

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

**Практическое
пособие**

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



МОСКВА
ЭНАС
2017

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

В 26

Составитель Ф.Д. Кузнецов

**Векторные диаграммы в схемах релейной защиты и
В 26 автоматики / Под ред. Б.А. Алексева. — М.: ЭНАС, 2017. —
с.; ил.**

ISBN 978-5-4248-0127-3

Приведены общие сведения о векторных диаграммах, применяемых в схемах релейной защиты и автоматики, описаны методы построения и анализа векторных диаграмм для нормального режима работы электроустановки, для различных видов коротких замыканий, а также для различных схем включения реле направленных защит.

Для персонала служб РЗА электростанций и сетей, а также для персонала монтажно-наладочных организаций и промышленных предприятий.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	4
1. Представление переменного тока	5
2. Представление переменного напряжения и ЭДС	7
3. Векторное изображение переменных токов и напряжений	8
4. Векторные диаграммы простейших цепей	10
5. Векторные диаграммы, изображающие токи, ЭДС и напряжения в трехфазных цепях	16
6. Векторные диаграммы токов и напряжений во вторичных цепях .. измерительных трансформаторов	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 .. дифференциальной защиты	45
11. Векторные диаграммы реле, включенных на фильтры тока и напряжения обратной последовательности	47
12. Векторные диаграммы реле, включенных на фильтры тока и напряжения нулевой последовательности	50
13. Векторные диаграммы реле направления мощности нулевой последовательности с токовой поляризацией	52
14. Векторные диаграммы реле, применяемых в устройствах автоматики	53
15. Векторные диаграммы реле направления мощности нулевой последовательности в схемах защит трансформаторов и автотрансформаторов от замыканий на землю	54
16. Векторные диаграммы реле в схемах автоматики, действующей при повышении напряжения	55
17. Векторные диаграммы реле фильтровых защит от токов обратной последовательности	56
Список литературы	61

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, проверить 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.

Общим правилом при изображении электрических величин является их соответствие задаче, для решения которой эти изображения используются. Для этого изображение должно содержать информацию, необходимую для решения рассматриваемой задачи. Например, при определении теплового действия тока достаточно знать только его значение.

При рассмотрении взаимодействия двух токов информации об их значениях будет недостаточно. В этом случае необходимо знать также взаимное направление прохождения токов по проводам.

В брошюре рассмотрены способы представления переменных токов и напряжений в прямоугольной системе координат, аналитическом виде и в виде векторных диаграмм, даются основные понятия о векторном изображении токов и напряжений, которые необходимы для эксплуатации релейной защиты, и методика снятия и использования векторных диаграмм.

1. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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 представлять положительными числами или положительными отрезками. Геометрическое направление, обозначенное стрелкой, получило название *положительного направления*.

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

Для примера на рис. 1 изображено изменение во времени переменного тока в сечении s провода за отрезок времени, равный двум-трем изменениям направления тока в прямоугольной системе координат.

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

На рис. 2 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

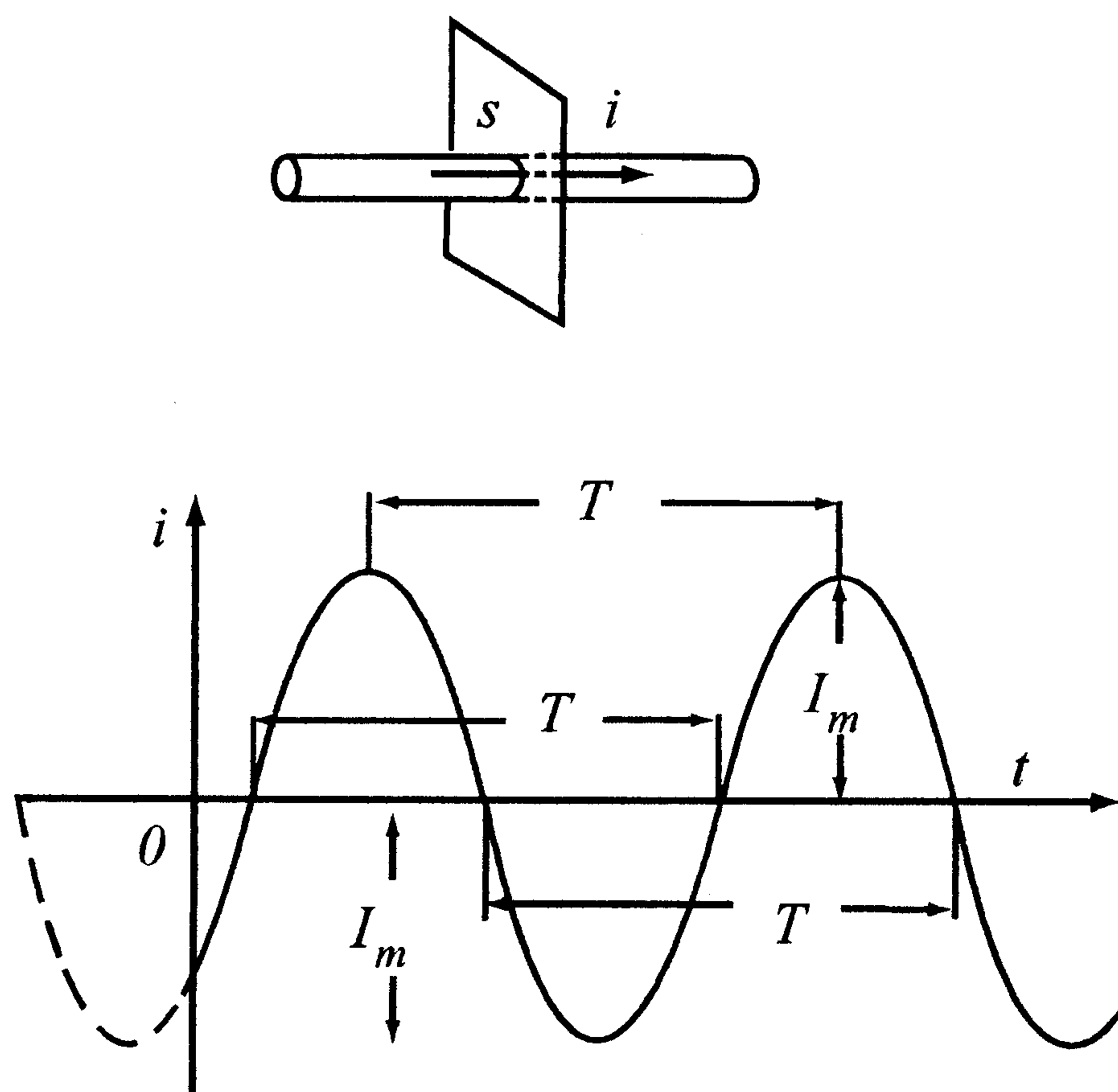


Рис. 1. Изображение одного тока

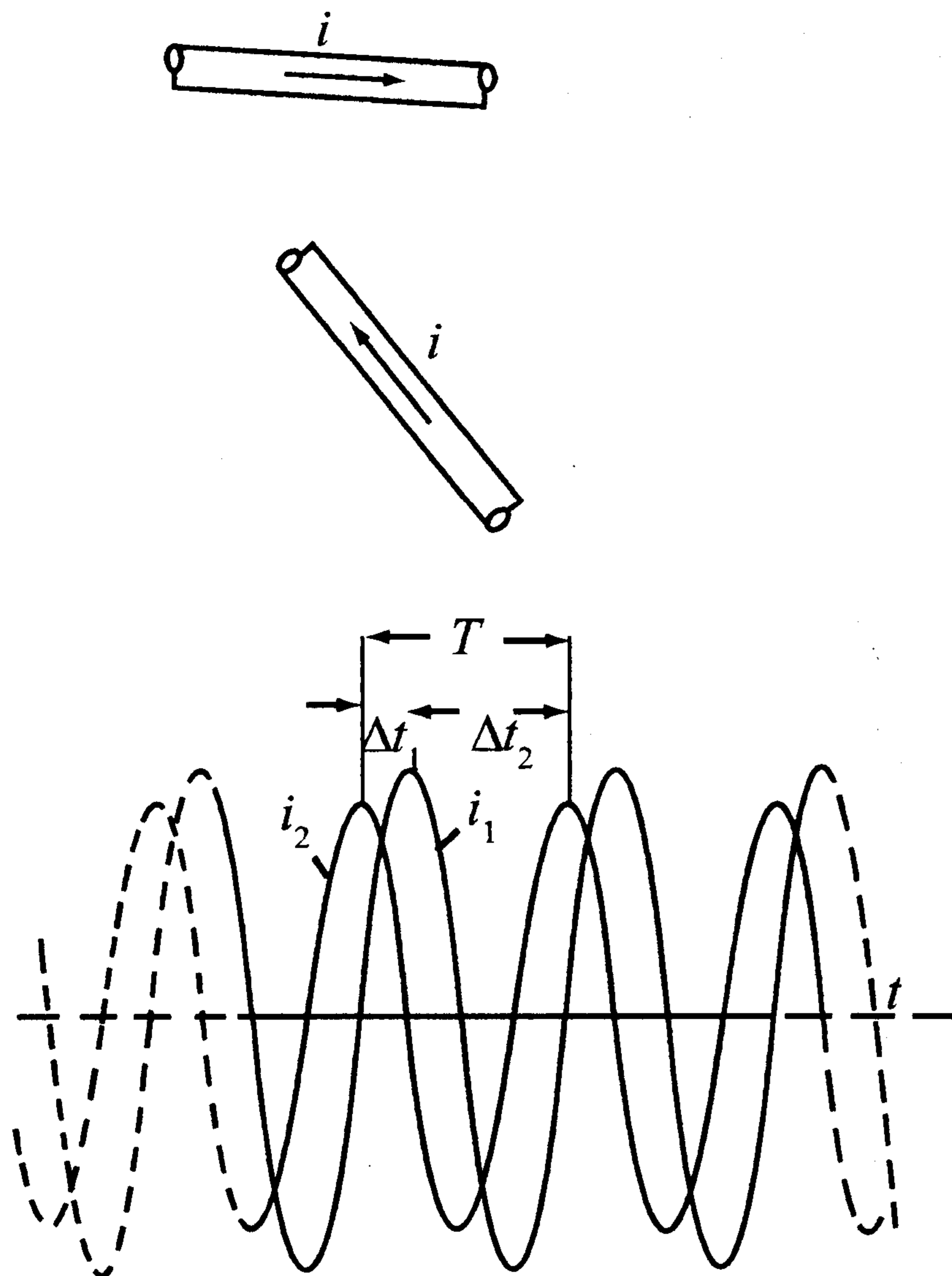


Рис. 2. Изображение двух токов

I_m на синус угла α , который в свою очередь зависит от времени t при заданных, постоянных для данного тока величинах Δt и T .

Любая стадия синусоидального тока (напряжения) может характеризоваться углом α в пределах от 0 до 360° . Этот угол, характеризующий стадию 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 φ .

Угол сдвига фаз

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

Отсюда 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.

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

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

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 .

Для аналитических расчетов токи представляют в виде математических функций.

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

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

где

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

Отсюда следует, что мгновенное значение тока определяется, как произведение амплитуды тока

При частоте 50 Гц ($T = 0,02$ с) угловая частота $\omega = 314$ рад/с.

Величину $360\frac{\Delta t}{T}$ или $2\pi\frac{\Delta t}{T}$ принято называть *начальной*

фазой и обозначать φ .

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 φ характеризует сдвиг во времени каждой фазы данного тока от аналогичной фазы сравниваемого 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 направлением*. Направление, встречное со стрелкой, считается *отрицательным направлением*. Положительное направление может обозначаться не стрелкой, а индексом. Например, принятому положительному направлению для напряжения от *a* к *b* будет соответствовать запись U_{ab} .

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

Общеприняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 u, e & \quad - \text{мгновенные значения напряжения и ЭДС;} \\
 U_m, E_m & \quad - \text{амплитудные значения напряжения и ЭДС;} \\
 U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} & \quad - \text{действующие значения напряжения и ЭДС.}
 \end{aligned}$$

3. ВЕКТОРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

При решении электротехнических задач, когда требуется производить сложение или вычитание токов и напряжений, способы изображения 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 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 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.

Рассмотрим аналитические выражения для переменного тока и напряжения:

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

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

Для векторного изображения токов и напряжений на плоскости произвольно откладывается ось отсчета углов. Расположенная вертикально, как показано на рис. 3.

Под углом φ_1 откладывается вектор, пропорциональный амплитуде I_{m1} или действующему значению I_1 тока i_1 . Под углом φ_2 откладывается вектор, пропорциональный амплитуде I_{m2} или действующему

ющему значению I_2 тока i_2 . Вектор, изображающий суммарный ток I_3 , получится как геометрическая сумма двух векторов.

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 действующих значениях (рис. 3, б).

Как видно из рис. 3, а, для определения суммы двух переменных токов нужно знать их значения 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 φ_3 суммарного тока I_3 отсчитывается от вектора тока I_1 . Вычитание токов также может быть выполнено с помощью векторного изображения.

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 тока I'_3 равен вектору тока I_3 , так как оба отрезка равны и параллельны.

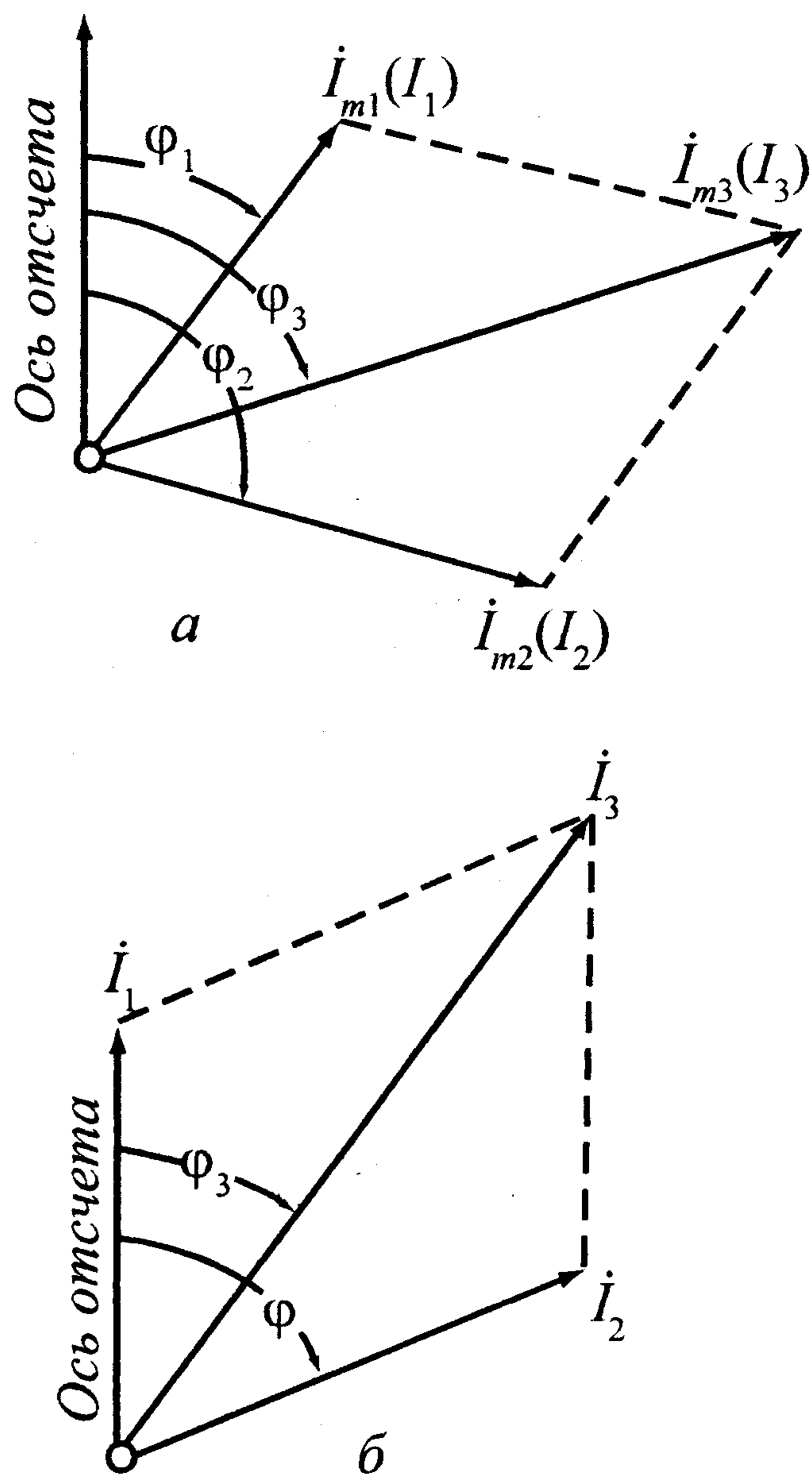


Рис. 3. Определение суммы двух векторов

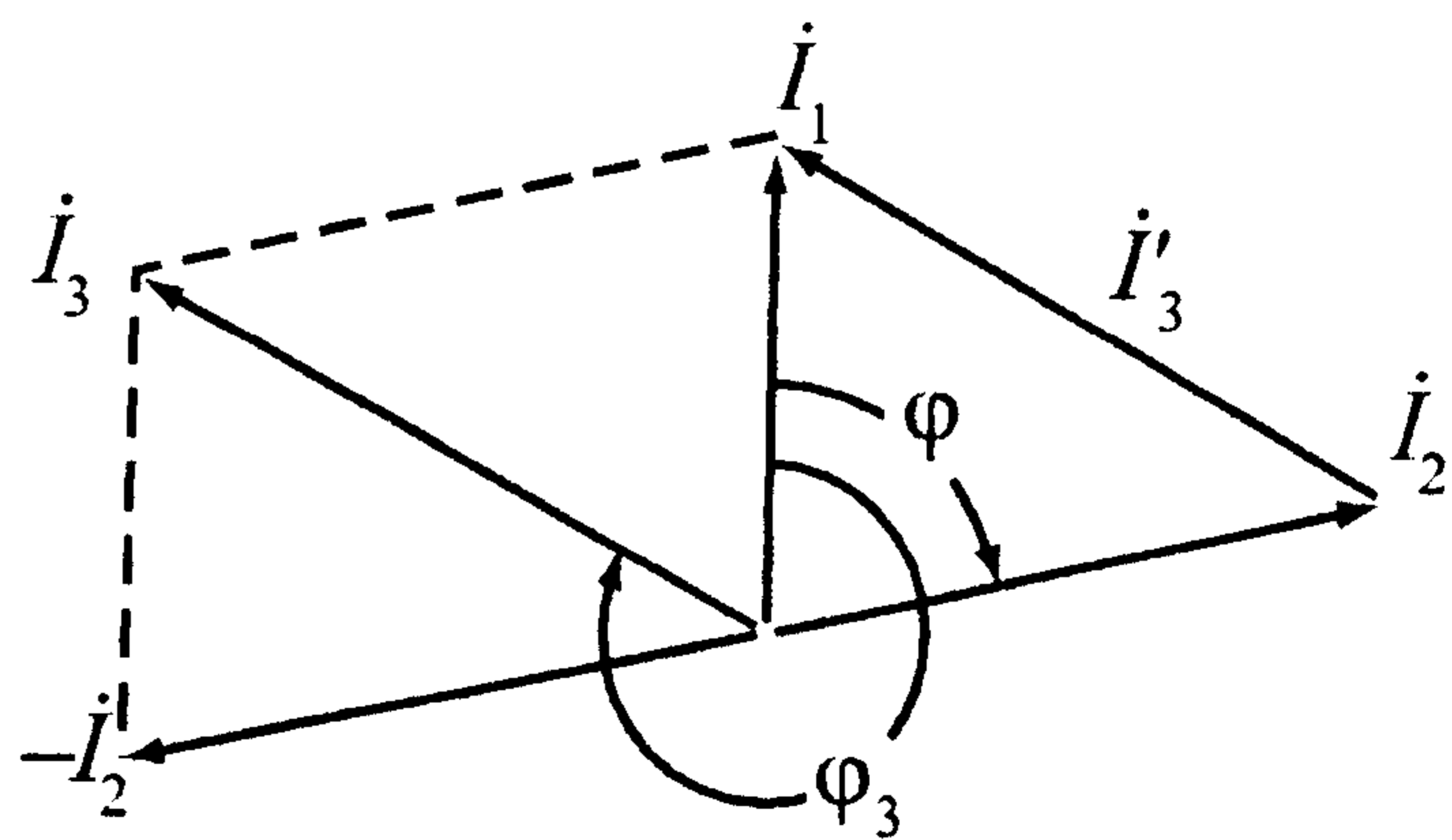


Рис. 4. Определение разности двух векторов

4. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ

Элемент электрической цепи обладает постоянным сопротивлением Z , если между действующим значением подведенного 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 , X_C .

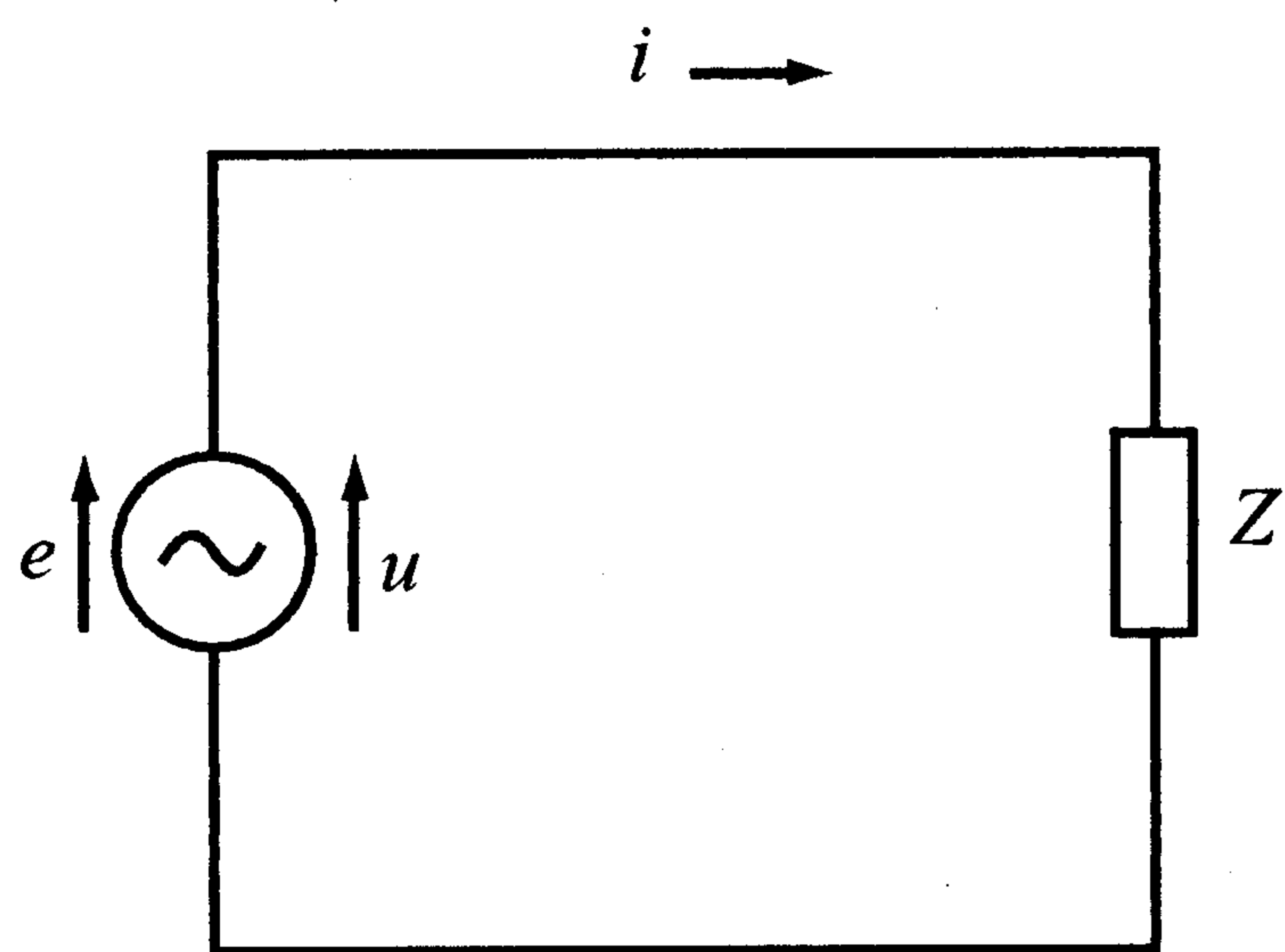


Рис. 5. К построению векторных диаграмм

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 проходит переменный ток i . Для упрощения примем, что внутреннее сопротивление источника равно нулю. Тогда значение напряжения u на зажимах источника равно ЭДС e .

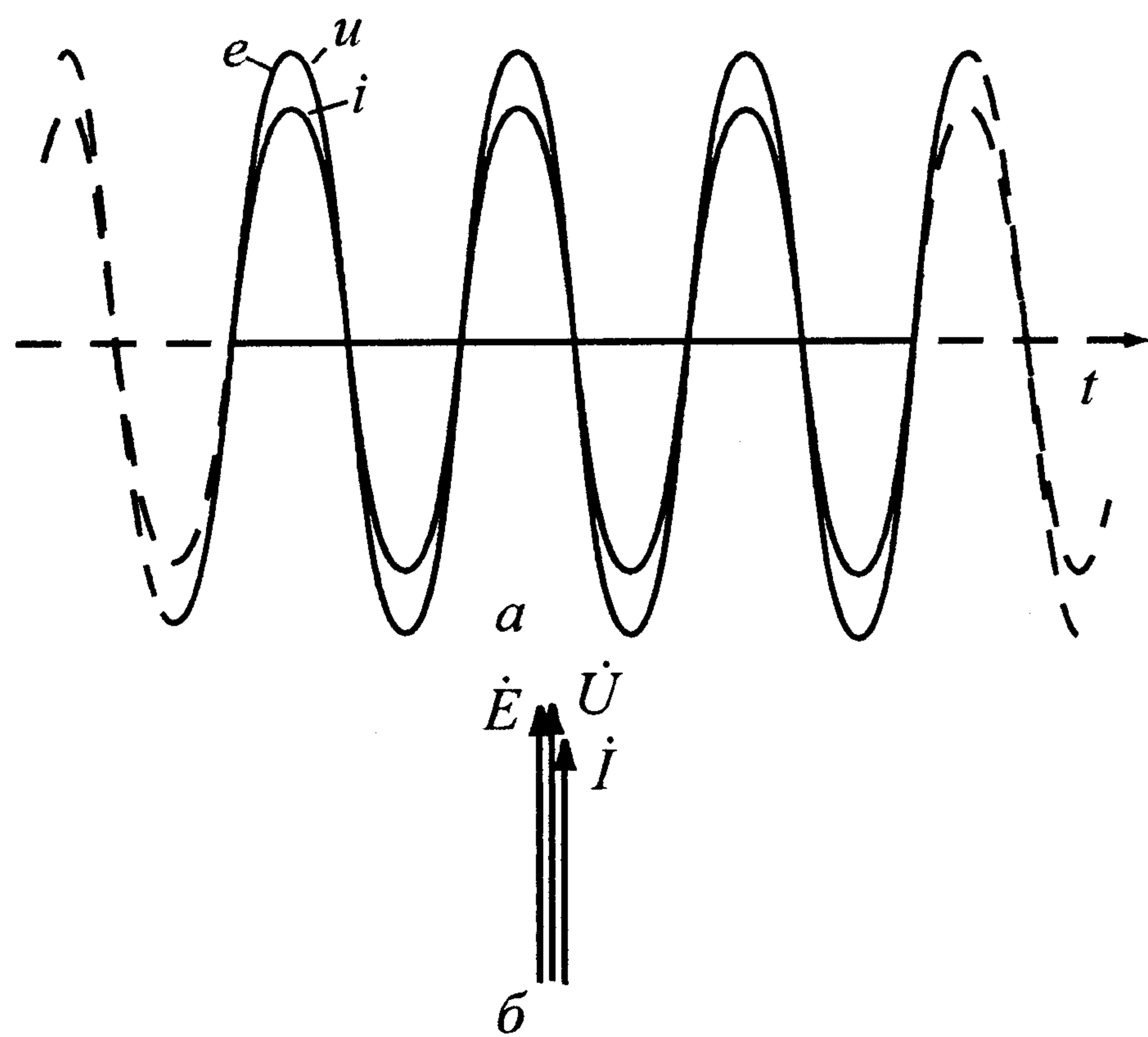


Рис. 6. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто активное:

a – графическое; b – векторное

Если сопротивление цепи чисто активное R , то получится 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 изображают совпадающими.

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

Изображение соответствующих величин в прямоугольной системе координат показано на рис. 7, а, векторное изображение — на рис. 7, б. Эти изображения показывают, что положительный максимум тока наступает через время $T/4$ (или 90°) 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 емкостное X_C .

Изображение соответствующих величин в прямоугольной 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 напряжений для схемы, приведенной на рис. 9, а, когда в цепи последовательно включены два сопротивления R и X_C . Примем для изображаемых величин положительные направления, показанные на рис. 9, б. Примем за ось отсчета вектор тока I (рис. 9, в).

