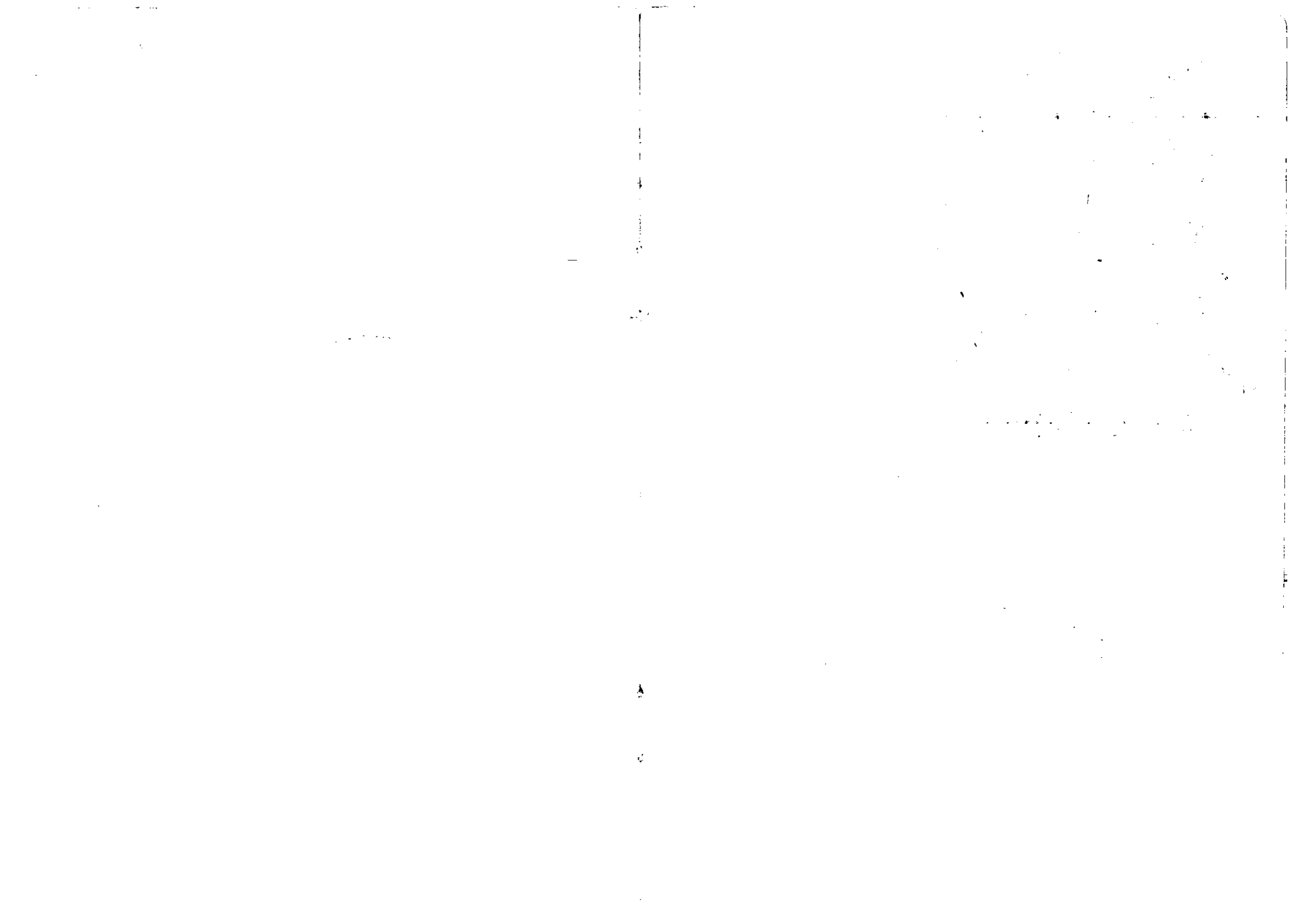


МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО ИЛ ЭНАС»

Практическое  
пособие

**ВЕКТОРНЫЕ  
ДИГРАММЫ  
В СХЕМАХ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
И АВТОМАТИКИ**





Производственно-практическое издание

**С О С Т А В И Т Е Л Ь**  
**Кузнецов Феликс Дмитриевич**

**ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ  
В СХЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ  
И АВТОМАТИКИ**

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Л.Л. Жданова*  
Художественный редактор *Н.И. Комиссарова*  
Компьютерная верстка и графика *Г.И. Эрм*  
Корректор *Н.Н. Смотина*

Лицензия № 071727 от 01.09.98.

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№77.99.02.953.Л.000626.02.02 от 04.02.2002 г.

Подписано в печать 18.07.2002. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ларнитура Таймс. Усл.печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 4,05.  
Тираж 10 000 экз. (1-й завод 1–3 000 экз.). Заказ № 254.

ЗАО «Издательство НЦ ЭНАС»  
115201, г. Москва, Каширское ш., д.22, корп.3.  
Тел./факс: (095) 113-53-90, 234-71-82.  
E-mail: [pr@enas.ru](mailto:pr@enas.ru)  
[www.enas.ru](http://www.enas.ru)

Отпечатано с готовых диапозитивов в ФГУП Московской типографии № 6  
Министерства РФ по делам печати, телерадиовещания  
и средств массовой телекоммуникации.  
115088, г. Москва, ул. Южнопортовая, 24.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	4
1. Представление переменного тока .....	5
2. Представление переменного напряжения и ЭДС .....	7
3. Векторное изображение переменных токов .....	8
4. Векторные диаграммы простейших цепей .....	10
5. Векторные диаграммы, изображающие токи, ЭДС .....	16
6. Векторные диаграммы токов и напряжений во вторичных цепях .....	26
7. Методы снятия векторных диаграмм .....	31
8. Векторные диаграммы дифференциальных защит .....	37
9. Векторные диаграммы реле направления мощности .....	39
10. Векторные диаграммы реле направленной поперечной .....	45
11. Векторные диаграммы реле, включенных на фильтры тока .....	47
12. Векторные диаграммы реле, включенных на фильтры тока .....	50
13. Векторные диаграммы реле направления мощности .....	52
14. Векторные диаграммы реле, применяемых .....	53
15. Векторные диаграммы реле направления мощности нулевой .....	54
16. Векторные диаграммы реле в схемах автоматики, .....	55
действующей при повышении напряжения .....	56
17. Векторные диаграммы реле фильтровых защит .....	61
от токов обратной последовательности .....	3
Список литературы .....	3

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Векторные диаграммы являются наиболее простым и наглядным методом оценки и проверки правильности сборки цепей тока и напряжения устройств релейной защиты и автоматики. Анализ векторных диаграмм позволяет убедиться в правильности включения реле дифференциальных и направленных защит, поверить цепи устройств синхронизации генераторов, контроля синхронизма АПВ, правильность включения приборов учета электроэнергии и фильтров симметричных составляющих, рассмотреть условия возникновения резонансных явлений в электрических цепях и т. п.

Изображение электрических величин должно содержать информацию об их значении, необходимости для решения рассматриваемой задачи. Напрямую, при определении теплового действия тока достаточно знать только его значение. При анализе взаимодействия двух токов информации о направлении происхождения токов по проводам. В пособиях рассмотрены способы представления переменных токов и напряжений в прямоугольной системе координат, аналитическом виде и в виде векторных диаграмм, а также методики снятия и использования векторных диаграмм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Ю.А., Степанов Д.Ю. Совершенствование релейной защиты на примерах построения векторных диаграмм. — М.: Энергоатомиздат, 1999.
2. Елфимов В.М. Векторные диаграммы в релейной защите. — М.: Энергия, 1967.
3. Кузнецов Ф.Д., Белотелов А.К. Техническое обслуживание релейной защиты и автоматики электростанций и сетей. — Ч. 2: Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит. — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2000.
4. Семенов В.А., Шибенко Н.Ф. Проверка токовых цепей дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов. — М.: Энергоатомиздат, 1996.
5. Андреев В.А., Фабрикант В.Л. Релейная защита распределительных электрических сетей. — М.: Высш. шк., 1965.
6. Мусаялян Э.С. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций. — М.: Энергоатомиздат, 1989.

# 1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Условно принято, что направление тока согласно движению положительных зарядов или встречно с движением отрицательных зарядов. Для того чтобы отличать эти два направления, одно из них обозначается стрелкой возле сечения провода, где рассматривается направление тока.

В каждом проводе геометрически возможны два направления тока. Для того чтобы совпадал со стрелкой, в расчетах принято представлять положительными числами или положительными отрезками. Геометрическое направление, обозначенное стрелкой, получили название *положительного направления*.

Соответственно ток, направление которого встречно со стрелкой, в расчетах представляется отрицательными числами или отрицательными отрезками. Геометрическое направление, встречное со стрелкой, получили название *отрицательного направления*.

Для примера на рис. 1 изображено изменение во времени переменного тока в сечении  $s$  провода за отрезок времени, равный двум периодам. Величина  $T$  называется *периодом*. Величина, обратная периоду, называется частотой  $f$ . Она измеряется в герцах ( $Гц$ ) и равна числу периодов изменения тока в секунду.

На рис. 1 каждому значению времени  $t$  соответствует определенное мгновенное значение тока и определенное его направление. Время  $T$  называется *периодом*. Величина, обратная периоду, называется частотой  $f$ . Она измеряется в герцах ( $Гц$ ) и равна числу периодов изменения тока в секунду.

Допустим, что имеются два провода, относящихся к двум разным цепям, по которым проходят переменные токи  $i_1$  и  $i_2$ , как показано на рис. 2, а, и прием частоты этих токов одинаковы, т. е. они имеют одинаковые периоды  $T$ .

На рис. 2 рассмотрены случаи, когда положительные максимумы тока  $i_2$  наступают на  $\Delta t_2$  позже или на  $\Delta t_1$  раньше положительных максимумов тока  $i_1$ . В таком случае, чтобы охарактеризовать процесс изменения тока  $i_2$  во времени

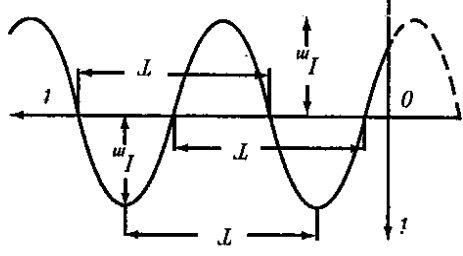
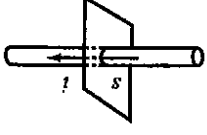


Рис. 1. Изображение одного тока

II. Фаза второго тока в трансформаторе  $TP$  зависит от его вторичной нагрузки. Значение сопротивления  $R_2$  подобрано таким образом, что напряжение на нем опережает первичный ток трансформатора  $TP$  на угол  $60^\circ$  (положительные направления токов и напряжений соответствуют полярности обмоток трансформаторов фильтра). При протекании по первичным обмоткам токов прямой последовательности напряжения на сопротивлении  $R_1$  и  $R_2$  равны по значению и противоположны по фазе, а напряжение на выходе фильтра, равное сумме этих напряжений, равно нулю.

При протекании по первичным обмоткам фильтра токов обратной последовательности напряжения на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$  равны по значению и сдвинуты на угол  $60^\circ$ . Напряжение на выходе фильтра при разомкнутой выходной цепи пропорционально току обратной последовательности.

Работа фильтра иллюстрируется векторными диаграммами, приведенными на рис. 55.

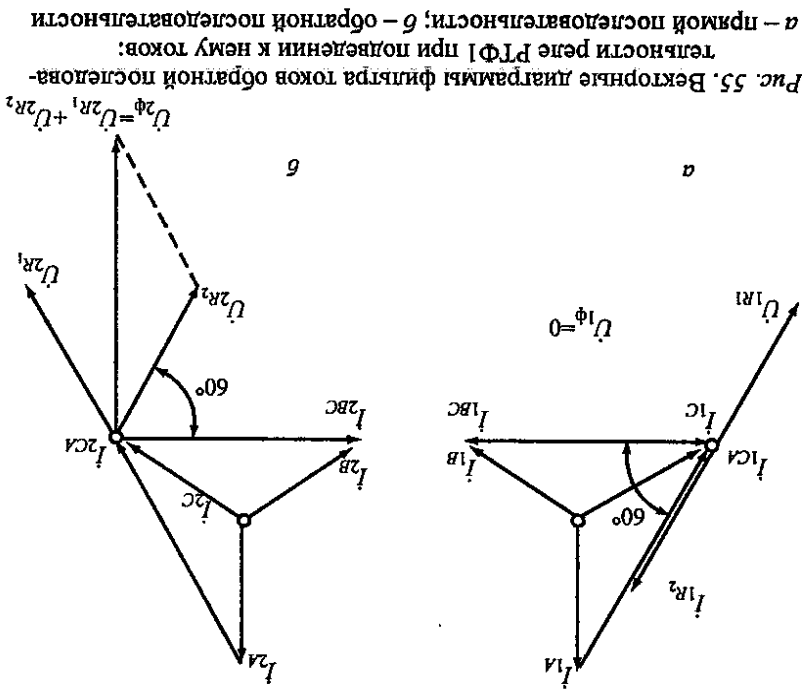
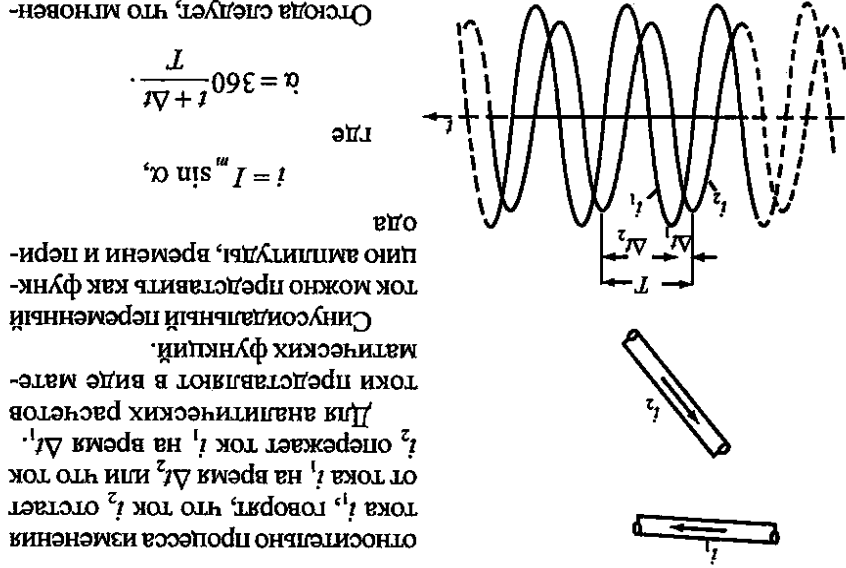


Рис. 55. Векторные диаграммы фильтра токов обратной последовательности при подавлении к нему токов: а — прямой последовательности; б — обратной последовательности



относительно процесса изменения тока  $i_1$ , говорят, что ток  $i_2$  отстает от тока  $i_1$  на время  $\Delta t_2$  или что ток  $i_2$  опережает ток  $i_1$  на время  $\Delta t_1$ . Для аналитических расчетов токi представляются в виде математических функций.

Отсюда следует, что мгновенное значение тока определяется, как произведение амплитуды тока  $I_m$  на синус угла  $\alpha$ , который в свою очередь зависит от времени  $t$  при заданных, постоянных для данного тока величинах  $\Delta t$  и  $T$ .

$$i = I_m \sin \alpha,$$

$$\alpha = 360 \frac{t + \Delta t}{T}.$$

Любая статия синусоидального тока (напряжения) может характеризоваться углом  $\alpha$  в пределах от 0 до 360°. Этот угол, характеризующий статию синусоидальной величины, называется *фазовым углом*, или *фазой*. При совместном рассмотрении двух синусоидальных величин одной частоты совместной характеристикой является разность их фаз, называемая *углом сдвига фаз* и обычно обозначаемая буквой  $\phi$ .

$$\phi = \alpha_1 - \alpha_2 = 360 \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{T}.$$

Отсюда видно, что при одинаковых частотах угол сдвига фаз 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.

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

Угловая частота, рад/с, рассчитывается по следующей формуле:

**Реле РТФ1**, так же как и реле типа РТ2, состоит из фильтра токов обратной последовательности, на выходе которого включен реагирующий орган — реле РТ. Схема реле типа РТФ1 приведена на рис. 54.

В реле РТФ1 применен фильтр токов обратной последовательности, отличающийся от применявшихся ранее более простым способом компенсации токов нулевой последовательности. Фильтр состоит из трансформатора тока  $IT$  и трансформатора с воздушным зазором (трансреактора)  $TP$ , нагруженных регулируемым активными сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ .

