиты;

в) проверить, что векторная диаграмма вторичных токов и напряжений в принятом масштабе величин соответствует или не соответствует векторной диаграмме первичных токов и напряжений. Для этого используются

сведения о направлении активной и реактивной мощности в первичной сети.

Если первичные токи нагрузки и напряжения изображать в виде векторной диаграммы и при этом использовать для них те же общепринятые положительные направления, что и при изображении токов и напряжений при коротких замыканиях, то для каждого соотношения

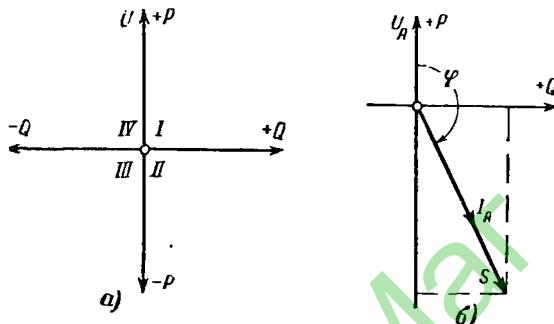


Рис. 42. Определение положения вектора тока нагрузки.

a — поясняющая диаграмма; *б* — определение вектора тока по известным значениям активной и реактивной мощности.

активной и реактивной нагрузок по линии вектор тока какой-либо фазы будет иметь относительно вектора фазного напряжения той же фазы вполне определенный угол. На рис. 42,*а* приведена система прямоугольных координат с осями: активная мощность P и реактивная мощность Q , позволяющая определять угол между первичным фазовым током и первичным фазным напряжением.

При этом за положительное значение активной и реактивной мощностей принимается мощность, поступающая от шин в линию.

Для случая, рассмотренного на рис. 42,*б*, поясняется, как определять угол между векторами фазного тока и фазного напряжения, пользуясь сведениями о знаке и величине активной и реактивной мощностей. Примем, что активная мощность направлена с линии на шины и равна 40 Мвт , а реактивная мощность идет с шин в линию и равна 20 Мвар .

Откладывая по оси P величину -40 Мвт , а по оси Q — величину $+20 \text{ Мвар}$, получим вектор, характеризующий полную мощность, передаваемую по линии.

Угол между вектором фазного напряжения и вектором одноименного фазного тока определится, если вектор первичного напряжения принять совпадающим с осью $+P$, а вектор тока — совпадающим с вектором полной мощности S . Таким образом, можем сказать, что угол между векторами первичного тока I_A и напряжения U_A в рассматриваемом случае равен φ . Аналогично и угол между векторами первичных токов I_B и I_C и векторами соответствующих фазных напряжений U_B и U_C равен тому же углу φ .

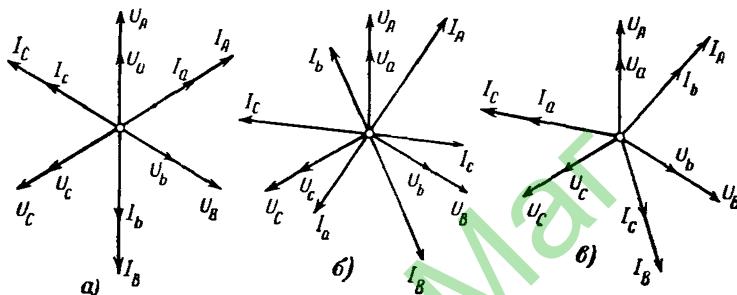


Рис. 43. Векторные диаграммы при разных схемах соединения токовых цепей.

a — схема правильная; *б* — трансформаторы тока соединены с обратной полярностью; *в* — циклически перепутана маркировка токовых цепей.

Сопоставляя векторную диаграмму первичных токов и напряжений, построенную на основании известных мощностей первичной цепи, и векторную диаграмму вторичных токов и напряжений, снятую с помощью приборов, подключенных на зажимах панели защиты, проверяют их соответствие и уточняют положения первичных векторов.

На рис. 43,*а*—*в* приведены примеры векторных диаграмм первичных токов и напряжений U_A , U_B , U_C , I_A , I_B и I_C , построенных по известной мощности первичной цепи и вторичных векторных диаграмм токов и напряжений U_a , U_b , U_c , I_a , I_b и I_c , снятых с помощью приборов, подключенных на зажимах панели защиты.

В диаграмме, приведенной на рис. 43,*а*, векторы первичных и вторичных токов и напряжений совпадают, что говорит о правильности выполнения токовых цепей, используемых в схеме защиты.

На рис. 43,*б* приведена векторная диаграмма, на которой векторы первичных и вторичных токов одноимен-

ных фаз расположены в противофазе. Это может иметь место, если токовые цепи соединены с обратной полярностью либо трансформатор напряжения имеет шестую группу соединения обмоток, а не двенадцатую, как обычно. Указанное несоответствие, выявленное после проверки током нагрузки, может быть исправлено в цепях тока или напряжения.

На рис. 43,*в* приведена векторная диаграмма первичных и вторичных токов и напряжений, из которой следует, что циклически перепутана маркировка во вторичных цепях тока или напряжения. Это несоответствие должно быть найдено и устранено.

После уточнения положения векторов первичных токов и напряжений с помощью векторной диаграммы вторичных токов и напряжений (вектор, изображающий первичный ток или напряжение, должен быть на одной прямой линии с одноименным вектором, изображающим вторичный ток или напряжение) приступают к проверке правильности включения реле направления мощности имитацией повреждения в зоне работы реле, т. е. в точке K_1 на рис. 41,*а* и вне зоны «за спиной», в точке K_2 .

Имитация состоит в подведении к реле через измерительные трансформаторы тех первичных напряжений и токов нагрузки, которые имеют векторное изображение, близкое к векторному изображению первичных токов и напряжений, подводимых к реле при коротком замыкании.

Имитация напряжения при коротком замыкании. Реле направления мощности в защите от междуфазных кратких замыканий подключены к напряжениям, которые при коротком замыкании могут значительно меняться по величине и незначительно по фазе. Поэтому на реле подается то междуфазное или фазное напряжение, которое будет подключено к нему при работе защиты во время короткого замыкания. Для защиты от замыканий на землю к реле направления мощности подводится напряжение испытательной жилки (см. рис. 27,*а*), с помощью которого обычно имитируют по цепям напряжения однофазное короткое замыкание на фазе *A*.

Имитация для реле направления мощности короткого замыкания по цепям тока состоит в подаче в токовую цепь этого реле поочередно токов нагрузки трех фаз.

ПОПРАВКА

На стр. 21 ошибочно вместо рис. 11,*а* и *б* помещен рис. 12,*а* и *б*, а на стр. 22 вместо рис. 12,*а* и *б* помещен рис. 11,*а* и *б*.

Зак. 193

Центромаг