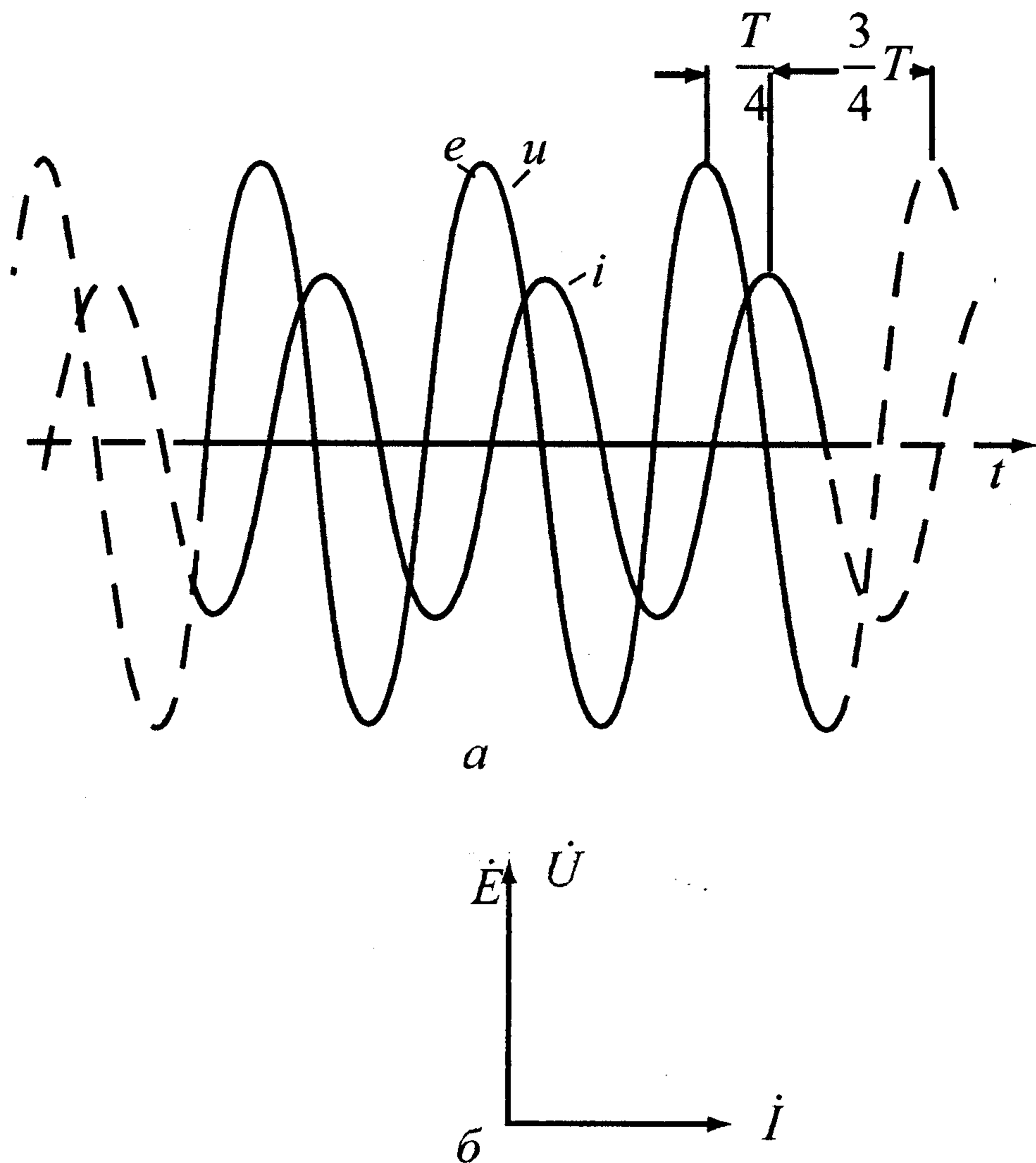


Рис. 7. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто индуктивное:

а — графическое; б — векторное

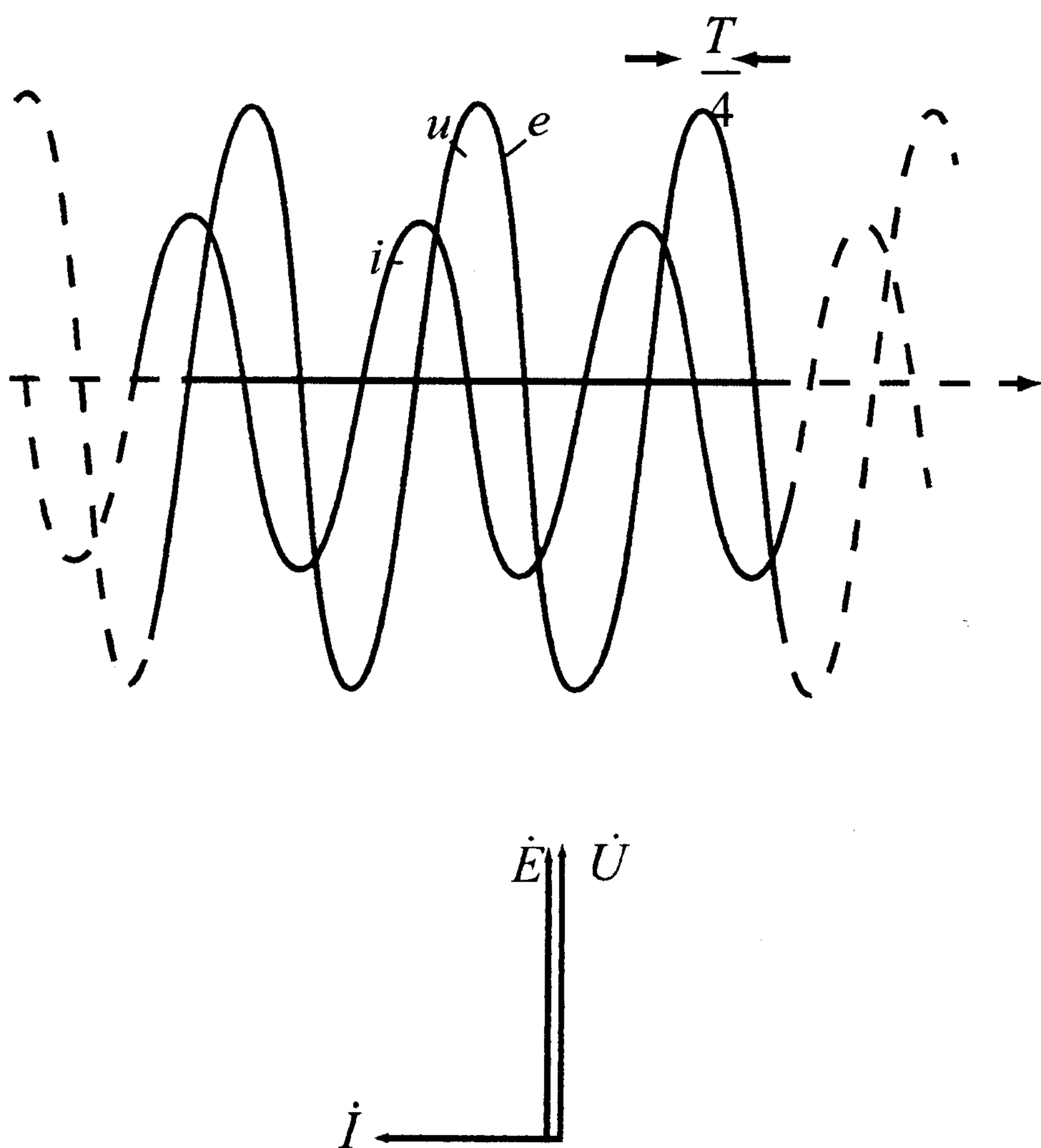


Рис. 8. Изображение тока, напряжения и ЭДС, когда сопротивление цепи чисто емкостное:

а — графическое; б — векторное.

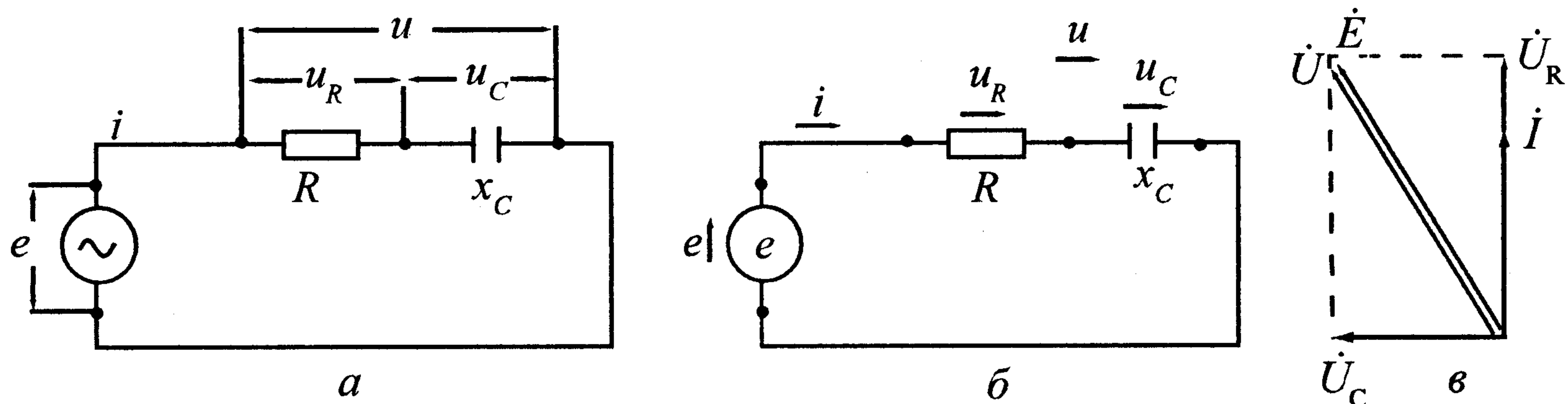


Рис. 9. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и емкостного сопротивлений:
а – расчетная схема; *б* – условные положительные направления; *в* – векторная диаграмма

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 \dot{U}_R совпадающим с вектором \dot{I} .

Если положительное направление напряжения на емкостном сопротивлении принять совпадающим с положительным направлением тока, то вектор, изображающий напряжение, будет опережать вектор тока на 90° . Поэтому вектор \dot{U}_C опережает вектор тока \dot{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 \dot{U} является суммой двух векторов \dot{U}_R и \dot{U}_C .

По векторной диаграмме на рис. 9, *в* можно видеть, что ток отстает от напряжения на угол φ . Чем больше отношение R/X_C , тем меньше угол φ , и, чем меньше это отношение, тем ближе угол к 90° .

Рассмотрим векторную диаграмму тока, ЭДС и напряжения для схемы, представленной на рис. 10, *а*, когда в цепи последовательно включены два сопротивления R и X_L . Примем для изображаемых

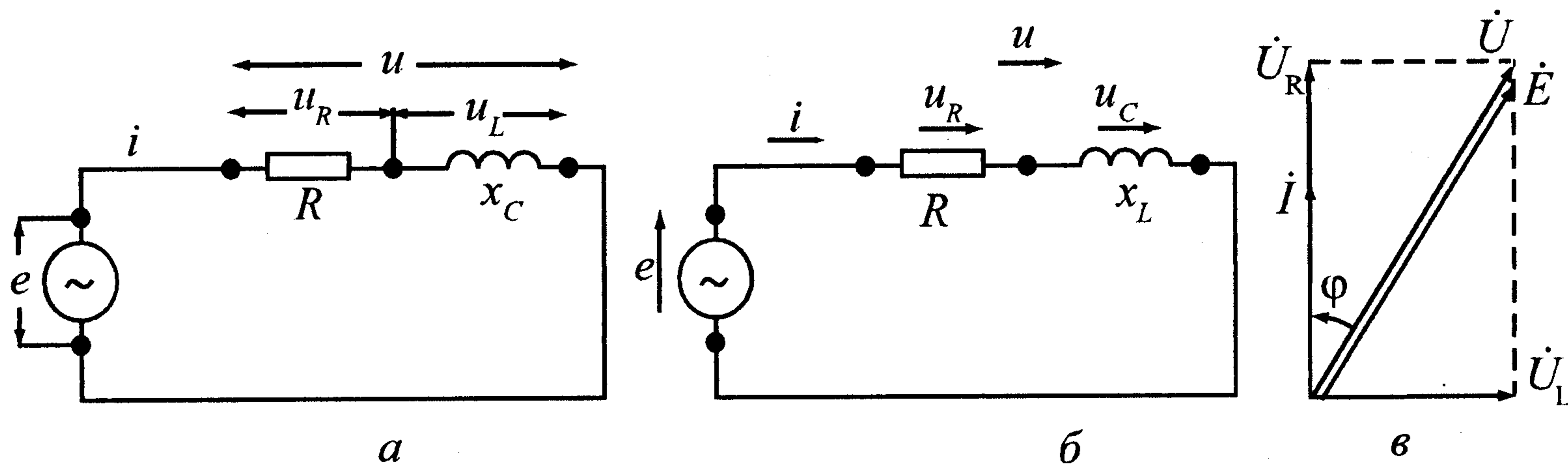


Рис. 10. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного и индуктивного сопротивлений:
а – расчетная схема; *б* – условные положительные направления; *в* – векторная диаграмма

величин положительные направления, указанные на рис. 10, б. Примем за ось отсчета вектор тока \dot{I} (рис. 10, в). Вектор, изображающий напряжение на активном сопротивлении \dot{U}_R , совпадает по направлению с вектором тока, а вектор напряжения на индуктивном сопротивлении \dot{U}_L — отстает от вектора тока на 90° . Для получения суммарного вектора \dot{U} произведем сложение векторов \dot{U}_R и \dot{U}_L . Вектор ЭДС \dot{E} совпадает с вектором суммарного напряжения.

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

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 \dot{I} .

На векторной диаграмме изображены векторы напряжения \dot{U}_R , совпадающего с вектором тока \dot{I} , \dot{U}_L , опережающего его на 90° , и \dot{U}_C , отстающего на 90° . 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 \dot{U} произведем сложение трех векторов \dot{U}_R , \dot{U}_L и \dot{U}_C . Для этого сначала сложим два каких-либо вектора, например \dot{U}_R и \dot{U}_C , и полученный вектор сложим с третьим.

Вектор ЭДС \dot{E} совпадает с вектором напряжения \dot{U} . Угол φ 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 ($\varphi = 0$). Последний случай имеет название резонанса напряжений, или последовательного резонанса.

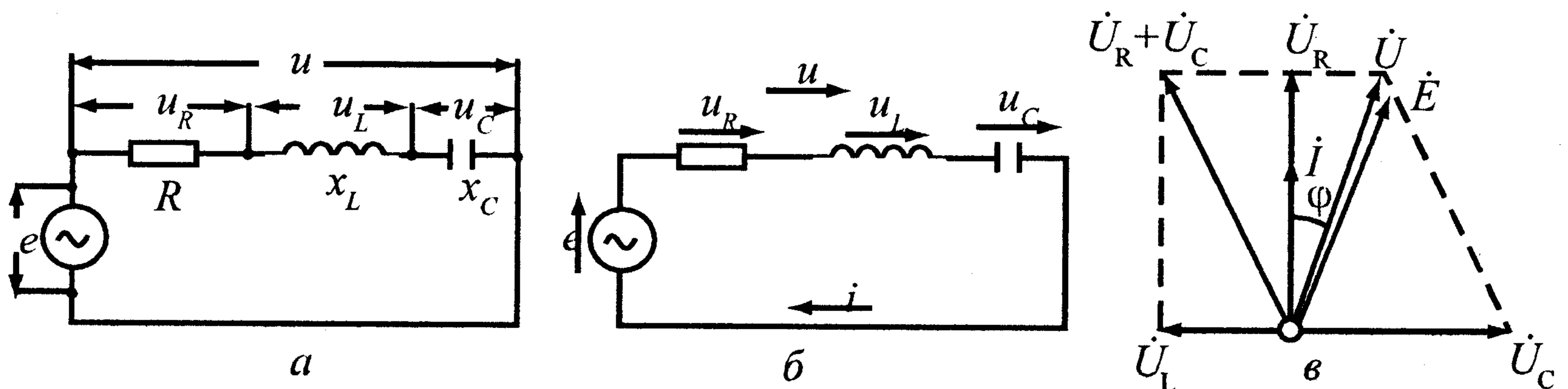


Рис. 11. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательно включенных активного, индуктивного и емкостного сопротивлений:

а — расчетная схема; б — условные положительные направления;

в — векторная диаграмма

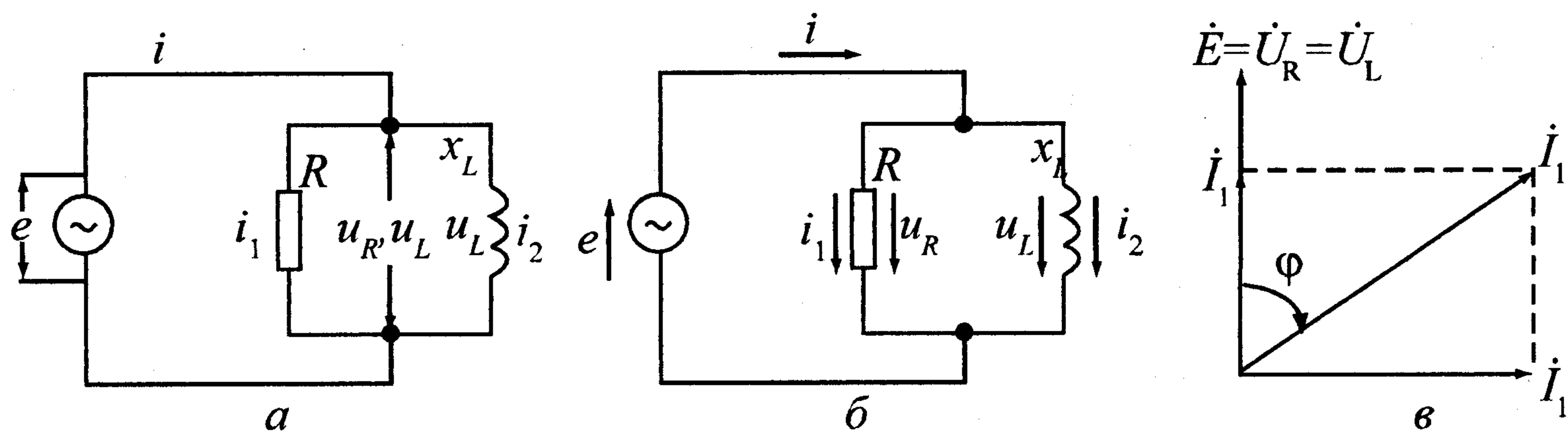


Рис. 12. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из параллельно включенных активного и индуктивного сопротивлений:
a – расчетная схема; *б* – условные положительные направления;
в – векторная диаграмма

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений для схемы, представленной на рис. 12, *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. 12, *б*. Примем за ось отсчета вектор \dot{U}_R напряжения и равный ему вектор \dot{U}_L (рис. 12, *в*). 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. 12, *в* изображены векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . Вектор тока \dot{I} находится как векторная сумма двух векторов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

Вектор \dot{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. 13, *a*, когда суммарное сопротивление рассматриваемой цепи состоит из двух параллельно включенных сопротивлений R и X_C . Примем для изображаемых величин положительные направления, приведенные на рис. 13, *б*, а за ось отсчета вектор напряжения и равный ему вектор (рис. 13, *в*). Вектор ЭДС E совпадает с векторами напряжений \dot{U}_R и \dot{U}_C .

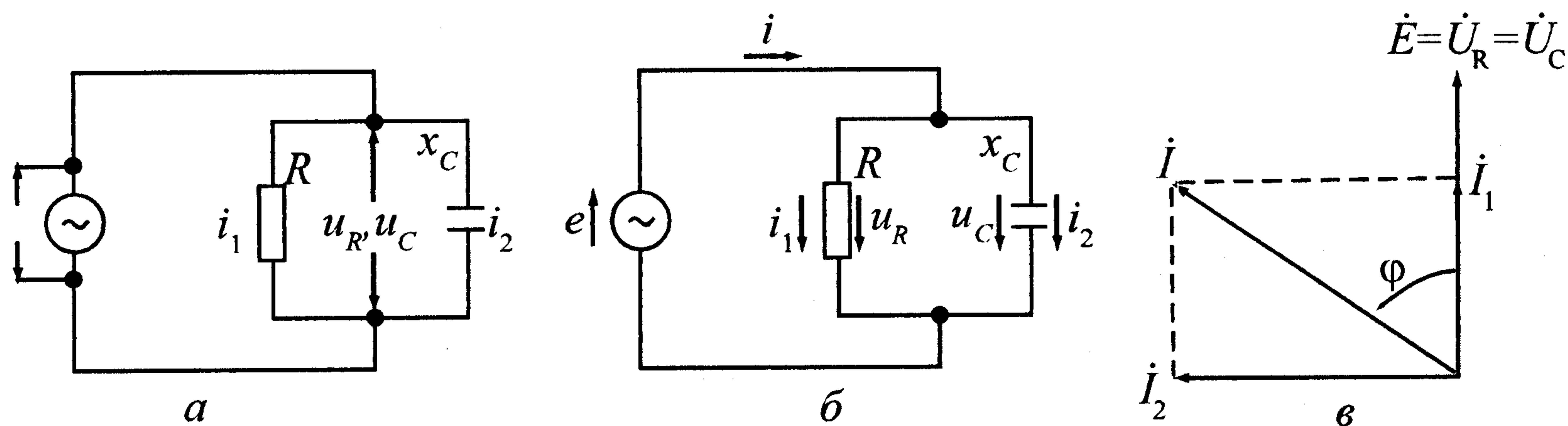


Рис. 13. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из параллельно включенных активного и емкостного сопротивлений:
a – расчетная схема; *б* – условные положительные направления;
в – векторная диаграмма

Ток, проходящий по активному сопротивлению, изобразится вектором \dot{I}_1 , совпадающим по направлению с вектором напряжения, а ток, проходящий по емкостному сопротивлению, — вектором \dot{I}_2 , опережающим вектор падения напряжения \dot{U}_C на угол 90° . Вектор тока \dot{I} , проходящего в общей цепи, равен сумме векторов токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

Угол φ между векторами суммарного тока \dot{I} и ЭДС \dot{E} определяется соотношением сопротивлений R и X_C и может быть в пределах от 0 до -90° .

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 . Примем для изображаемых величин положительные направления, указанные на рис. 14, б. Примем за ось отсчета вектор напряжения \dot{U}_L и равный ему вектор напряжения \dot{U}_C (рис. 14, в). Вектор тока \dot{I}_1 отстает, а вектор \dot{I}_2 опережает вектор $\dot{U}_L = \dot{U}_C$.

Вектор тока \dot{I} равен сумме векторов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . 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 равный ему вектор \dot{E} , изображающий ЭДС.

Угол φ (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*.

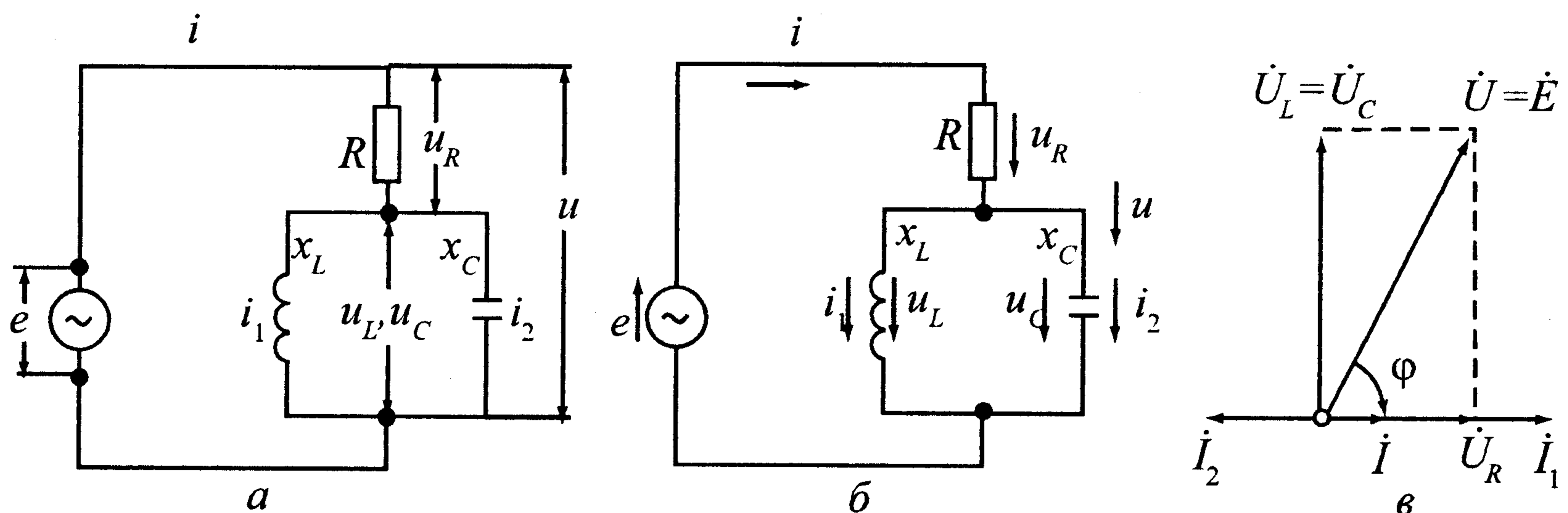


Рис. 14. Векторная диаграмма для цепи, состоящей из последовательного соединения активного сопротивления и двух параллельных сопротивлений x_L и x_C

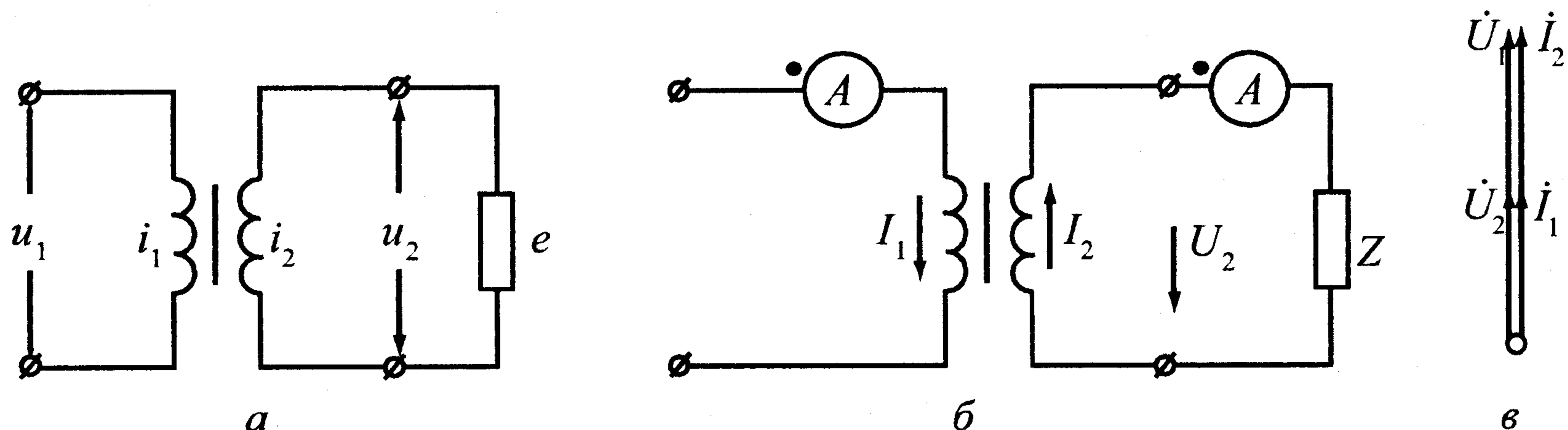


Рис. 15. Векторная диаграмма токов и напряжений для идеального трансформатора:

a – схема трансформатора; *б* – условные положительные направления токов и напряжений; *в* – векторная диаграмма

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, *a*).

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 определить направление напряжения и тока во вторичной обмотке относительно напряжения и тока первичной обмотки, обозначаются так называемые однополярные зажимы обмоток трансформатора. Выводы называются полярными и обозначаются точкой •, если стрелки идеальных, безынерционных амперметров, включенных, как показано на рис. 15, *б*, будут одновременно отклоняться вправо до максимального значения.

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.

5. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, ИЗОБРАЖАЮЩИЕ ТОКИ, ЭДС И НАПРЯЖЕНИЯ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

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 А, В, С и называются *фазами*.

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

Положительное направление ЭДС 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 индексов E_{AB} , E_{BC} и E_{CA} .

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° .

Векторная диаграмма этих трех ЭДС приведена на рис. 16. При работе генератора на холостом ходу напряжение на его выводах будет одновременно с ЭДС достигать максимального значения.

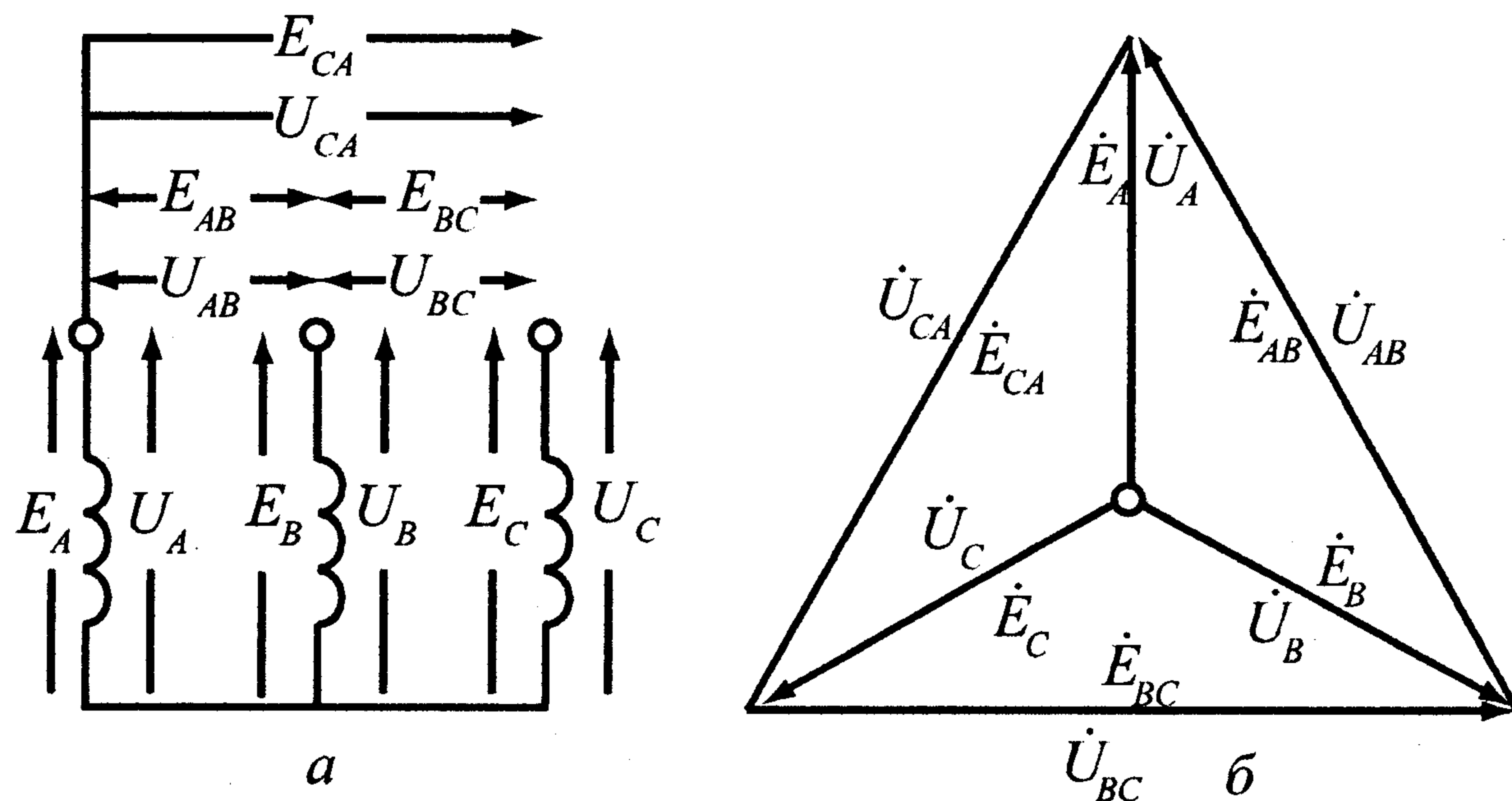


Рис. 16. Напряжение и ЭДС на выводах трехфазного генератора: *a* — условные положительные направления; *б* — векторная диаграмма

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° .

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 напряжений и принятых обозначений фаз.

Для определения взаимного расположения векторов одноименных напряжений сторон высшего и низшего напряжения трансформатора введено понятие о группах соединения. Номер группы соединений обмоток рассматриваемого трансформатора зависит от взаимного положения двух векторов одноименных напряжений.

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

Подводимые к трансформатору первичные напряжения изображены в виде трех векторов \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C . С учетом полярности и принятых положительных направлений на вторичной стороне получаются три напряжения, которые изображены тремя векторами \dot{U}_1 , \dot{U}_2 и \dot{U}_3 , направления которых совпадают с \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C .

На рис. 18, а изображена другая схема соединений первичных и вторичных обмоток трансформатора и их полярность, когда вторичные обмотки соединены в треугольник.