Для компенсации токов нулевой последовательности первичные обмотки трансформаторов фильтра разделены на две части и включены на разность фазных токов: в трансформаторе  $IT$  на разность токов фаз  $C$  и  $A$ , в трансреакторе  $TP$  на разность токов фаз  $B$  и  $C$ .

Лапаретры  $IT$ ,  $TP$  и сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  выбраны так, что при протекании по первичным обмоткам трансформаторов равных по значению токов напряжения на этих сопротивлениях равны.

В трансформаторе тока  $IT$  вторичный ток практически совпадает по фазе с первичным, поэтому напряжение на активном сопротивлении  $R_1$  совпадает по фазе с первичным током трансформатора

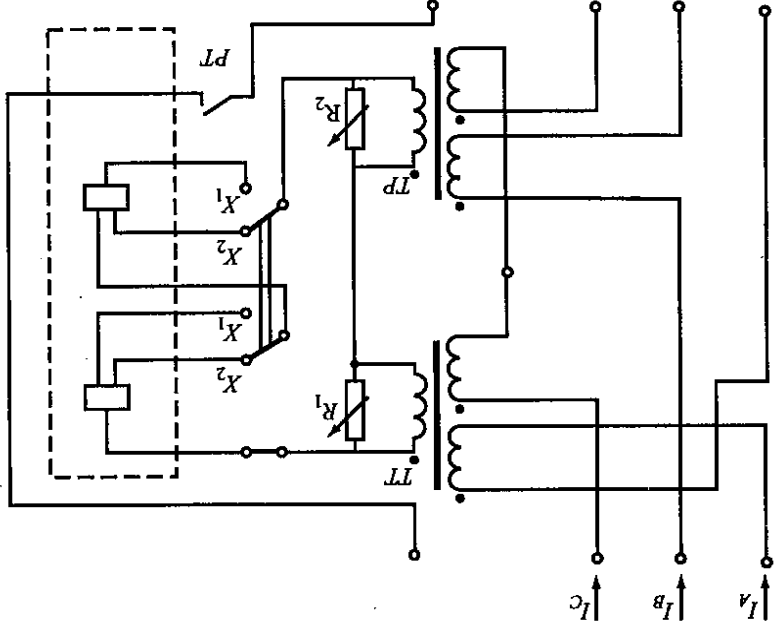


Рис. 54. Схема реле тока обратной последовательности типа РТФ1

При частоте 50 Гц ( $T = 0,02$  с) угловая частота  $\omega = 314$  рад/с. Величину  $360 \frac{T}{\Delta t}$  или  $2\pi \frac{T}{\Delta t}$  принято называть *начальной фазой* и обозначать  $\varphi$ .

При таких обозначениях общее аналитическое выражение для тока имеет следующий вид:

$$i = I^m \sin(\omega t + \varphi).$$

В практических расчетах используется выражение

$$i = I^m \sin(\omega t - \varphi),$$

где угол  $\varphi$  характеризует сдвиг во времени каждой фазы данного тока от аналогичной фазы сравняваемого с ним тока (или другой синусоидальной величины той же частоты) с начальной фазой, равной нулю.

На практике для обозначения характеристик переменного тока и других синусоидально изменяющихся величин применяется *действующее (эффективное) значение*. Действующее значение для синусоидального тока связано с амплитудным значением через постоянный коэффициент, равный  $\sqrt{2}$ , а именно:

$$I = \frac{I^m}{\sqrt{2}}.$$

## 2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЭДС

Так же как и изображение тока, изображение напряжения и ЭДС должно включать в себя сведения о мгновенном значении и о направлении.

Направление действия напряжения и ЭДС принимается по направлению перемещения положительного заряда под действием рассматриваемого напряжения. В электрической схеме направления действия напряжения или ЭДС обозначают стрелкой.

Напряжение или ЭДС, направление действия которого совпадает с направлением стрелки, считается *положительным напряжением*. Направление, встречное со стрелкой, считается *отрицательным напряжением*. Положительное направление может обозначаться не стрелкой, а индексом. Например, принятому положительному направлению для напряжения от  $a$  к  $b$  будет соответствовать запись  $U_{ab}$ .

Принцип действия фильтра трансформаторного типа, примененного в реле типа РТ2, основан на сравнении падений напряжения  $U_R$  на активном сопротивлении  $R$  с электродвижущей силой  $E_{TP}$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $TP$ .

Напряжение на выходе фильтра токов обратной последовательности  $E_\Phi$  пропорционально разности между током в фазе  $C$  и геометрической разности токов в фазах  $A$  и  $B$ . Сопротивление резистора  $R$  в  $\sqrt{3}$  раз больше сопротивления взаимной индукции  $X_m$  между обмотками трансформатора  $TP$ . При этом для токов прямой последовательности напряжение на выходе фильтра равно нулю. При наличии токов обратной последовательности это напряжение пропорционально их значению. Токи нулевой последовательности на выходе фильтра компенсируются трансформатором  $TP$ .

Векторные диаграммы (рис. 53) поясняют принцип действия фильтра. Таким образом, токи прямой и нулевой последовательности не создают ЭДС на выходе фильтра.

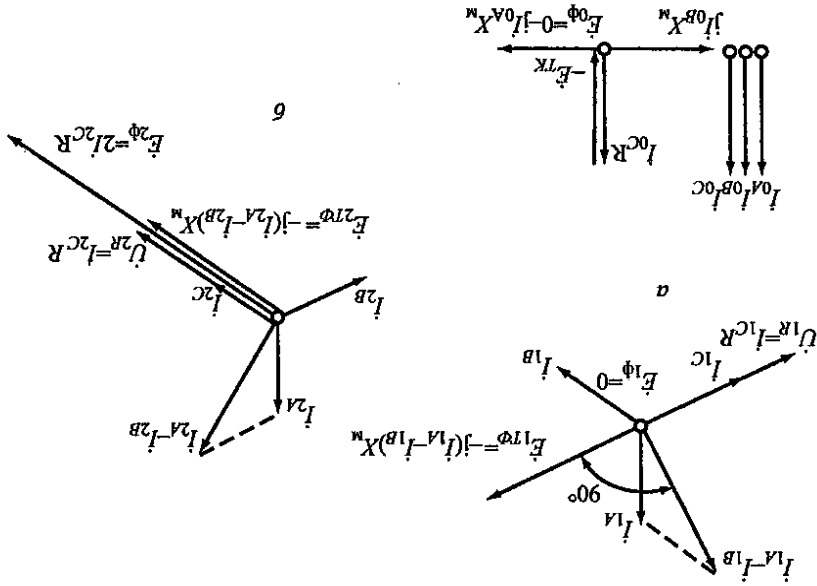


Рис. 53. Векторные диаграммы фильтра токов обратной последовательности реле РТ2 при подведении к нему токов:  
 $a$  — прямой последовательности;  $b$  — обратной последовательности;  $c$  нулевой последовательности;  $E_{TP}$  — ЭДС вторичной обмотки  $TP$ ;  $E_\Phi$  — напряжение на выходе фильтра;  $X_m$  — реактивное сопротивление взаимной индукции обмоток  $TP$

Переменное напряжение и ЭДС характеризуются так же, как и ток, амплитудой или соответствующим значением, а также углом фазового сдвига.

Общепринятые следующие обозначения:

- мгновенные значения напряжения и ЭДС;  $U_m, E_m$
- действующие значения напряжения и ЭДС;  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$
- действующие значения напряжения и ЭДС.

### 3. ВЕКТОРНОЕ ИЗООБРАЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

При решении электротехнических задач, когда требуется производить сложение или вычитание токов и напряжений, способы изообразования в прямоугольной системе координат и в аналитическом виде неудобны.

Для примера приведем выражение для амплитуды и фазы сдвига результирующего тока  $i_3$ , определяемого сложением двух токов  $i_1$  и  $i_2$ , имеющих соответственно амплитуды  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$  и фазы сдвига  $\phi_1$  и  $\phi_2$ .

$$I_{m3} = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + 2I_{m1}I_{m2}\cos(\phi_2 - \phi_1)};$$

$$\operatorname{tg} \phi_3 = \frac{I_{m1} \sin \phi_1 + I_{m2} \sin \phi_2}{I_{m1} \cos \phi_1 + I_{m2} \cos \phi_2}.$$

Как видно, для определения амплитуды результирующего тока  $I_{m3}$  и его угла  $\phi_3$  необходимо продумать весьма громоздкие вычисления. Гораздо проще эта задача решается графически с помощью так называемого *векторного изображения* токов.

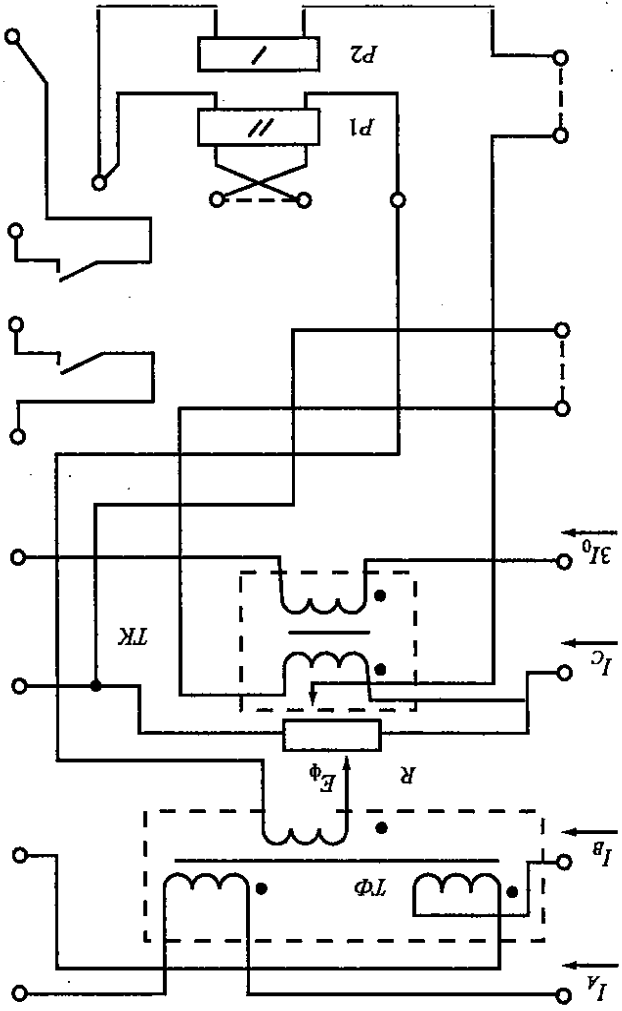
Рассмотрим аналитические выражения для переменного тока и напряжения

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi_1);$$

$$u = U_m \sin(\omega t - \phi_2).$$

Для векторного изображения токов и напряжений на плоскости произвольно откладываем ось отсчета углов. Расположенная вертикально ось  $\phi_1$  откладывается вектор, пропорциональный амплитуде  $I_{m1}$  или действующему значению  $I_1$  тока  $i_1$ . Под углом  $\phi_2$  откладываемся вектор, пропорциональный амплитуде  $I_{m2}$  или действующему значению  $I_2$  тока  $i_2$ . Под углом  $\phi_3$  откладываемся вектор, пропорциональный амплитуде  $I_{m3}$  или действующему значению  $I_3$  тока  $i_3$ . Под углом  $\phi_3$  откладываемся вектор, пропорциональный амплитуде  $I_{m3}$  или действующему значению  $I_3$  тока  $i_3$ . Под углом  $\phi_3$  откладываемся вектор, пропорциональный амплитуде  $I_{m3}$  или действующему значению  $I_3$  тока  $i_3$ .

Рис. 52. Схема реле тока обратной последовательности типа РТ2



более грубое, служит для отключения токов при несимметричных коротких замыканиях, а реле  $P_2$ , более чувствительное, служит для сигнализации появления опасных для генератора значений токов обратной последовательности. Схема реле представляется на рис. 52. Фильтр тока обратной последовательности состоит из трансформатора с воздушным зазором  $TK$ , имеющего две первичные и одну вторичную обмотки, регулируемого сопротивления  $R$  и трансформатора компенсации  $TK$ . Подробно схема и работа реле описаны в [3].





#### 4. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ

Элемент электрической цепи обладает постоянным сопротивлением  $Z$ , если между действующим значением подводимого к элементу напряжения  $U$  и действующим 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  $X_L$  и  $X_C$ .

Векторные диаграммы цепей, содержащих сопротивления

$R$ ,  $X_L$  и  $X_C$ . Рассмотрим цепь, изображенную на рис. 5, состоящую из источника переменного тока ЭДС  $e$  и сопротивления  $Z$ . По цепи протекает переменный ток  $i$ . Для упрощения примем, что внутреннее сопротивление источника равно нулю. Тогда значение напряжения на зажимах источника равно ЭДС  $e$ .

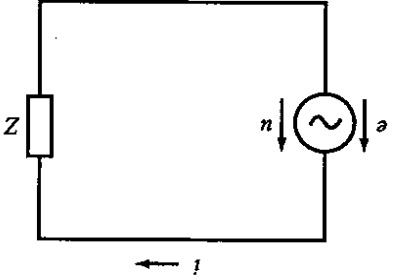


Рис. 5. К построению векторных диаграмм

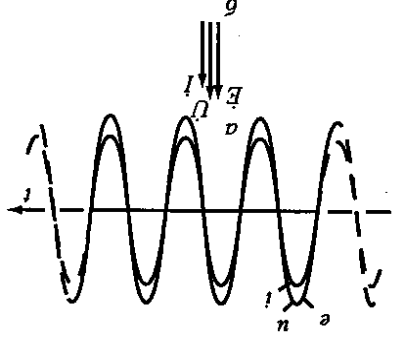


Рис. 6. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто активное:  $a$  – графическое;  $b$  – векторное

Если сопротивление цепи чисто активное, то активное  $R$ , то получается изображение, приведенное на рис. 6,  $a$ . Поскольку все величины одновременно достигают своих положительных максимумов, то, следовательно, их векторное изображение соответствует рис. 6,  $b$ , т. е. все векторы изображаются совпадающими.

Рассмотрим векторную диаграмму тока, ЭДС и напряжений для схемы, приведенной на рис. 5, когда сопротивление цепи чисто индуктивное  $X_L$ .

При определении зоны работы реле направления мощности типа РБМ178 направление мощности от шин к трансформатору условно принимается положительным.

Для случая однофазного короткого замыкания на фазе  $A$  угловая характеристика реле строится относительно напряжения  $3U_0 = U_B + U_C$ . При коротком замыкании на шинах или на одной из отходящих линий мощность короткого замыкания, проходящая по трансформатору, будет направлена к шинам подстанции, а вектор перемещается по трансформатору, следовательно, направление мощности нулевой работы реле направления мощности типа РБМ178 на мощности нулевой работы реле направления мощности после включения фазы  $A$ , произойдет в такой последовательности:

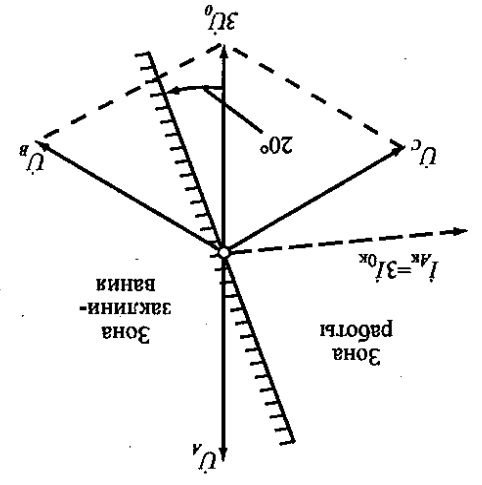


Рис. 50. Определение зоны работы реле направления мощности нулевой работы реле направления мощности от замыканий на землю

ного тока поврежденной фазы  $A$  расположится в III квадранте (рис. 50). Поскольку при таком повреждении защита должна срабатывать, зона, в которую попадает вектор тока короткого замыкания, и будет зоной работы. Полученная зона работы защиты по сравнению с рассмотренной ранее защитой линии будет повернута на  $180^\circ$ .

#### 16. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ В СХЕМАХ АВТОМАТИКИ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Реле направления реактивной мощности, устанавливаемое в схемах автоматики повышения напряжения, включается так же, как и реле направления мощности в схемах защиты от междуфазных коротких замыканий. Отличие состоит лишь в расположении зоны работы и зоны заклинивания на векторной диаграмме.

