

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ
И ОБРАЗОВАНИЯ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Г.А. Клундук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

Часть I

ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Красноярск 2016

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Департамент научно-технологической политики и образования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Г.А. Клундук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

Электронное издание

Красноярск 2016

Клундук, Г.А.

Теоретические основы электротехники: курс лекций / Г.А. Клундук;
Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 60 с.

Рассмотрены цепи трехфазного тока. Приведены основные положения теории и методы решения задач.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06.

© Клундук Г.А., 2016

© ФГБОУ ВО «Красноярский
государственный аграрный
университет», 2016

© Центр дистанционного обучения, 2016

Оглавление

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ.....	5
1-1. ТРЕХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ	5
1-2 СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗВЕЗДОЙ	8
1-3 СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ТРЕУГОЛЬНИКОМ	12
1-4 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ	14
1-5 РОЛЬ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ. НЕЙТРАЛЬНЫЙ ПРОВОД.....	18
1-6 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ.....	21
1-7 ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА.....	22
1-8 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ.....	26
1-9 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ	29
1-10 ВКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА	31
1-11 СВОЙСТВА СУММ ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ И ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ	32
1-12 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКА СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЗВЕЗДУ	33
1-13 МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. УРАВНОВЕШЕННАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА	37
1-15. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	45
1-16. ПРИНЦИП ДЕЙСВИЯ АСИНХРОННОГО И СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ.	51

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

1-1. ТРЕХФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

Трехфазная система, изобретенная выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 80-х годах прошлого столетия, применяется во всем мире для передачи и распределения электрической энергии. Это объясняется рядом ее преимуществ по сравнению, как с однофазными, так и с другими многофазными цепями:

- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность создания надежных в работе и простых по устройству электродвигателей, генераторов и трансформаторов;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного.

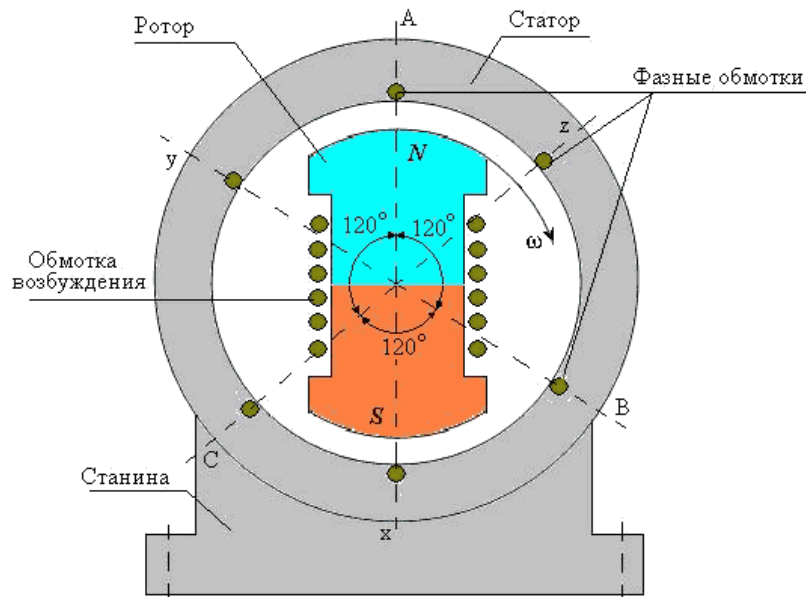


Рис. 1-1 Устройство простейшего генератора трехфазного тока

На статоре 1 генератора размещается обмотка 2, состоящая из трех частей или, как их принято называть, фаз. Обмотки фаз располагаются на статоре таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $2\pi/3$, т.е. на 120° . На рис. 1-1 каждая фаза обмотки статора условно показана состоящей из одного витка. Начала фаз обозначены буквами А, В и С, а концы – Х, Y, Z. Ротор 3 представляет собой

электромагнит, возбуждаемый постоянным током обмотки возбуждения 4, расположенной на роторе.

ЭТО ВАЖНО. *Трехфазной системой э. д. с.* называется система трех переменных э. д. с. одинаковой частоты, сдвинутых друг относительно друга по фазе на угол 120° ($2\pi/3$) периода так, что сумма трех фазных углов равна 2π .