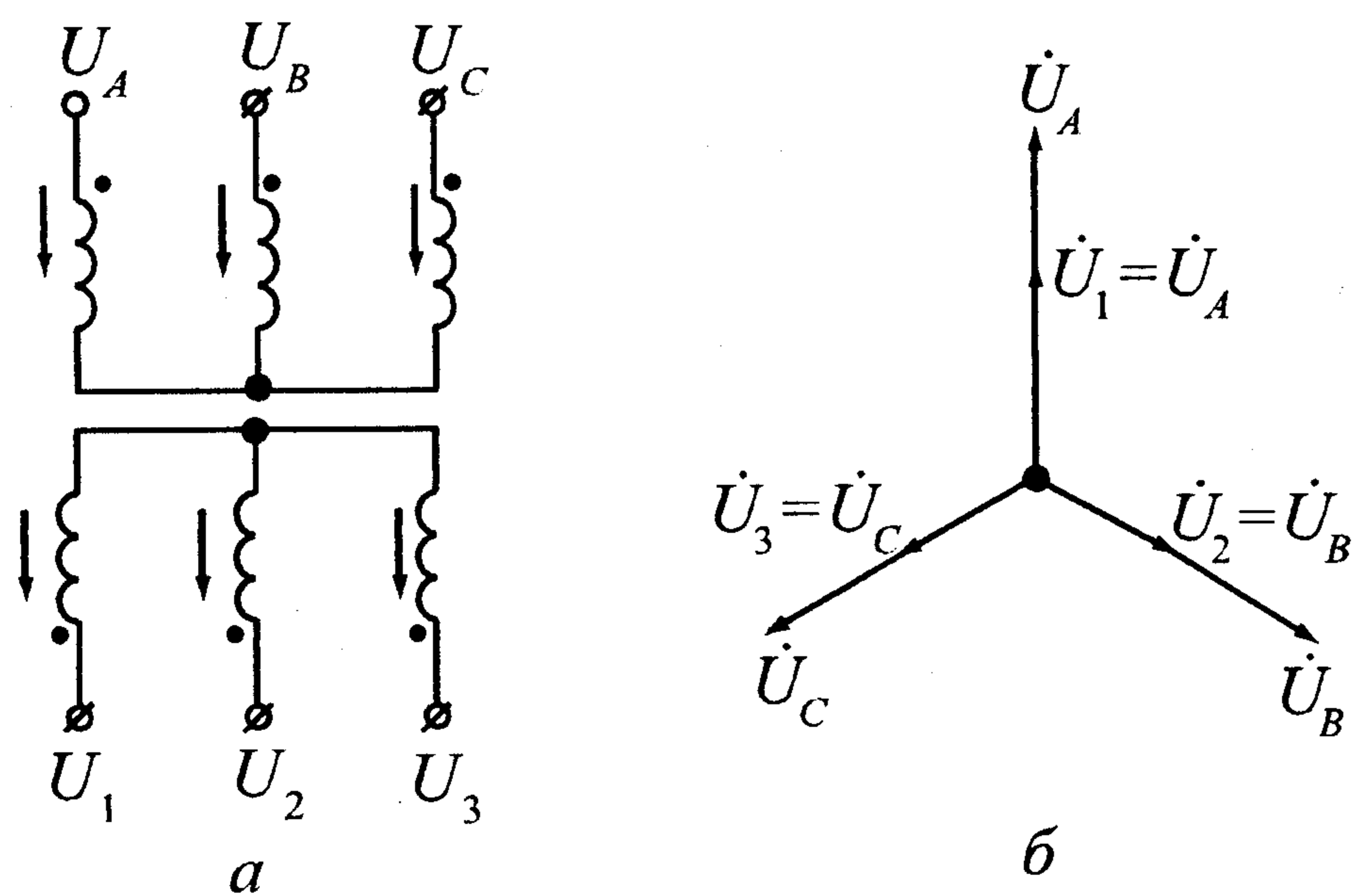


Рис. 17. Соединение обмоток трансформатора по схеме Y/Y-12: а — схема соединения; б — векторная диаграмма

Подведенные к трансформатору первичные напряжения изображены в виде трех векторов \dot{U}_A , \dot{U}_B и \dot{U}_C . Векторы фазных напряжений \dot{U}_1 , \dot{U}_2 и \dot{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 напряже-

ний элементы энергосистемы заменяют в расчетных схемах активными и реактивными сопротивлениями. Генераторы, трансформаторы и реакторы обычно замещают индуктивными сопротивлениями, а линии – индуктивно-активными сопротивлениями. Большинство нагрузок электроприемников также замещается индуктивно-активными сопротивлениями.

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

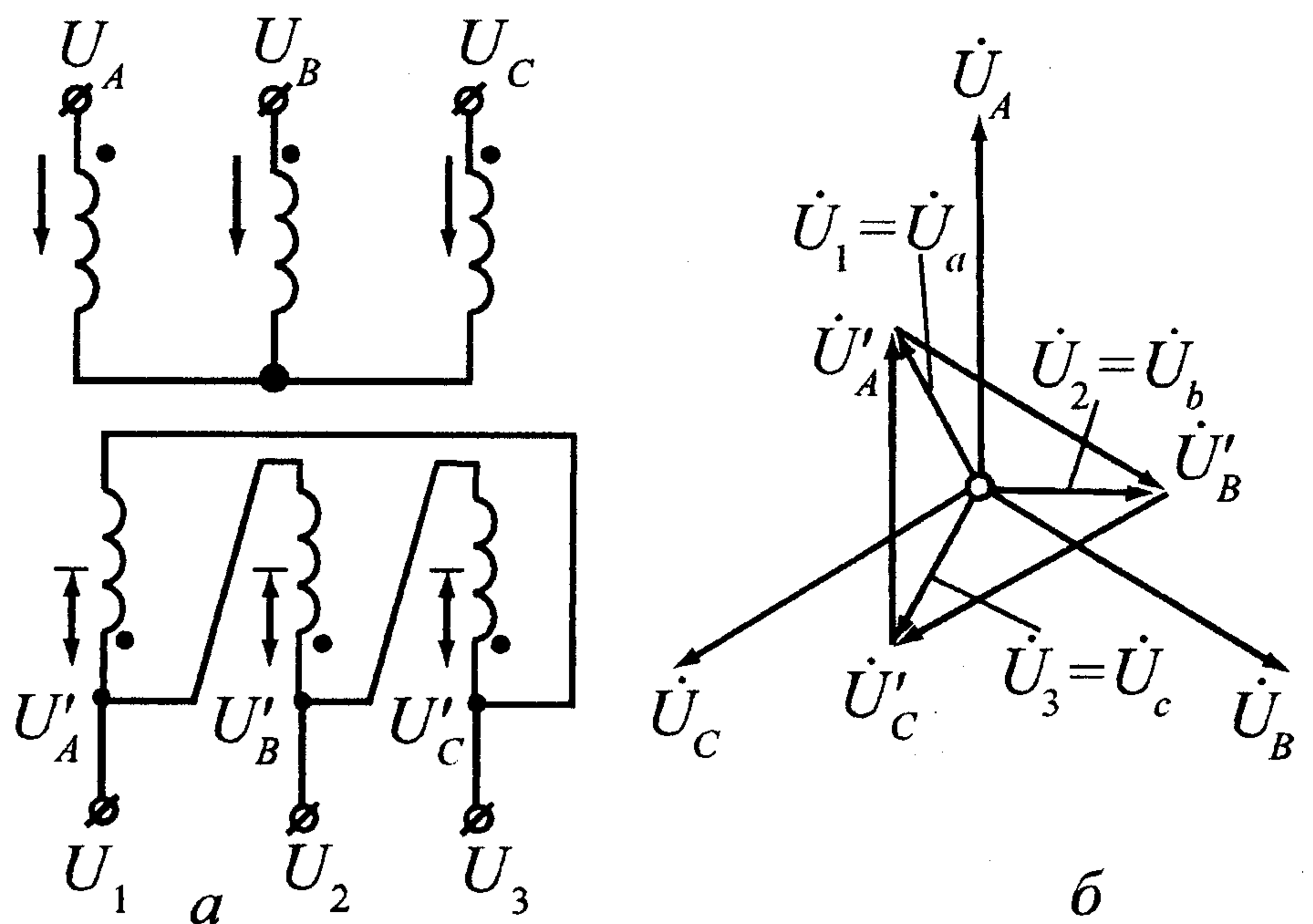


Рис. 18. Соединения обмоток трансформатора по схеме $Y/\Delta-11$:
а – схема соединения обмоток;
б – векторная диаграмма

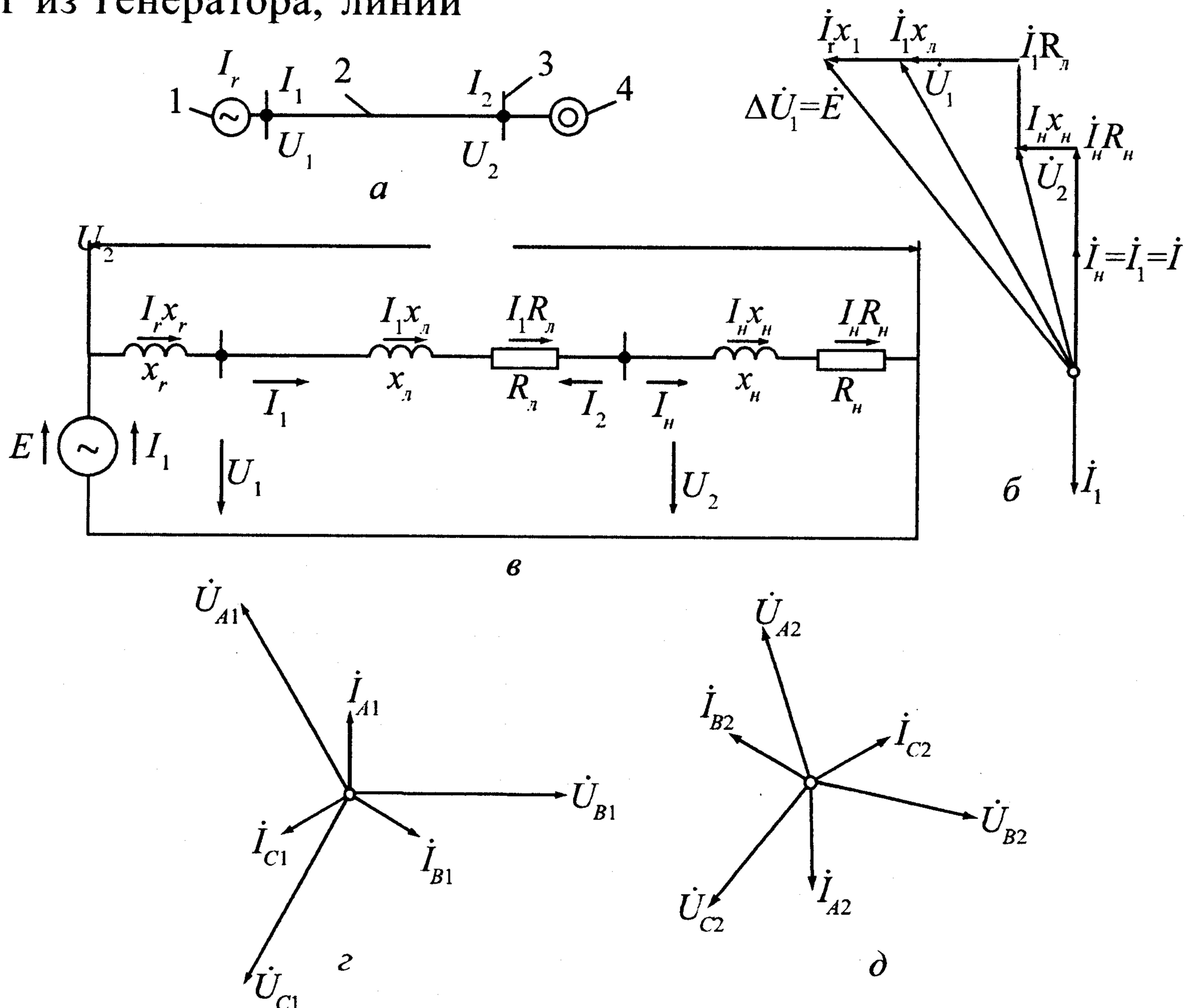


Рис. 19. Векторные диаграммы при нагрузочном режиме:
а – схема рассматриваемой сети; б – расчетная схема замещения;
в – векторная диаграмма одной фазы для рассматриваемого нагрузочного режима; г – трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д – то же приемной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

и электроприемников. 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_r , линия – индуктивным сопротивлением X_l и активным сопротивлением R_l , а нагрузка – индуктивным сопротивлением X_n и активным сопротивлением R_n . На рис. 19, б указаны токи и напряжения, которые нужно изобразить на векторной диаграмме. Из схемы замещения видно, что токи нагрузки I_n по линии от станции I_1 и генератора I_r 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_1 достигает положительного максимума, ток I_2 достигает своего отрицательного максимума (минимума). Поэтому вектор тока I_2 изображается сдвинутым на 180° относительно вектора тока I_1 .

Поскольку положительные направления токов I_r , I_1 и I_n 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 активных сопротивлениях и опережают эти токи на 90° 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, в, 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 отличием векторной диаграммы одного конца линии от другого является изображение векторов тока одноименных фаз под углом 180° .

Векторные диаграммы при коротких замыканиях. Токами 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 К 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

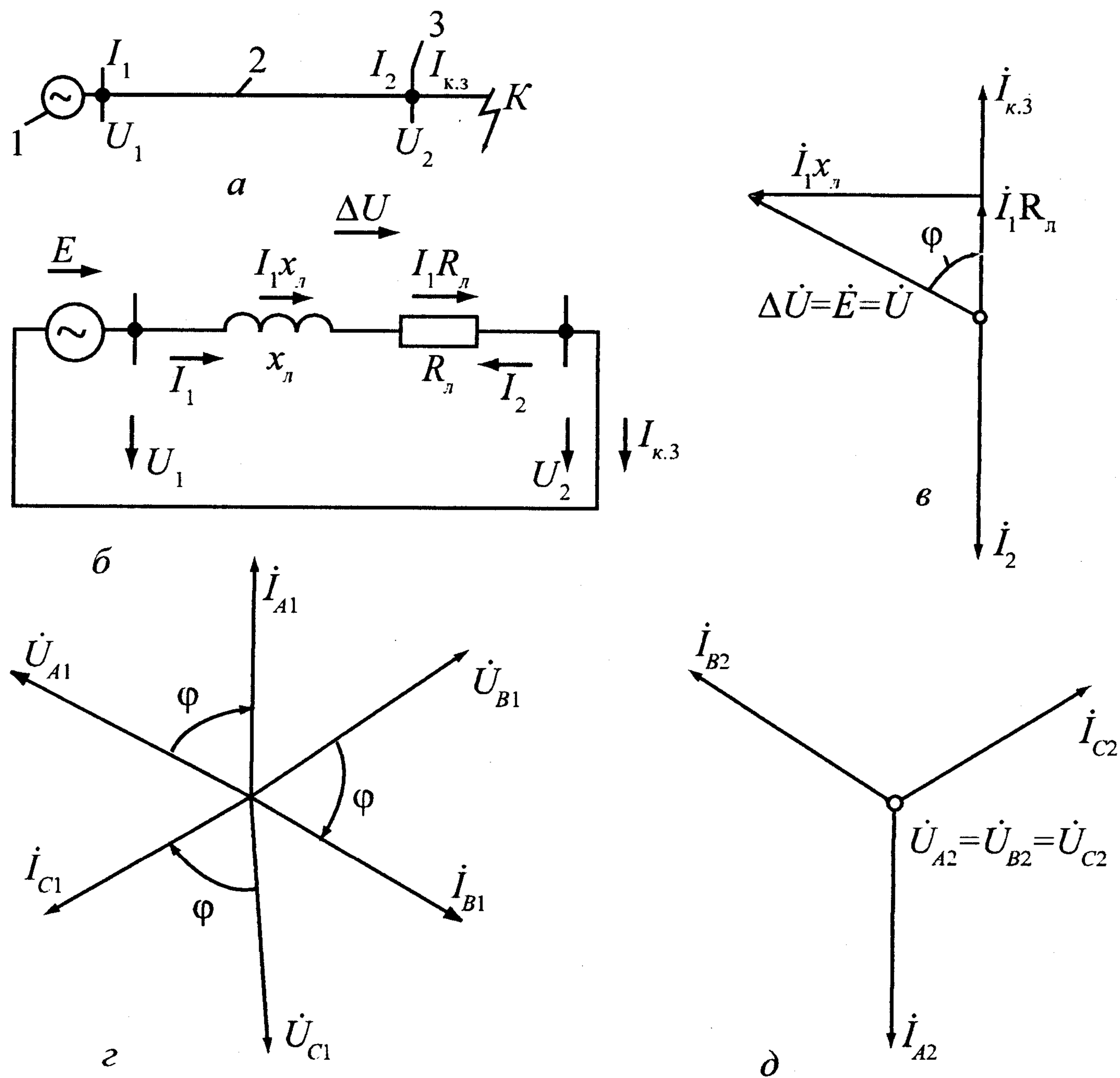


Рис. 20. Векторные диаграммы при трехфазном коротком замыкании: *а* – схема сети; *б* – расчетная схема замещения; *в* – векторная диаграмма для одной из фаз; *г* – трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; *д* – то же приемной подстанции; *1* – энергосистема; *2* – линия; *3* – подстанция

случая. Для простоты изложения сопротивление 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 КЗ \dot{I}_k и равного ему по амплитуде и направлению вектора тока \dot{I}_1 . Вектор тока \dot{I}_2 изображен под углом 180° к вектору тока \dot{I}_k . 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 \dot{U}_1 и, наконец, фазная ЭДС изображается вектором \dot{E} . Вектор тока \dot{I}_1 отстает от вектора напряжения на шинах станции \dot{U}_1 на угол φ , который зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений линии.

Для воздушных линий угол φ лежит в пределах $60-83^\circ$. На рис. 20, *г* и *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. 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 \dot{I}_K и совпадающий с ним вектор тока \dot{I}_{B1} . Вектор тока

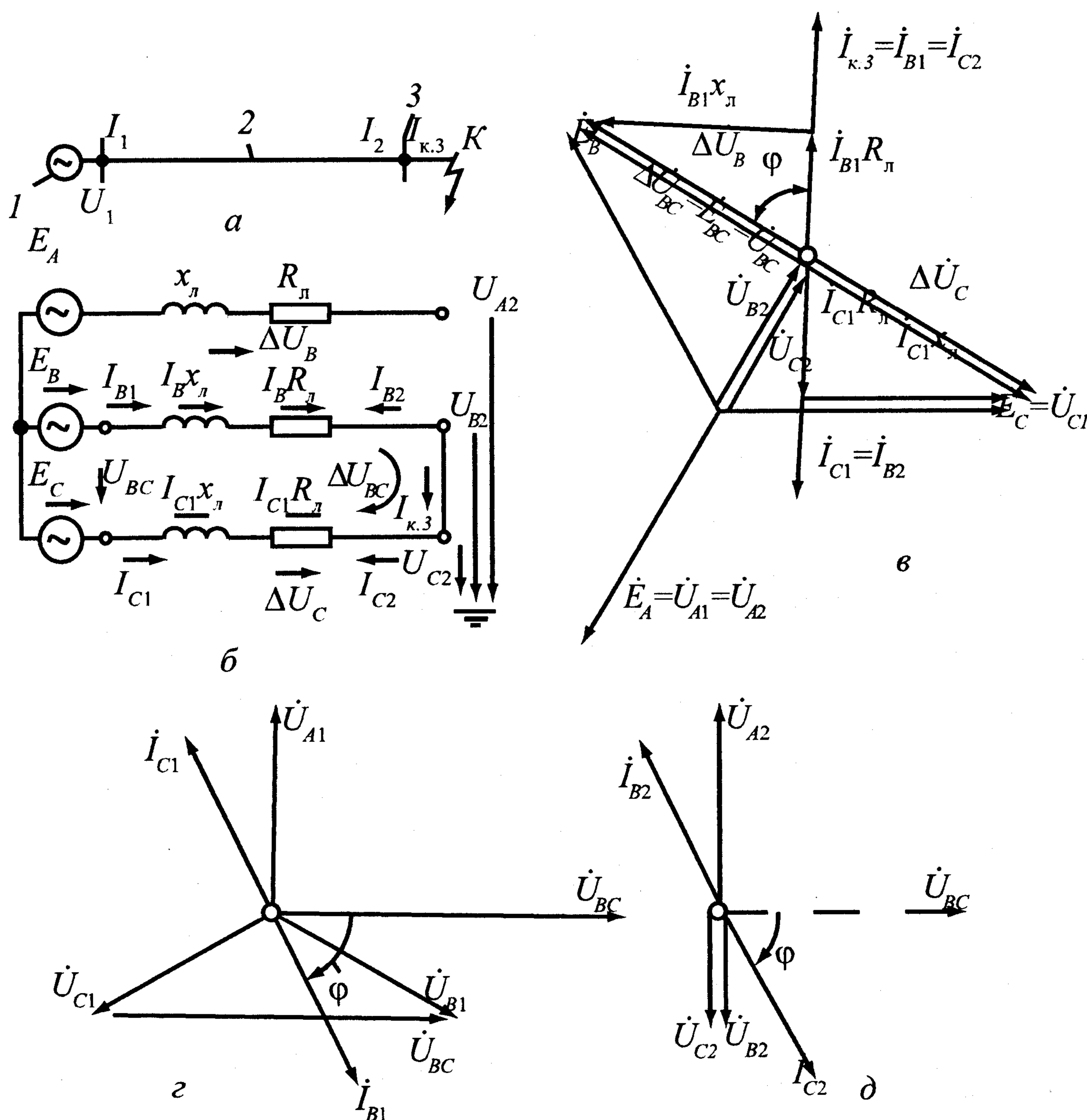


Рис. 21. Векторные диаграммы при двухфазном коротком замыкании: а – схема сети; б – расчетная схема замещения; в – векторная диаграмма для поврежденных фаз; г – трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; д – то же приемной подстанции; 1 – энергосистема;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

\dot{I}_{C1} , равный току \dot{I}_{B1} , но имеющий с ним встречное положительное направление, изображается вектором, сдвинутым на 180° относительно вектора тока \dot{I}_{B1} . Векторы падения напряжений $\dot{I}_{B1}R_L$ и $\dot{I}_{C1}R_L$ строятся совпадающими с соответствующими векторами токов.

Векторы падений напряжений на индуктивных сопротивлениях $\dot{I}_{B1}X_L$ и $\dot{I}_{C1}X_L$, опережают векторы своих токов на 90° .

На каждой фазе падение напряжений $\Delta\dot{U}_{B1}$ и $\Delta\dot{U}_{C1}$ равно сумме 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 встречно с положительным направлением для падения напряжения ΔU_{C1} . Поэтому вектор $\Delta\dot{U}_{BC}$ должен изображаться как разность векторов $\Delta\dot{U}_{B1}$ и $\Delta\dot{U}_{C1}$. Таким же вектором изображается и действующая по контуру короткого замыкания ЭДС E_{BC} , которая имеет положительное направление, совпадающее с положительным направлением ЭДС фазы B и встречное с положительным направлением ЭДС фазы C . Исходя из вектора междуфазной ЭДС E_{BC} , строим звезду векторов фазных ЭДС E_A , E_B и E_C .

Из векторной диаграммы видно, что угол φ между вектором тока \dot{I}_k и вектором междуфазного напряжения $\Delta\dot{U}_{BC}$ определяется соотношением индуктивного и активного сопротивлений линии, как и при трехфазном коротком замыкании.

Фазные напряжения в месте короткого замыкания равны: на фазе A (U_{A2}) значению фазной ЭДС, а на фазах B и C (U_{B2} и U_{C2}) половине фазной ЭДС. 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. 21, з, а со стороны приемной подстанции – как показано на рис. 21, д.

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

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

На векторной диаграмме рис. 22, в вектор тока \dot{I}_k равен вектору тока \dot{I}_1 . Вектор тока \dot{I}_2 откладывается под углом 180° относительно вектора тока \dot{I}_1 , равного по величине, но имеющего встречное положительное направление.

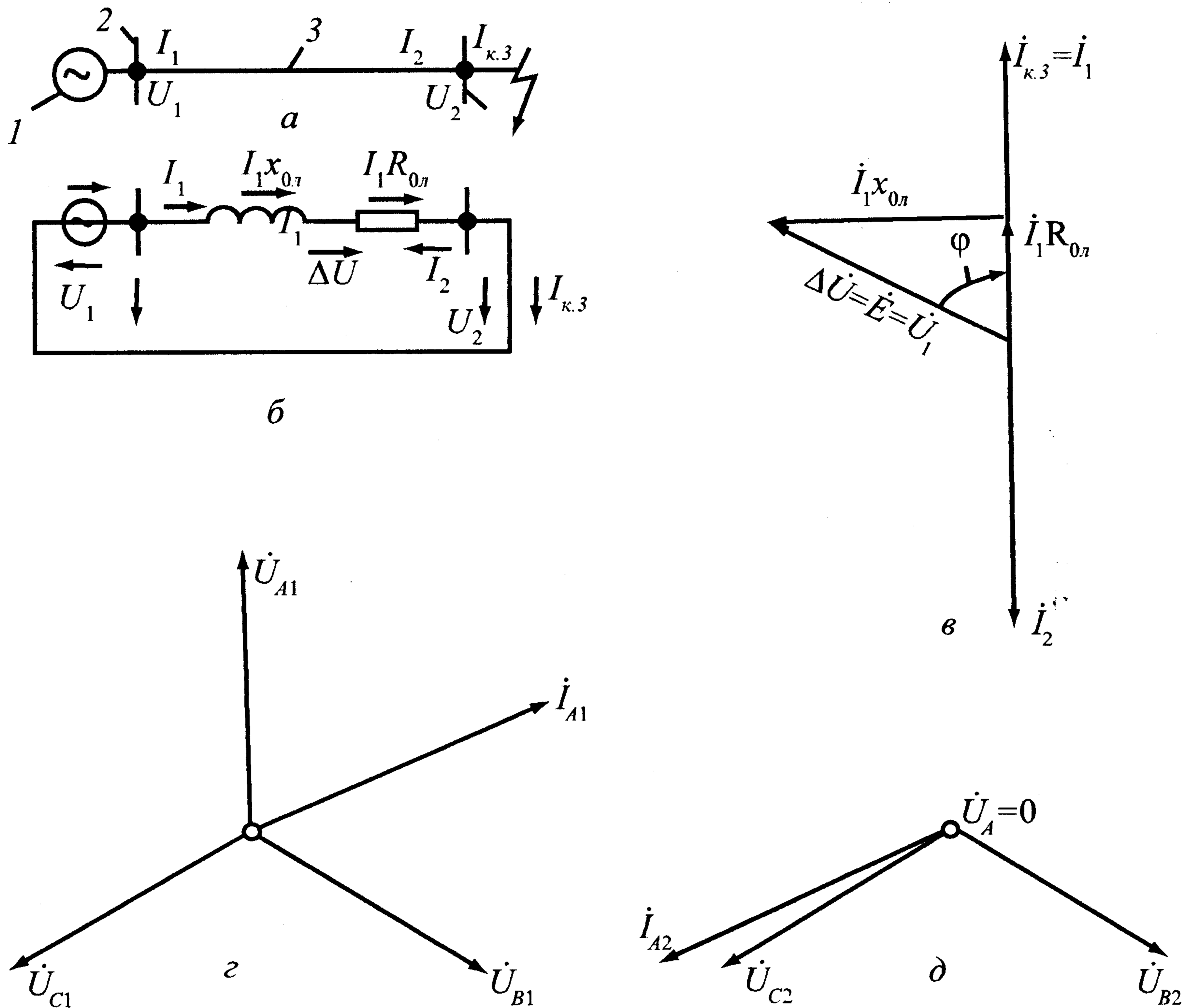


Рис. 22. Векторные диаграммы при однофазном коротком замыкании: *a* – схема сети; *б* – расчетная схема замещения; *в* – векторная диаграмма для поврежденной фазы; *г* – трехфазная векторная диаграмма токов и напряжений на шинах со стороны питающей подстанции; *д* – то же приемной подстанции; 1 – энергосистема; 2 – подстанция № 1; 3 – линия; 4 – подстанция № 2

Вектор результирующего падения напряжения $\Delta \dot{U}$ и равный ему вектор фазной ЭДС \dot{E} получаются как векторная сумма падений напряжений на отдельных сопротивлениях. Векторная диаграмма справедлива для короткого замыкания на любой фазе. На рис. 22, *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. 23, *a* изображен трансформатор, обмотки которого соединены по схеме звезда – треугольник. На этой же схеме указаны принятые положительные направления напряжений и токов, а также указаны полярности первичных и вторичных обмоток трансформатора. Для упрощения примем, что сопротивление трансформатора равно нулю.

Векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора при двухфазном коротком замыкании на выводах обмоток, соединенных в треугольник. 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.

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

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

где k — коэффициент трансформации трансформатора.

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

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

$$\dot{I}_{AY} + \dot{I}_{BY} + \dot{I}_{CY} = 0$$

или

$$\dot{I}_{CY} = -(\dot{I}_{AY} + \dot{I}_{BY}).$$

Для рассматриваемого случая, когда $\dot{I}_{AY} = \dot{I}_{BY}$, тока фазы C со стороны звезды равен:

$$\dot{I}_{CY} = -2\dot{I}_{BY}.$$

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 . Ток $I_{B\Delta}$ разделяется на два тока. Один из них I'_B равен $1/3 I_{B\Delta}$, а второй $I'_C = 2/3 I_{B\Delta}$. 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 достигнет своего максимума, но против направления своей стрелки.

Как видно из рис. 23, а, 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.

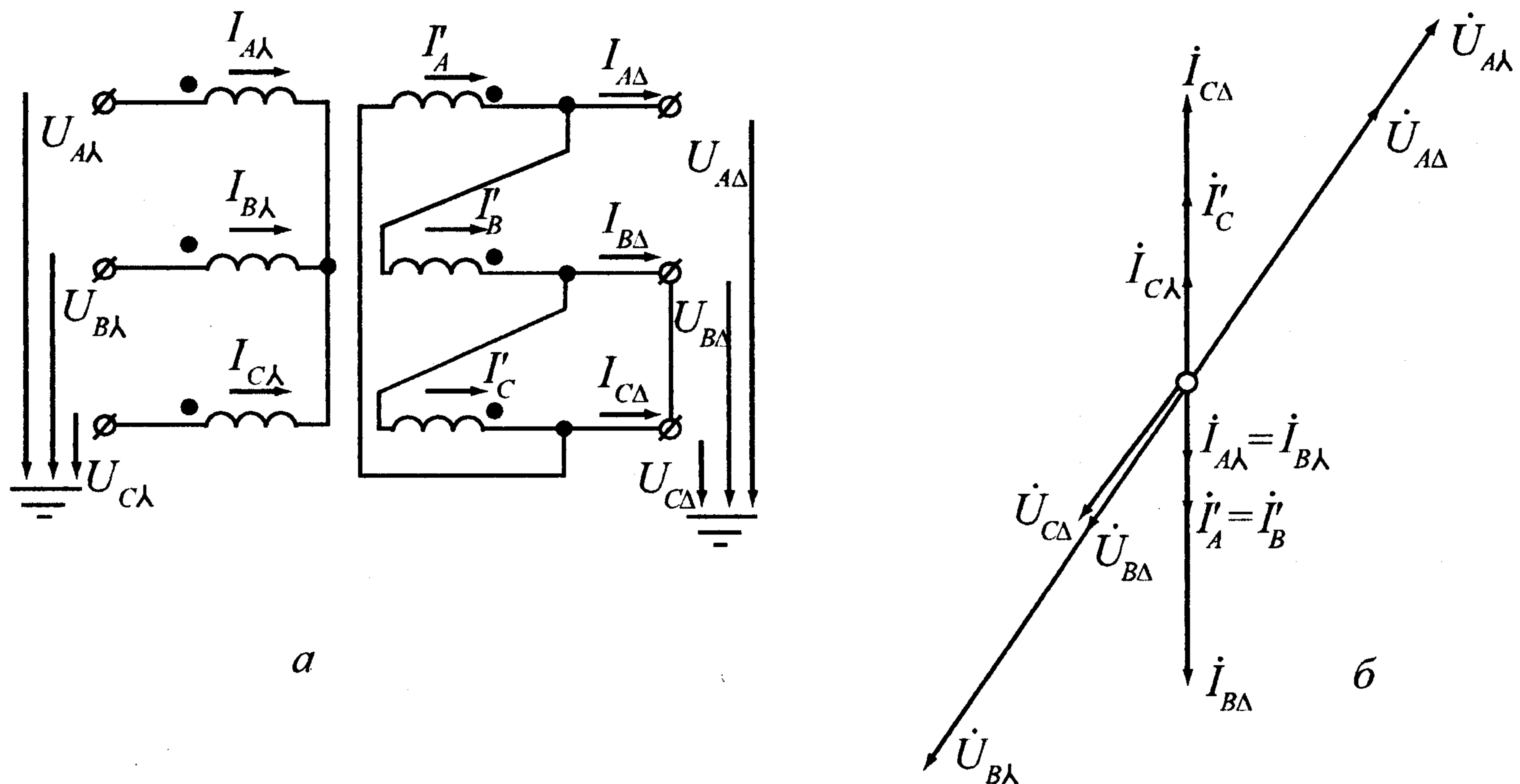


Рис. 23. Двухфазное короткое замыкание за трансформатором, соединенным по схеме звезда – треугольник:
 а – исходная схема; б – векторная диаграмма

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

При двухфазном коротком замыкании закороченной оказывается не только фаза С трансформатора, но и последовательно соединенные две вторичные обмотки фаз А и В. Соответственно должна быть равна нулю и сумма напряжений фаз А и В на стороне трансформатора, где обмотки соединены в звезду.

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 цепей измерительных трансформаторов тока и напряжения, проанализировать поведение реле защиты в нормальных и аварийных режимах в первичных цепях и ответить на другие вопросы, возникающие при эксплуатации.