Построение зоны работы РБМ178 с дополнительным кон-  
 типом  $R_C$  имеющего угловую характеристику

$$M_{np} = kU I_p \sin(\varphi_p + 10^\circ)$$

и включенного на ток и напряжение фазы  $A$ , производится в такой последовательности:

В такой схеме обычно используется реле РБМ178, включенное на фазное напряжение, и ток той же фазы. В цепь обмотки напряжения реле включается дополнительное сопротивление  $R_n$  (300–500 Ом) и конденсатор  $C_n$  (3–5 мкФ) для того, чтобы увеличить мощность, требуемую для срабатывания реле, и несколько изменить его угловую характеристику, которая в результате будет иметь следующие вид:

$$M_{np} = k U I^p \sin [\varphi \pm (8^\circ + 10^\circ)].$$

На этом же рисунке построены угловая характеристика реле и векторная диаграмма в режиме, когда линия отключена с противоположной стороны и на шины защищаемой подстанции поступает реактивная мощность, обусловленная емкостью этой линии. Реле мощности при этом срабатывает, разрешая действие автоматики.

## 15. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

В схемах резервных защит трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов от замыканий на землю часто используются реле направления мощности нулевой последовательности. Реле направления мощности срабатывает и замыкает свои контакты при направлении мощности короткого замыкания от трансформатора к шинам (рис. 49).

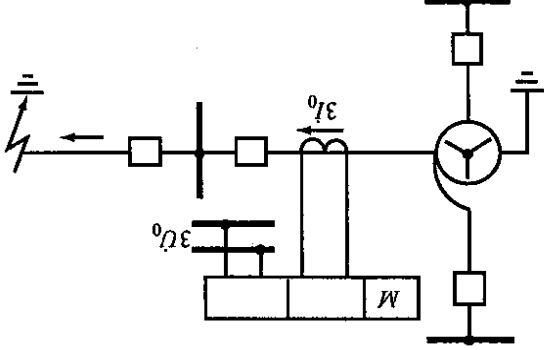


Рис. 49. Схема включения реле направления мощности в схеме защиты автотрансформатора от замыканий на землю

Изображение соответствует угловой системе координат показано на рис. 7, а, векторное изображение — на рис. 7, б. Эти изображения показывают, что полонительный максимум тока наступает через время  $T/4$  (или  $90^\circ$ ) после того, как ЭДС и напряжение достигнут своего положительного максимума.

Рассмотрим векторную диаграмму тока, ЭДС и напряжения в схеме, приведенной на рис. 5, когда сопротивление цепи чисто

Изображение соответствует угловой системе координат, показано на рис. 8, а и векторное изображение — на рис. 8, б.

Эти изображения показывают, что положительный максимум тока наступает на время, равное  $1/4 T$ , ранее наступления положительных максимумов ЭДС и напряжения. Рассмотрим векторную диаграмму тока, ЭДС и напряжения для схемы, приведенной на рис. 9, а, когда в цепи последовательно включены два сопротивления, положительные значения  $R$  и  $X_c$ . Примем для изображения величины по-

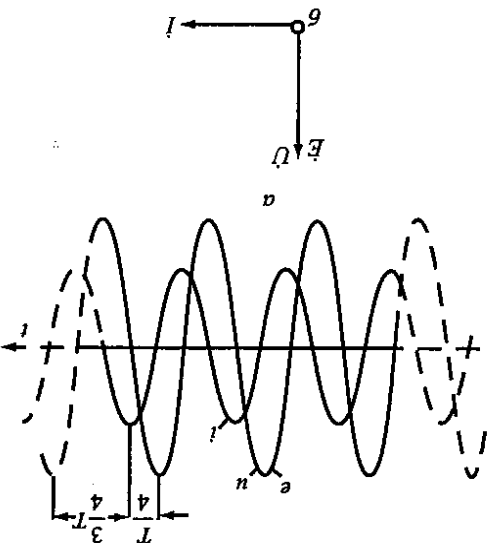


Рис. 7. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто индуктивное: а — графическое; б — векторное

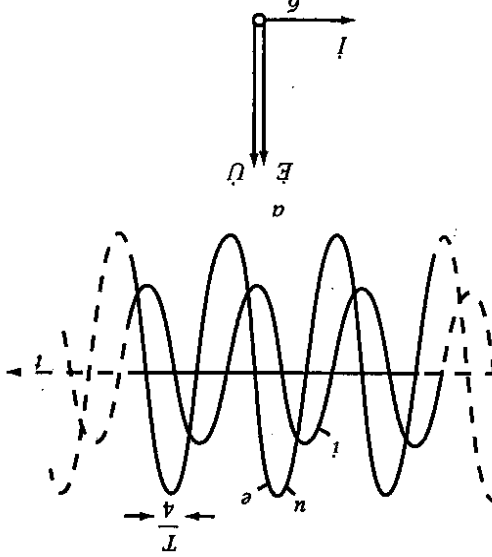


Рис. 8. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто емкостное: а — графическое; б — векторное

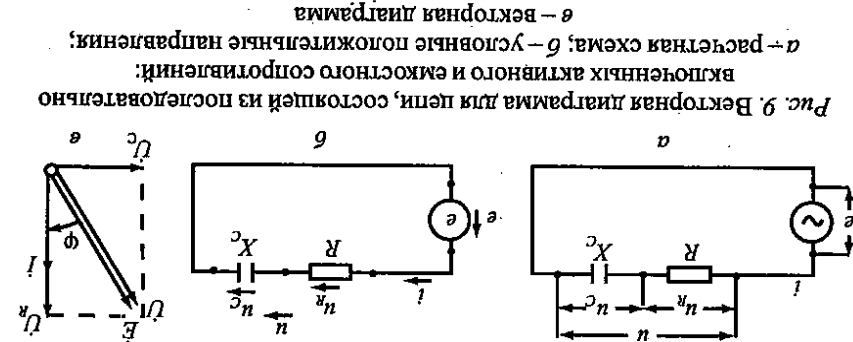


Рис. 9. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и емкостного сопротивлений:

*a* — расчетная схема; *б* — условные положительные направления;

*е* — векторная диаграмма

Примем за ось отсчета вектор тока *I* (рис. 9, *е*). Если положительное направление напряжения на активном сопротивлении принять совпадающим с положительным направлением тока, то вектор, изображающий напряжение, совпадает по направлению с вектором тока. Поэтому построим вектор  $U_R$  совпадающим с вектором *I*. Если положительное напряжение на емкостном сопротивлении принять совпадающим с положительным направлением тока, то вектор, изображающий напряжение, совпадает по направлению с вектором тока. Поэтому построим вектор  $U_C$  совпадающим с вектором *I*. Вектор  $U$  является суммой двух векторов  $U_R$  и  $U_C$ . По векторной диаграмме на рис. 9, *е* можно видеть, что ток отстает от напряжения на угол  $\phi$ . Чем больше отношение  $R/X_C$ , тем меньше угол  $\phi$ , и, чем меньше это отношение, тем ближе угол к  $90^\circ$ . Рассмотрим векторную диаграмму тока, ЭДС и напряжения для схемы, представленной на рис. 10, *а*, когда в цепи последовательно включены два сопротивления *R* и *X<sub>L</sub>*. Примем для изображаемых

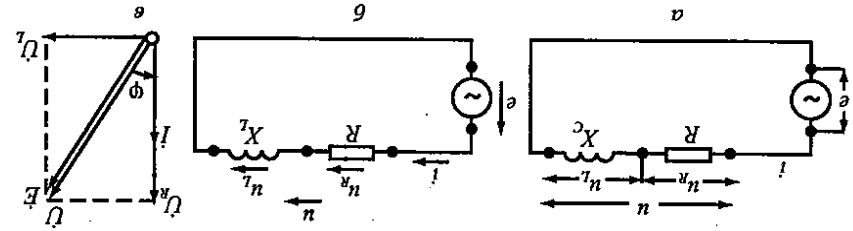


Рис. 10. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений:

*a* — расчетная схема; *б* — условные положительные направления;

*е* — векторная диаграмма

Одна из обмоток реле (поляризуемая) включается так, чтобы направление тока нулевой последовательности в ней при коротких замыканиях на землю в любом месте защищаемой сети не изменялось. Лучше всего для этой цели использовать трансформатор тока, установленный в цепи, соединяющей нейтраль трансформатора с землей. При коротком замыкании в зоне действия защиты (например, в точке *K<sub>1</sub>*) вторичные токи  $I_{p1}$  и  $I_{p2}$  входят в выводы обмоток реле, обозначенные точками, с одинаковым направлением, вращающийся момент на реле имеет положительный знак, и реле срабатывает. При коротком замыкании вне зоны действия защиты (точки *K<sub>2</sub>*) ток  $I_{p2}$  меняет свое направление. В результате по обмоткам реле протекают токи  $I_{p1}$  и  $-I_{p2}$  вращающийся момент реле имеет отрицательный знак, и реле не срабатывает.

# 14. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИКИ

Реле мощности, применяемые в устройствах системной автоматики, обычно используются для определения значения и направления потока активной или реактивной мощности в аварийных режимах. Так, например, на линиях напряжением 330–500 кВ в схемах автоматизации, действующей при повышении напряжения, используются реле направления мощности, которые должны замыкать свои контакты при направлении реактивной мощности в сторону шин защищаемой подстанции (рис. 48). Положительное направление тока на рисунке принято, как обычно, от шин в линию.

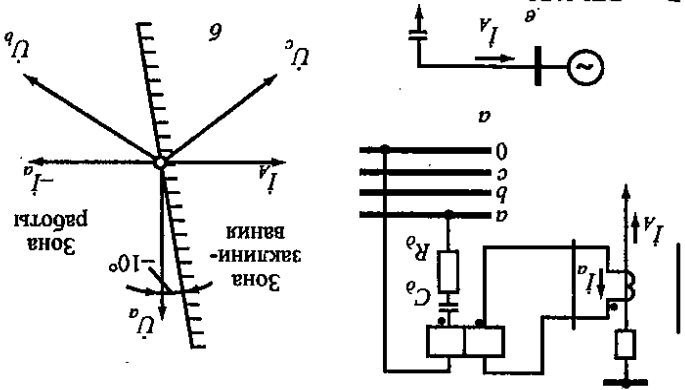


Рис. 48. Реле RBM178 в схеме автоматизации, действующей при повышении напряжения: *a* — схема включения реле; *б* — векторная диаграмма

*е* — поясняющая схема

### 13. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ С ТОКОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Схема включения реле направления мощности нулевой последовательности с токовой поляризацией и векторные диаграммы, показывающие его работу при коротких замыканиях на землю, в зоне и вне зоны действия защиты показаны на рис. 47.

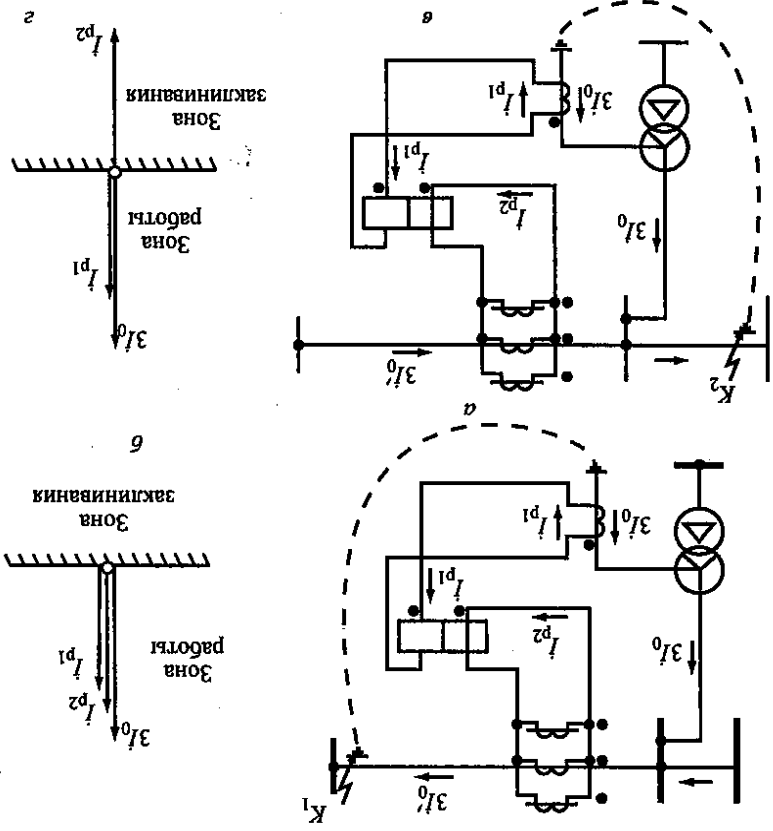


Рис. 47. Схема включения и векторные диаграммы реле направления мощности нулевой последовательности с токовой поляризацией при коротких замыканиях: а и в — распределение токов при КЗ соответственно в зоне и вне зоны действия защиты; б и z — диаграммы токов при КЗ соответственно в зоне и вне зоны действия защиты

величин положительные направления, указанные на рис. 10, б. Примем за ось отсчета вектор тока  $I$  (рис. 10, в). Вектор, изображающий напряжение на активном сопротивлении  $U_R$ , совпадает по направлению с вектором тока, а вектор напряжения на индуктивном сопротивлении  $U_L$  — отстает от вектора тока на  $90^\circ$ . Для получения суммарного вектора  $U$  произведем сложение векторов  $U_R$  и  $U_L$ . Вектор ЭДС  $E$  совпадает с вектором суммарного напряжения  $U$ . Как видно из векторной диаграммы, ток опережает напряжение на угол  $\phi$ . При этом чем больше отношение  $R/X_L$ , тем меньше угол  $\phi$ , и, чем меньше это отношение, тем ближе угол к  $90^\circ$ . Рассмотрим векторную диаграмму тока и напряжения для схемы, представленной на рис. 11, 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. 11, б. Примем за ось отсчета вектор тока  $I$ .

На векторной диаграмме изображены векторы напряжения  $U_R$ , совпадающего с вектором тока  $I$ ,  $U_L$ , опережающего его на  $90^\circ$ , и  $U_C$ , отставшего на  $90^\circ$ . Как видно из рис. 11, 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 ЭДС  $E$  совпадает с вектором напряжения  $U$ . Угол  $\phi$  зависит от соотношения всех трех сопротивлений  $R$ ,  $X_L$  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 ( $\phi = 0$ ). Последний случай имеет название резонанса с напряжением, или последовательного резонанса.

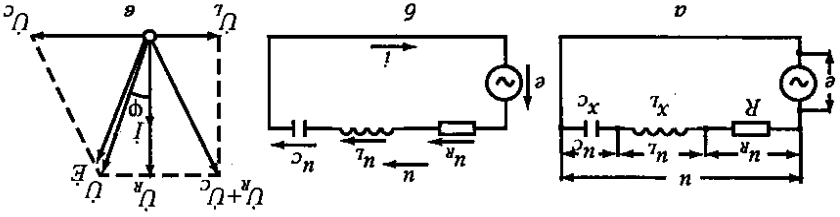


Рис. 11. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений: а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма

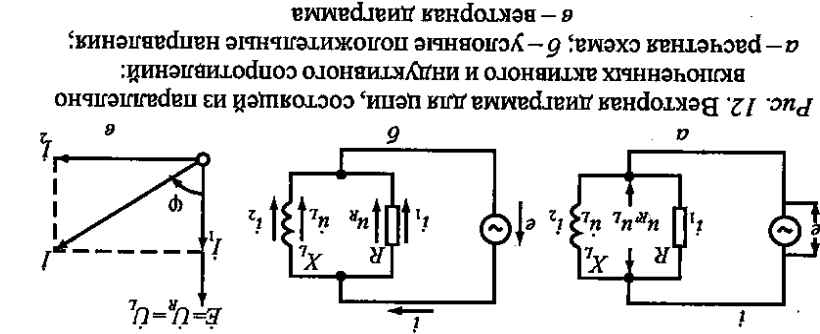


Рис. 12. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из параллельно включенных активного и индуктивного сопротивлений: а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений для схемы, представленной на рис. 12, а, когда суммарное сопротивление цепи  $Z$  состоит из двух параллельно включенных сопротивлений  $R$  и  $X_L$ . Примем для изображения величин положительные направления, указанные на рис. 12, б. Примем за ось отсчета вектор напряжения  $U_R$  и равный ему вектор  $U_L$  (рис. 12, в). При принятых положительных направлениях векторы тока и напряжения на активном сопротивлении изобразим совпадающими, а на индуктивном сопротивление вектор тока отстает от вектора напряжения на  $90^\circ$ . В соответствии с этим на рис. 12, в изобразим 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  $\varphi$  определяется из соотношения сопротивления  $R$  и  $X_L$  и может находиться в пределах от  $0$  до  $90^\circ$ .