Источником электроэнергии в трехфазной системе служит электромашинный генератор. Фазы генератора принято обозначать первыми буквами латинского алфавита: **A, B, C**.

Простейший генератор трехфазного тока по конструкции аналогичен генератору однофазного тока, только его якорь имеет не одну, а три обмотки *AX, BY, CZ*, сдвинутые в пространстве друг относительно друга (рис. 1-1). При вращении якоря в этих обмотках наводятся э. д. с. одинаковой частоты, но имеющие разные фазы.

Если амплитуды э. д. с. трех обмоток генератора равны друг другу, а сдвиг фаз между двумя любыми смежными э. д. с. равен $\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$, то трехфазная система э. д. с. называется симметричной.

Отдельные обмотки трехфазного генератора называют фазами (фаза A, фаза B и фаза C).

Это понятие не следует путать с фазой синусоидально изменяющейся величины, например э. д. с. в обмотке, т. е. с ее фазным углом.

Приняв начало отсчета времени ($t = 0$) совпадающим с моментом, когда э. д. с. первой фазы проходит через нулевое значение, запишем э. д. с. в фазе **A**:

$$e_A = E_m \sin \omega t. \quad (1.1)$$

У симметричного генератора э. д. с. второй (**B**) и третьей (**C**) фаз имеют ту же амплитуду E_m , но отстают по фазе от э. д. с. e_A , причем вторая - на $1/3$ периода, а третья - на $2/3$ периода (т. е. e_C опережает по фазе e_A на $1/3$ периода):

$$e_B = E_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{T}{3} \right) \right] = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right); \quad (1.2)$$

$$e_C = E_m \sin \left[\omega \left(t + \frac{T}{3} \right) \right] = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right). \quad (1.3)$$

или

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ). \end{aligned}$$

На рис. 1-2 даны графики этих э. д. с. и их векторная диаграмма. На этой диаграмме вектор E_A направлен вертикально вверх. Так как э. д. с. e_A имеет нулевую начальную фазу, то это значит, что направление **положительной** полуоси действительных величин на диаграмме выбрано *не горизонтальным, а вертикальным*.

При исследовании трехфазных систем часто выбирают вертикальное направление оси действительных величин.

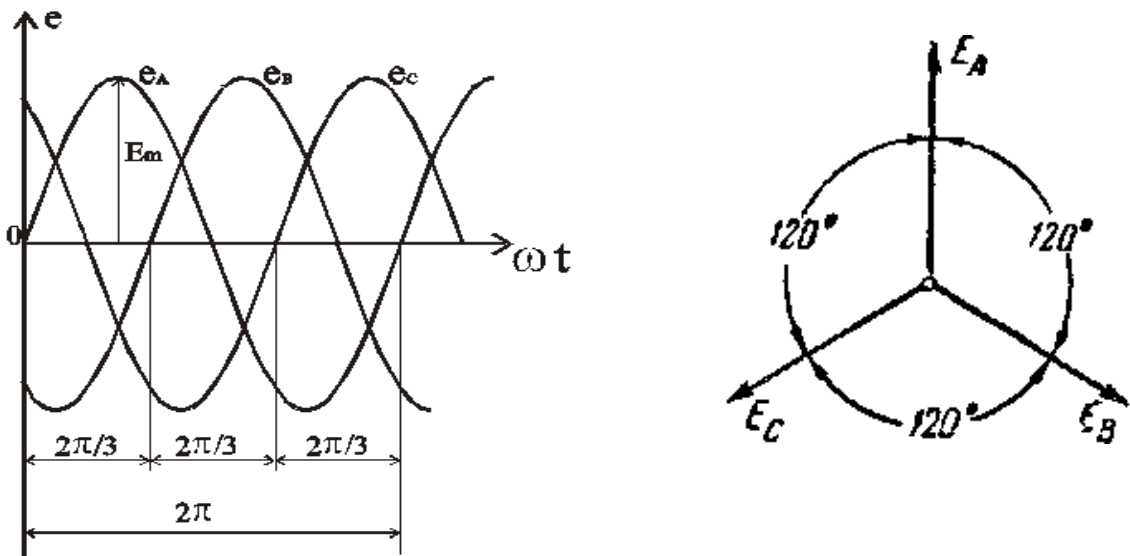


Рис. 1-2. Графики и векторная диаграмма симметричных э. д. с. трехфазного генератора.