Векторные диаграммы, изображающие первичные и вторичные напряжения трансформаторов напряжения. Первичные обмотки измерительных трансформаторов напряжения

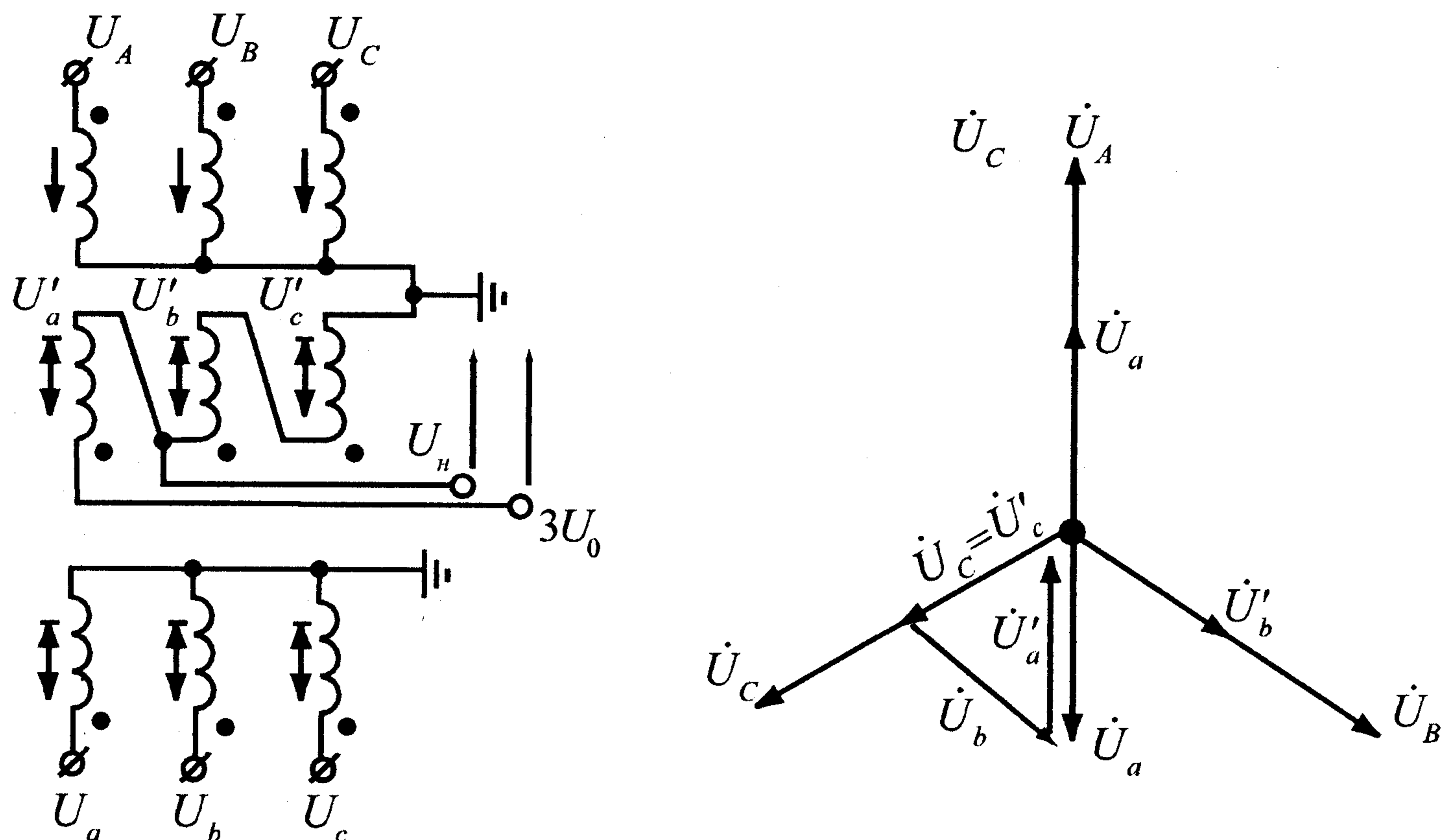


Рис. 24. Векторная диаграмма для трансформатора напряжения:
 а – схема соединения обмоток трансформатора напряжения;
 б – векторная диаграмма напряжений

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 строится звезда из трех векторов первичных напряжений, подведенных к обмотке высшего напряжения \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . Затем изображаются векторы вторичных напряжений. Принимая центр звезды за нулевой потенциал, откладываем вектор вторичного напряжения \dot{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 \dot{U}'_b совпадает с вектором \dot{U}_B , а вектор \dot{U}'_a – с вектором \dot{U}_A . Конец вектора \dot{U}'_a совпадает с началом вектора \dot{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 проверки направленных защит от замыканий на землю конец вторичной обмотки фазы В, имеющий потенциал относительно земли, равный сумме вторичных напряжений фаз С и В, выводится на панели защит и называется испытательной жилкой.

Вектор, изображающий напряжение испытательной жилки \dot{U}_n , находится как сумма векторов \dot{U}'_c и \dot{U}'_b .

Для напряжений вторичных обмоток, соединенных в звезду, векторы напряжений соответствующих фаз изобразятся совпадающими с векторами одноименных фаз первичных напряжений.

Векторные диаграммы, изображающие первичные и вторичные токи 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).

На рис. 25, 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 совпадать с первичными токами. Векторная диаграмма вторичных токов повторяет (в соответствующем масштабе) векторную диаграмму первичных токов и для других режимов.

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–г 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, назовем его I'_0 , равен сумме токов фаз А и С.

Если для тока, проходящего по общему проводу, принять положительное направление, встречное положительному направлению для

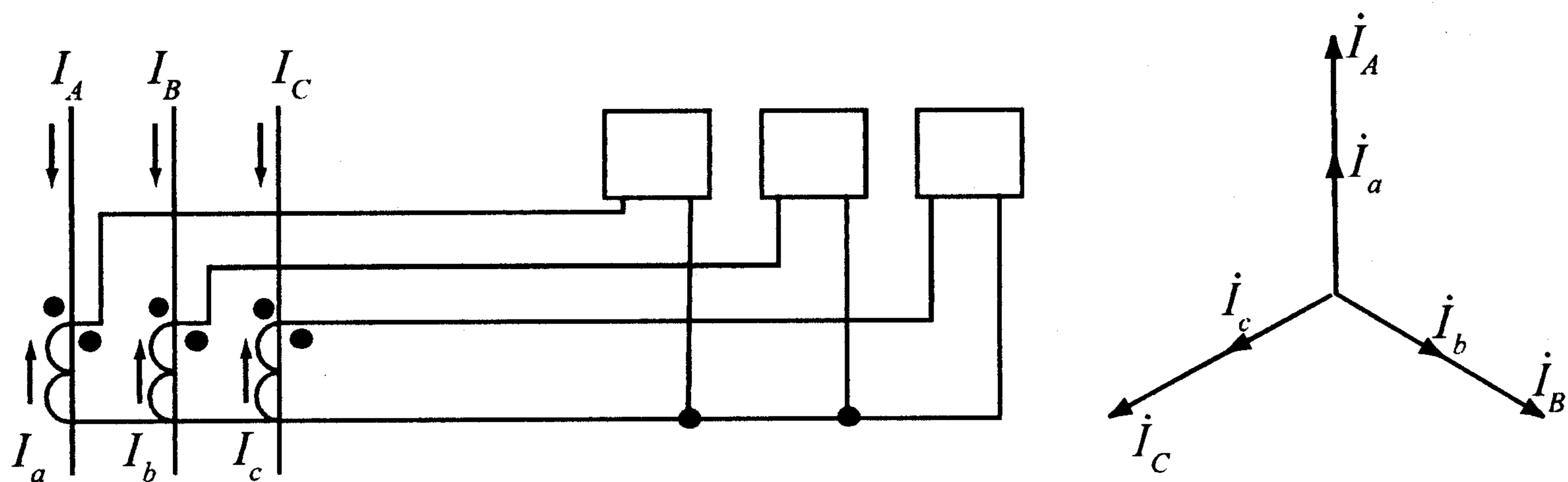


Рис. 25. Схема соединения трансформаторов тока, соединенных по схеме звезда (а) и векторная диаграмма токов (б)

тока I'_0 , то векторное изображение этого тока \dot{I}_0 будет сдвинуто относительно вектора тока \dot{I}'_0 на 180° , т. е. $\dot{I}_0 = -(\dot{I}'_a + \dot{I}'_c)$

Рассмотрим схему включения одного реле на разность токов двух трансформаторов тока (рис. 27, а). Векторы вторичных токов трансформаторов тока, совпадают по направлению с векторами первичных 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 С и А. 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 В отсутствует, то при однофазном коротком замыкании на фазе В токи во вторичных цепях трансформаторов тока отсутствуют.

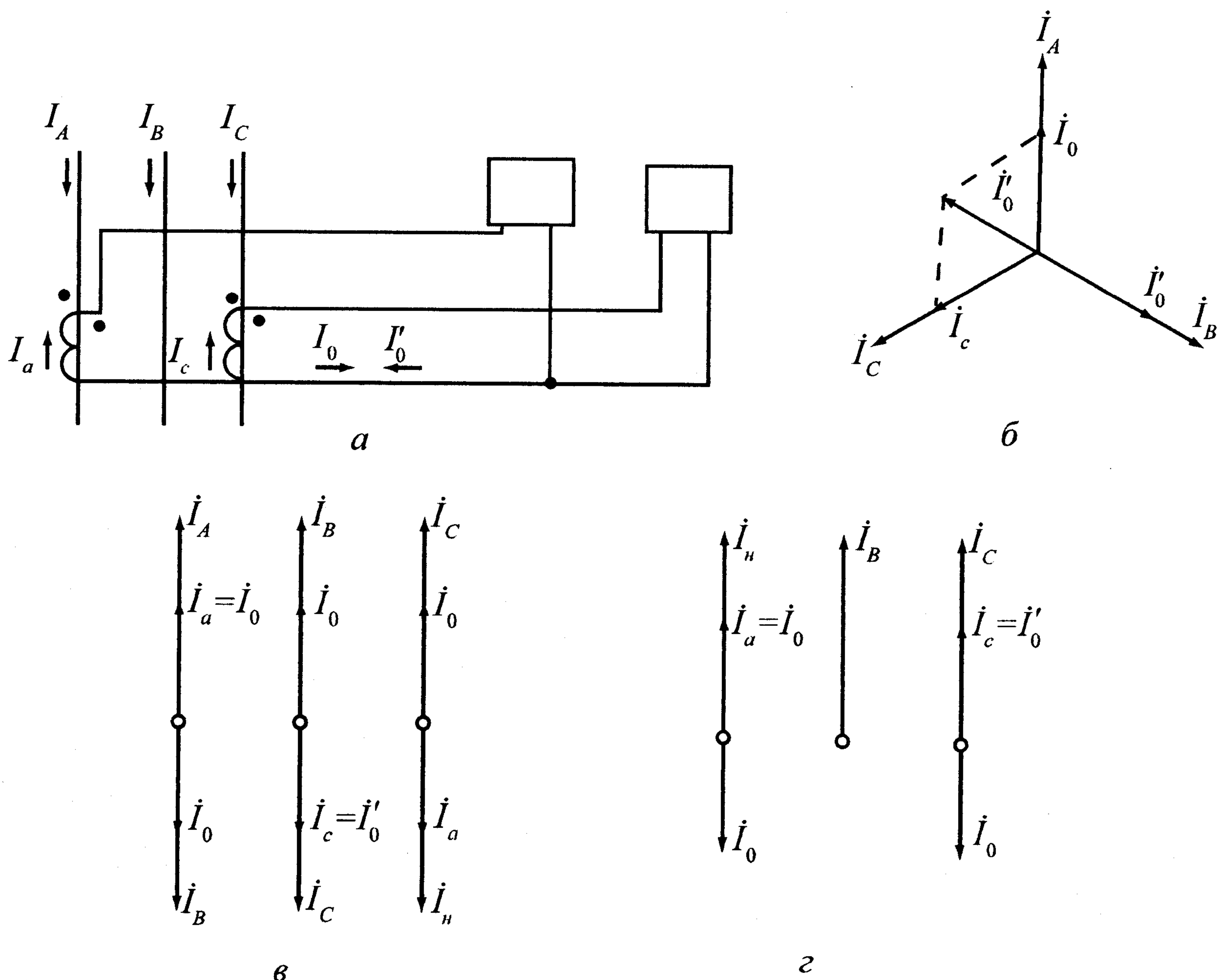


Рис. 26. Схема соединения трансформаторов тока, соединенных по схеме неполная звезда (а) и векторные диаграммы первичных и вторичных токов в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании (б); то же при двухфазных коротких замыканиях (в); то же при однофазных коротких замыканиях (з).

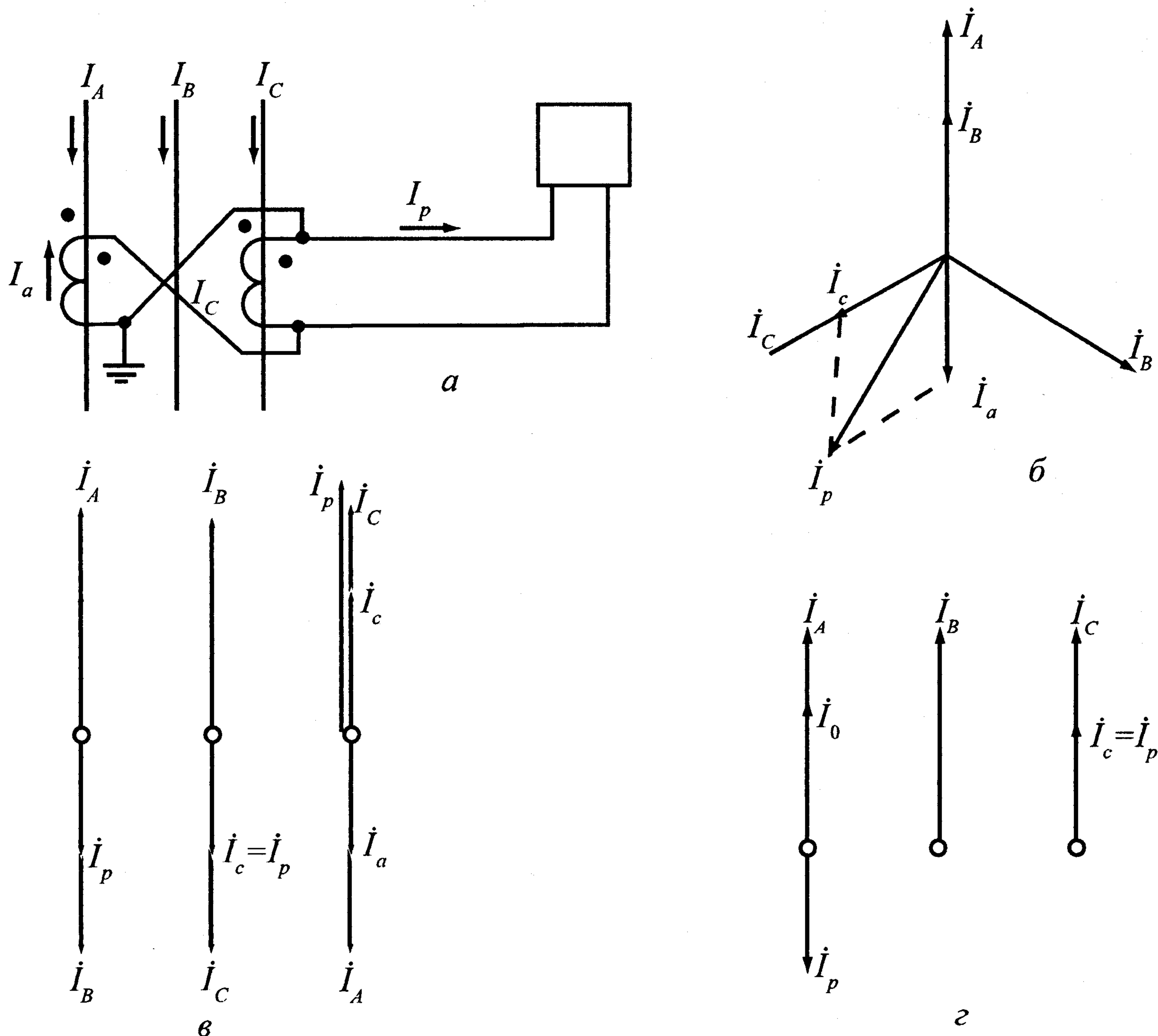


Рис. 27. Схема соединения трансформаторов тока, соединенных на разность токов двух фаз (а) и векторные диаграммы первичных токов и токов во вторичных цепях трансформаторов тока и в реле в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании (б); то же при двухфазных коротких замыканиях (в); то же при однофазных коротких замыканиях (г).

Рассмотрим схему (рис. 28, 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, на векторной диаграмме совпадают по направлению.

Токи в реле при указанных для них положительных направлениях определяются как разности токов двух соответствующих фаз, а именно:

$$\dot{I}_{pa} = \dot{I}_a - \dot{I}_b, \dot{I}_{pb} = \dot{I}_b - \dot{I}_c, \dot{I}_{pc} = \dot{I}_c - \dot{I}_a.$$

С помощью векторных диаграмм для разных видов коротких замыканий по известным векторам вторичных токов можно определить векторы токов в реле как разности соответствующих векторов фазных токов.

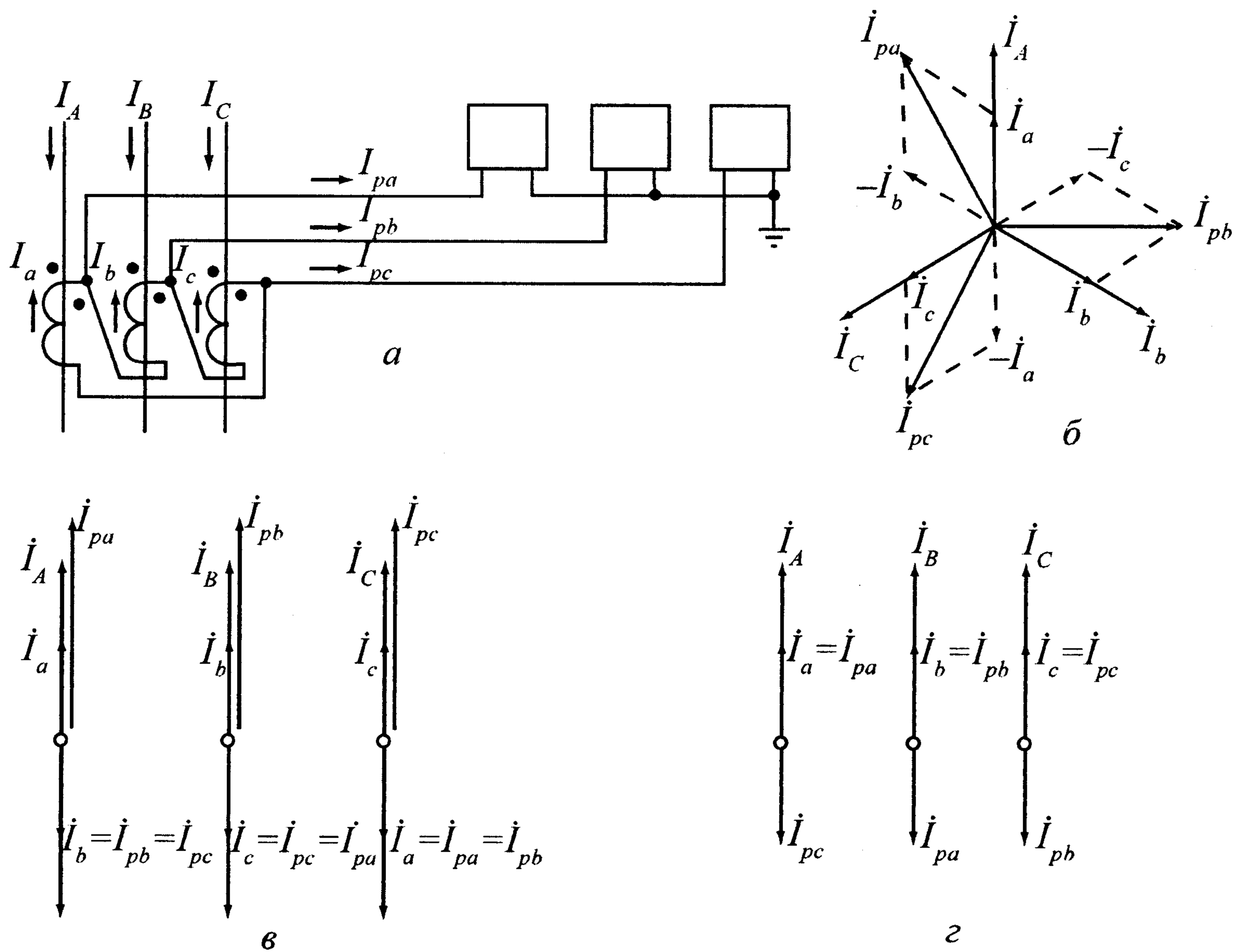


Рис. 28. Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а реле в звезду (а) и векторные диаграммы первичных и вторичных токов в обмотках трансформаторов тока и в реле в нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании (б); то же при двухфазных коротких замыканиях (в); то же при однофазных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

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 называют *снятием векторных диаграмм*.

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

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

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

путем измерения вольтметром убедиться 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 напряжения.

Определение соответствия маркировки выводов основной маркировке называется *фазировкой вторичных цепей напряжения*. Фазировка, которая обычно производится вольтметром, может быть выполнена только в том случае, если фазлируемые 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.

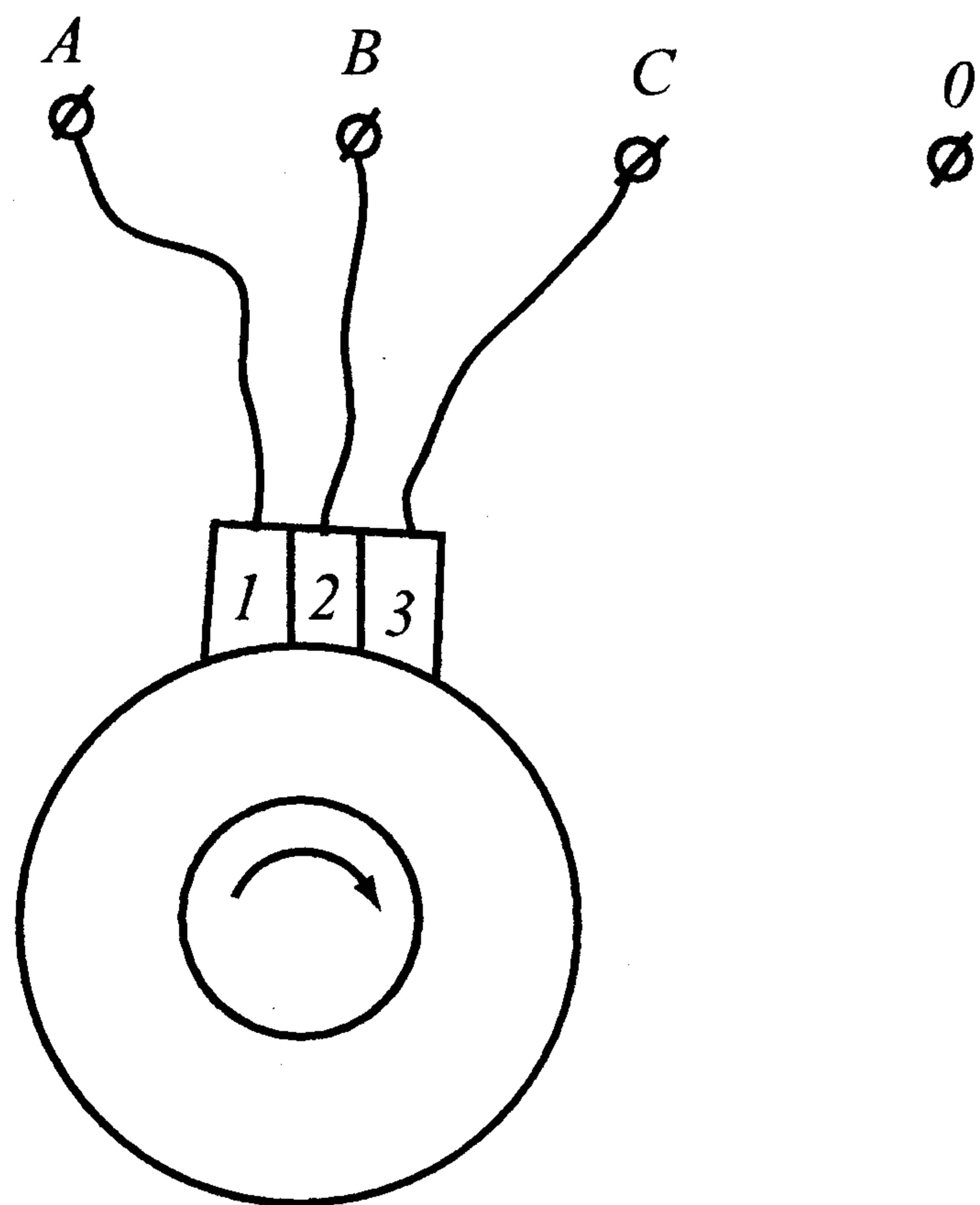


Рис. 29. Включение фазоуказателя для определения последовательности чередования фаз напряжений

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 задаются определенным масштабом изображения напряжения (например, 1 мм соответствует 1 В). В соответствии с принятым масштабом изображают три фазных (рис. 30, а) и, если нужно, три междуфазных (рис. 30, б).

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

использованием известной звезды 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. 31 показано построение одного неизвестного вектора с помощью трех известных. Представим, 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 \dot{U}_A, \dot{U}_B и \dot{U}_C в принятом масштабе и сдвинутых один относительно другого на 120° .

Измерив поочередно вольтметром напряжения между выводом X и выводами A, B и C , получим три показания вольтметра.

Из концов известных векторов радиусами, равным 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 \dot{U}_A, \dot{U}_B и \dot{U}_C удовлетво-

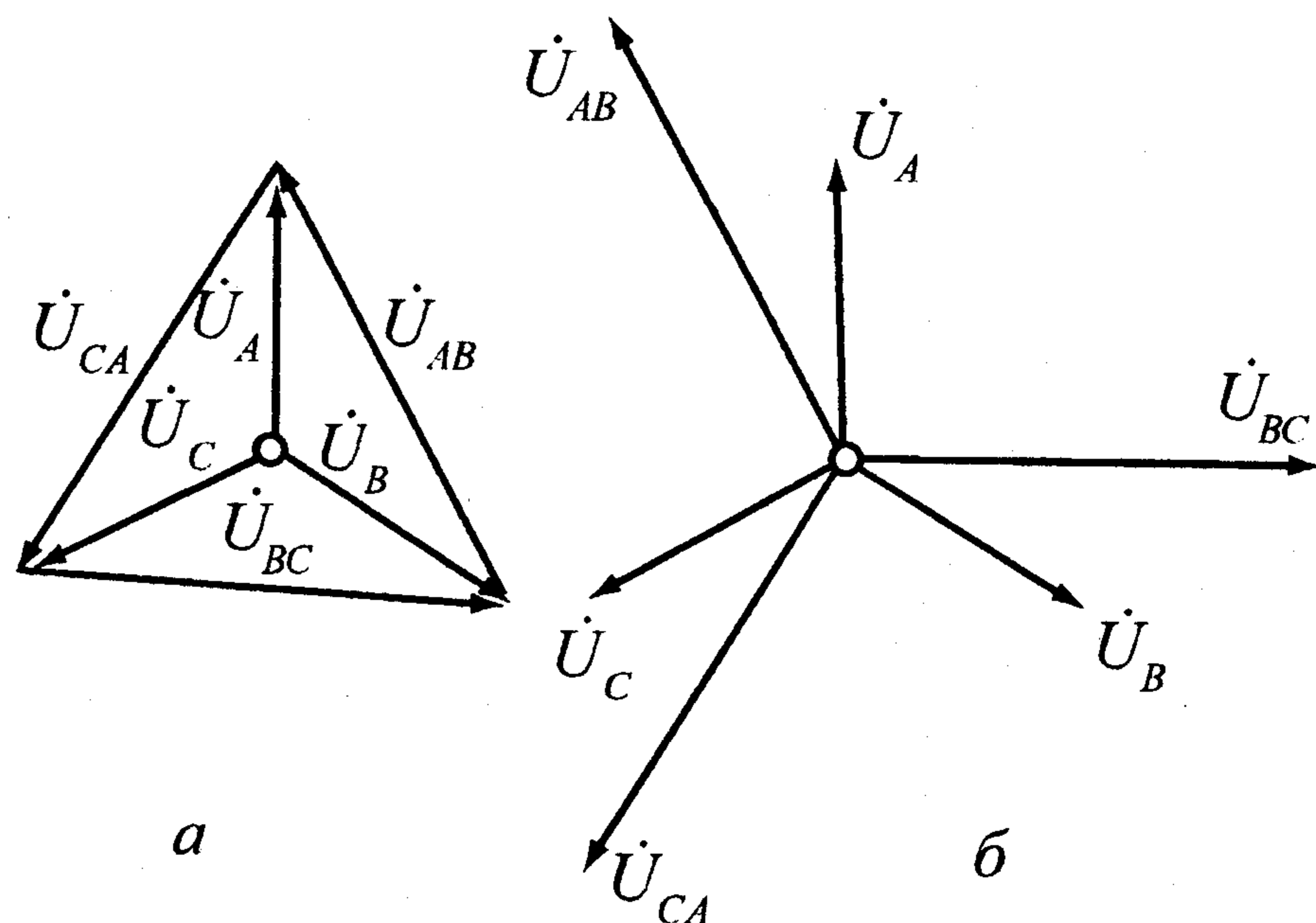


Рис. 30. Векторная диаграмма фазных и междуфазных напряжений

2 2

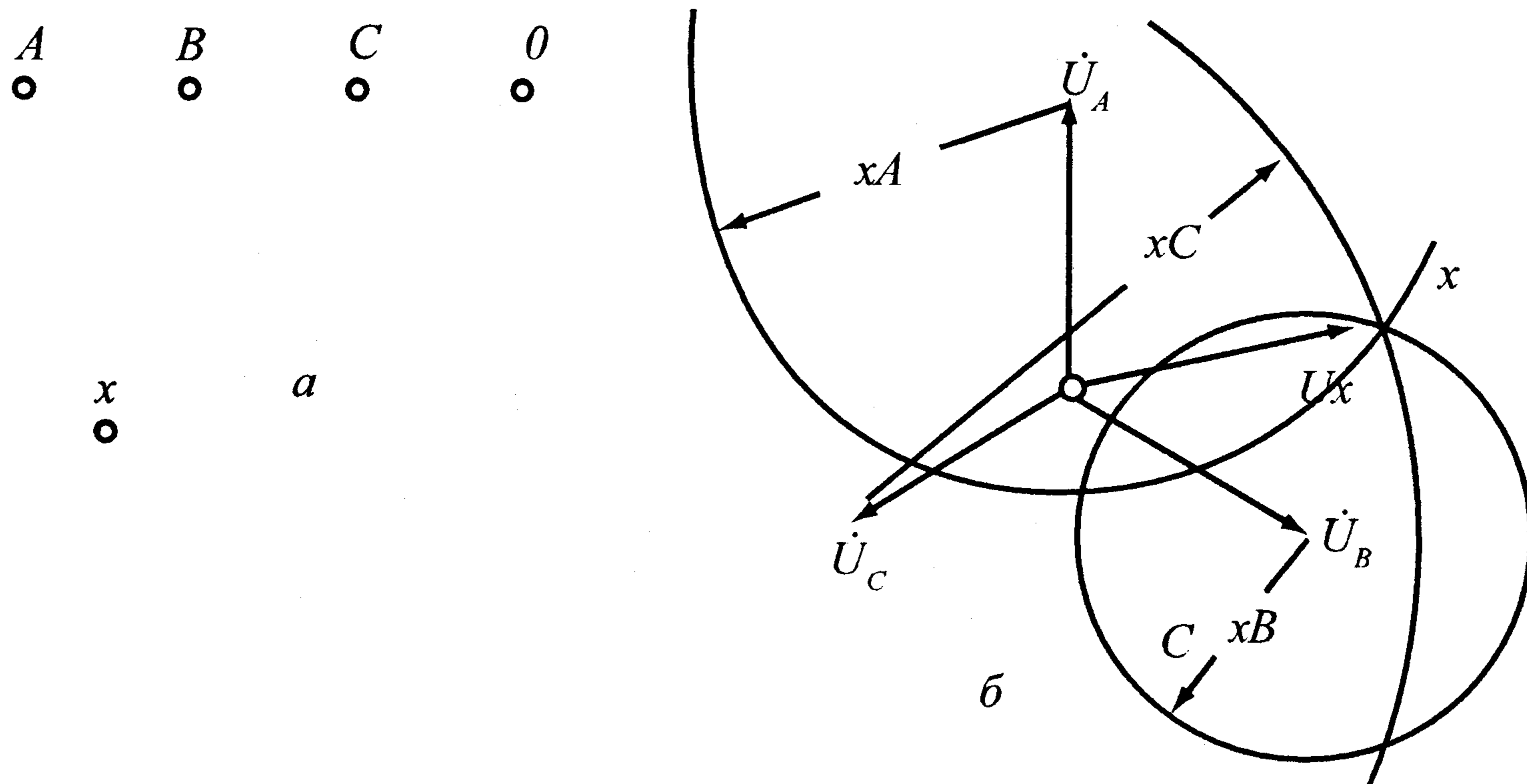


Рис. 31. Определение вектора неизвестного напряжения: а — зажимы известных и неизвестного напряжений; б — построение вектора неизвестного напряжения

ряет всем трем показаниям вольтметра. Вектор, изображающий напряжение между выводом X и землей, изобразится вектором \dot{U}_X .