Построим векторную диаграмму токов и напряжений для схемы, представленной на рис. 13, а, когда суммарное сопротивление расматриваемой цепи состоит из двух параллельно включенных сопротивлений  $R$  и  $X_C$ . Примем для изображения величин положительные направления, приведенные на рис. 13, б, а за ось отсчета вектор напряжения  $U_R$  и равный ему вектор  $U_C$  (рис. 13, в). Вектор ЭДС  $E$  совпадает с векторами напряжений  $U_R$  и  $U_C$ .

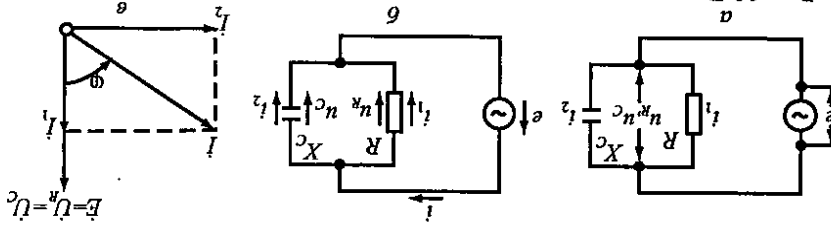


Рис. 13. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из параллельно включенных активного и емкостного сопротивлений: а — расчетная схема; б — условные положительные направления; в — векторная диаграмма

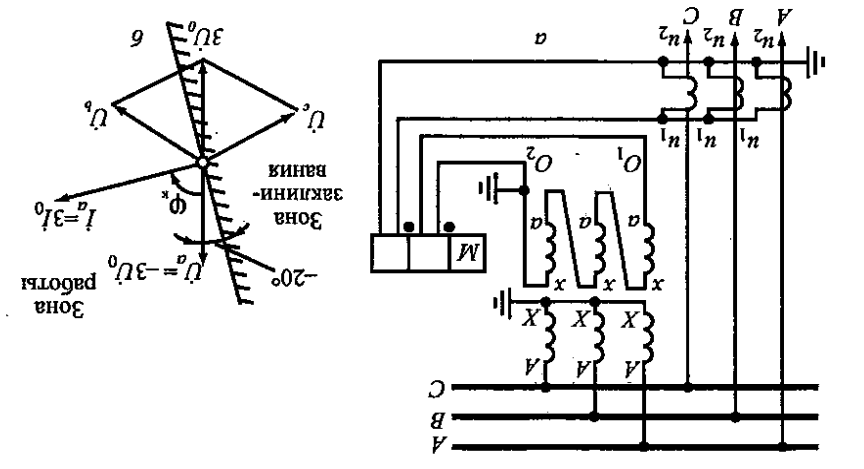
При однофазном коротком замыкании на фазе А вблизи места установки защиты  $U_A = 0$ , а первичное напряжение нулевой последовательности равно сумме напряжений неповрежденных фаз В и С

$$3U_0 = U_B + U_C.$$

Первичный ток  $3I_0$  при этом равен току, проходящему в поврежденной фазе  $I_A$ . Если подвести к реле вторичные ток и напряжение нулевой последовательности, совпадающие с первичными векторами, то угол между  $3I_0$  и  $3U_0$  будет равен примерно  $-120^\circ$ .

В расматриваемом случае реле должно действовать на отключение поврежденной линии. Однако момент на реле, равный  $K I U \sin(\varphi + 20^\circ)$ , оказывается отрицательным, так как  $\sin(\varphi + 20^\circ)$  при  $\varphi = -120^\circ$  имеет отрицательное значение. Поэтому для обеспечения правильной работы реле направления мощности нулевой последовательности необходимо одну из составляющих (ток или напряжение) перевести к концу вторичной обмотки трансформатора напряжения  $U_n$ , то вывод обмотки напряжения (также обозначенный точкой) должен быть присоединен к концу вторичной обмотки трансформатора напряжения  $O_2$ , соединенной в разомкнутый треугольник.

В соответствии с этой схемой включения зона работы реле выдана относительно напряжения  $-3U_0$ ; равного  $U_n$ . При этом вторичный ток  $3I_0 = I_A$  подает в зону работы реле, и оно правильно действует на отключение поврежденной линии.



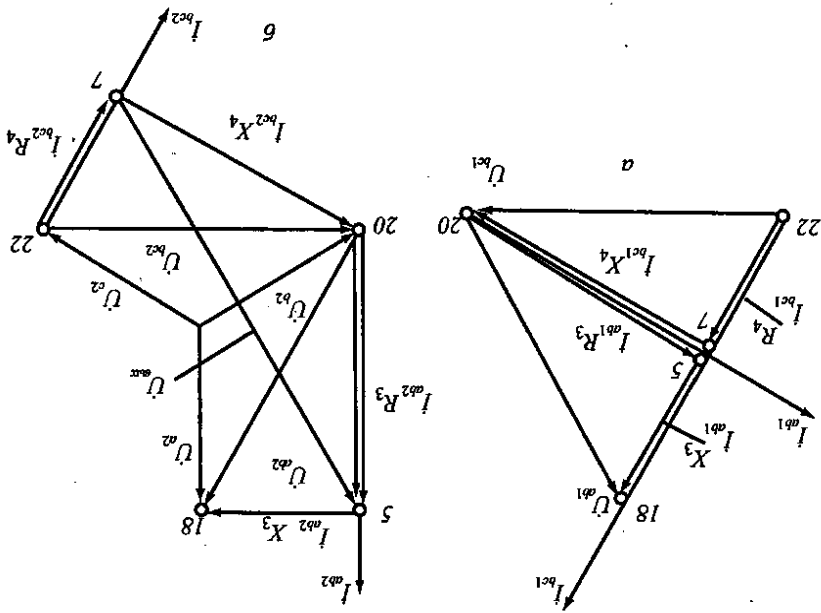


Рис. 45. Векторные диаграммы  $\PhiНОП$ :  
 а — при подведении напряжений прямой последовательности;  
 б — при подведении напряжений обратной последовательности;  
 на выходе  $\PhiНОП$  всегда существует небольшое напряжение, называемое напряжением небаланса.  
 Векторные диаграммы, поясняющие работу фильтра  $\PhiНОП$ , приведены на рис. 45.

## 12. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА ФИЛЬТРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

К реле направления мощности в защитах от замыканий на землю подводится ток и напряжение нулевой последовательности. Токовая обмотка этого реле включается в нулевой провод вторичных обмоток трансформаторов тока, соединенных в звезду. Обмотка напряжения реле включается в разомкнутый треугольник трансформаторов напряжения.  
 На рис. 46 показаны схема включения реле направления мощности типа РБМ178 и векторная диаграмма, характеризующая его работу при однофазном коротком замыкании на фазе А.

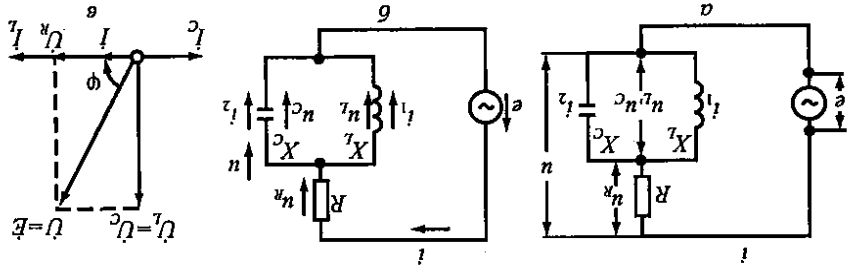


Рис. 14. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательного соединения активного сопротивления и двух параллельных сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$

Ток, проходящий по активному сопротивлению, изображается вектором  $I_1$ , совпадающим с вектором напряжения  $U_R$ , а ток, проходящий по емкостному сопротивлению, — вектором  $I_2$ , опережающим вектор падения напряжения  $U_C$  на угол  $90^\circ$ . Вектор тока  $I$ , проходящий в общей цепи, равен сумме векторов  $I_1$  и  $I_2$ . Угол  $\phi$  между векторами суммарного тока  $I$  и ЭДС  $E$  определяется соотношением сопротивлений  $R$  и  $X_C$  и может быть в пределах от  $0$  до  $-90^\circ$ .  
 Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений на схеме, представленной на рис. 14, а, когда суммарное сопротивление цепи  $Z$  представляет собой последовательное соединение активного сопротивления  $R$  и двух параллельных сопротивлений  $X_L$  и  $X_C$ . При этом для изображаемых величин положительные направления, указанные на рис. 14, б. Примем за ось отсчета вектор напряжения  $U_L$  и равный ему вектор напряжения  $U_C$  (рис. 14, в). Вектор тока  $I_1$  отстает, а вектор  $I_2$  опережает вектор  $U_L = U_C$ . Положительное направление напряжения  $u_R$  и результирующего тока  $i$  на схеме рис. 14, б принято совпадающим, и поэтому их векторы на рис. 14, 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 равнодействующий ЭДС  $E$ , изображающий ЭДС.  
 Угол  $\phi$  (см. рис. 14, 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.

фазам.

Общепринятые положительные направления ЭДС, 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

## 5. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, ЭДС И НАПРАВЛЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

нием соответственно.

При положительных направлениях токов и напряжений, показанных на рис. 15, б, векторная диаграмма трансформатора будет иметь вид диаграммы, представленной на рис. 15, в. Характерной особенностью этой диаграммы является то, что первичные токи и напряжения совпадают по направлению со вторичным током и напряжением соответственно.

Для того чтобы определить направление напряжения и тока во вторичной обмотке относительно напряжения и тока первичной обмотки трансформатора. Выводы называются полными и обозначаются точкой •, если стрелки идеальных, безынерционных амперметров, включенных, как показано на рис. 15, б, будут одновременно отклоняться вправо до максимального значения.

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

Векторная диаграмма идеального однофазного двухобмоточного трансформатора. Трансформатор является устройством, вторичная и первичная обмотки которого связаны общим магнитопроводом и, следовательно, связаны общим электромагнитным процессом (рис. 15, а).

Рис. 15. Векторная диаграмма токов и напряжений для идеального трансформатора:  
а — схема трансформатора; б — условные положительные направления токов и напряжений; в — векторная диаграмма

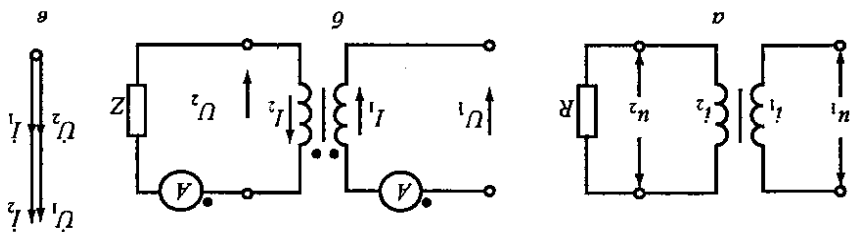
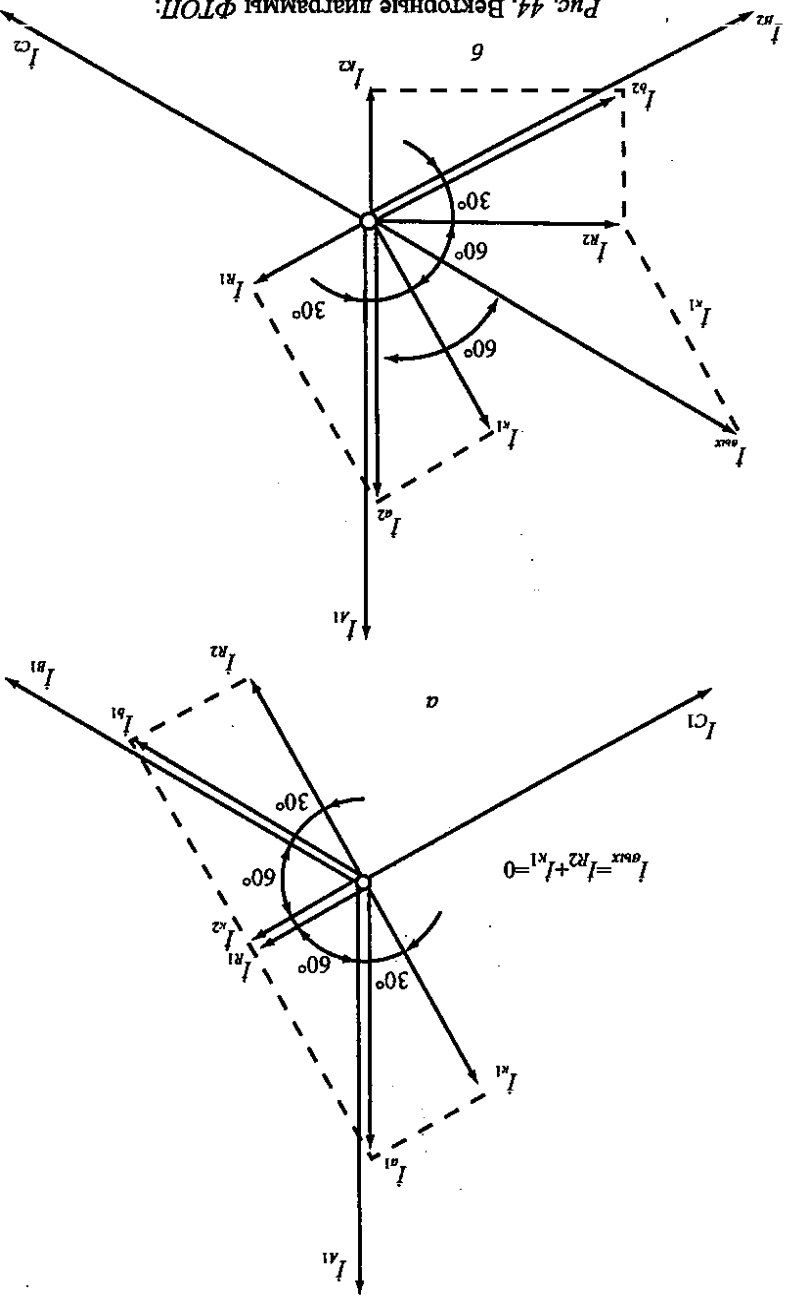


Рис. 44. Векторные диаграммы ФТОП:  
а — при подделении токов прямой последовательности; б — при подделении токов обратной последовательности





Положительное направление ЭДС каждой фазы генератора, обмотки которого соединены в звезду, принято от нулевого вывода к линейному (рис. 16, а).

Положительное направление ЭДС между линейными выводами генератора принимается обычно от фазы А к фазе В, от фазы В к фазе С к фазе А. 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 напряжения любого элемента относительно земли принято направление от элемента к земле.

Общепринятым положительным направлением тока любой фазы считается: для генераторов — от нуля генератора к его выводам; для силовых и измерительных трансформаторов с питающей стороны — от внешней цепи к выводам, с нагрузочной стороны — от выводов к нагрузке;

по линии — от шин в линию. Векторная диаграмма ЭДС и напряжений генератора. Конструкция трехфазных генераторов такова, что ЭДС на его трех выводах в векторном изображении представляется тремя равными векторами, сдвинутыми один относительно другого на  $120^\circ$ . При работе генератора на холостом ходу напряжение на его выводах будет одновременно с ЭДС достигать максимального значения.

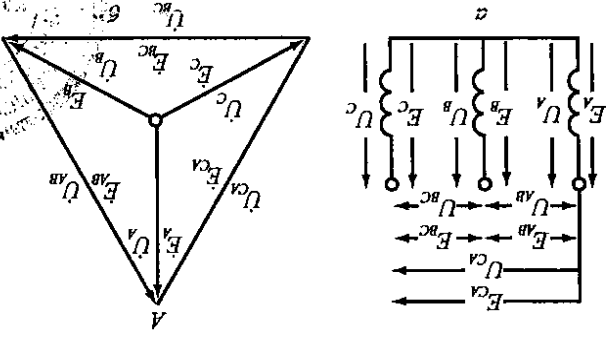


Рис. 16. Напряжение и ЭДС на выводах трехфазного генератора: а — условное изображение напряжений; б — векторная диаграмма

ЗАВАЙКАЛЬСКОЕ ПИМЭС  
№ 1-3.7  
"01" 08.12.1982 2003

обратной последовательности ФНОП, реле направления мощности РМ и максимального реле тока РТ.