Выразив э. д. с. первой фазы комплексом с нулевой начальной фазой $\dot{E}_A = E$, напомним комплексные выражения э. д. с. остальных фаз:

$$\begin{aligned}\dot{E}_B &= \dot{E}_A e^{-j\frac{2}{3}\pi} = \dot{E} e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_A e^{+j\frac{2}{3}\pi} = \dot{E} e^{+j\frac{2}{3}\pi}.\end{aligned}$$

Один из зажимов каждой обмотки генератора называют началом фазы и обозначают соответственно буквами **A**, **B** и **C**. Другой зажим каждой обмотки называют концом и обозначают соответственно буквами **X**, **Y** и **Z**.

Условимся всегда выбирать положительные направления э. д. с. в обмотках генератора *от концов фаз к началам* (рис. 1-3).

Каждая обмотка трехфазного генератора может служить самостоятельным источником электрической энергии и быть соединена с отдельным приемником энергии (рис. 1-3). В этом случае получается несвязанная трехфазная система из трех отдельных электрических цепей. Режим каждой цепи может быть рассчитан уже известными методами.

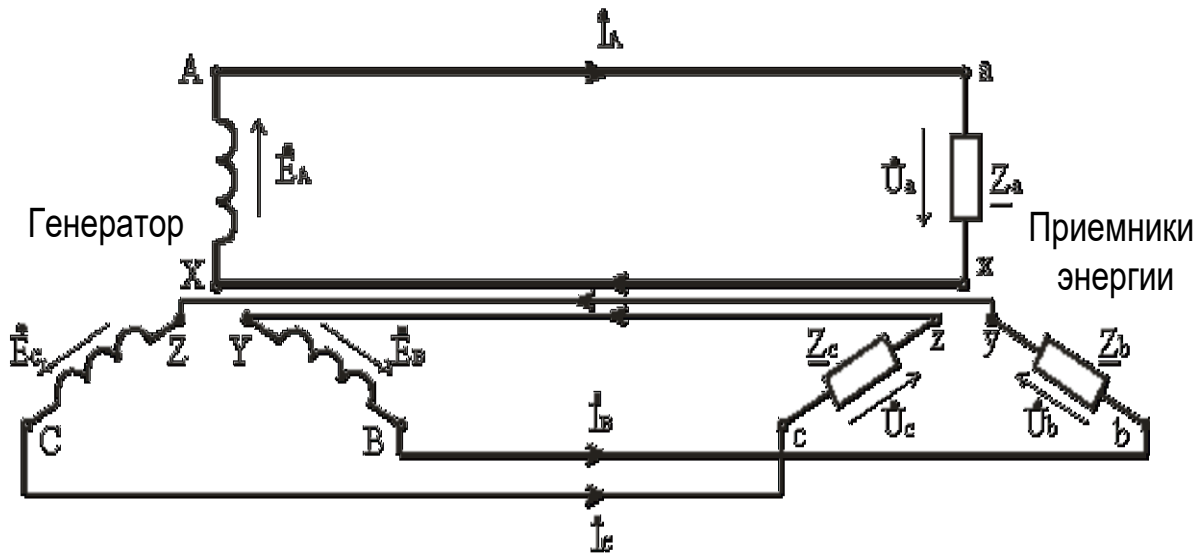


Рис. 1-3. Несвязанная трехфазная система.

В несвязанной системе для передачи энергии необходимы шесть проводов. На практике такая система не применяется.

Отдельные цепи трехфазной системы принято также называть фазами.

1-2 СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ЗВЕЗДОЙ

ЭТО ВАЖНО. У реальных трехфазных генераторов обмотки часто имеют одну общую точку N , в которой соединяются концы обмоток X , Y , Z (рис. 1-4). Такую схему соединения называют звездой, а общую точку обмоток - нулевой точкой или нейтралью генератора.

С приемником энергии генератор соединяется тремя или четырьмя проводами. Три из них, называемые *линейными*, присоединяют к началам обмоток (зажимы A , B и C), а четвертый - *нулевой* или *нейтральный* - присоединяют к нулевой точке.

Применяются системы и без нейтрального провода.