Если необходимо снять векторную диаграмму напряжений нескольких выводов, то поочередно производятся измерения и строится 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: μA и I/U .

В положении μA 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 *Фаза* 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.

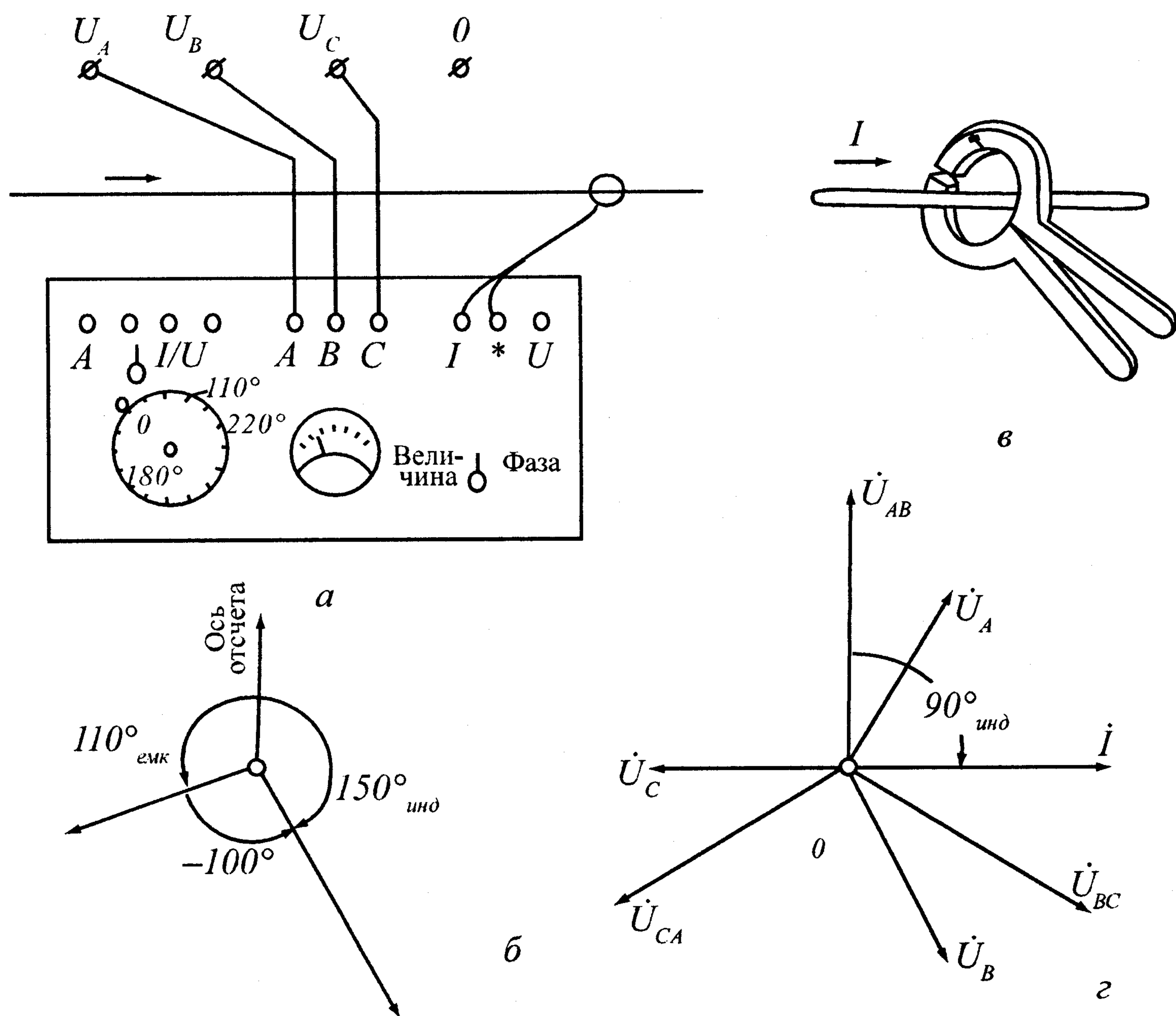


Рис. 32. Снятие векторной диаграммы прибором ВАФ:

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}

На магнитопроводе разъемных токоизмерительных клещей (рис. 32, б) и на входных зажимах цепи напряжения нанесена маркировка в виде звездочек, показывающих, при каких положительных направлениях для тока и напряжения отградуирован прибор.

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

Измерение угла производится следующим образом:

проверяется, что трехфазное напряжение питания, подведенное к зажимам *A, B, C*, имеет прямое чередование. Для этого от лимба отжимают резиновый тормоз. Освобожденный лимб должен вращаться по часовой стрелке. После этого резиновый тормоз подключается к лимбу;

переключатель μA и I/U устанавливается в положение I/U ;

переключатель *Величина/Фаза* устанавливается в положение *Величина*;

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, охватываемому клещами. Этот провод входит в торец клещей, обозначенный звездочкой. Напряжение подводится 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 проходит нуль слева направо. Когда стрелка прибора находится на нуле, отсчитываются показания угла на лимбе по отметке, нанесенной на корпусе (110 или 220 В);

отключается измеряемый ток или напряжение, а переключатель *Величина/Фаза* устанавливается в положение *Величина*;

на прибор подается следующий ток или напряжение и производятся измерения его значения и угла.

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

Например, допустим, что первый раз подали на прибор напряжение и измерили угол 110° (емк.). От условно принятой оси отсчета на рис. 32, в откладываем против часовой стрелки 110° и в принятом

для напряжения масштабе откладываем вектор напряжения \dot{U} . Отключаем измеряемое напряжение и на прибор подаем ток с помощью токоизмерительных клещей.

Предположим, по лимбу мы отсчитали угол 150° (инд.). От отсчета откладываем 150° по часовой стрелке и в масштабе, принятом для тока, откладываем вектор тока I . Как видно из рис. 32, в, угол между током I и напряжением U составляет 100° .

На векторной диаграмме рис. 32, г показано положение вектора напряжения, вектора измеренного тока I , если замер показал, например сдвиг на 90° (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 подведения к нему трехфазной системы напряжений. Чередование 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 напряже-

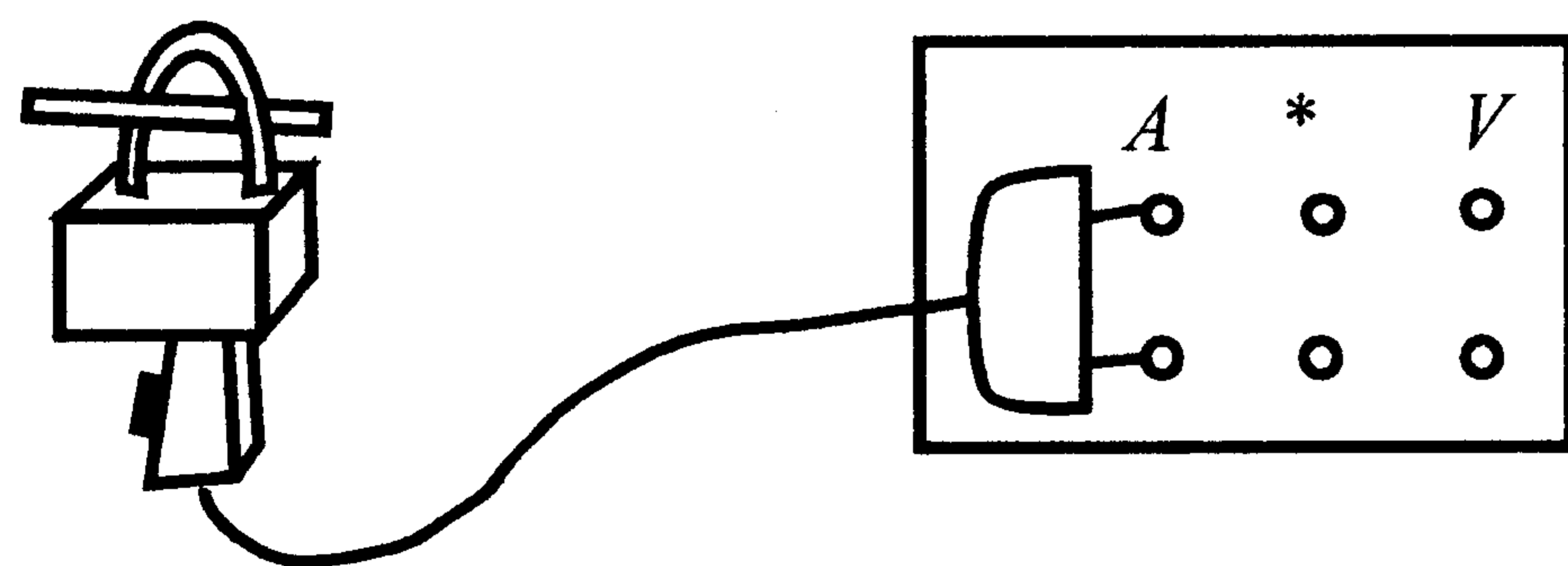


Рис. 33. Измерение тока

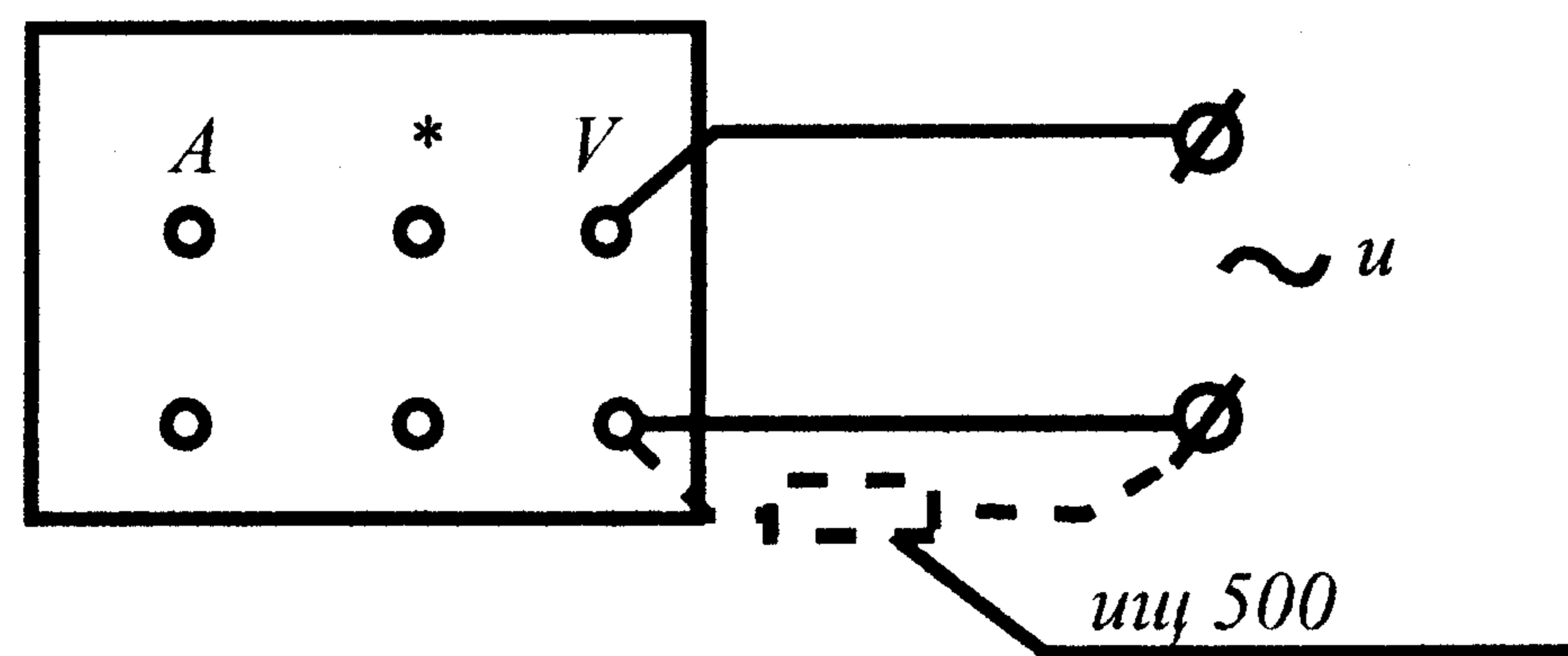


Рис. 34. Измерение напряжения

ниями. 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 А / 1 А выбирают предел измерения. При измерении тока до 100 А необходимо токовую приставку (ТП100) установить в гнезда «А», а кнопку предела измерения в положение «10 А».

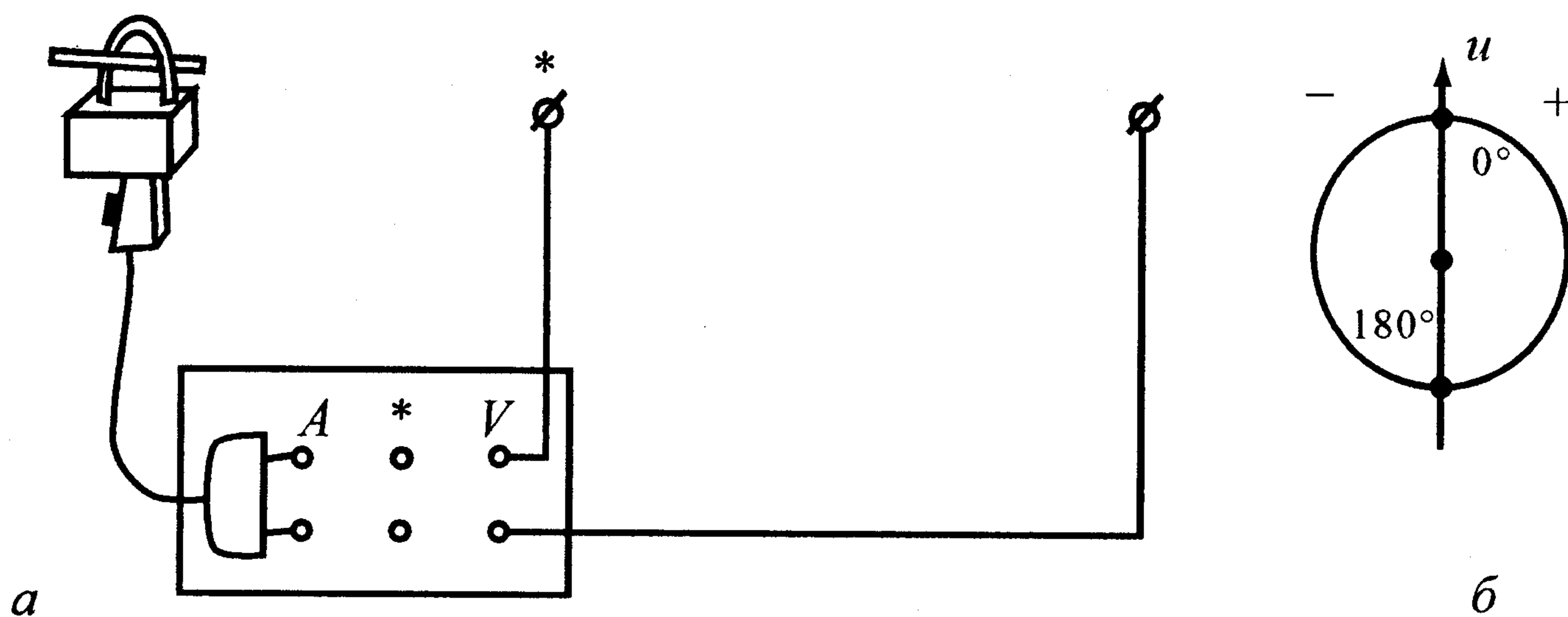


Рис. 35. Снятие векторных диаграмм:
a – схема подключения внешних цепей к прибору; *б* – ось отсчета напряжения и зоны расположения векторов тока

Измерение напряжения. Штыри проводников устанавливают в гнезда (рис. 34).

При напряжении до 125 (250) В используют обыкновенные соединительные проводники, а до 500 В – соединительный проводник с делителем напряжения (ИЩ500) и обыкновенный проводник (показания прибора необходимо умножать на 4).

Снятие векторных диаграмм. Измерения производят согласно рис. 35 при нажатой кнопке VA/φ. При подаче напряжения 40–125 В (150–250 В) используют два соединительных проводника (обыкновенных). Вектор тока откладывают от подаваемого напряжения, совмещаемого с вертикальной линией 0–180°. При загорании светодиода со знаком + вектор тока откладывают в зоне + (0–180°), а при загорании светодиода со знаком – вектор тока откладывают в зоне – (18–0).

8. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

В настоящем и последующих параграфах приведены примеры применения векторных диаграмм в практике наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики.

Токовые цепи дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора со схемой соединения звезда – треугольник изображены на рис. 36, *a*. На этой же схеме указаны полярности обмоток и принятые положительные направления для изображаемых на векторной диаграмме токов.

На векторной диаграмме на рис. 36, *б* показаны векторы токов нагрузки первичной цепи со стороны обмоток силового трансформатора, соединенных в звезду \dot{I}_{A1} , \dot{I}_{B1} , \dot{I}_{C1} . В соответствии с полярностью обмоток и принятыми положительными направлениями векторы

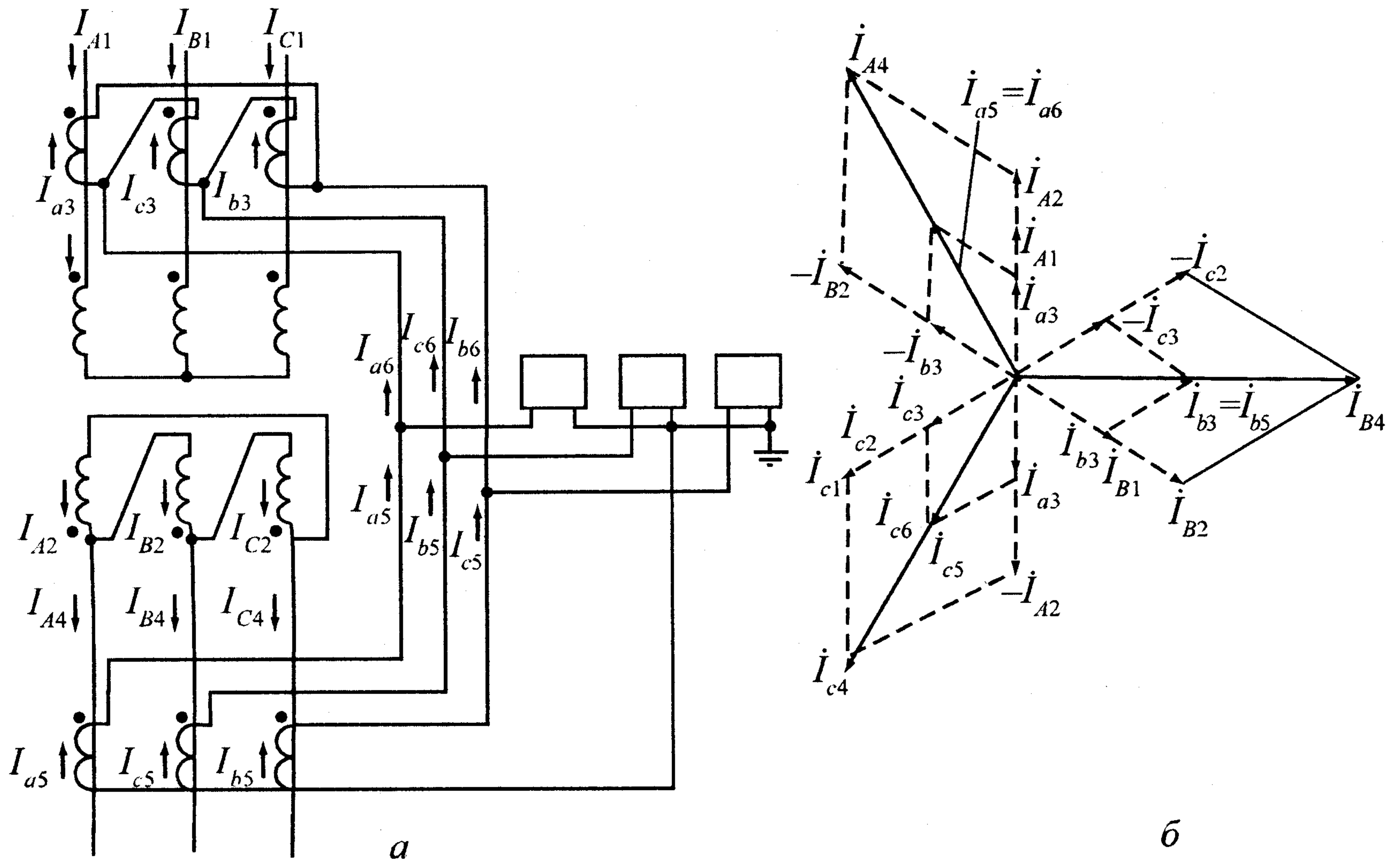


Рис. 36. Токовые цепи дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора $Y/\Delta-11$:
 а – схема соединения токовых цепей; б – векторная диаграмма первичных, вторичных токов и токов в плечах защиты

токов \dot{I}_{A1} , \dot{I}_{B2} и \dot{I}_{C2} вторичных обмоток силового трансформатора, а также векторы токов \dot{I}_{A3} , \dot{I}_{B3} , \dot{I}_{C3} вторичных обмоток трансформаторов тока с первичной стороны силового трансформатора совпадают по направлению с векторами токов \dot{I}_{A1} , \dot{I}_{B1} , \dot{I}_{C1} .

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

Векторы вторичных токов трансформаторов тока со вторичной стороны силового трансформатора обозначены \dot{I}_{A5} , \dot{I}_{B5} , \dot{I}_{C5} , \dot{I}_{A6} , \dot{I}_{B6} , \dot{I}_{C6} .

Для токов, подведенных к реле 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 $\dot{I}_{A5} - \dot{I}_{A6}$, $\dot{I}_{B5} - \dot{I}_{B6}$ и $\dot{I}_{C5} - \dot{I}_{C6}$ должны быть равны нулю. Это значит, что вектор тока \dot{I}_{A6} должен быть равен вектору \dot{I}_{A5} и одинаково направленным.

Соответственно вектор тока \dot{I}_{B6} должен совпадать с вектором тока \dot{I}_{B5} , а вектор тока \dot{I}_{C6} — с вектором \dot{I}_{C5} .

Как видно из векторной диаграммы 3б,б, чтобы получить вектор \dot{I}_{A6} из векторов \dot{I}_{A3} , \dot{I}_{B3} и \dot{I}_{C3} , надо из вектора тока \dot{I}_{A3} вычесть вектор тока \dot{I}_{B3} . Чтобы получить вектор \dot{I}_{B6} , надо из вектора тока \dot{I}_{B3} вычесть вектор тока \dot{I}_{C3} , и чтобы получить вектор тока \dot{I}_{C6} , надо из вектора \dot{I}_{C3} вычесть вектор тока \dot{I}_{A3} . Соответственно с этим и производится соединение верхних трансформаторов тока в треугольник и подсоединение к ним проводов дифференциальной защиты.

9. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Реле направления мощности применяются в схемах защиты от междуфазных КЗ всех видов, реагирующей на направление мощности прямой или обратной последовательности, в том числе — в направленной поперечной дифференциальной защите. Они применяются также в защитах от замыканий на землю, срабатывая от токов и напряжений нулевой последовательности, в том числе в резервных защитах трансформаторов и автотрансформаторов.

Для контроля направления мощности прямой последовательности используются реле РБМ171, РБМ271, нулевой последовательности — РБМ178, РБМ278, обратной последовательности — РМОП1, РМОП2. Реле РБМ271 и РБМ278 имеют электрические характеристики, аналогичные соответственно реле РБМ171 и РБМ178, и предназначены для использования в схемах поперечных дифференциальных защит параллельных линий, отличаются они наличием двух контактов. Подробно особенности и схемы защит в реле направления мощности описаны в [3].

Реле выполнены на индукционном основе. На ярме магнитопровода расположены обмотки напряжения и тока. Магнитный поток Φ_n , создаваемый обмоткой напряжения и магнитный поток Φ_t , создаваемый обмоткой тока сдвинуты один относительно другого, что является необходимым условием создания вращающего момента на оси индукционного реле, который определяется выражением

$$M \equiv \Phi_n \Phi_t \sin \psi,$$

где ψ — угол между векторами магнитных потоков Φ_n и Φ_t .

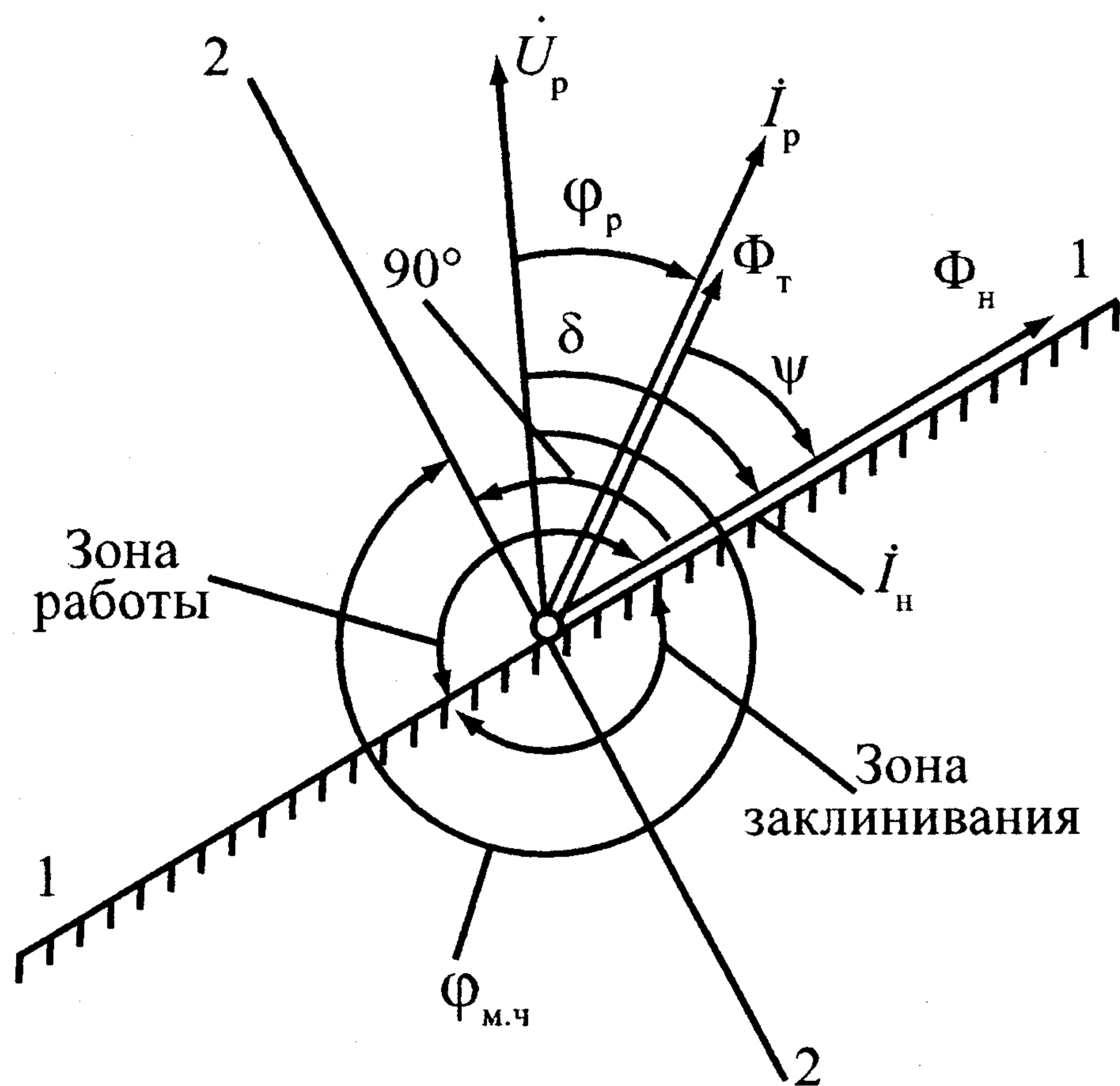


Рис. 37. Векторная диаграмма реле направления мощности

Векторная диаграмма реле приведена на рис. 37. Вектор тока I_p может занимать различные положения относительно вектора напряжения \dot{U}_p . Положение вектора I_p определяется углом φ_p . Отсчет всех углов производится относительно вектора напряжения. Векторные диаграммы, дополненные графическим изображением зон работы и заклинивания представляют собой угловые характеристики реле направления мощности.

Зависимость вращающего момента подвижной системы реле от тока и напряжения и угла между ними выражается характеристикой

$$M_{вр} = kU_p I_p \cos(\varphi_p - \varphi_{м.ч}).$$

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

$$U_{ср} = f_1(\varphi_p) \quad \text{при } I_p = \text{const},$$

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

$$S_{ср} = f_2(\varphi_p) \quad \text{при } I_p = \text{const},$$

где $S_{ср} = U_{ср} I_{ср}$.

Угол φ_p между током и напряжением, подводимыми к реле, считается положительным, если направление отсчета от вектора напряжения \dot{U}_p совпадает с направлением вращения часовой стрелки.

На рис. 38 приведены угловые характеристики реле направления мощности типа РБМ171, вращающий момент которого выражается уравнением

$$M_{вр} = kU_p I_p \cos(\varphi_p + 45^\circ).$$

На рис. 38, а угловая характеристика приведена в прямоугольной, а на рис. 38, б – в полярной системах координат.

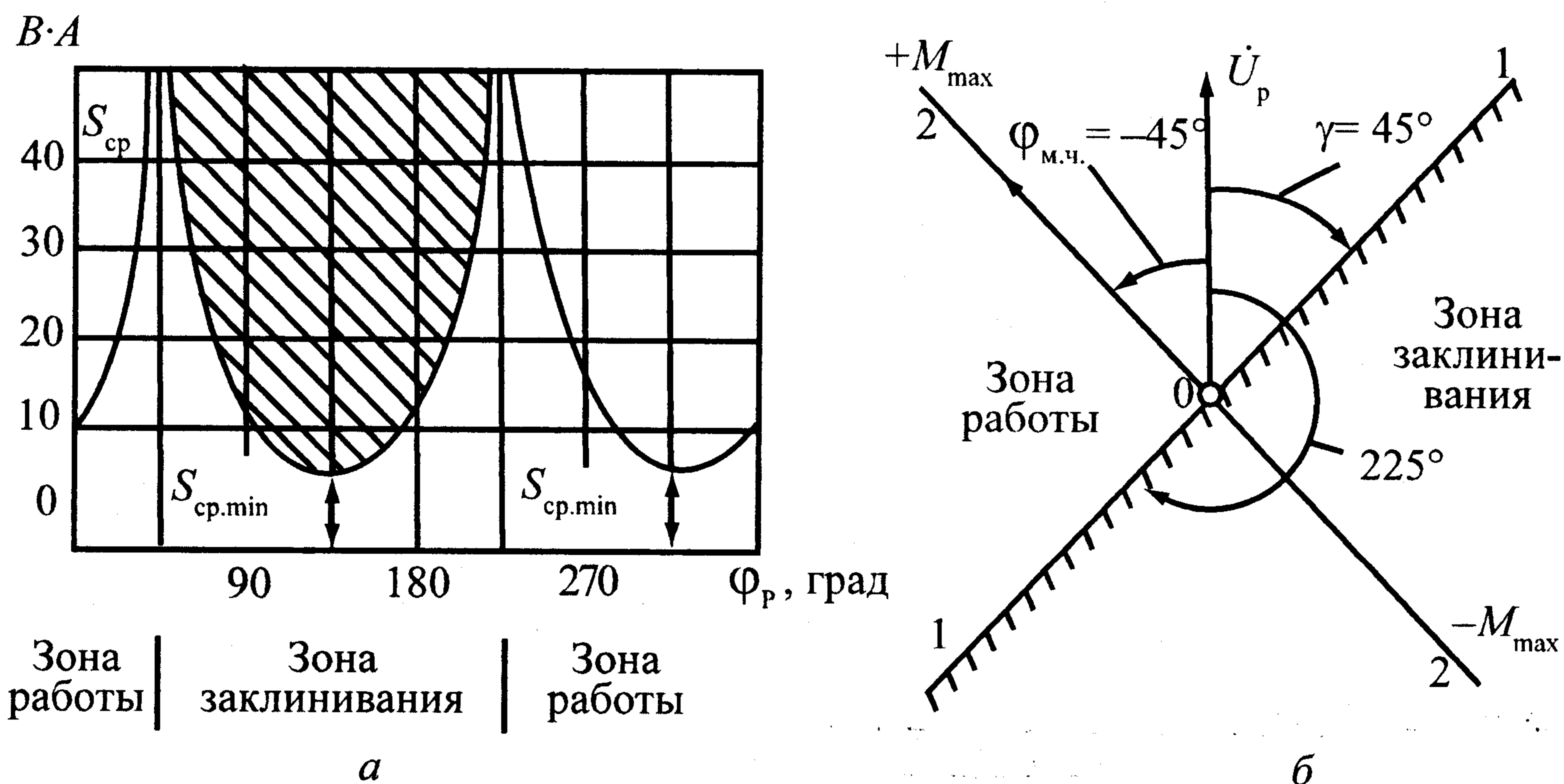


Рис. 38. Угловые характеристики реле направления мощности типа РБМ171

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 $1-1$, которую принято называть линией изменения знака вращающего момента, а угол наклона этой линии к вектору напряжения — углом изменения знака вращающего момента.