Активно-емкостный фильтр тока обратной последовательности ФТОП состоит из двух конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  и двух активных регулируемых сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Значения активных сопротивлений фильтра устанавливаются так, что  $R_1 = \sqrt{3}X_1$ , а  $X_2 = \sqrt{3}R_2$ , где  $X_1$  и  $X_2$  — емкостные сопротивления конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Напряжение между выходными зажимами ФТОП должно быть равно нулю. В действительности в нормальных условиях в выходной цепи ФТОП всегда проходит незначительный по значению ток, называемый током небаланса.

Векторные диаграммы, поясняющие работу фильтра, приведены на рис. 44. Токи прямой последовательности в первичных обмотках Т1 и Т2 —  $I_{A1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{C1}$ ; токи, проходящие через вторичные обмотки Т1 и Т2 —  $I_{A1}$  и  $I_{B1}$ . Ток  $I_A$  разветвляется на ток  $I_{A1}$  и ток  $I_{A2}$ . Векторы этих токов направлены один относительно другого под углом  $90^\circ$  и обратно пропорциональны значениям  $R_1$  и  $X_1$ . Вектор большего по значению тока  $I_{A1}$  опережает вектор тока  $I_{A1}$  на угол  $30^\circ$ , а вектор тока  $I_{A2}$  отстаёт от вектора тока  $I_{A1}$  на угол  $60^\circ$ .

Соответственно вектор меньшего по значению тока  $I_{A2}$  опережает вектор тока  $I_{A1}$  на угол  $60^\circ$ . Сумма токов  $I_{A2} + I_{A1}$  на выходе от вектора тока  $I_{A1}$  на угол  $30^\circ$ . Сумма токов  $I_{A2} + I_{A1}$  на выходе ФТОП равна нулю. При подведении к фильтру токов обратной последовательности  $I_{A2}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{C2}$  во вторичных обмотках Т1 и Т2 протекают токи  $I_{A2}$  и  $I_{B2}$  также разветвляющиеся на токи, проходящие по активному и емкостному сопротивлению соответствующих плеч фильтра.

Векторы токов  $I_{A1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{C1}$  направлены под теми же углами по отношению к  $I_{A2}$  и  $I_{B2}$ , что и при подведении токов прямой последовательности  $I_{A1}$  и  $I_{B1}$ . Ток на выходе фильтра равен сумме токов  $I_{A2} + I_{A1}$ , по абсолютному значению в  $\sqrt{3}$  раз большему каждому из этих токов. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности ФНОП состоит из двух конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$  и двух активных регулируемых сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$  (см. рис. 43). Значения активных сопротивлений при настройке фильтра устанавливаются так, что  $R_3 = \sqrt{3}X_3$ , а  $X_4 = \sqrt{3}R_4$ , где  $X_3$  и  $X_4$  — емкостные сопротивления конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$ .

При симметричных режимах первичной цепи напряжения на выходе ФНОП должны быть равно нулю. В действительности

При положительных направлениях, принятых для ЭДС и напряжений, векторы напряжения и ЭДС 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 одинаковых вектора, сдвинутых один относительно другого на  $120^\circ$ .

Векторная диаграмма напряжений на стороне нагрузки трансформатора, построенная на общей векторной диаграмме с векторами напряжений питающей стороны, зависит от схемы соединения обмоток трансформатора, принятых положительных направлений напряжений и принятых обозначений фаз.

Для определения взаимного расположения векторов одноименных напряжений сторон высшего и низшего напряжения трансформатора введено понятие о группах соединения.

Понятие о группах соединения обмоток трансформатора зависит от взаимного расположения двух векторов одноименных напряжений.

На рис. 17, а приведена простейшая схема соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора в звезду, их полярность и стрелками указаны общие принятые положительные направления для напряжений.

Получаемые к трансформатору первичные напряжения изображены 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 изображены тремя векторами  $U_1, U_2$  и  $U_3$ , направлениями которых совпадают с  $U_a, U_b$  и  $U_c$ .

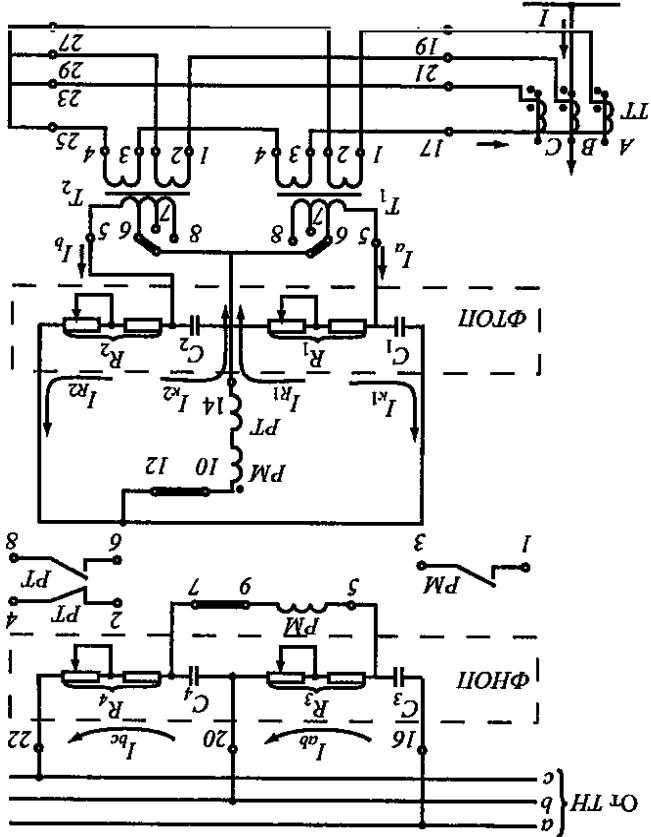
На рис. 18, а изображена другая схема соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора по схеме Y/Δ-11; а — схема соединения обмоток; б — векторная диаграмма.

## 11. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА ФИЛЬТРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Реле направления мощности, реагирующие на направление мощности обратной последовательности и защищающие от несимметричных КЗ, включаются на выход фильтров тока и напряжения об-ратной последовательности. Действие таких реле рассматривается на примере реле направления мощности обратной последовательности типа РМОП2.

Принципиальная схема реле РМОП2 приведена на рис. 43. Реле состоит из двух промежуточных трансформаторов тока  $T_1$  и  $T_2$ , филь-

Рис. 43. Схема электрических соединений реле РМОП2 и подключения к нему цепей тока и напряжения



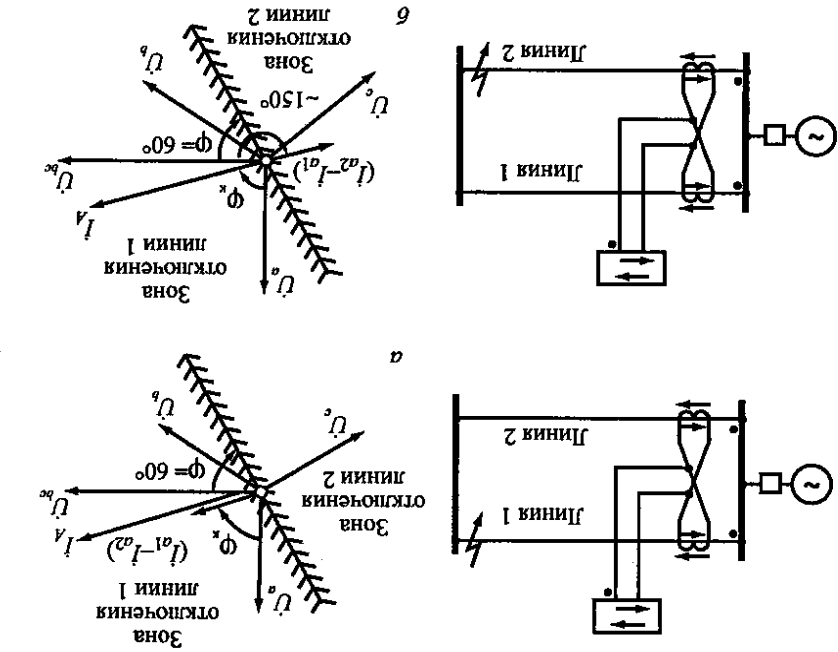


Рис. 42. Угловые характеристики реле РБМ271 и векторные диаграммы токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании: а — на линии 1 ( $I_{a1} > I_{a2}$ ); б — на линии 2 ( $I_{a2} > I_{a1}$ )

этом протекает разность вторичных токов одноименных фаз двух параллельных линий  $I_{a1} - I_{a2}$ , поскольку к выводу токовой обмотки реле, обозначенному точкой, подключены начало обмотки ТТ линии 1 и конец обмотки ТТ линии 2. Эта разность токов имеет положительный знак, так как  $I_{a1} > I_{a2}$  и вектор  $I_{a1} - I_{a2}$  совпадает по направлению с вектором  $I_{a1}$ , т. е. попадает в зону работы реле на отключение линии 1. Вращающий момент на реле при этом положителен, а угол между током и напряжением на обмотке реле примерно соответствует максимальной чувствительности.

При коротком замыкании на линии 2 векторная диаграмма имеет аналогичный вид. Однако при этом вектор разности токов  $I_{a2} - I_{a1}$  располагается в противофазе с вектором  $I_{a1}$ , так как  $I_{a2} > I_{a1}$ . При этом вектор  $I_{a2} - I_{a1}$  попадает в зону работы на отключение линии 2. Вращающий момент на реле отрицательный, так как угол между током и напряжением, подведенными к реле, равен примерно  $150^\circ$ .

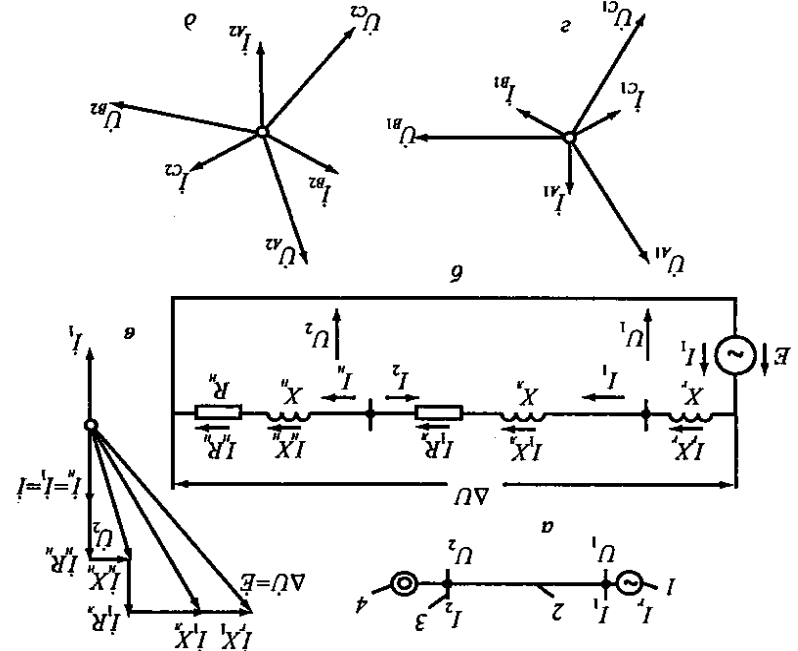


Рис. 19. Векторные диаграммы при нагрузочном режиме: а — схема рассматриваемой сети; б — расчетная схема замещения; в — векторная диаграмма одной фазы для рассматриваемого нагрузочного режима; г — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д — то же приемной подстанции; 1 — генератор; 2 — линия; 3 — подстанция; 4 — нагрузки

трансформатора и их полярность, когда вторичные обмотки соединены в треугольник.

Подведенные к трансформатору первичные напряжения изображены в виде трех векторов  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ . Векторы фазных напряжений  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_3$  в этом случае находятся, как векторы, направленные из общей нулевой точки векторной диаграммы к соответствующим вершинам треугольника.

**Векторные диаграммы нагрузочных режимов.** При вычислении токов и напряжений элементы энергосистемы заменяют в расчетных схемах активными и реактивными сопротивлениями. Генераторы, трансформаторы и реакторы обычно замещают индуктивными сопротивлениями. Большие сопротивление нагрузок электромехаников также замещается индуктивно-активными сопротивлениями.

На рис. 19, а представлена схема электрической трехфазной системы, которая состоит из генератора, линии и электромехаников.

# 10. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ НАПРАВЛЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Реле направления мощности, применяемые в схемах направленной поперечной дифференциальной защиты от междуфазных коротких замыканий, включаются на разность токов одноименных фаз двух линий, как показано для одной из фаз на рис. 41 (30-градусная схема). Реле типа РБМ271 включают по 90-градусной схеме. При коротком замыкании на одной из защищаемых параллельных линий релейная мощность двустороннего действия замыкает тот из двух своих контактов, который разрешает пусковым органам защиты подействовать на отключение поврежденной линии.

Угловые характеристики релей РБМ271 и векторные диаграммы, поясняющие его работу при коротких замыканиях на защищаемых линиях, показаны на рис. 42. Угловые характеристики релей построены относительно напряжения  $U_{bc}$ , поскольку так же, как в случае, рассмотренном выше, вывод обмотки напряжения реле, обозначенный точкой, подключен к фазе  $b$ .

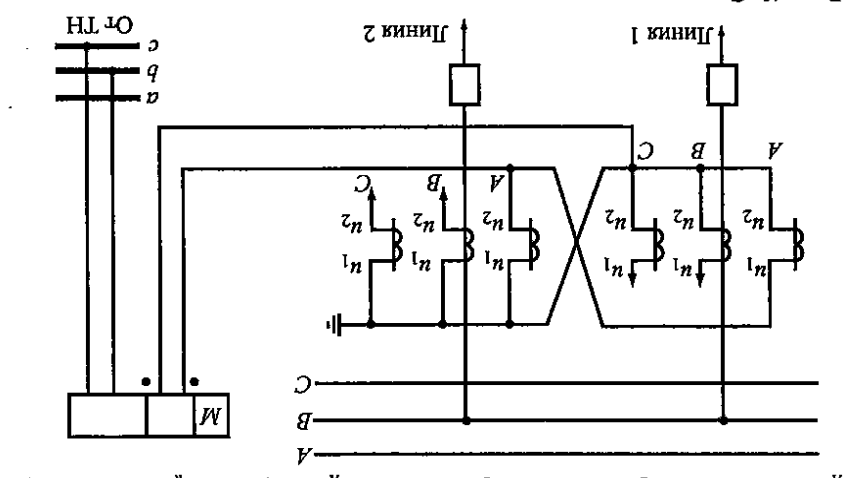


Рис. 41. Схема включения одного элемента релей направления мощности двустороннего действия в поперечной дифференциальной защите по 30-градусной схеме (на ток  $I_a$  и напряжение  $U_{ac}$ )

Поскольку режим симметричный, схема замещения для расчета может быть изображена для одной фазы (рис. 19, б).

На этой схеме генератор замещен ЭДС и индуктивным сопротивлением  $X$ , линия — индуктивным сопротивлением  $X''$  и активным сопротивлением  $R''$ , а нагрузка — индуктивным сопротивлением  $X''$  и активным сопротивлением  $R''$ . На рис. 19, б указаны токи и напряжения, которые нужно изобразить на векторной диаграмме. Из схемы замещения видно, что токи нагрузки  $I''$  по линии от станции  $I'$  и генератора  $I'$  равны. Поэтому эти токи изображаются на векторной диаграмме совпадающими. Ток по линии от подстанции  $I_2$  равен указанным выше токам, но его положительное направление принято встречным. В тот момент, когда ток  $I'$  достигает положительного максимума, ток  $I_2$  достигает своего отрицательного максимума (минимума). Поэтому вектор тока  $I_2$  изображается сдвинутым на  $180^\circ$  относительно вектора тока  $I'$ .

Поскольку положительные направления токов  $I'$ ,  $I'$  и  $I''$  приняты совпадающими по контуру с положительным направлением ЭДС  $E$ , а положительные направления падений напряжения от токов приняты совпадающими с положительными направлениями этих токов, векторы падений напряжения на векторной диаграмме совпадают с этими токами на индуктивных сопротивлениях.

Приведенная на рис. 19, в векторная диаграмма справедлива для любой фазы электрической системы. На практике обычно бывает нужна не вся векторная диаграмма, приведенная на рис. 19, а лишь ее часть, например токи по линии и напряжения на шинах подстанции. На рис. 19, г и д изображены две такие трехфазные векторные диаграммы соответственно для станции и подстанции.

Как видно из диаграмм, на линиях без ответвлений основным оттичем векторной диаграммы одного конца линии от другого является изображение векторов тока одноименных фаз под углом  $180^\circ$ . Векторные диаграммы при коротких замыканиях. Токи и нагрузки пренебрегаем, что обычно допустимо из-за их относительно малого значения по сравнению с токами коротких замыканий. На рис. 20, а показана схема, состоящая из трехфазной системы, линии и подстанции, в точке  $K$  которой произошло трехфазное короткое замыкание.