ЭТО ВАЖНО. Напряжения между линейными проводами U_L (т. е. между началами обмоток генераторов) принято называть *линейными* и обозначать U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} , причем **порядок индексов указывает положительное направление напряжения во внешней цепи.**

ЭТО ВАЖНО. Напряжения между линейными и нейтральными проводами U_Φ (т. е. между началами и концами обмоток) *называют фазными напряжениями* и обозначают U_A , U_B и U_C . **Фазное напряжение отличается от фазной э. д. с. на величину падения напряжения в обмотке генератора.**

Установим соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении обмоток генератора звездой.

Мгновенные значения линейных и фазных напряжений равны разностям мгновенных значений потенциалов начал и концов соответствующих обмоток:

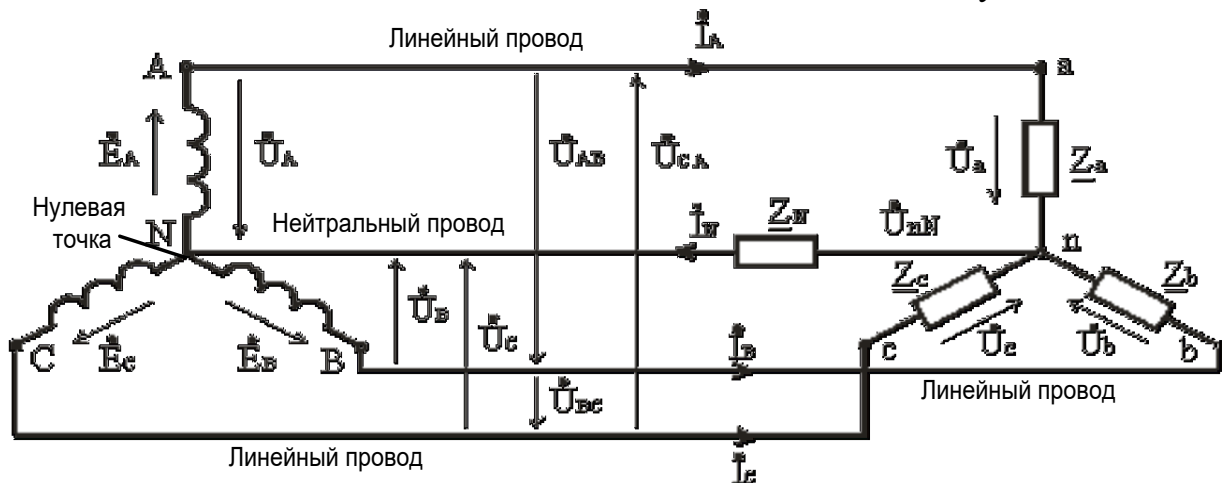


Рис. 1-4. Схема соединения обмоток генератора звездой.

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B; \quad u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C;$$

$$u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A;$$

$$u_A = \varphi_A - \varphi_x; \quad u_B = \varphi_B - \varphi_y;$$

$$u_C = \varphi_C - \varphi_z.$$

Так как концы обмоток соединены в одну точку, то потенциалы

$$\varphi_x = \varphi_y = \varphi_z$$

и мгновенное линейное напряжение между точками **A** и **B**

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = (\varphi_x + u_A) - (\varphi_x + u_B) = u_A - u_B. \quad (1.4)$$

Аналогично линейные напряжения

$$u_{BC} = u_B - u_C; \quad (1.5)$$

$$u_{CA} = u_C - u_A. \quad (1.6)$$

Таким образом, *мгновенные значения линейных напряжений равны алгебраическим разностям мгновенных значений соответствующих фазных напряжений.*

Если напряжения выразить комплексными величинами, то *комплексное линейное напряжение определяется как разность соответствующих*

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Точно так же векторы линейных напряжений равны разностям векторов фазных напряжений (рис. 1-5, а). Векторы линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} всегда образуют замкнутый треугольник, так как их сумма тождественно равна нулю. Это станет очевидным, если векторы линейных напряжений переместить параллельно самим себе, как показано на векторной диаграмме рис. 1-5,б.

Рассматривая диаграммы рис. 1-5, мы видим, что и векторы двух соседних фазных напряжений вместе с вектором соответствующего линейного напряжения образуют замкнутый треугольник.