Линия $2-2$, расположенная перпендикулярно линии $1-1$ соответствует максимальному значению вращающего момента реле и называется линией максимальных вращающих моментов, а угол, который она составляет с вектором напряжения, — углом максимальной чувствительности реле $\varphi_{м.ч.}$. Если направление вектора тока совпадает с линией $1-1$, то вращающий момент реле равен нулю. Для реле типа РБМ171 это имеет место при углах между током и напряжением φ_p , равных $+45$ и $+225^\circ$.

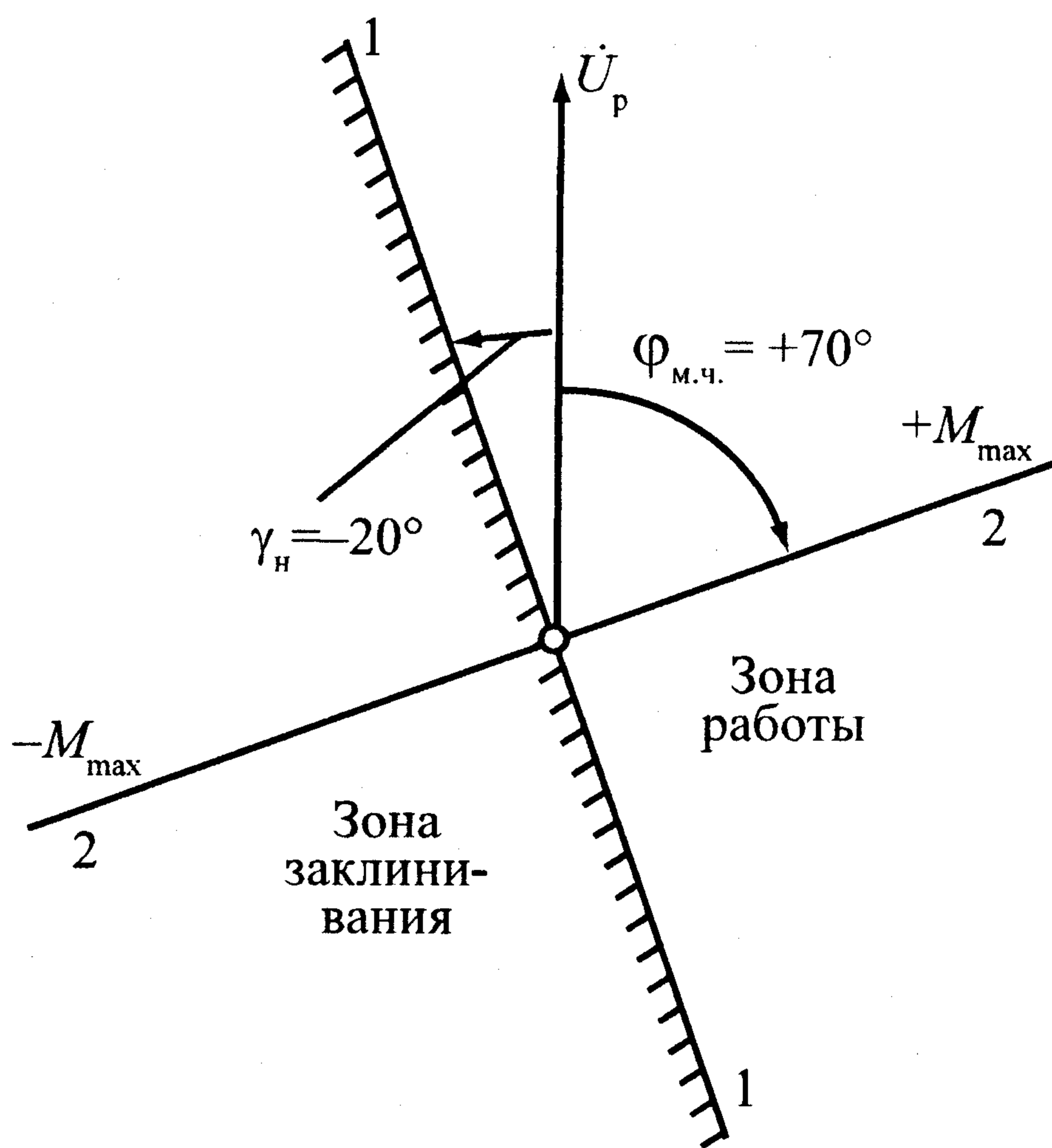


Рис. 39. Угловая характеристика реле направления мощности типа РБМ178 для защиты от замыканий на землю

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 защит 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

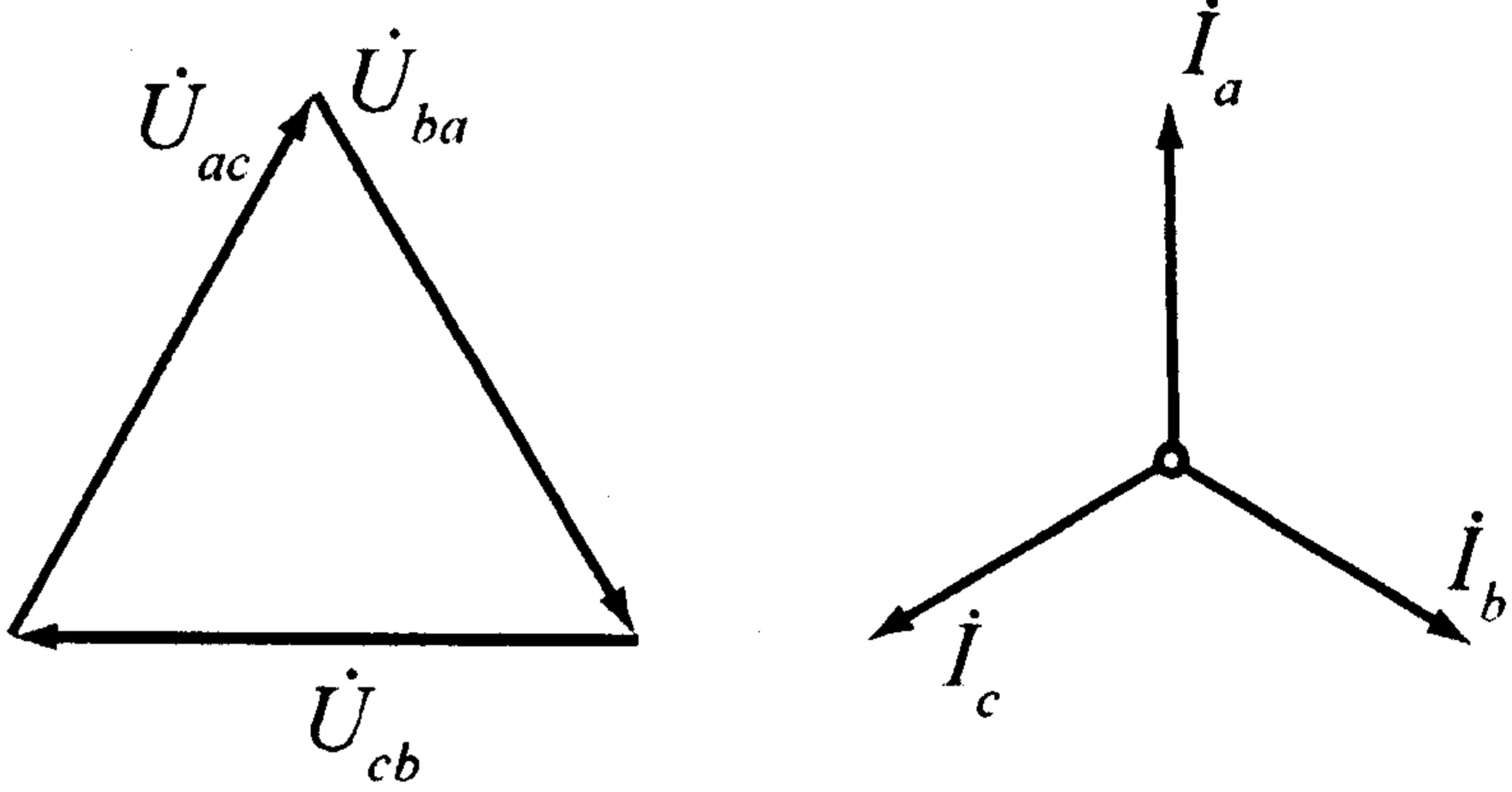
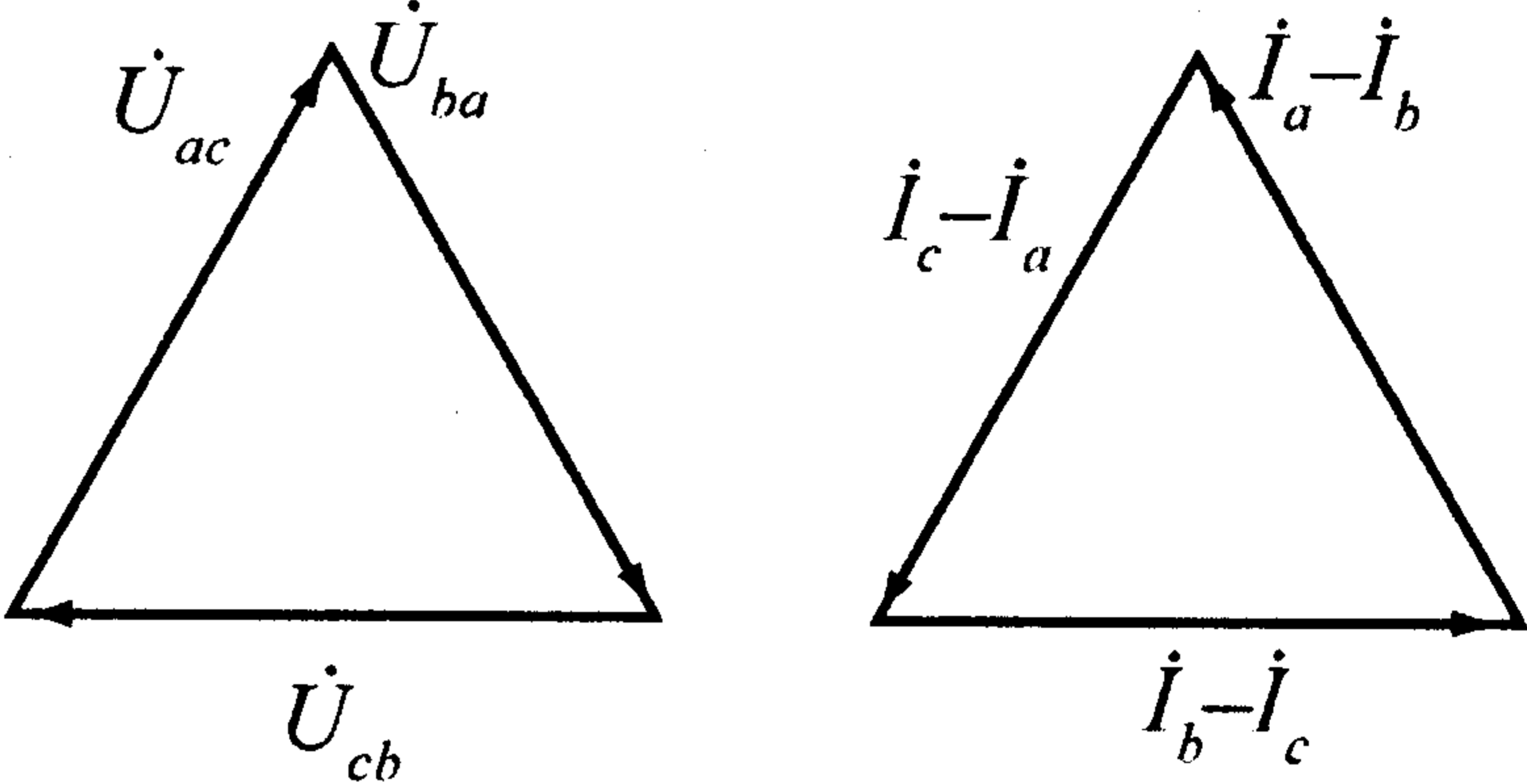
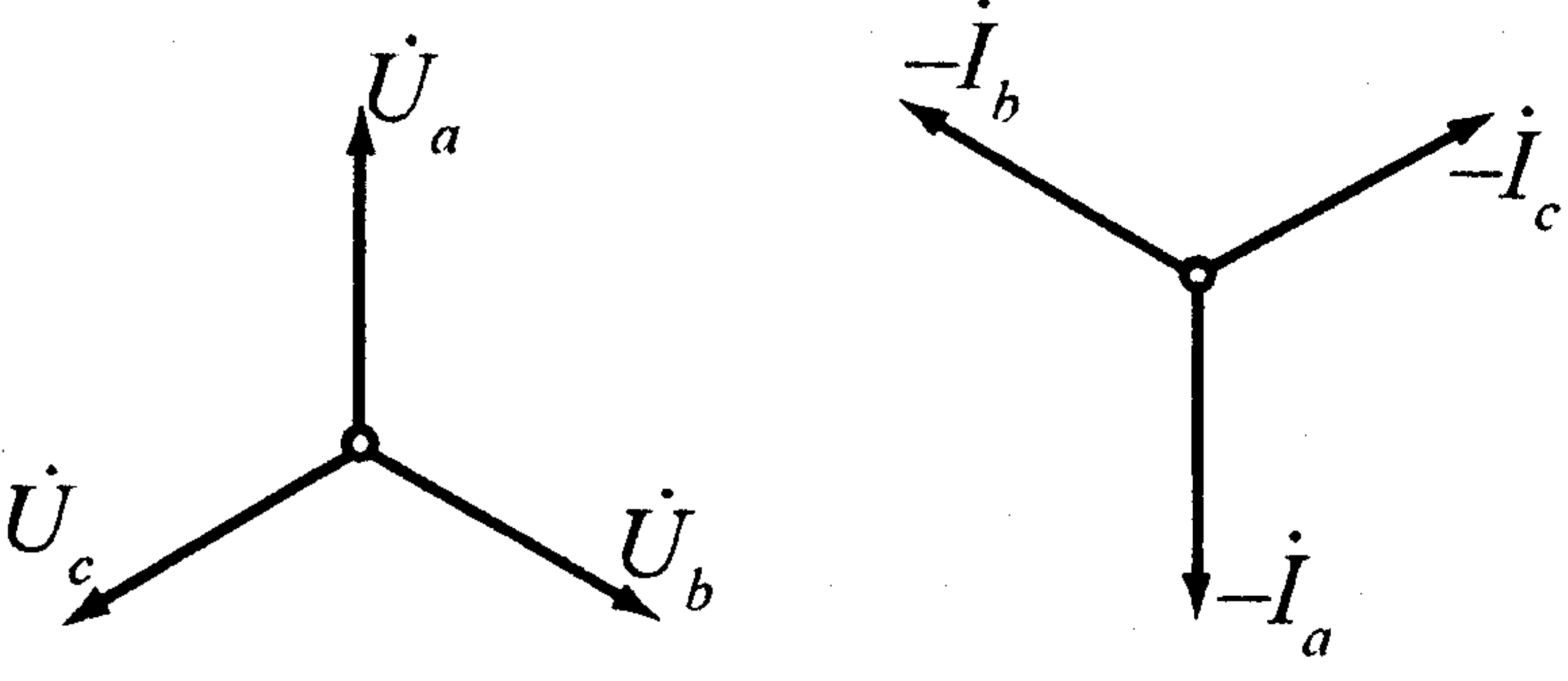
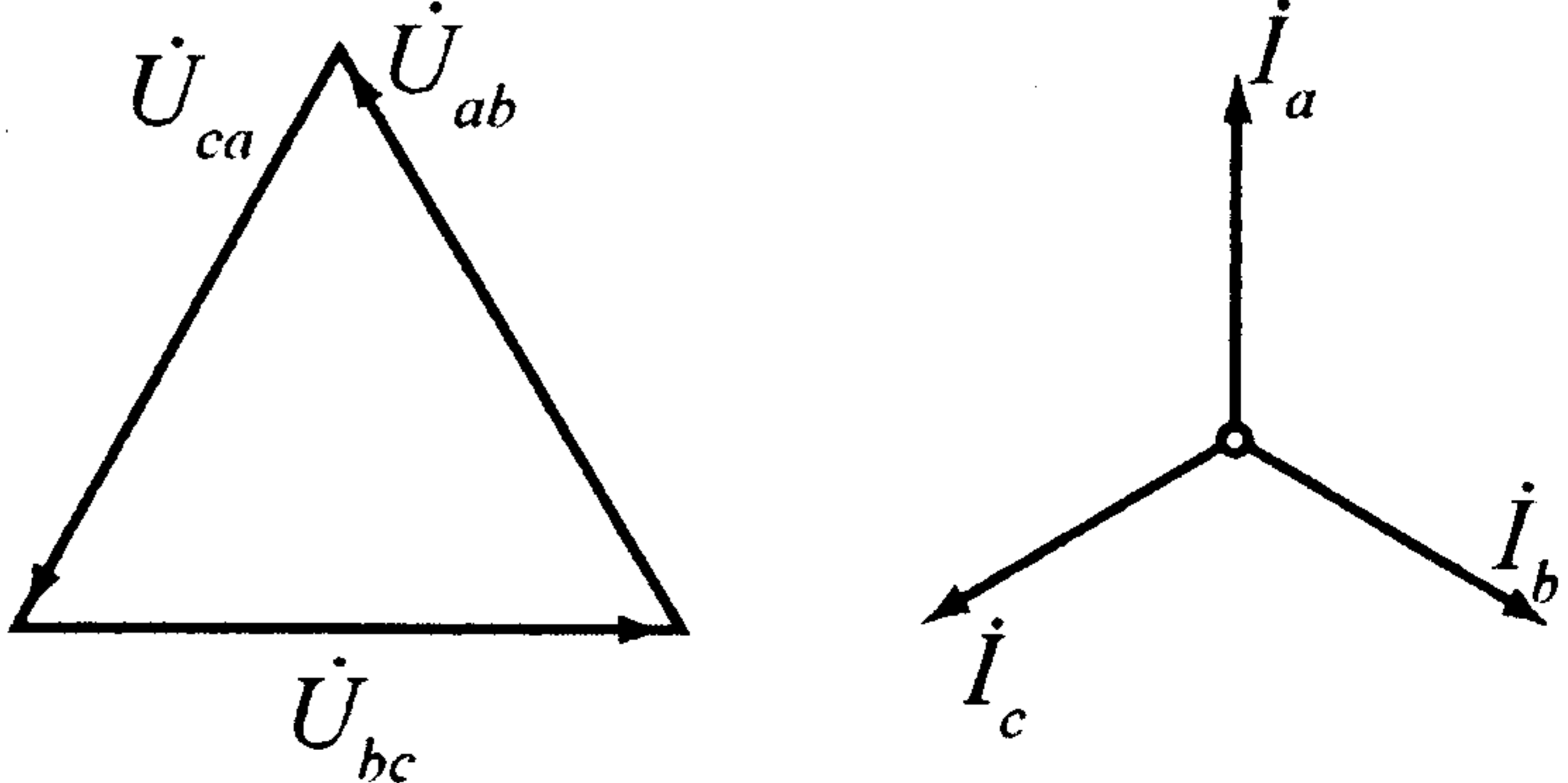
Выражение момента вращения	Угловая характеристика реле
<p><i>Реле типа РБМ171 и РБМ271, включенные на полные токи и напряжения без дополнительного сопротивления</i></p> $kU_p I_p \cos(\varphi_p + 25^\circ)$	
<p><i>Реле типа РБМ171 и РБМ271, включенные на полные токи и напряжения с дополнительным сопротивлением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

Примечание: Знаком «+» обозначена зона работы реле, знаком «-» – зона заклинивания реле.

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

Таблица 2

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
<i>30-градусная схема</i>		
\dot{U}_{ac} \dot{U}_{ba} \dot{U}_{cb}	\dot{I}_a \dot{I}_b \dot{I}_c	
<i>60-градусная схема с включением на разность фазных токов</i>		
\dot{U}_{ac} \dot{U}_{ba} \dot{U}_{cb}	$\dot{I}_a - \dot{I}_b$ $\dot{I}_b - \dot{I}_c$ $\dot{I}_c - \dot{I}_a$	
<i>60-градусная схема с включением на фазные токи</i>		
\dot{U}_a \dot{U}_b \dot{U}_c	$-\dot{I}_b$ $-\dot{I}_c$ $-\dot{I}_a$	
<i>90-градусная схема</i>		
\dot{U}_{ab} \dot{U}_{bc} \dot{U}_{ca}	\dot{I}_c \dot{I}_a \dot{I}_b	

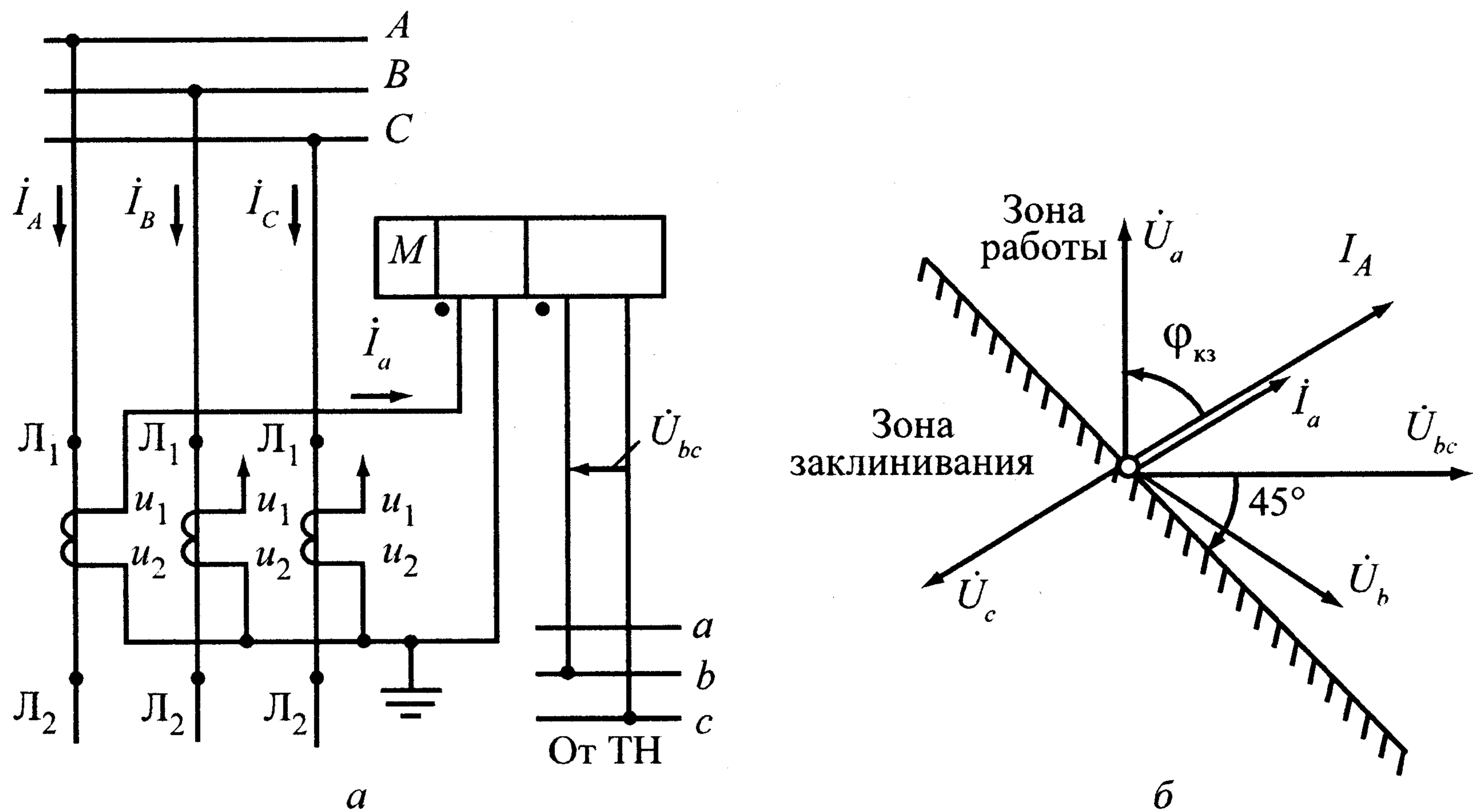


Рис. 40. Включение реле РБМ171 по 90-градусной схеме:
а – схема включения; *б* – векторная диаграмма при трехфазном коротком замыкании на защищаемом присоединении; φ_k – угол между напряжением и током при коротком замыкании; L_1 и u_1 – начала первичных и вторичных обмоток трансформаторов тока; L_2 и u_2 – концы первичных и вторичных обмоток трансформаторов тока

Подключение обмоток реле к цепям тока и напряжения и поведение реле при трехфазном коротком замыкании рассмотрены на примере включения реле направления мощности типа РБМ171 по 90-градусной схеме (рис. 40). Реле включено на ток I_a фазы *A* и линейное напряжение \dot{U}_{bc} . При этом к однополярным выводам реле, обозначенным точками, подведены напряжение фазы *B* (начало вектора напряжения \dot{U}_{bc}) и ток от начала вторичной обмотки u_1 трансформатора тока фазы *A*.

Поскольку вывод обмотки напряжения, обозначенный точкой, подключен к фазе *b*, угловая характеристика реле направления мощности построена относительно вектора вторичного напряжения \dot{U}_{bc} . Зона работы относительно напряжения \dot{U}_{bc} , когда вращающий момент имеет положительный знак, ограничена углами от -135° до 0° и от 0° до $+45^\circ$.

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

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 реле направления мощности двустороннего действия замыкает тот из двух своих контактов, который разрешает пусковым органам защиты подействовать на отключение поврежденной линии.

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

Положительный вращающий момент на реле соответствует его действию на отключение линии 1. При трехфазном коротком замыкании на линии 1 первичный ток, проходящий в поврежденной фазе I_A , отстает от фазного напряжения U_A на угол φ_k . В реле при

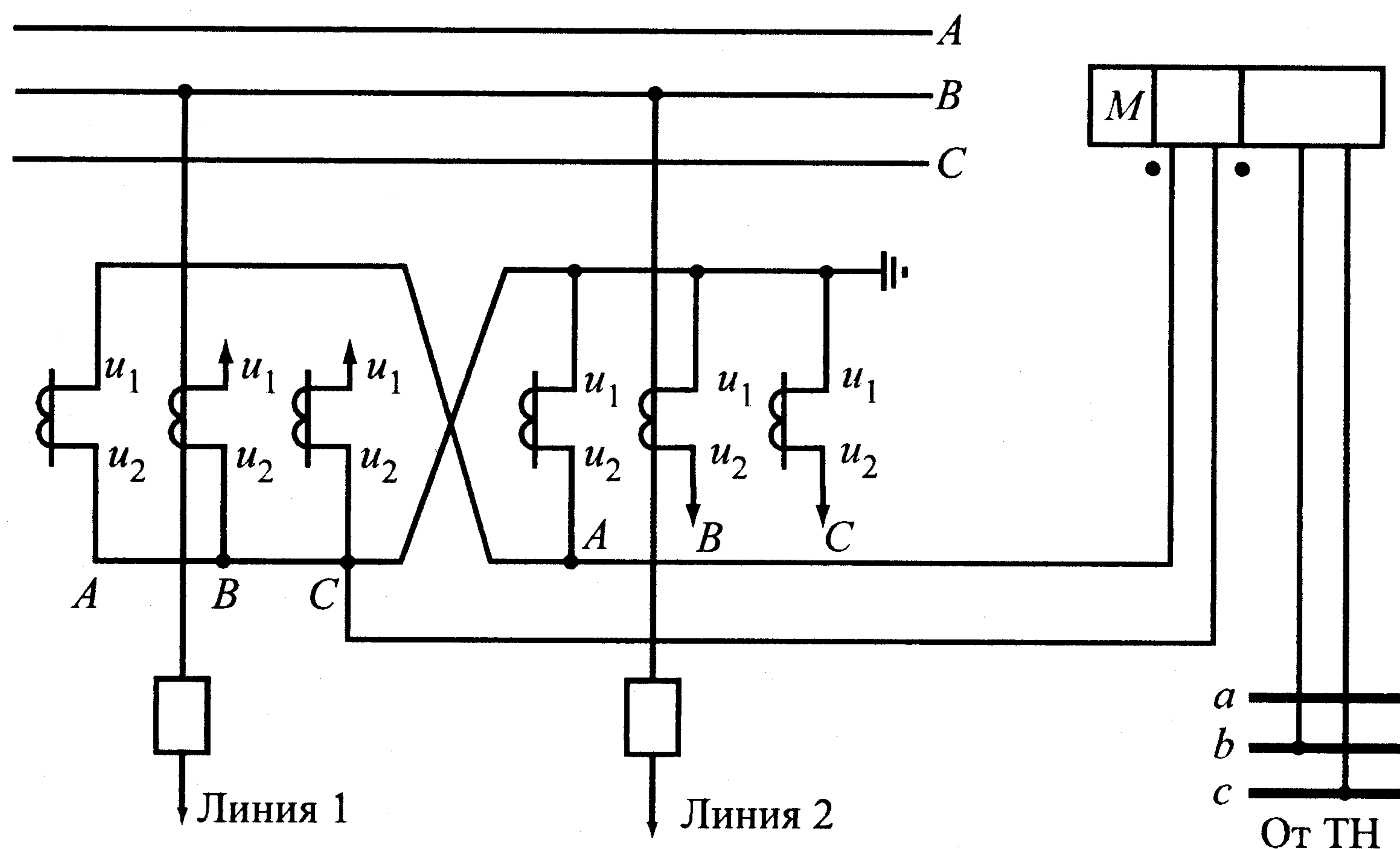


Рис. 41. Схема включения одного элемента реле направления мощности двустороннего действия в поперечной дифференциальной защите по 30-градусной схеме (на ток I_a и напряжение U_{ac})

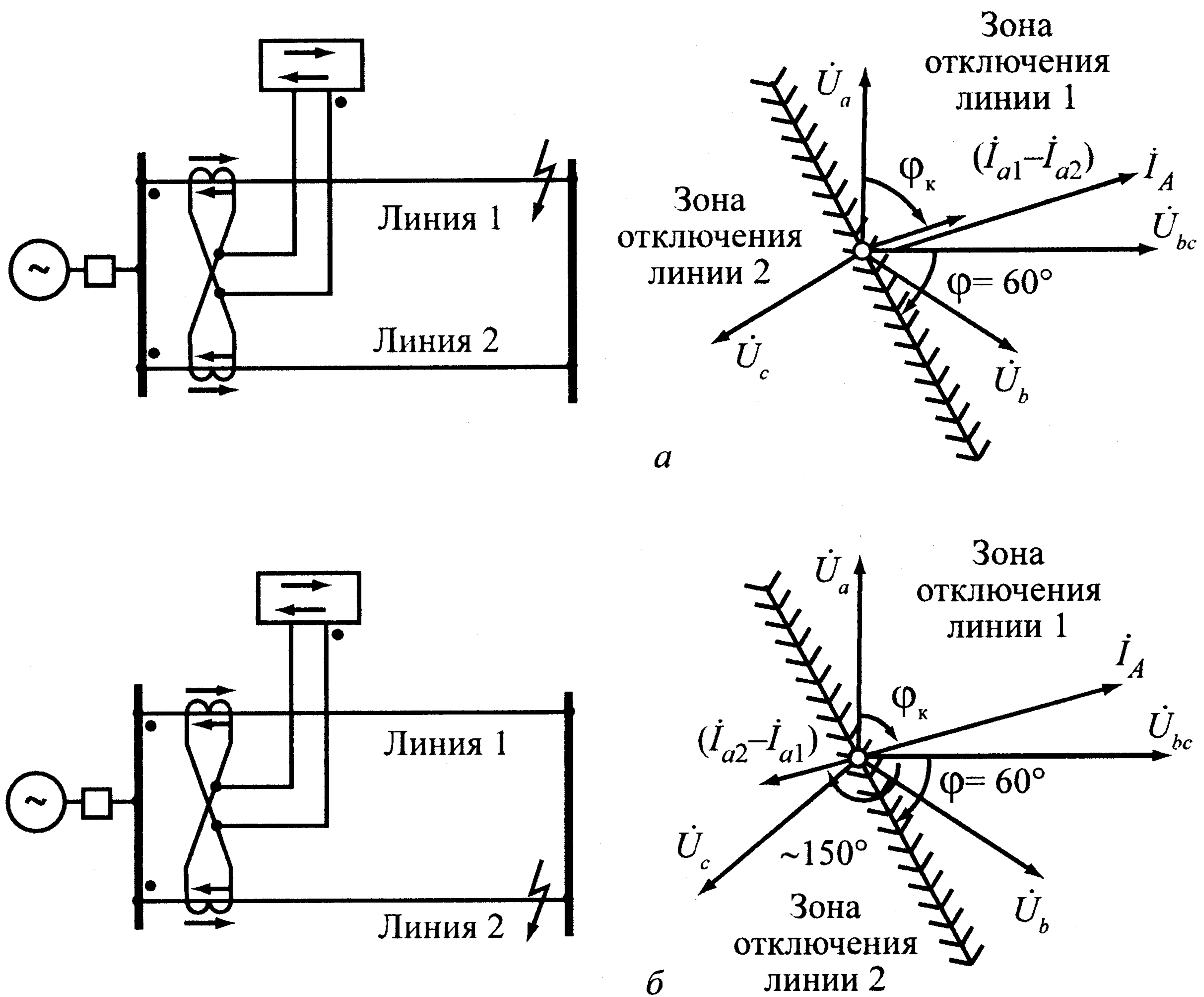


Рис. 42. Угловые характеристики реле РБМ271 и векторные диаграммы токов и напряжений при трехфазном коротком замыкании:
а – на линии 1 ($I_{a1} > I_{a2}$); *б* – на линии 2 ($I_{a2} > I_{a1}$)

этом протекает разность вторичных токов одноименных фаз двух параллельных линий $\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2}$, 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 $\dot{I}_{a1} > \dot{I}_{a2}$ и вектор $\dot{I}_{a1} - \dot{I}_{a2}$ совпадает по направлению с вектором \dot{I}_{A1} , т. е. попадает в зону работы реле на отключение линии 1. Вращающий момент на реле при этом положительный, а угол между током и напряжением на обмотках реле примерно соответствует максимальной чувствительности реле.