Поскольку режим трехфазного короткого замыкания симметричен, то для расчета достаточно рассмотреть одну фазу. На рис. 20, б приведена расчетная схема замещения для рассматриваемого случая.

по присоединения.

На том же рисунке построен вектор первичного тока  $I_1$  фазы A, проходящего в первичной цепи при трехфазном коротком замыкании на запитываемой линии, и совпадающий с ним вектор вторичного тока  $I_2$ . Этот вектор расположен в зоне работы реле, вследствие чего оно срабатывает и замыкает цепь на отключение поврежденного

ра тока фазы  $A$ . Поскольку вывод обмотки напряжения, обозначенный точкой, подключен к фазе  $b$ , угловая характеристика реле направления мощности построена относительно вектора отрицательного напряжения  $U_{bc}$ . Зона работы относительно напряжения  $U_{bc}$ , когда вращающийся момент имеет положительный знак, ограничена углами от  $-135$  до  $0^\circ$  и от  $0$  до  $+45^\circ$ .

Подключение обмоток реле к цепям тока и напряжения и поведение реле при трехфазном коротком замыкании рассмотрены на примере включения реле направления мощности типа РМЛ71 по 90-градусной схеме (рис. 40). Реле включено на ток  $I''$  фазы А и линейное напряжение  $U_{bc}$ . При этом к однополярным выводам реле, обозначенным точками, подведены напряжение фазы В (начало вектора напряжения  $U_{bc}$ ) и ток от начала второйной обмотки и, трансформатора-пряжения  $U_{bc}$ ) и ток от начала второйной обмотки и, трансформатора-

и вторичных обмоток трансформаторов тока

ем и током при коротком замыкании;  $I_1$  и  $I_2$  — начала первичных и вторичных обмоток трансформатора тока;  $I_2$  и  $I_2'$  — концы первичных

$n$  – схема включения;  $o$  – векторная диаграмма при трехфазном коротком замыкании на защищаемом присоединении;  $\Phi^k$  – угол между напряжением и

Рис. 40. Включение реле РБМ171 по 90-градусной схеме:

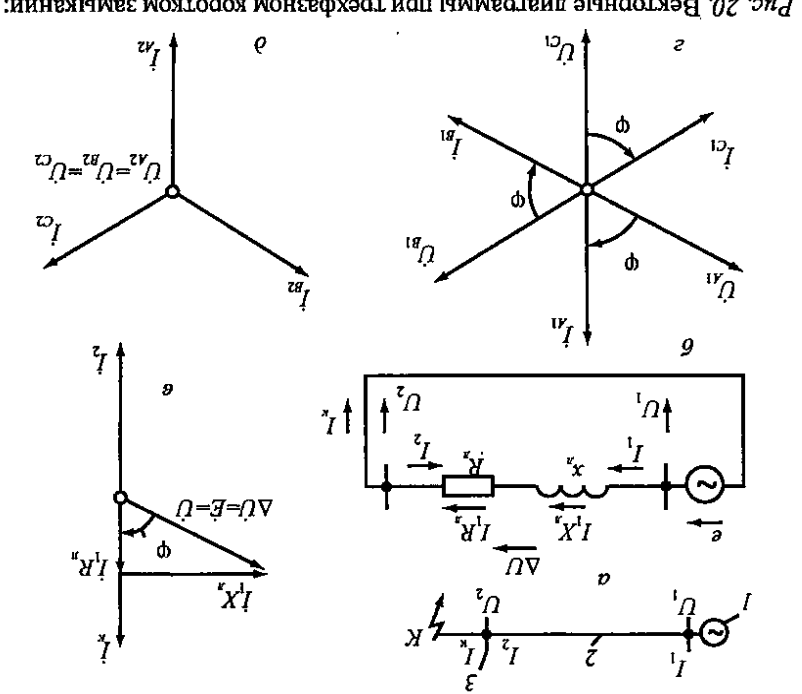
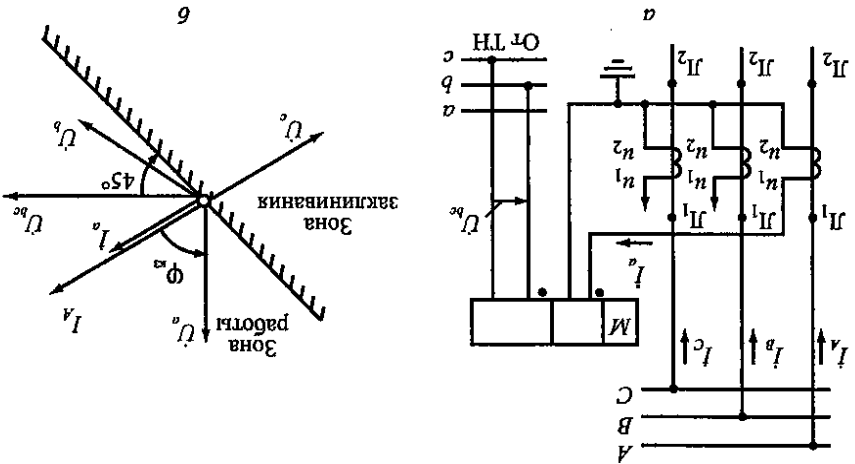


Рис. 20. Векторные диаграммы при трехфазном коротком замыкании: а – схема сети; б – расчетная схема замещения; в – векторная диаграмма для одной из фаз; г – трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д – то же приемной подстанции; е – энергосистема; ж – линия; з – подстанция

индуктивного и активного сопротивлений линий. Для воздушных линий угол  $\phi$  лежит в пределах 60–83°. На рис. 20, 2 и 3 изображены векторные диаграммы токов и напряжений трех фаз соответственно для энергосистемы и приемной подстанции.

чая. Для простоты изложения сопротивления системы принято равным нулю. На этой же схеме указаны принятые положительные направления токов и напряжений. Построение векторной диаграммы для одной фазы начинаем с построения в произвольном направлении вектора тока  $I_3$  и равного ему по амплитуде и направлению вектора тока  $I_1$ . Вектор тока  $I_2$  изображен под углом  $180^\circ$  к вектору тока  $I_1$ . 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, фазная ЭДС изображается вектором  $E$ . Вектор тока  $I_1$  отстает от вектора напряжения на шинах станции  $U_1$  на угол  $\phi$ , который зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений линии.

Поскольку рассмотрен случай трехфазного короткого замыкания вблизи шин подстанции, то напряжения на шинах подстанции равно нулю, что и отображает векторная диаграмма на рис. 20, *д*. На рис. 21, *а* изображена такая же электрическая система, но в точке К показано двухфазное короткое замыкание. Для расчета на рис. 21, *б* приведена расчетная схема и указаны положительные направления токов и напряжений. На рис. 21, *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  $I_a^*$  и совпадающий с ним вектор тока  $I_{b1}$ . Вектор тока

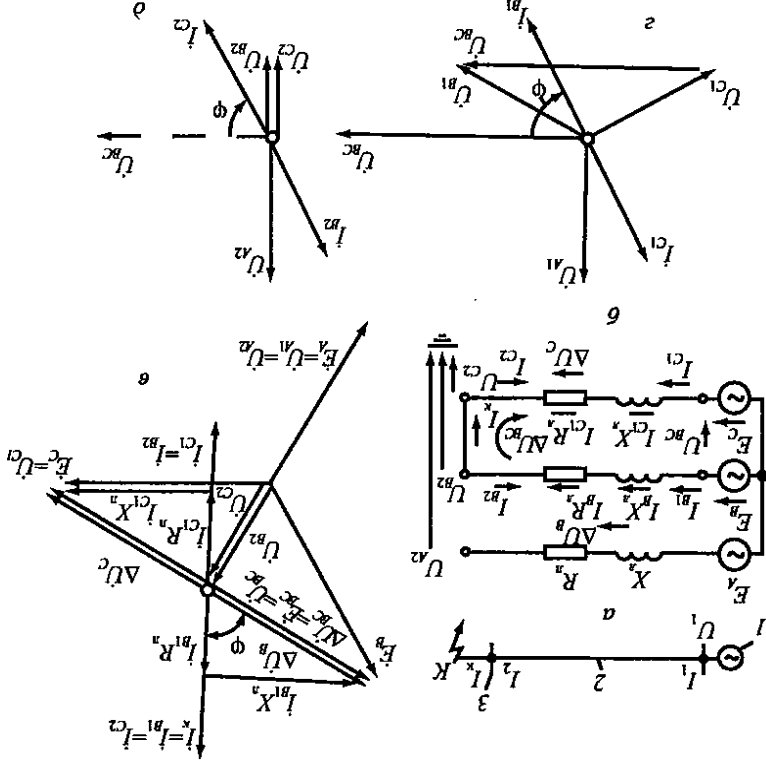


Рис. 21. Векторные диаграммы при двухфазном коротком замыкании: *а* — схема сети; *б* — расчетная схема замещения; *в* — векторная диаграмма поврежденных фаз; *г* — трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; *д* — то же принятой подстанции; 1 — энергосистема; 2 — линия; 3 — подстанция

Векторные диаграммы реле направления мощности в защитах от междуфазных коротких замыканий

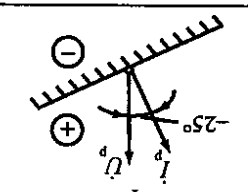
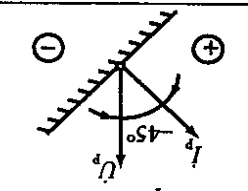
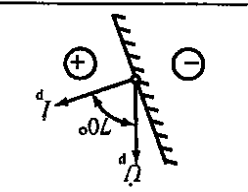
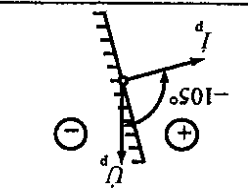
Напряжения, подводимые к реле	Ток, подводимый к реле	Векторные диаграммы токов и напряжений на реле
$U_{ac}$ $U_{ba}$ $U_{cb}$	$I_a$ $I_b$ $I_c$	30-градусная схема
$U_{ac}$ $U_{ba}$ $U_{cb}$	$I_a - I_b$ $I_b - I_c$ $I_c - I_a$	60-градусная схема с включением на разность фазных токов
$U_a$ $U_b$ $U_c$	$-I_a$ $-I_b$ $-I_c$	60-градусная схема с включением на фазные токи
$U_{ab}$ $U_{bc}$ $U_{ca}$	$I_c$ $I_a$ $I_b$	90-градусная схема

В защитах от междуфазных коротких замыканий реле направления мощности обычно включаются по схемам, приведенным в табл. 2.

Максимальный вращающий момент в сторону срабатывания реле имеет место при  $\varphi_p = -45^\circ (+315^\circ)$ , а в сторону заклинивания – при  $\varphi_p = +135^\circ$ . В обоих случаях направление вектора тока совпадает с линией 2–2.

Характеристика реле направления мощности РБМ178, применяемого в схемах защиты от замыканий на землю, приведена на рис. 39. Угловые характеристики некоторых реле направления мощности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Угловые характеристики реле направления мощности		Выражение момента вращения	Угловая характеристика реле
Реле типа РБМ171 и РБМ271, включенные на полные токи и напряжение без дополнительного сопротивления		$kU_p I_p \cos(\varphi_p + 25^\circ)$	
Реле типа РБМ171 и РБМ271, включенные на полные токи и напряжение с дополнительным сопротивлением		$kU_p I_p \cos(\varphi_p + 45^\circ)$	
Реле типа РБМ178 и РБМ278, включенные на напряжение и ток нулевой последовательности		$kU_p I_p \sin(\varphi_p + 20^\circ)$	
Реле типа РМОП1 и РМОП2, включенные на напряжение и ток обратной последовательности		$kU_p I_p \cos(\varphi_p + 105^\circ)$	

Примечания: Знаком «+» обозначена зона работы реле, знаком «-» — зона заклинивания реле.

$I_{c1}$ , равный току  $I_{b1}$ , но имеющий с ним встречное положительное направление, изображается вектором, сдвинутым на  $180^\circ$  относительно вектора тока  $I_{b1}$ . Векторы падения напряжения  $I_{b1}R_n$  и  $I_{c1}R_n$  строятся совпадающими с соответствующими векторами токов.

Векторы падений напряжения на индуктивных сопротивлениях  $I_{b1}X_n$  и  $I_{c1}X_n$ , опережают векторы своих токов на  $90^\circ$ . На каждой фазе падение напряжений  $\Delta U_{b1}$  и  $\Delta U_{c1}$  равно сумме падений напряжений на активном и реактивном сопротивлениях. Положительное направление для результирующего падения на  $\Delta U_{bc}$  совпадает с положительным направлением для падений  $\Delta U_{bc}$ , совпадая с положительным направлением для падений напряжения  $\Delta U_{b1}$  и встречно с положительным направлением для падений напряжения  $\Delta U_{c1}$ . Поэтому вектор  $\Delta U_{bc}$  должен изображаться как разность векторов  $\Delta U_{b1}$  и  $\Delta U_{c1}$ . Таким же вектором  $E_{bc}$ , которая имеет положительное направление, совпадающее с положительным направлением ЭДС фазы В и встречное с положительным направлением ЭДС фазы С. Исходя из вектора междуфазной ЭДС  $E_{bc}$ , строим звездку векторов фазных ЭДС  $E_a$ ,  $E_b$  и  $E_c$ . Из векторной диаграммы видно, что угол  $\varphi$  между вектором тока  $I_*$  и вектором междуфазного напряжения  $U_{bc}$  определяется соотношением индуктивного и активного сопротивления линии, как и при трехфазном коротком замыкании.

Фазные напряжения в месте короткого замыкания равны: на фазе А ( $U_{a2}$ ) значению фазной ЭДС, а на фазах В и С ( $U_{b2}$  и  $U_{c2}$ ) половине фазной ЭДС. На практике при векторном изображении напряжений 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. 21, а с другой стороны приемной подстанции — как показано на рис. 21, б.

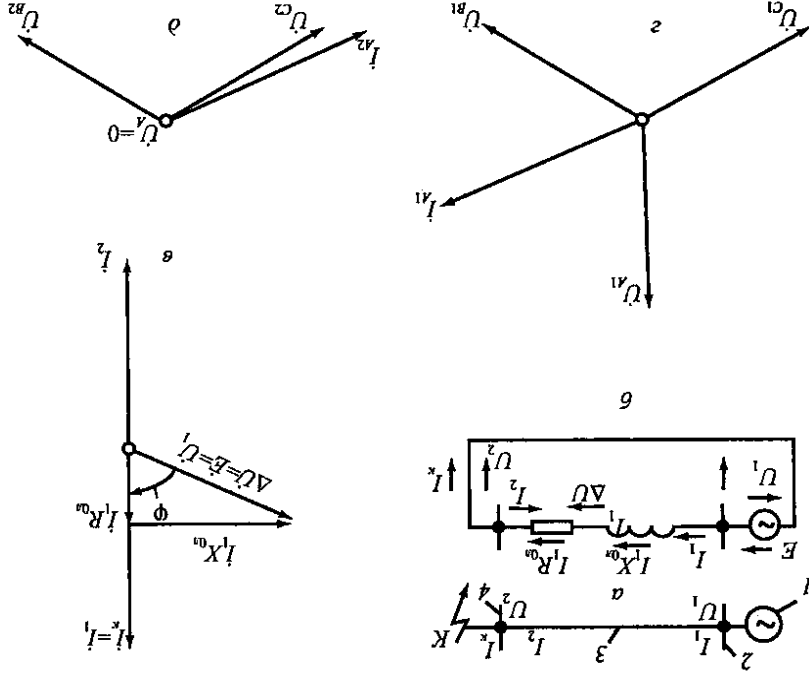
На рис. 22 приведена схема и векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном коротком замыкании в точке К.

Сопротивления элементов электрической системы при однофазном коротком замыкании отключаются от сопротивлений при трехфазном и двухфазном коротком замыкании. В расчетной схеме сопротивление линии представлено индуктивным и активным сопротивлениями  $X_{0n}$  и  $R_{0n}$ . На этой схеме показаны положительные направления токов и напряжений.

На векторной диаграмме рис. 22, в вектор тока  $I_*$  равен вектору тока  $I_1$ . Вектор тока  $I_2$  откладывается под углом  $180^\circ$  относительно вектора тока  $I_1$ , равного по величине, но имеющего встречное положительное направление.

Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании за трансформатором с соединением обмоток звезда – треугольник. На рис. 23, а изображен трансформатор, обмотки которого соединены по схеме звезда – треугольник. На этой же схеме указаны принятые положительные направления токов, а также указаны полюсности первичных и вторичных обмоток трансформатора. Для упрощения прием, что сопротивление обмоток трансформатора равно нулю.

Рис. 22. 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



Векторная диаграмма токов и напряжений при двухфазном коротком замыкании за трансформатором с соединением обмоток звезда – треугольник. На рис. 23, а изображен трансформатор, обмотки которого соединены по схеме звезда – треугольник. На этой же схеме указаны принятые положительные направления токов, а также указаны полюсности первичных и вторичных обмоток трансформатора. Для упрощения прием, что сопротивление обмоток трансформатора равно нулю.

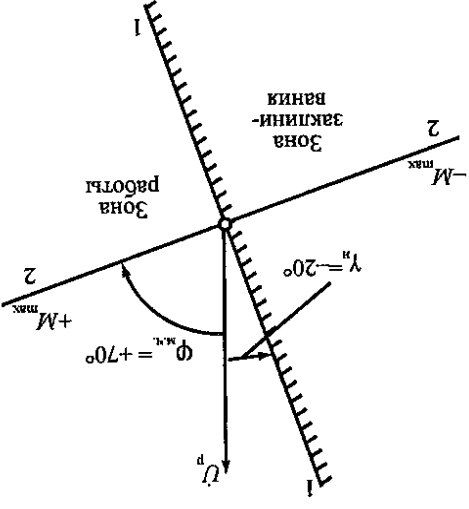
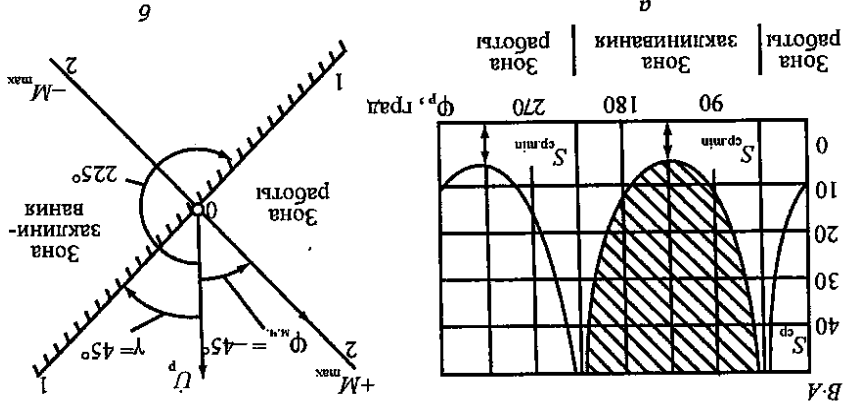


Рис. 39. Угловая характеристика реле направления мощности типа RBM178 для защиты от замыканий на землю

При анализе поведения реле используется упрощенная угловая характеристика, где минимальная мощность срабатывания реле предполагается равной нулю. Зоны работы и заклинивания разделяются проходящей через начало координат прямой  $I-I$ , которую принято называть линией изменения знака вращения момента, а угол наклона этой линии к вектору напряжения – углом изменения знака вращения момента.

Рис. 38. Угловые характеристики реле направления мощности типа RBM171





Для расматриваемого случая, когда  $I_{AV} = I_{BV}$ , ток фазы C со стороны звезды равен:

$$I_{CV} = -(I_{AV} + I_{BV}).$$

или

$$I_{AV} + I_{BV} + I_{CV} = 0$$

фаз равна нулю  
соединенных в звезду, согласно закону Кирхгофа сумма токов трех  
При принятых положительных направлениях токов в обмотках,  
Отсюда следует, что если  $I'_B = I'_{BV}$  то и  $I'_{AV} = I'_{BV}$ .

где  $k$  — коэффициент трансформации трансформатора.

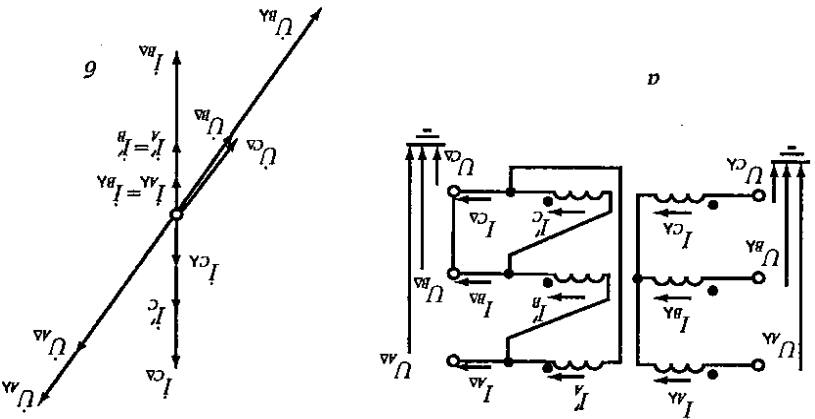
$$I'_A = \frac{\sqrt{3}}{k} I_A; I'_B = \frac{\sqrt{3}}{k} I_B \text{ и } I'_C = \frac{\sqrt{3}}{k} I_C,$$

ношением:

Первичные и вторичные токи проходят по обмоткам, имеющим  
общий магнитопровод, и потому связаны пофазно следующим соотношением:

Векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора при  
двухфазном коротком замыкании на выводах обмоток, соединенных  
в треугольник. Для построения векторной диаграммы токов в об-  
мотках, соединенных в треугольник и в звезду, рассмотрим, как бу-  
дет растекаться ток  $I'_{BV}$  на два тока  $I'_B$  и  $I'_C$ . Отметим, что ток  $I'_B$   
равен току  $I'_{AV}$  так как ток  $I'_{AV}$  равен нулю.

Рис. 23. Двухфазное короткое замыкание за трансформатором,  
соединенным по схеме звезда — треугольник:  
а — исходная схема; б — векторная диаграмма



4

На рис. 38, а угловая характеристика приведена в прямоуголь-  
ной, а на рис. 38, б — в полярной системах координат.

$$M^p = k U^p I^p \cos(\varphi^p + 45^\circ).$$

уравнением

На рис. 38 приведены угловые характеристики реле напряжения  
жесткая  $U^p$  совпадает с направлением вращения часовой стрелки.

где  $S^p = U^p I^p$  — полная мощность,  $U^p$  — напряжение между реле,  $I^p$  — ток,  $\varphi^p$  — угол между вектором напряжения и вектором тока.

$$S^p = f(\varphi^p) \quad \text{при } I^p = \text{const},$$

или как зависимость мощности срабатывания реле от угла между  
током и напряжением при неизменном значении тока

$$U^p = f_1(\varphi^p) \quad \text{при } I^p = \text{const},$$

Угловую характеристику принято изображать графически как  
зависимость напряжения срабатывания реле от угла между током и  
напряжением при неизменном значении тока

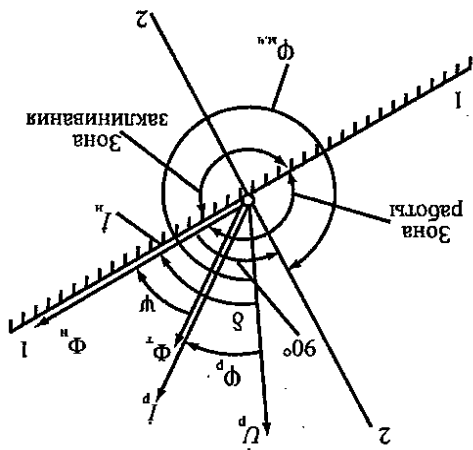
$$M^p = k U^p I^p \cos(\varphi^p - \varphi^{м.ч.}).$$

теристикой

мы реле от тока и напряжения и угла между ними выражается харак-  
теристикой

Зависимость вращения по-  
момента подвижной систе-  
мы от угла между током и напряжением и угла между ними выражается харак-  
теристикой

Рис. 37. Векторная диаграмма реле





а — схема соединения токовых цепей; б — векторная диаграмма первичных, трансформатора  $Y/\Delta-11$ ;

вторичных токов и токов в плечах защиты

обмоток и принятыми положительными направлениями векторы токов  $I_{A2}$ ,  $I_{B2}$  и  $I_{C2}$  вторичных обмоток трансформатора, а также векторы токов  $I_{A3}$ ,  $I_{B3}$ ,  $I_{C3}$  вторичных обмоток трансформатора по направлению с векторами токов  $I_{A1}$ ,  $I_{B1}$ ,  $I_{C1}$ .

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

Векторы вторичных токов трансформатора тока со вторичной стороны силового трансформатора обозначены  $I_{A5}$ ,  $I_{B5}$ ,  $I_{C5}$ ,  $I_{A6}$ ,  $I_{B6}$ ,  $I_{C6}$ .

Для токов, подводенных к релю от трансформаторов тока, соединенных в звезду, приняты те же положительные направления, что и для токов, проходящих во вторичных обмотках трансформаторов тока. Поэтому они изображаются теми же векторами.

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  $I_{\Delta 6}$  должен быть равен вектору  $I_{\Delta 5}$  и одинаково направленным.

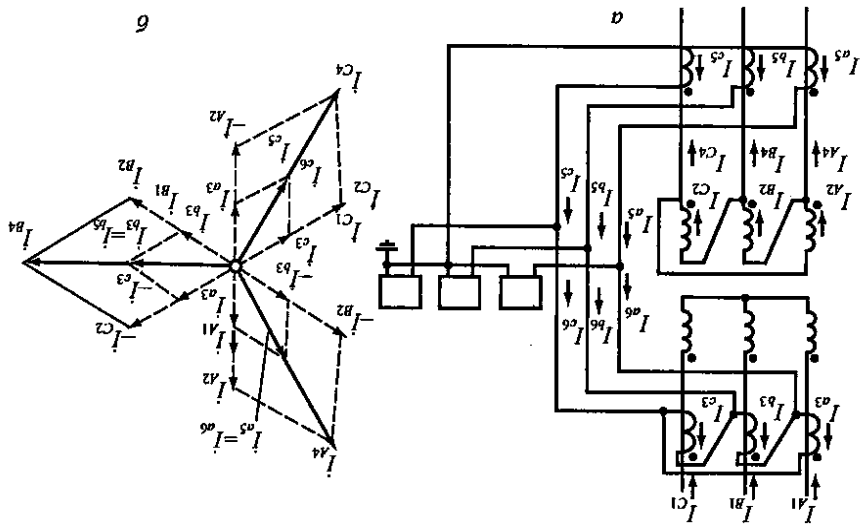


Рис. 36. Токовые цепи дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора  $Y/\Delta-11$ :

соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой. Вторичные обмотки соединяют в звезду с заземленной нулевой точкой и в разомкнутый треугольник, как показано на рис. 24, а.

При изображении напряжений (рис. 24, б) трансформатора напряжения сначала строятся из обмотке высшего напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ . 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 совпадают.

Аналогично вектор  $U'_b$  совпадает с вектором  $U_b$ , а вектор  $U'_a$  — с вектором  $U_a$ . Концы вектора  $U'_a$  совпадают с началом вектора  $U'_c$ , т. е. напряжение  $3U_0$  на выходе вторичных обмоток трансформатора направлено равно нулю. Такое соединение вторичных обмоток трансформатора напряжения используется для подключения приборов и реле, фиксирующих замыкания на землю одной из фаз первичной цепи.

Для проверки направленных защит от замыканий на землю концы вторичной обмотки фазы  $B$ , имеющий потенциал относительно земли, равный сумме вторичных напряжений фаз  $C$  и  $B$ , выводятся на панель защит и называется испытательной жилкой.

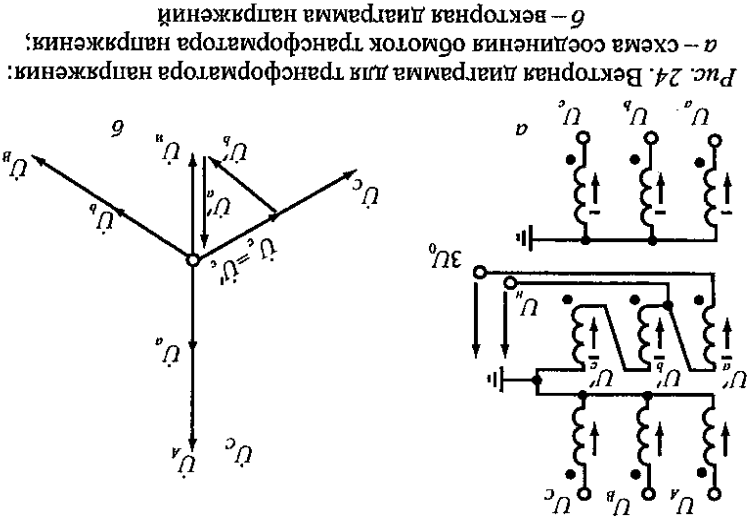


Рис. 24. Векторная диаграмма для трансформатора напряжения: а — схема соединения обмоток трансформатора напряжения; б — векторная диаграмма напряжений

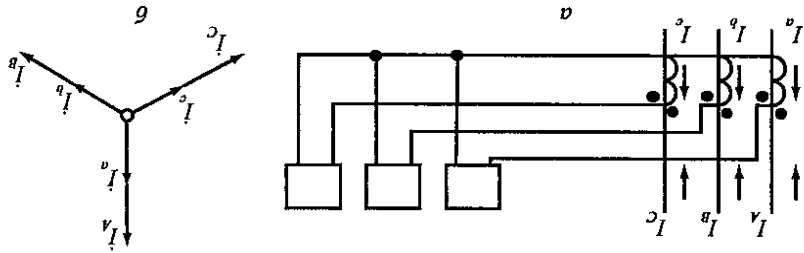
Вектор, изображающий напряжение испытательной жилки  $U_n$ , находится как сумма векторов  $U'_c$  и  $U'_b$ .

Для напряжений вторичных обмоток, соединенных в звезду, векторы напряжений соответствующих фаз совпадают с первичными и вторичными токами трансформаторов тока. Первичная обмотка трансформатора тока включается в первичную цепь. Вторичные обмотки трансформаторов могут соединяться по-разному. Рассмотрим схему соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в неполную звезду по схеме рис. 26, а. Векторы вторичных токов фаз А и С совпадают с соответствующими векторами, изображающими первичные токи фаз А и С во всех режимах.

На рис. 26, б — приведены диаграммы первичных и вторичных токов соответственно для разных видов коротких замыканий. Поскольку на фазе В отсутствует трансформатор тока, то при однофазном коротком замыкании фазы В во вторичных цепях токи отсутствуют.

Векторное изображение тока проходящего в общем проводе зависит от принятого для него положительного направления. Этот ток, если для тока, проходящего по общему проводу, принять положительным направлением, встречное положительному направлению для жилки

Рис. 25. Схема соединения трансформаторов тока, соединенных по схеме звезда (а) и векторная диаграмма токов (б)



ми с векторами одноименных фаз первичных напряжений. Вторые напряжения соответствующих фаз изображаются совпадающими для напряжений вторичных обмоток, соединенных в звезду, векторы напряжений соответствующих фаз совпадают с первичными и вторичными токами трансформаторов тока. 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. 25, а).

## 8. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

(150–250 В) используют два соединительных проводника (обыкновенных). Вектор тока отключается от подаваемого напряжения, совместного с вертикальной линией 0–180°. При затарании светодiodа со знаком + вектор тока отключается в зоне + (0–180°), а при затарании светодiodа со знаком – вектор тока отключается в зоне – (180–0°).

Рис. 35. Снятие векторных диаграмм: а — схема подключения внешних цепей к прибору; б — ось отсчета напряжения и зоны расположения векторов тока

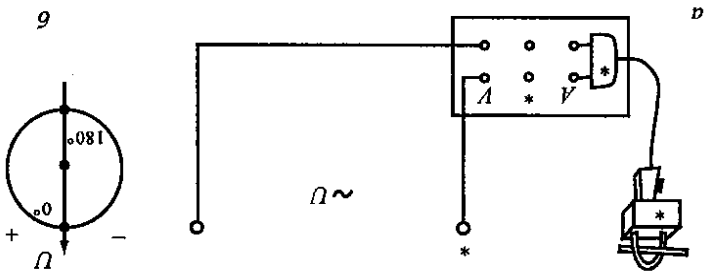


рис. 35 при нажатой кнопке ВА/ф. Измерения производят согласно *Снятию векторных диаграмм*. Измерения производят согласно

заяния прибора необходимо умножать на 4). При напряжении до 125 (250) В используют обыкновенные соединительные проводники, а до 500 В — соединительный проводник с делителем напряжения (ИП1500) и обыкновенный проводник (показание прибора необходимо умножать на 4). При напряжении до 125 (250) В используют обыкновенные соединительные проводники, а до 500 В — соединительный проводник с делителем напряжения (ИП1500) и обыкновенный проводник (показание прибора необходимо умножать на 4). При напряжении до 125 (250) В используют обыкновенные соединительные проводники, а до 500 В — соединительный проводник с делителем напряжения (ИП1500) и обыкновенный проводник (показание прибора необходимо умножать на 4).