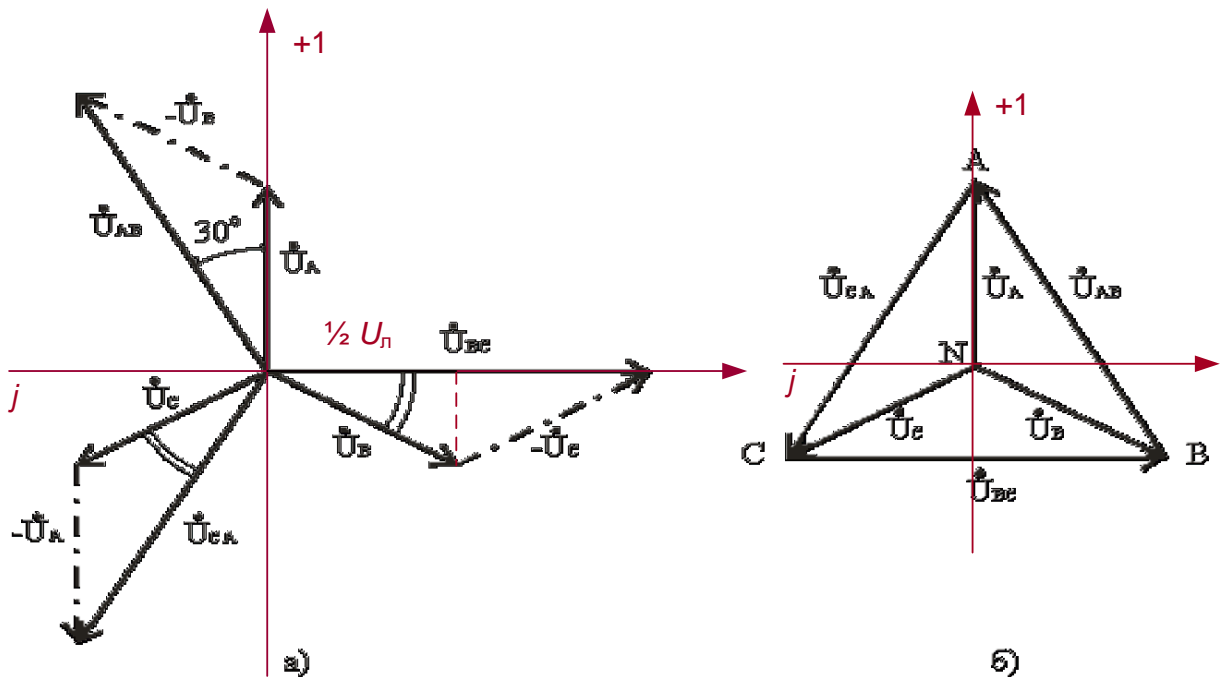


Рис. 1-5. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении обмоток генератора звездой.

При симметричной системе напряжений этот треугольник равнобедренный, его углы равны 30, 30 и 120°. Следовательно:

а) между действующими значениями фазных U_ϕ и линейных U_L напряжений существует соотношение

$$\frac{1}{2}U_L = U_\phi \cos 30^\circ$$

или

$$U_L = 2U_\phi \cos 30^\circ = 2U_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot U_\phi, \quad (1-7)$$

т. е. *линейное напряжение в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раза больше фазного;*

б) векторная диаграмма симметричных линейных напряжений сдвинута на 30° в сторону вращения векторов относительно диаграммы фазных напряжений (рис. 1-5, а).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ. *Трехфазную цепь называют симметричной, если амплитудные и действующие значения напряжений и токов во всех фазах равны и сдвинуты по фазе друг относительно друга на угол 120°, и несимметричной, если хотя бы одно из условий не выполняется.*

Предусмотренные ГОСТом линейные и фазные напряжения для цепей низкого напряжения связаны между собой соотношениями:

$$U_L = 660 \text{ В}; U_\phi = 380 \text{ В};$$

$$U_L = 380 \text{ В}; U_\phi = 220 \text{ В};$$

$$U_L = 220 \text{ В}; U_\phi = 127 \text{ В}.$$

Пример 1-1. В обмотках трехфазного генератора индуцируются симметричные э. д. с.

Определить линейное напряжение генератора, если фазное напряжение его:

1) 127 В; 2) 220 В.