При коротком замыкании на линии 2 векторная диаграмма имеет аналогичный вид. Однако при этом вектор разности токов $\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{a1}$ располагается в противофазе с вектором \dot{I}_A , так как $\dot{I}_{a2} > \dot{I}_{a1}$. При этом вектор $\dot{I}_{a2} - \dot{I}_{a1}$ 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° .

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 обратной 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 , фильтра тока обратной последовательности $\PhiТОП$, фильтра напряжения

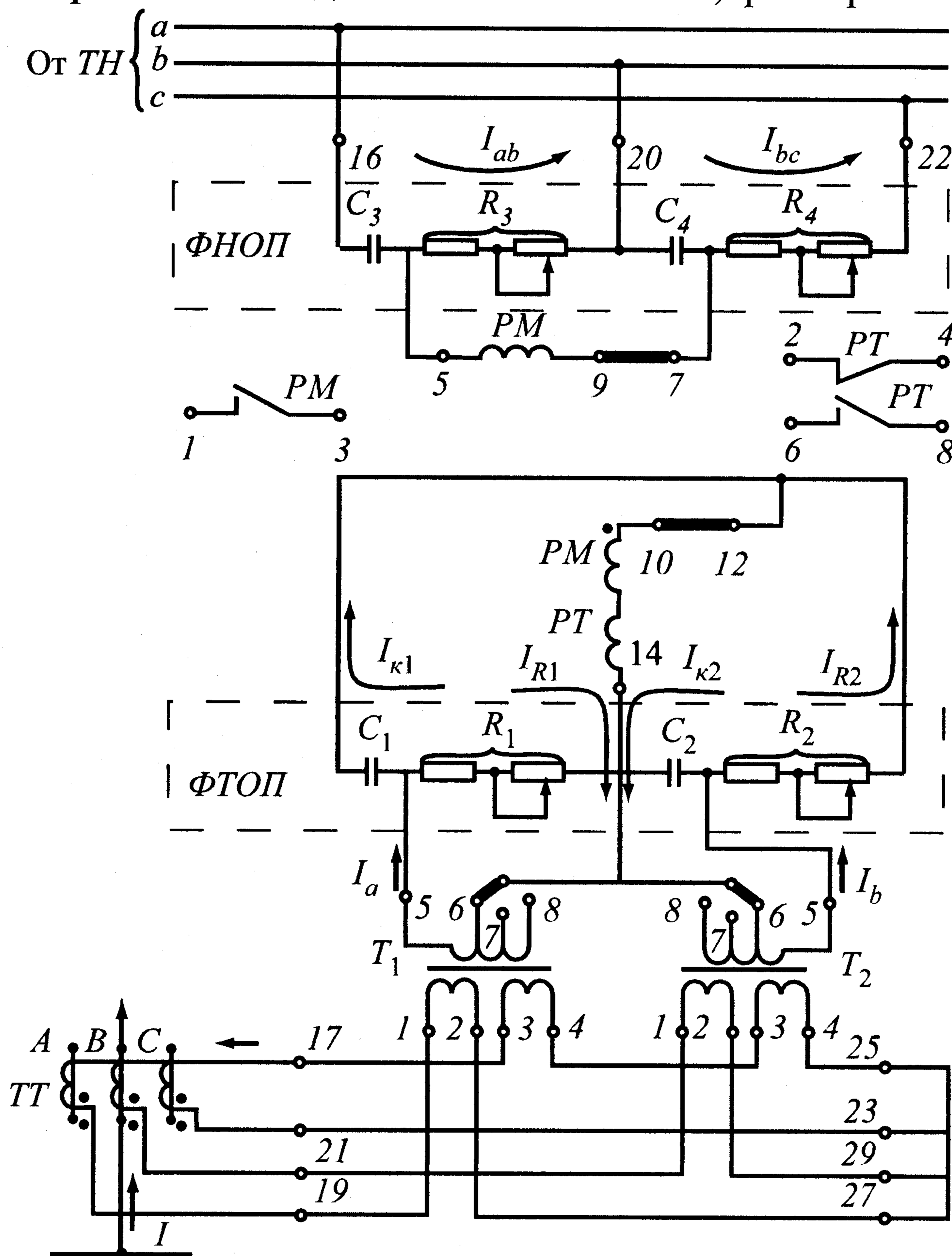


Рис. 43. Схема электрических соединений реле РМОП2 и подключения к нему цепей тока и напряжения

обратной последовательности $\PhiНОП$, реле направления мощности PM и максимального реле тока PT .

Активно-емкостный фильтр тока обратной последовательности $\PhiТОП$ состоит из двух конденсаторов C_1 и C_2 и двух активных регулируемых сопротивлений R_1 и R_2 . Значения активных сопротивлений настроенного фильтра установлены 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_3 и C_4 .

Напряжение между выходными зажимами $\PhiТОП$ должно быть равно нулю. В действительности в нормальных условиях в выходной цепи $\PhiТОП$ всегда проходит незначительный по значению ток, называемый током небаланса.

Векторные диаграммы, поясняющие работу фильтра, приведены на рис. 44.

Токи прямой последовательности в первичных обмотках $T1$ и $T2$ — I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} , токи, проходящие через вторичные обмотки $T1$ и $T2$ — I_{a1} и I_{b1} .

Ток I_a разветвляется на ток I_{R1} и ток $I_{\kappa1}$. Векторы этих токов направлены один относительно другого под углом 90° и обратно пропорциональны значениям R_1 и X_1 . Вектор большего по значению тока $I_{\kappa1}$ опережает вектор тока I_{a1} на угол 30° , а вектор тока I_{R1} отстает от вектора тока I_{a1} на угол 60° .

Соответственно вектор меньшего по значению тока $I_{\kappa2}$ опережает вектор тока I_{b1} на угол 60° , а вектор большего тока I_{R2} отстает от вектора тока I_{b1} на угол 30° . Сумма токов $I_{R2} + I_{\kappa1}$ на выходе фильтра равна нулю.

При подведении к фильтру токов обратной последовательности I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} , во вторичных обмотках $T1$ и $T2$ протекают токи I_{a2} и I_{b2} , также разветвляющиеся на токи, проходящие по активному и емкостному сопротивлениям соответствующих плеч фильтра.

Векторы токов $I_{\kappa1}$, I_{R1} , $I_{\kappa2}$, I_{R2} 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 $I_{\text{вых}} = I_{R2} + I_{\kappa1}$, по абсолютному значению в $\sqrt{3}$ раз большему каждого из этих токов.

Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности $\PhiНОП$ 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 сети напряжение на выходе $\PhiНОП$ должно быть равно нулю. В действительности

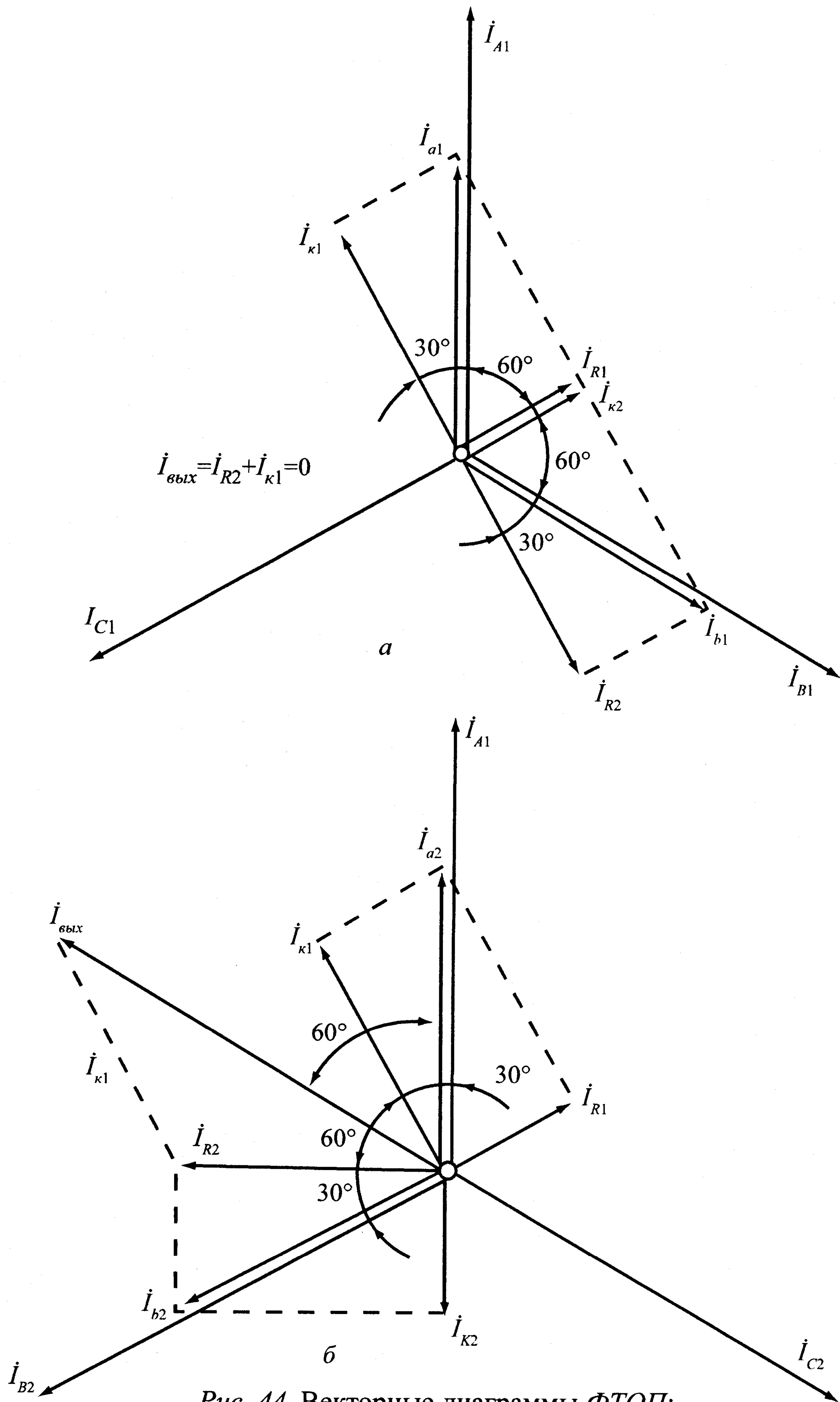


Рис. 44. Векторные диаграммы ФТОП:
a – при подведении токов прямой последовательности; *б* – при подведе-
 нии токов обратной последовательности

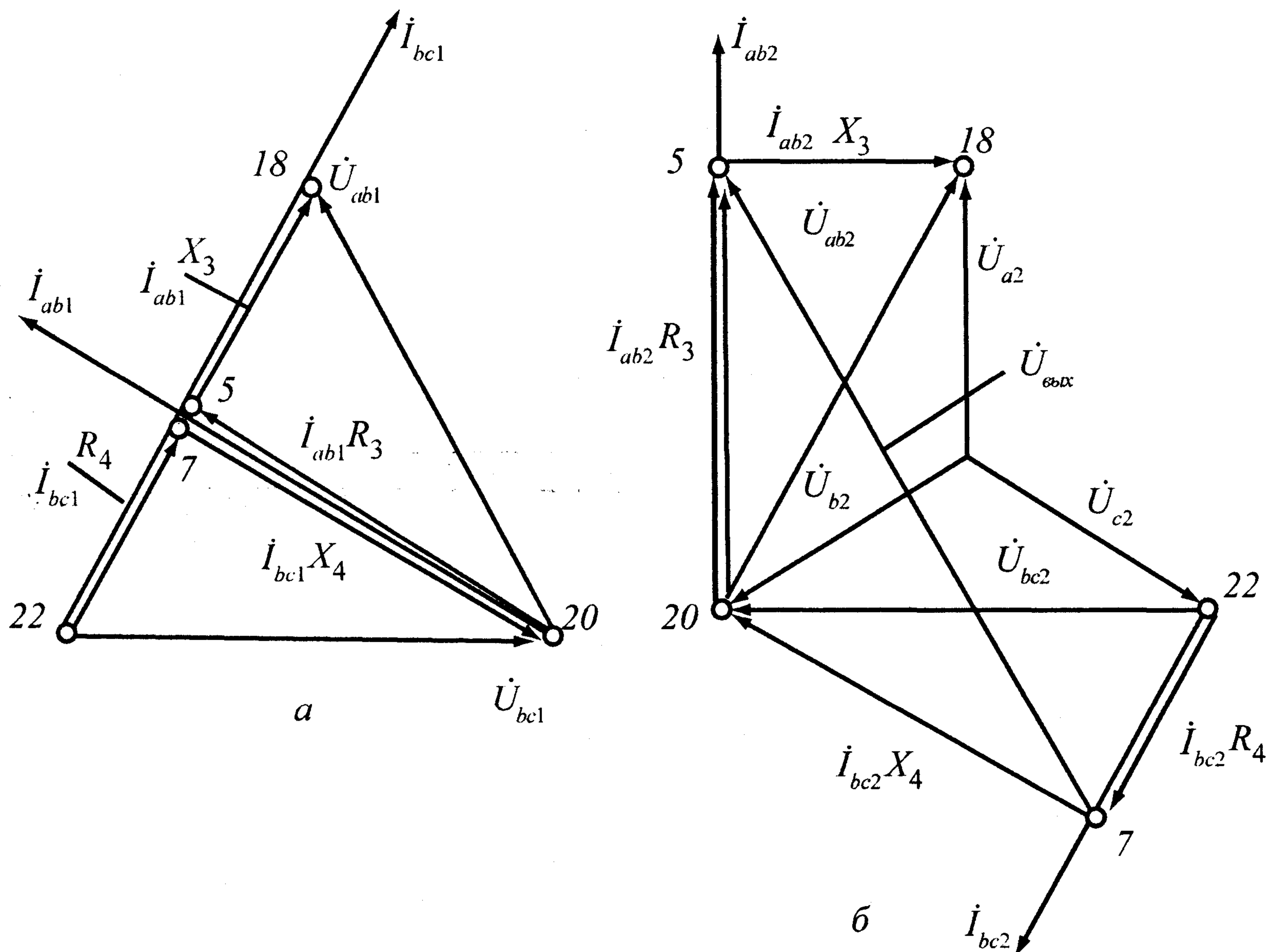


Рис. 45. Векторные диаграммы ФНОП:

a – при подведении напряжений прямой последовательности;
б – при подведении напряжений обратной последовательности

на выходе ФНОП всегда существует небольшое напряжение, называемое напряжением небаланса.

Векторные диаграммы, поясняющие работу фильтра ФНОП, приведены на рис. 45.

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

К реле направления мощности в защитах от замыканий на землю подводится ток и напряжение нулевой последовательности. Ток 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 *A*.

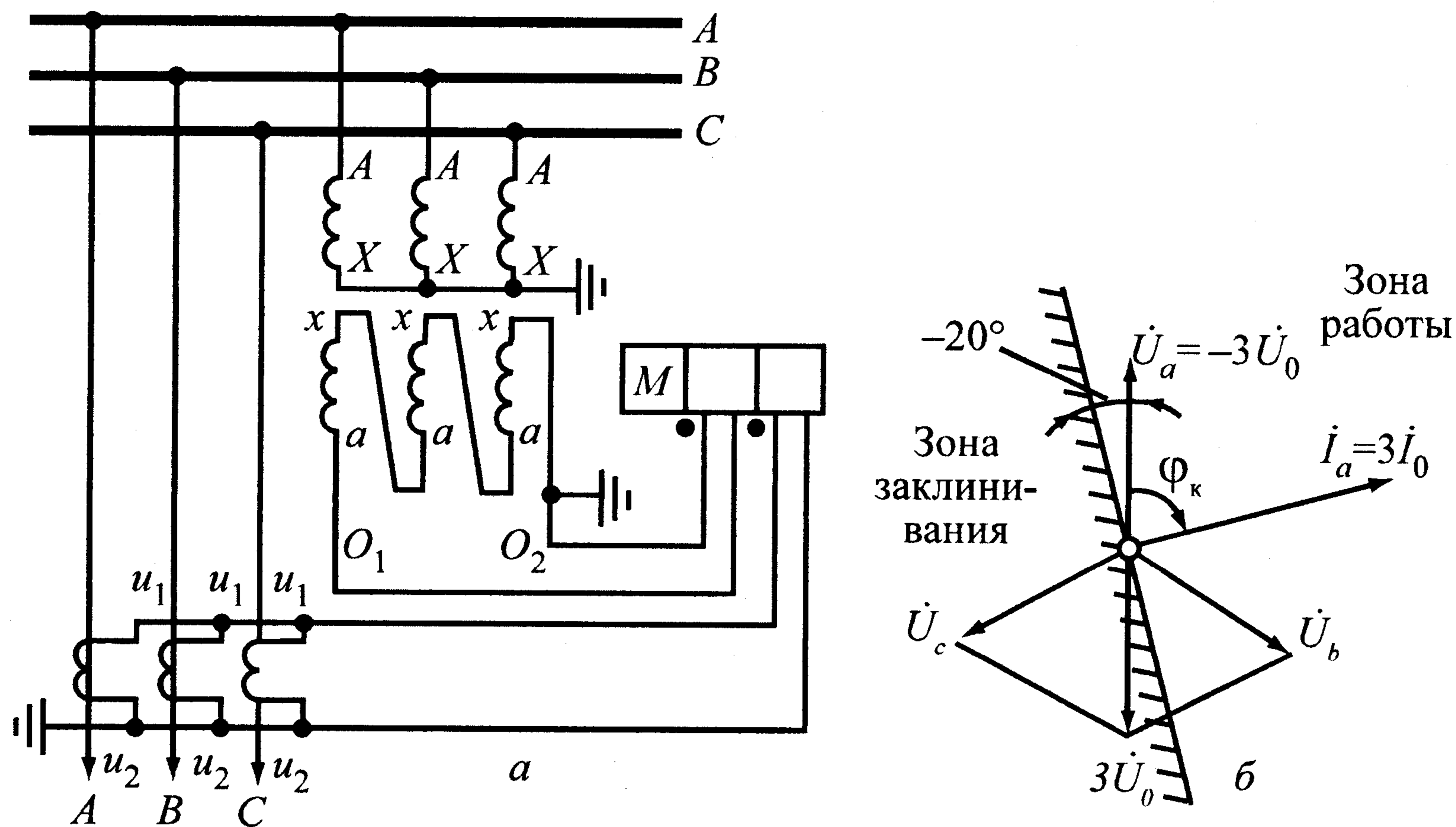


Рис. 46. Включение реле РБМ178 в схеме защиты от замыканий на землю: а – схема включения; б – векторная диаграмма при однофазном коротком замыкании; $3U_0$ – напряжение нулевой последовательности; $3I_0$ – ток нулевой последовательности

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

$$3\dot{U}_0 = \dot{U}_B + \dot{U}_C.$$

Первичный ток $3I_0$ при этом равен току, проходящему в поврежденной фазе \dot{I}_A . Если подвести к реле вторичные ток и напряжение нулевой последовательности, совпадающие с первичными векторами, то угол между $3\dot{I}_0$ и $3\dot{U}_0$ будет равен примерно -120° .

В рассматриваемом случае реле должно действовать на отключение поврежденной линии. Однако момент на реле, равный $kI_p U_p \sin(\varphi_p + 20^\circ)$, оказывается отрицательным, так как $\sin(\varphi_p + 20^\circ)$ при $\varphi_p = -120^\circ$ имеет отрицательное значение. Поэтому для обеспечения правильной работы реле направления мощности нулевой последовательности необходимо одну из составляющих (ток или напряжение нулевой последовательности) подавать на реле с обратным знаком. Следовательно, если вывод токовой обмотки реле, обозначенный точкой, соединяется с началом вторичных обмоток трансформаторов тока u_1 , 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 выбрана относительно напряжения $-3\dot{U}_0$, равного \dot{U}_a . При этом вторичный ток $3\dot{I}_0 = \dot{I}_a$ попадает в зону работы реле, и оно правильно действует на отключение поврежденной линии.

13. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ТОКОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

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

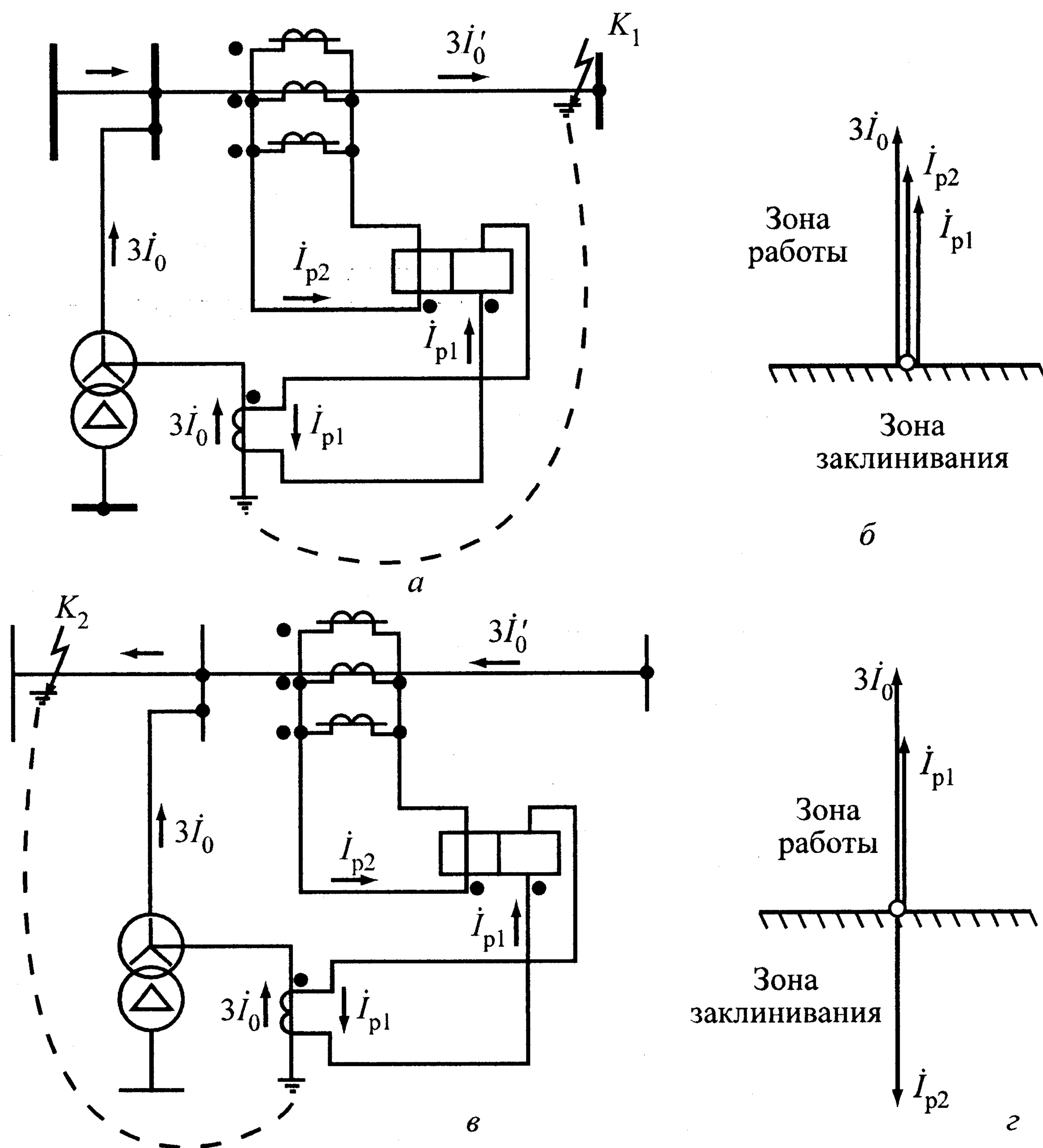


Рис. 47. Схема включения и векторные диаграммы реле направления мощности нулевой последовательности с токовой поляризацией при коротких замыканиях:

a и *в* – распределение токов при КЗ соответственно в зоне и вне зоны действия защиты; *б* и *г* – диаграммы токов при КЗ соответственно в зоне и вне зоны действия защиты

Одна из обмоток реле (поляризующая) 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_1) вторичные токи \dot{I}_{p1} и \dot{I}_{p2} входят в выводы обмоток реле, обозначенные точками, с одинаковым направлением, вращающий момент на реле имеет положительный знак, и реле срабатывает. При коротком замыкании вне зоны действия защиты (точка K_2) ток \dot{I}_{p2} меняет свое направление. В результате по обмоткам реле протекают токи \dot{I}_{p1} и $-\dot{I}_{p2}$, вращающий 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 автоматики, 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.

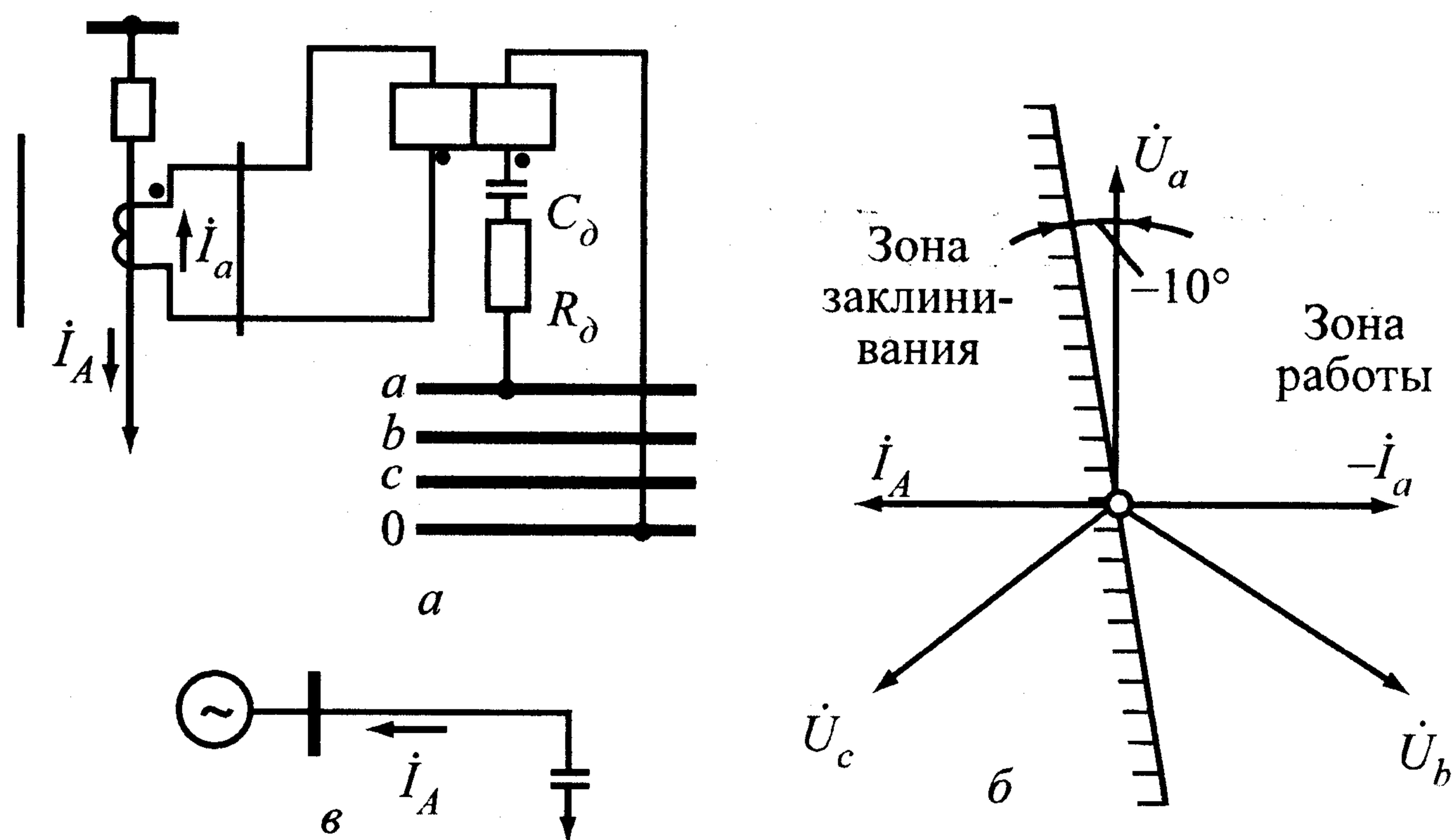


Рис. 48. Реле РБМ178 в схеме автоматики, действующей при повышении напряжения: а – схема включения реле; б – векторная диаграмма в режиме, когда линия отключена с противоположного конца; в – поясняющая схема

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_d (300–500 Ом) и конденсатор C_d (3–5 мкФ) для того, чтобы увеличить мощность, требуемую для срабатывания реле, и несколько изменить его угловую характеристику, которая в результате будет иметь следующий вид:

$$M_{вр} = kU_p I_p \sin [\varphi \pm (8^\circ \div 10^\circ)].$$

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 В СХЕМАХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТО- РОВ 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).