На векторной диаграмме на рис. 36, б показаны векторы токов на диаграмме токов. На этой же схеме указаны положительные направления для изображаемых на векторной диаграмме токов. На этой же схеме указаны положительные направления для изображаемых на векторной диаграмме токов. На этой же схеме указаны положительные направления для изображаемых на векторной диаграмме токов.

Токовые цепи дифференциальной защиты и автоматизации устройств релейной защиты и автоматизации. Применение векторных диаграмм в практике наладки и эксплуатации.

В настоящем и последующих параграфах приведены примеры применения векторных диаграмм в практике наладки и эксплуатации.

Для напряжения масштабе откладываем вектор напряжения  $U$ . Отключаем измеремое напряжение и на прибор подаем ток с помощью токоизмерительных клещей.

Предположим, по лимбу мы отчитали угол  $150^\circ$  (инд.). От оси отсчета откладываем  $150^\circ$  по часовой стрелке и в масштабе, принятом для тока, откладываем вектор тока  $I$ . Как видно из рис. 32, е, угол между током  $I$  и напряжением  $U$  составляет  $100^\circ$ . На векторной диаграмме рис. 32, з показано положение вектора напряжения  $U_{ab}$  вектора измеренного тока  $I$  если замер показал, например сдвиг на  $90^\circ$  (инд.), и векторов фазных и междуфазных напряжений, если напряжение  $U_{ab}$  является одним из напряжений трехфазной симметричной системы.

**Снятие векторной диаграммы прибором «Потенциал».** Прибор «Потенциал» позволяет измерять токи и напряжения, а также углы между током и напряжением. Ток, напряжение и угол между ними измеряется микроамперметром. Прибор «Потенциал», в отличие от прибора ВАФ, не требует подключения к нему трехфазной системы напряжений. Переключение фаз проверяемой системы напряжений, определяется с помощью светодиодов, сила свечения которых меняется за счет смещения нейтрали, образованной двумя резисторами в фазах B и C и конденсатором в фазе A.

Фазочувствительный орган реагирует на фазовый сдвиг между подведенными к прибору напряжением и током или двумя напряжениями. Сила тока измеряется без разрыва цепи с помощью приставки — токоизмерительных клещей.

**Измерение тока.** Вилку токоизмерительных клещей

устанавливают в токовые гнезда (рис. 33). Кнопку VA/φ устанавливают в отжатое положение, а кнопкой  $10\text{ A}/1\text{ A}$  выбирают предел измерения. При измерении тока до  $100\text{ A}$  необходимо токовую приставку (ТТ100) установить в гнезда «А», а кнопку предела из-

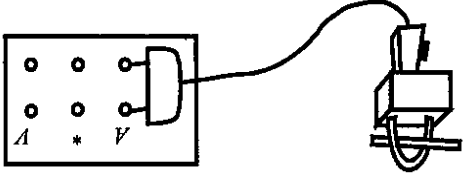


Рис. 33. Измерение тока

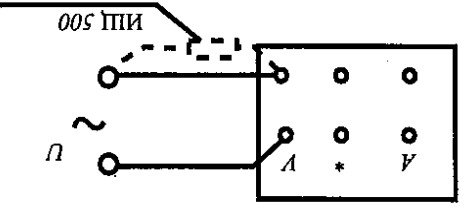


Рис. 34. Измерение напряжения

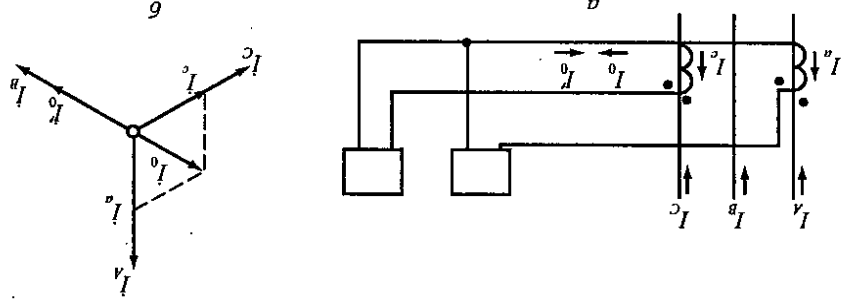


Рис. 26. Схема соединения трансформаторов тока, соединенных по схеме неполная звезда (а) и векторные диаграммы первичных и вторичных токов в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании (б); то же при двухфазных коротких замыканиях (в); то же при однофазных коротких замыканиях (г)

тока  $I_0$ , то векторное изображение этого тока  $I_0$  будет сдвинуту относительно вектора тока  $I_0$  на  $180^\circ$ , т. е.  $I_0 = -(I_a' + I_b')$ .

Рассмотрим схему включения одного реле на разность токов двух трансформаторов тока (рис. 27, а). Векторы вторичных токов трансформаторов тока, совпадают по направлению с векторами первич-

ных токов. На рис. 27, б приведена векторная диаграмма при симметричной нагрузке или при трехфазном коротком замыкании. Проходящий в реле ток равен разности вторичных токов трансформаторов тока фаз C и A. Соответственно вектор тока  $I_p$  изображается как разность векторов  $I_c$  и  $I_a$  на рис. 27, б для трехфазного короткого замыкания, на рис. 27, в — для двухфазных коротких замыканий и на рис. 27, 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 трансформаторов тока отсутствуют.

переключатель  $\mu A$  и  $I/V$  устанавливается в положение  $I/V$ ; переключатель  $V_{\text{всп}}/I/V$  устанавливается в положение  $V_{\text{всп}}$ .

на прибор подается ток или напряжение, относительно которого мы хотим произвести отсчет утлов. При этом ток подается через токоизмерительные клещи, и положительное направление для него принимается по проводу, охватываемому клещами. Этот провод входит в торец клещей, обозначенный звездочкой. Напряжение подается к зажимам, обозначенным звездочкой и индексом  $U$ . При этом на приборе принято положительное направление от зажима со звездочкой к зажиму  $U$ .

переключатель *Величина/Фаза* устанавливается в положение *Фаза*. Поворотом рукоятки лимба следует добиться нулевого показания стрелки прибора. Это можно сделать в двух положениях лимба. Остановиться следует на таком положении, когда при движении лимба по часовой стрелке стрелка прибора пройдет нуль слева направо. Когда стрелка прибора находится на нуле, отсчитываются показания угла на лимбе по отметке, нанесенной на корпус (110 или 220 В);

отключается измерительный ток или напряжение, а переключатель *Величина/фаза* устанавливается в положение *Величина*; на прибор подается сдвинувший ток или напряжение и производится измерение его значения и угла.

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

Например, допустим, что первый раз получали на прибор напряжение

удовлетворяет всем трем показаниям вольтметра. Вектор, изображающий напряжение между выводом X и землей, изображается вектором  $U^x$ .

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

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

На приборе, изображенном на рис. 32, а, установлены два переключателя. Один из них имеет два положения:  $I\dot{U}$  и  $I/U$ . В положении  $I\dot{U}$  прибором измеряют переменный ток до 250 мА, подведенный к соответствующим зажимам прибора.

В положении  $I/U$  измерительный прибор ВАФ через второй переключатель с двумя положениями *Величина* и *Фазы* подключается соответственно для измерения тока (напряжения), подведенного к зажимам  $I$  или  $U$  прибора, или фазы угла тока (напряжения). Ток к зажимам  $I$  следует подводить только через токоизмерительные клещи.

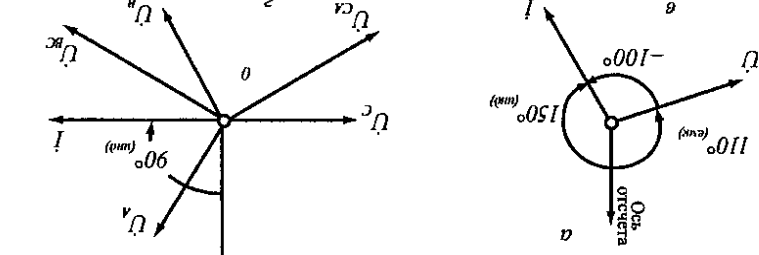
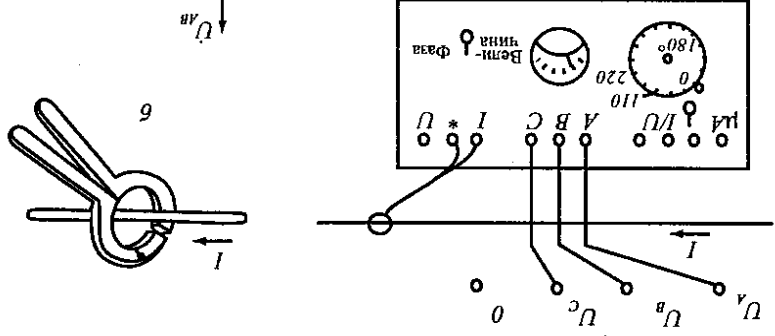


Рис. 32. Снятие векторной диаграммы прибором ВАФ: а — схема включения прибора; б — охват клещами токовой цепи; в — определение угла между векторами тока и напряжения; г — определение угла между током и напряжением  $U_{AB}$

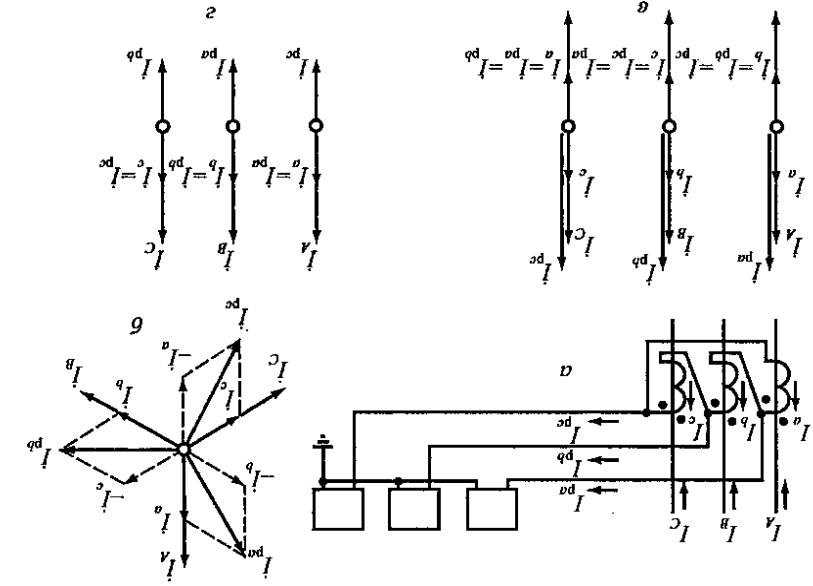


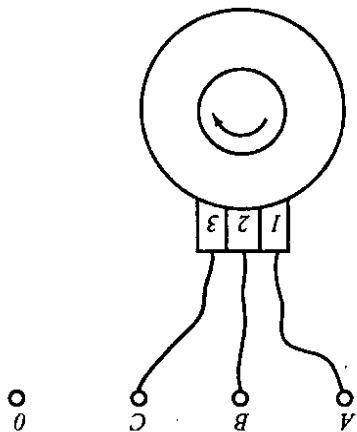
Рис. 28. Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а реле в звезду (а) и векторные диаграммы первичных и вторичных токов в обмотках трансформаторов тока и в реле в нормальном режиме (б); то же при двухфазных коротких замыканиях (в) и при трехфазном коротком замыкании (г); то же при однофазных коротких замыканиях (д); то же при однофазных коротких замыканиях (е)

## 7. МЕТОДЫ СНЯТИЯ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

Изображение токов и напряжений в виде векторных диаграмм позволяет достаточно просто решать многие практические задачи. Для векторного изображения фактических токов и напряжений в нормальных режимах производятся измерения с помощью специальных методов и приборов. Измерение токов и напряжений различными приборами и построение изображающих их векторов называются *снятием векторных диаграмм*.

Векторные диаграммы можно снять с помощью лабораторных вольтметров или фазометров, однако эти способы считаются устаревшими, они сложны в использовании, поэтому не могут быть рекомендованы и в настоящей книге не рассматриваются. Здесь приводятся методы снятия векторных диаграмм (фазировка цепей напряжения) с помощью вольтметра, вольтамперфазоиндикатора или прибора «Потенциал».

Рис. 29. Включение фазоуказателя для определения последовательности чередования фаз напряжений



Для построения исходной векторной диаграммы напряжений трех фаз путем измерения вольтметром убеждается в равенстве значений фазных напряжений. Допустимое отклонение напряжения должно быть не более  $\pm 5\%$ ;

путем измерения вольтметром убеждается в равенстве значений междуфазных напряжений. Допустимое отклонение напряжений должно быть не более  $\pm 5\%$ ;

вольтметром сфазировать выводы, напряжение на которых будет изображено на векторной диаграмме, с известным источником напряжений.

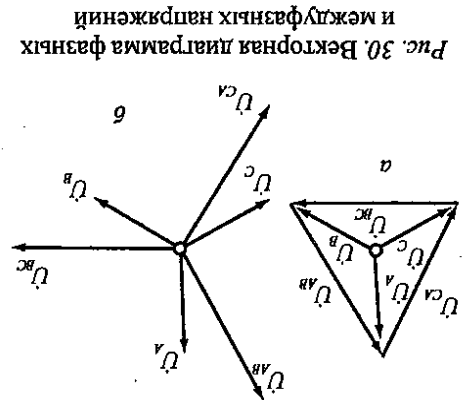
Определение соответствия маркировки выводов основной маркировке называется *фазировкой вторичных цепей напряжения*. Фазировка, которая обычно производится вольтметром, может быть выполнена только в том случае, если фазированные системы имеют электрическое соединение хотя бы в одной точке. Обычно такая 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 является обязательной. Фазировка двух других фаз может быть заменена проверкой чередования фаз напряжения новых выводов специальным прибором — фазоуказателем, как показано на рис. 29.

Фазные и междуфазные напряжения могут быть изображены в виде векторов. Для этого задается определенным масштабом изображения на протяжении (например, 1 мм соответствует 1 В). В соответствии с принятым масштабом изображаются три фазных (рис. 30, а) и, если нужно, три междуфазных (рис. 30, б) напряжения.

**Снятие векторной диаграммы напряжений вольтметром.** Вольтметром можно снять векторную диаграмму неизвестной системы напряжений



ний с использованием известных тной звезды векторов фазных напряжений. Условием для снятия векторной диаграммы таким методом является нахождение хотя бы одной общей электрической точки в известной системе напряжений и неизвестной системе напряжений. На рис. 31 показано построение одного неизвестного вектора с помощью трех известных. Представим, что

Из концов известных векторов радиусами, равными показанию вольтметра в принятом масштабе ( $XA$ ,  $XB$ ,  $XC$ ), проводят три окружности, как показано на рис. 31, б. Точка  $X$  на векторной диаграмме единственная, потенциал которой таков, что разность потенциалов между этой точкой и концами векторов  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$

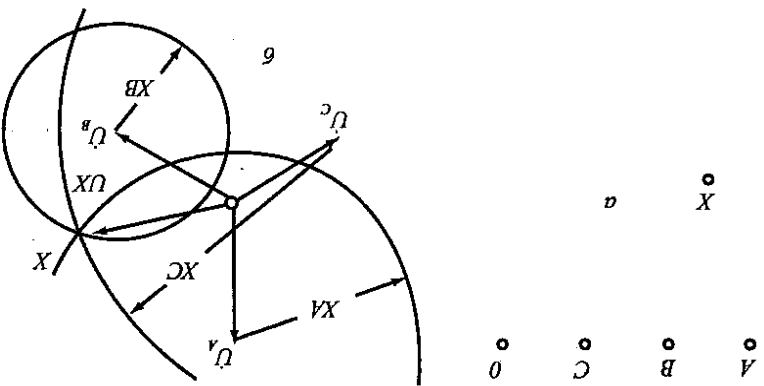


Рис. 31. Определение вектора неизвестного напряжения: а — зажимы известных и неизвестного напряжений; б — построение вектора неизвестного напряжения