Линейное напряжение:

$$1) U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi = \sqrt{3} \cdot 127 = 220 \text{ В};$$

$$2) U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi = \sqrt{3} \cdot 220 = 380 \text{ В}.$$

1-3 СОЕДИНЕНИЕ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА ТРЕУГОЛЬНИКОМ

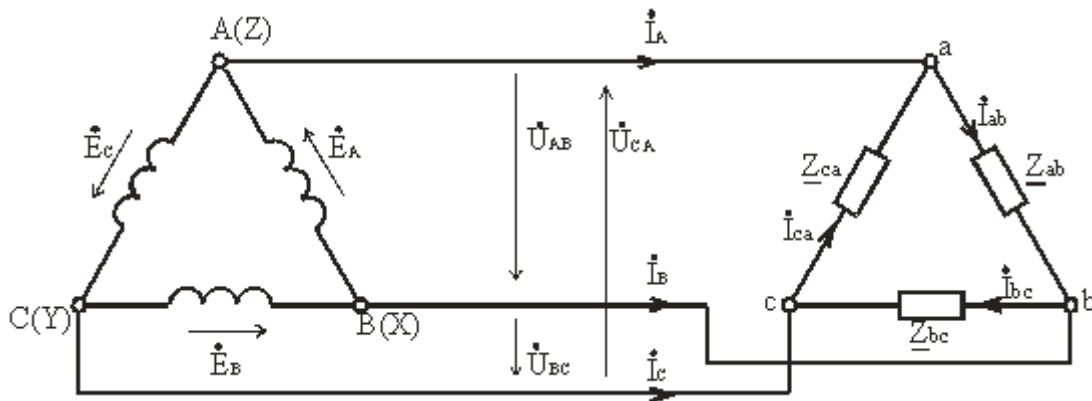


Рис. 1-6. Схема соединения обмоток генератора треугольником.

ЭТО ВАЖНО. При соединении источника электроэнергии по схеме «треугольник» (рис. 1.6), конец первой обмотки **X** соединяют с началом второй обмотки **B**, конец второй обмотки **Y** - с началом третьей **C** и конец третьей **Z** - с началом первой **A**.

В такой схеме три обмотки генератора образуют замкнутый контур с весьма малым сопротивлением. Однако при симметричной системе э. д. с. и отключенной внешней цепи тока в этом контуре нет, так как сумма симметричных э. д. с. в любой момент времени равна нулю. В этом легко убедиться, сложив мгновенные значения трех э. д. с, действующих в обмотках трехфазного генератора:

$$\begin{aligned}
 e_A + e_B + e_C &= E_m \left[\sin \omega t + \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) \right] = \\
 &= E_m \left[\sin \omega t + \left(-\frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) + \left(-\frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \right) \right] = 0.
 \end{aligned}$$

Здесь синус разности двух углов ωt и $\frac{2}{3}\pi$ и синус суммы тех же углов разложены по известным формулам тригонометрии, причем учтено, что $\cos\left(\pm\frac{2}{3}\pi\right) = -\frac{1}{2}$, $\sin\left(\pm\frac{2}{3}\pi\right) = \pm\frac{\sqrt{3}}{2}$.

К тому же выводу можно прийти, складывая векторы фазных э. д. с. (рис. 1-7) или комплексные выражения фазных э. д. с;

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \dot{E}_A \left(1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{+j\frac{2\pi}{3}} \right) = 0, \quad (1-8)$$

так как

$$\begin{aligned} 1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}} + e^{+j\frac{2\pi}{3}} &= 1 + \cos\frac{2}{3}\pi - j\sin\frac{2}{3}\pi + \cos\frac{2}{3}\pi + j\sin\frac{2}{3}\pi = \\ &= 1 - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 0. \end{aligned}$$

Из выражения (1-8) следует, что сумма двух э. д. с. равна третьей, взятой с обратным знаком, например:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_C = -\dot{E}_B.$$

ЭТО ВАЖНО. При соединении обмоток трехфазного генератора треугольником линейный провод отходит непосредственно от общих точек начала одной фазы и конца соседней ($A - Z$, $B - X$, $C - Y$).