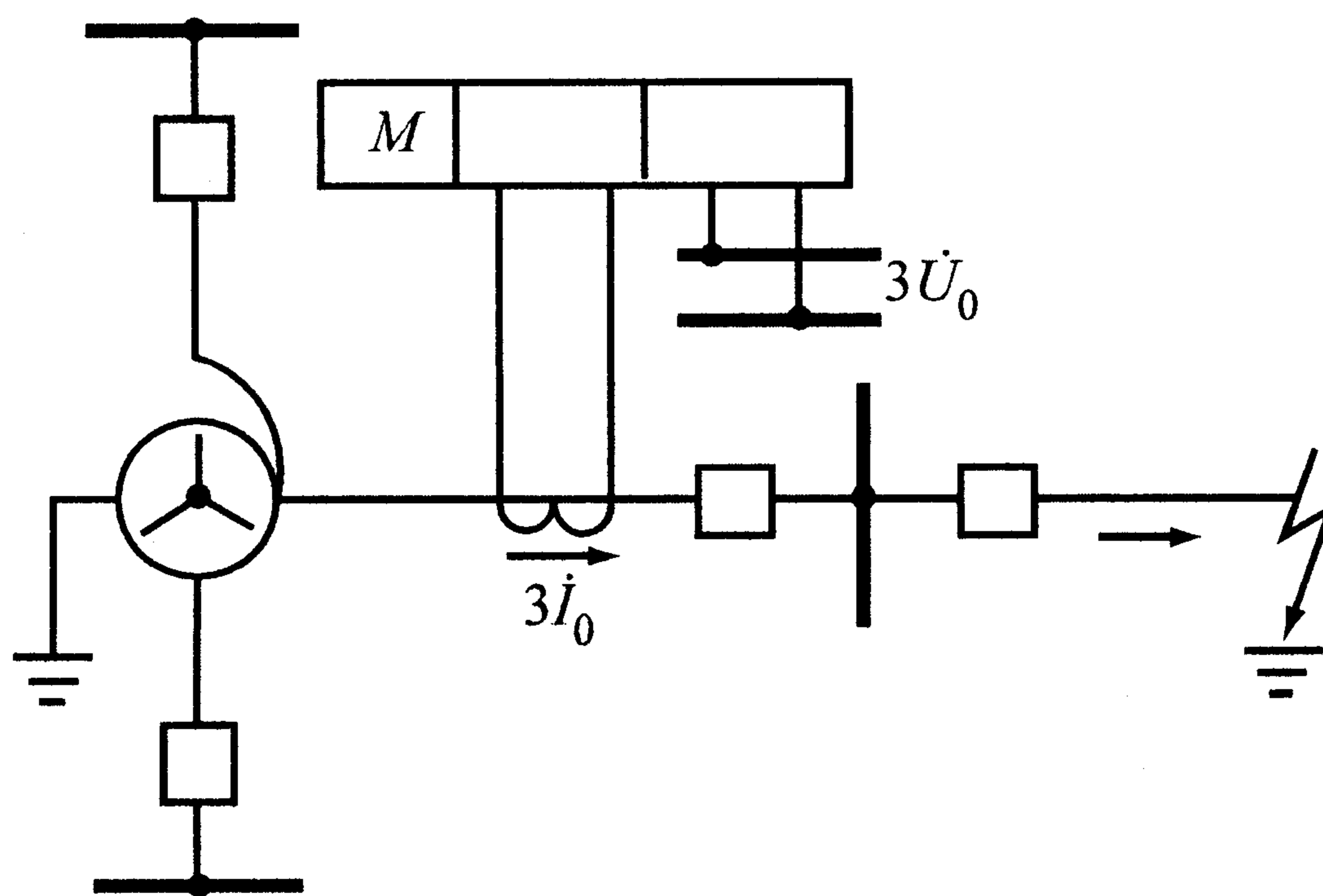


Рис. 49. Схема включения реле направления мощности в схеме защиты автотрансформатора от замыканий на землю

При определении зоны работы реле направления мощности нулевой последовательности 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 $3\dot{U}_0 = \dot{U}_B + \dot{U}_C$.

При коротком замыкании на шинах или на одной из отходящих линий мощность короткого замыкания, проходящая по трансформатору, будет направлена к шинам подстанции, а вектор первичного 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° .

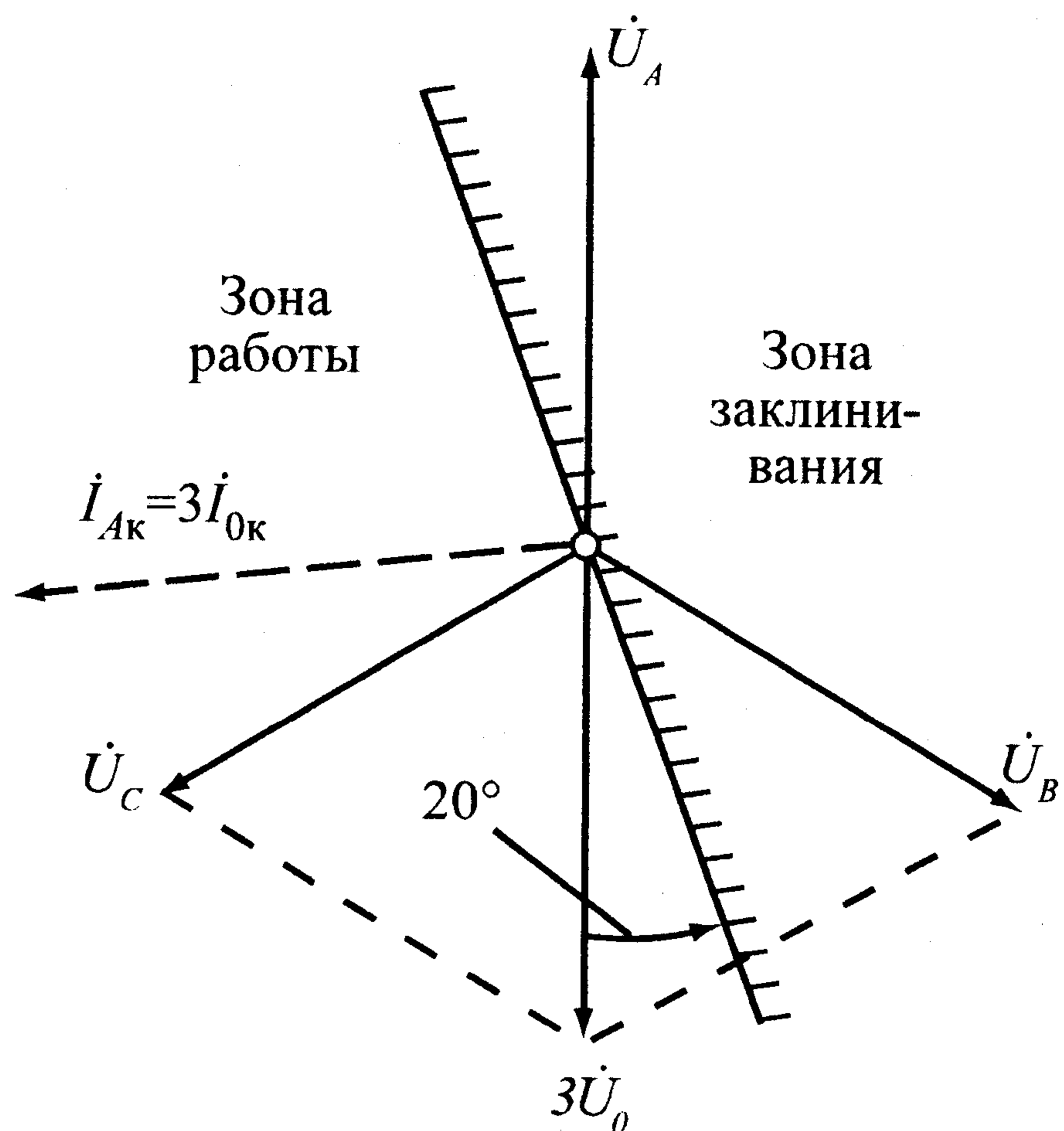


Рис. 50. Определение зоны работы реле направления мощности нулевой последовательности защиты автотрансформатора от замыканий на землю

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 реле РБМ178 с дополнительным контуром $R_d C_d$, имеющего угловую характеристику

$$M_{вр} = kU_p I_p \sin(\varphi_p + 10^\circ)$$

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

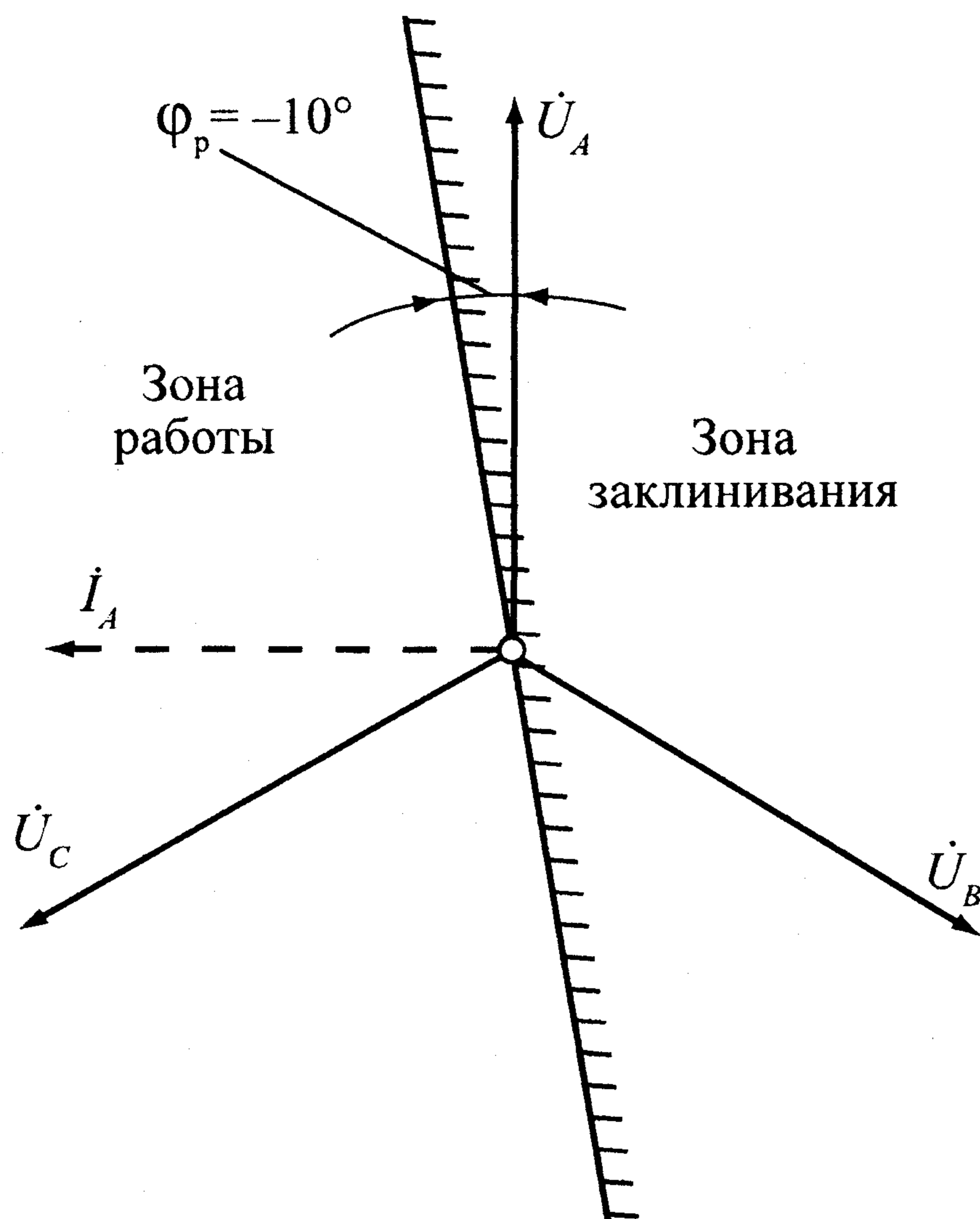


Рис. 51. Построение зоны работы реле мощности в схеме автоматики, действующей при повышении напряжения

мое реле, отключается с противоположного конца (показан пунктирной линией). Этот ток опережает напряжение своей фазы на угол 90° , поскольку в рассматриваемом случае с линии на шины поступает реактивная мощность.

Так как в данном режиме реле должно сработать (и разрешить действовать автомате повышения напряжения), зона, в которую попадает вектор тока \dot{I}_A , и должна быть зоной работы реле.

17. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ РЕЛЕ ФИЛЬТРОВЫХ ЗАЩИТ ОТ ТОКОВ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Фильтровые защиты от токов обратной последовательности предназначены для защиты трансформаторов, блоков генератор – трансформатор и других установок. Они не реагируют на симметричные повреждения и симметричные перегрузки. Такие защиты выполняются на реле РТ2 и РТФ1.

Реле РТ2 состоит из фильтра тока обратной последовательности, выполненного с компенсацией токов нулевой последовательности, и двух реле тока Р1 и Р2 типа ЭТ 520, из которых реле Р1,

- строится вектор первичного напряжения \dot{U}_A для случая, когда реле включено на напряжение фазы А (рис. 51);

- строится линия изменения знака вращающего момента, для чего по снятой угловой характеристике реле или по выражению $M_{вр}$ определяется угол, при котором вращающий момент на реле становится равным нулю, и под этим углом относительно вектора \dot{U}_A проводится прямая линия;

- определяется зона работы реле (включено на ток фазы А), для чего строится вектор первичного тока \dot{I}_A фазы А, который проходит, когда линия, на которой установлено рассматриваемое реле,

более грубое, служит для отключения токов при несимметричных коротких замыканиях, а реле $P2$, более чувствительное, служит для сигнализации появления опасных для генератора значений токов обратной последовательности. Схема реле представлена на рис. 52. Фильтр тока обратной последовательности состоит из трансформатора с воздушным зазором $T\Phi$, имеющего две первичные и одну вторичную обмотки, регулируемого сопротивления R и трансформатора компенсации TK . Подробно схема и работа реле описаны в [3].

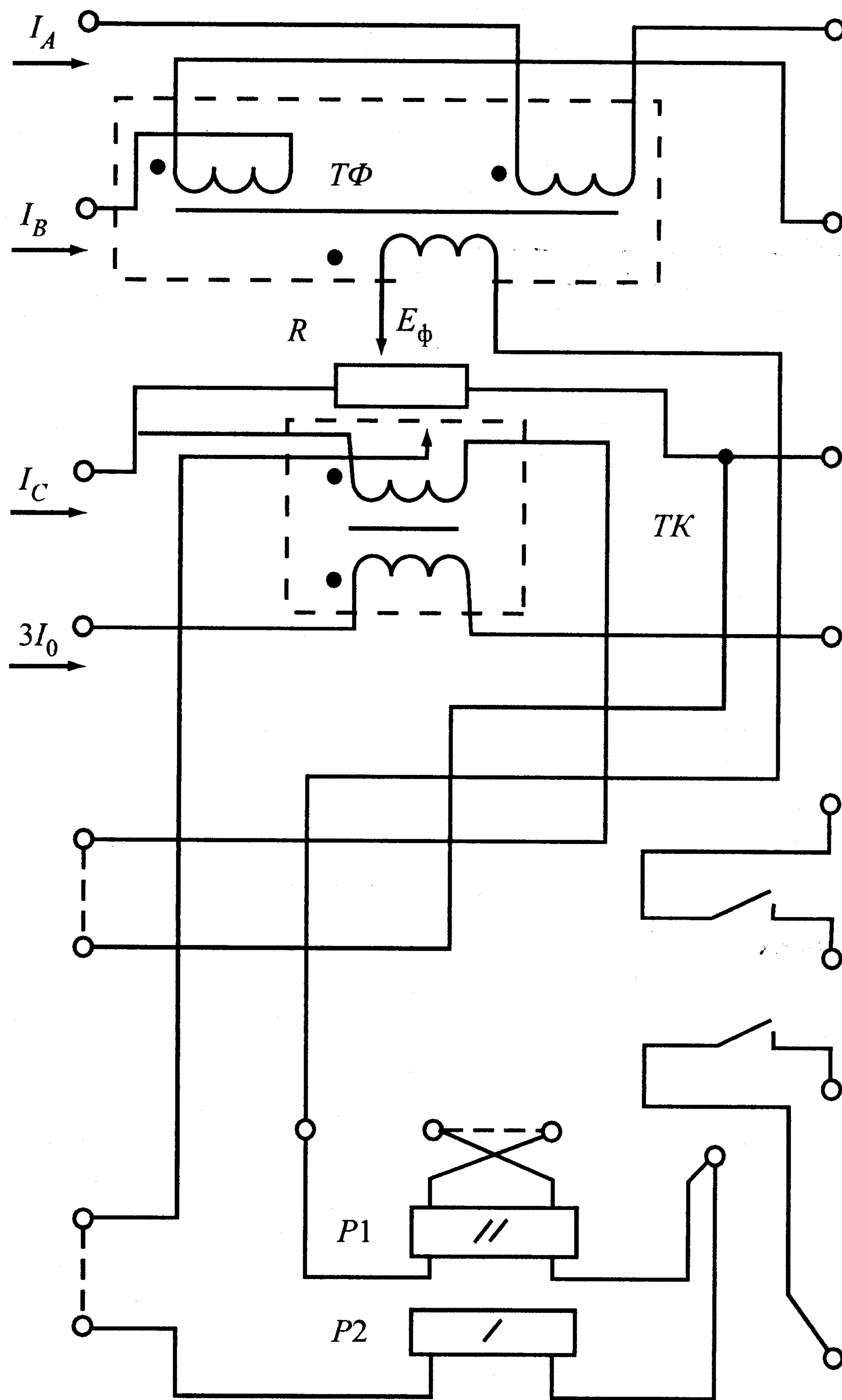


Рис. 52. Схема реле тока обратной последовательности типа РТ2

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

Напряжение на выходе фильтра токов обратной последовательности E_ϕ 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 взаимоиндукции X_M между обмотками трансформатора $T\Phi$. 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 TK .

Векторные диаграммы (рис. 53) поясняют принцип действия фильтра.

Таким образом, токи прямой и нулевой последовательности не создают ЭДС на выходе фильтра.

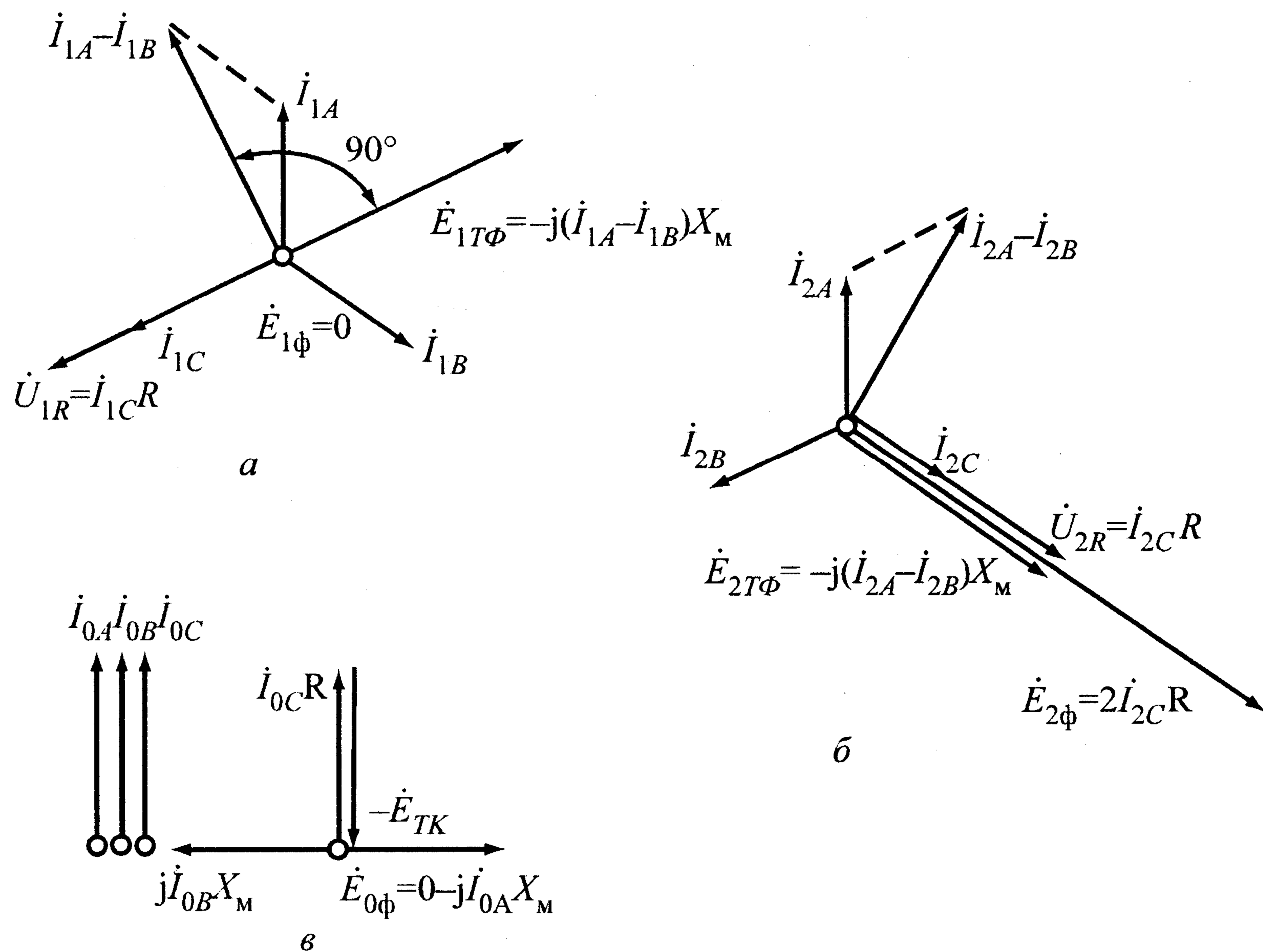


Рис. 53. Векторные диаграммы фильтра токов обратной последовательности реле РТ2 при подведении к нему токов:

a – прямой последовательности; $б$ – обратной последовательности; $в$ – нулевой последовательности; $E_{T\Phi}$ – ЭДС вторичной обмотки $T\Phi$; E_ϕ – напряжение на выходе фильтра; X_M – реактивное сопротивление взаимоиндукции обмоток $T\Phi$

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 *ТТ* и трансформатора с воздушным зазором (трансреактора) *ТР*, нагруженных регулируемыми 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 *ТТ* на разность токов фаз *С* и *А*, в трансреакторе *ТР* на разность токов фаз *В* и *С*.

Параметры *ТТ*, *ТР* 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 *ТТ* вторичный ток практически совпадает по фазе с первичным, поэтому напряжение на активном сопротивлении R_1 совпадает по фазе с первичным током трансформатора

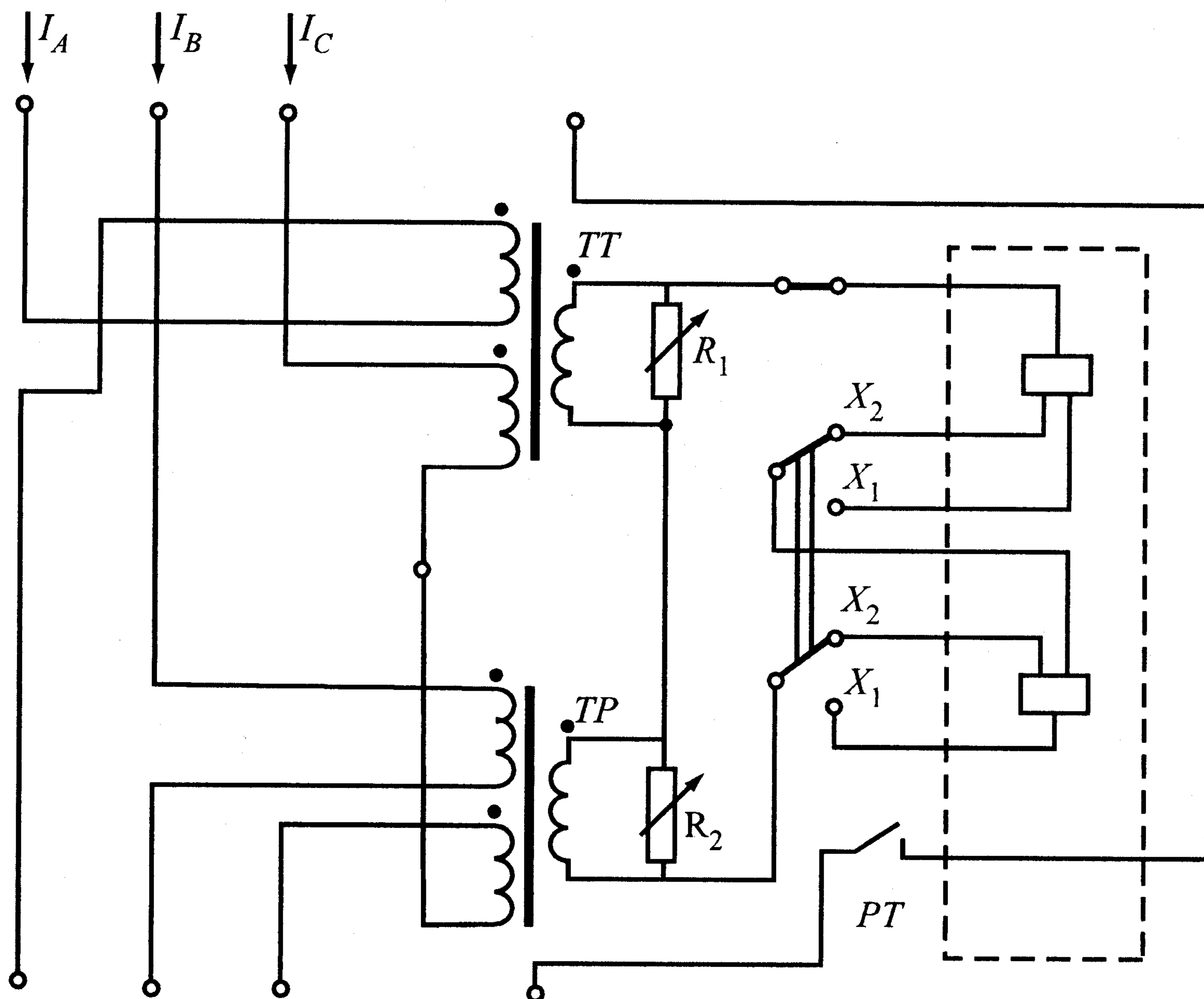


Рис. 54. Схема реле тока обратной последовательности типа РТФ1

ТТ. Фаза вторичного тока в трансреакторе TR зависит от его вторичной нагрузки. Значение сопротивления R_2 подобрано таким образом, что напряжение на нем опережает первичный ток трансреактора TR на угол 60° (положительные направления токов и напряжений соответствуют полярности обмоток трансформаторов фильтра). При протекании по первичным обмоткам токов прямой последовательности напряжения на сопротивлениях 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 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° . Напряжение на выходе фильтра при разомкнутой выходной цепи пропорционально току обратной последовательности.

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

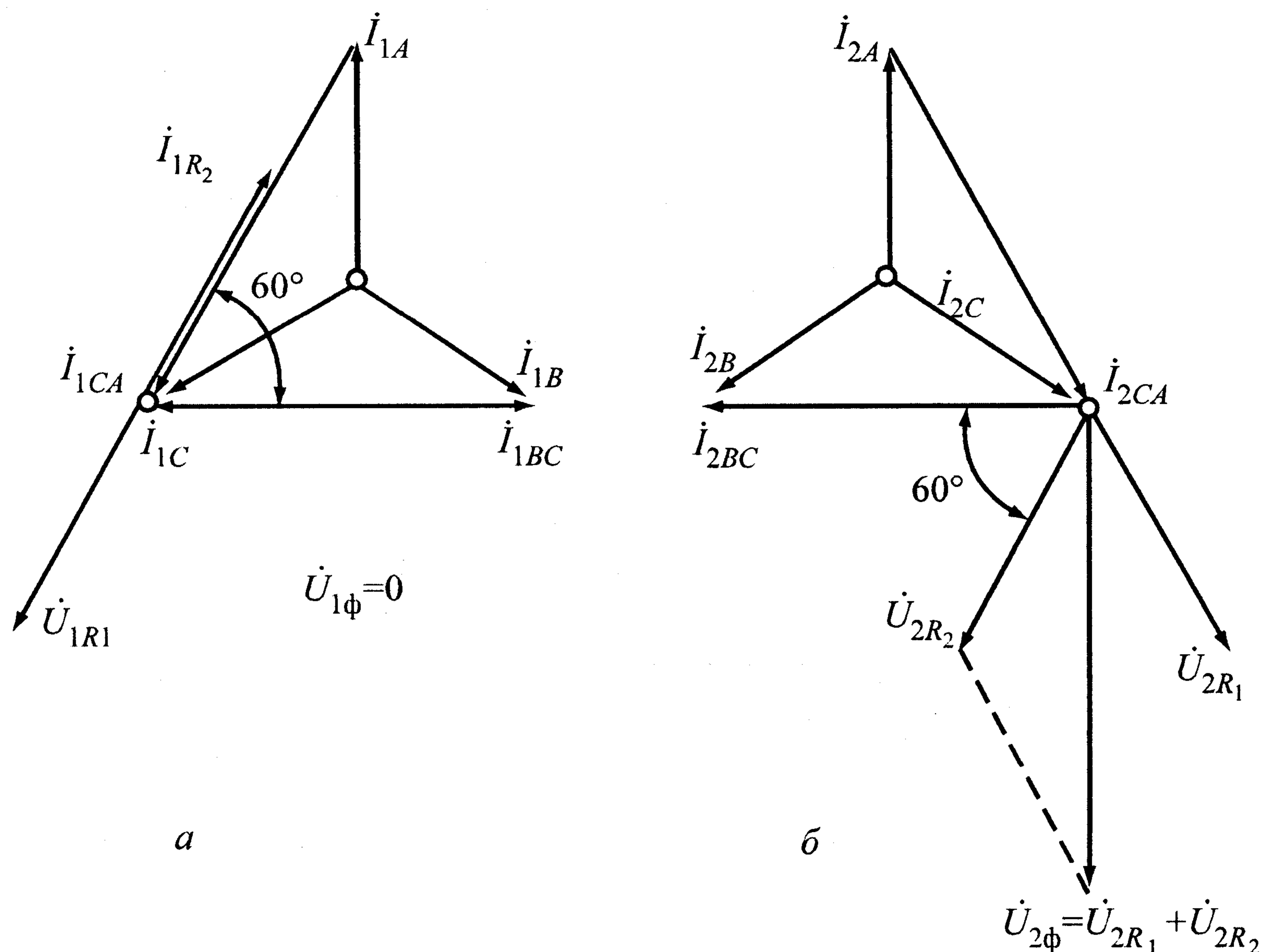


Рис. 55. Векторные диаграммы фильтра токов обратной последовательности реле РТФ1 при подведении к нему токов:

a — прямой последовательности; *б* — обратной последовательности

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. **Мусаэлян Э.С.** Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

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. Эрли*
Корректор *Н.Н. Смолина*

Подписано в печать 27.06.2016.
Формат 60x88/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 4,0. Уч.-изд.л. 4,05.

ООО НЦ «ЭНАС».
115114, Москва, Дербеневская наб., д. 11.
Тел. (495) 913-66-20. E-mail: adres@enas.ru
<http://www.enas.ru>

Фирменный магазин «Специалист».
111141, г. Москва, ул. 3-й проезд Перова Поля, д. 8, стр. 5.
Тел. (499) 391-85-45. E-mail: magazin@enas.ru

Отпечатано в Академиздатцентре «Наука» РАН,
ОП Производственно-издательский комбинат «ВИНИТИ»-«Наука»,
140014, Московская обл., г. Люберцы, Октябрьский пр-т, д. 403.
Тел./факс: 554-21-86, 554-25-97, 974-69-76.

ISBN 978-5-4248-0127-3



9 785424 801273