Поэтому напряжения между линейными проводами (линейные напряжения) в то же время являются фазными напряжениями генератора, т. е.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C.$$

Опасно неправильное соединение обмоток генератора треугольником; на рис. 1-8 указана одна из неправильных схем соединения, в которой конец первой обмотки X соединен не с началом B , а с концом Y второй, а начало третьей обмотки C не с концом Y , а с началом B второй.

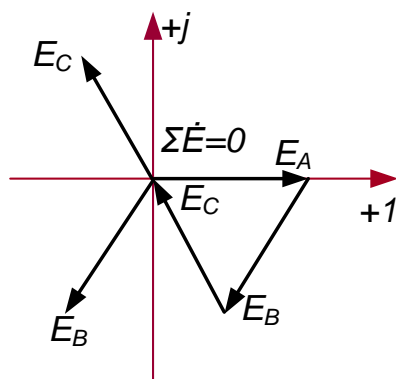


Рис. 1-7. Векторная диаграмма э.д.с. при соединении обмоток генератора треугольником.

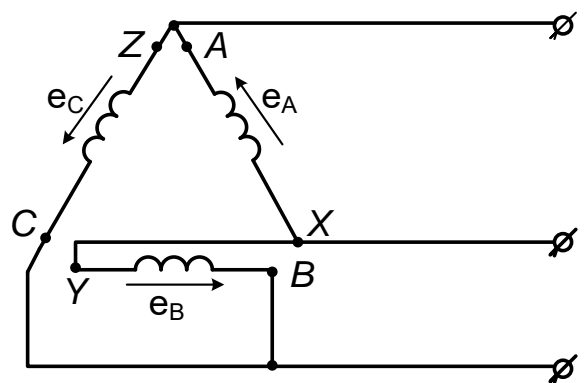


Рис. 1-8. Неправильная схема соединения обмоток генератора треугольником.

Поэтому э. д. с. E_B не складывается с остальными э. д. с, а вычитается из их суммы. Результирующая э. д. с. обмоток

$$\dot{E}_A - \dot{E}_B + \dot{E}_C = \left(\dot{E}_A + \dot{E}_C \right) - \dot{E}_B = -2\dot{E}_B,$$

т. е. по абсолютной величине равна удвоенному значению фазной э. д. с. (рис. 1-9), что при весьма малом сопротивлении обмоток генератора равносильно *короткому замыканию*.

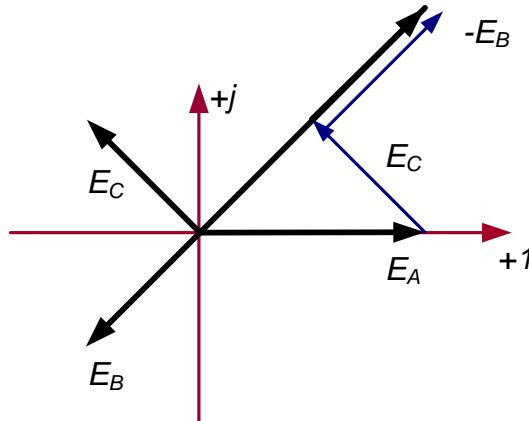


Рис. 1-9. Векторная диаграмма э.д.с. к схеме, изображенной на рис. 12-8

На практике невозможно выполнить все обмотки одинаковыми, т.е. система ЭДС генератора всегда несимметрична. В ней появляется уравнивающий ток, что нежелательно с точки зрения электробезопасности. Поэтому обмотки генератора, как правило, соединяют по схеме «звезда».

Вообще говоря, трехфазный генератор и трехфазная нагрузка могут быть включены по разным схемам, т.е. имеется 5 способов соединения обмоток генератора с нагрузкой

Таблица 1.1 - Способы соединения трехфазных цепей

№пп	Схема включения фаз генератора	Схема включения фаз нагрузки	Нейтральный провод
1	«Звезда»	«Звезда»	Есть
2	«Звезда»	«Звезда»	Нет
3	«Звезда»	«Треугольник»	-
4	«Треугольник»	«Звезда»	-
5	«Треугольник»	«Треугольник»	-

1-4 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗДОЙ

Приемники энергии, так же как и обмотки генератора, можно соединить звездой; при этом получается *четырёхпроводная* (рис. 1-10) или *трехпроводная* (рис. 1-11) трехфазная система.

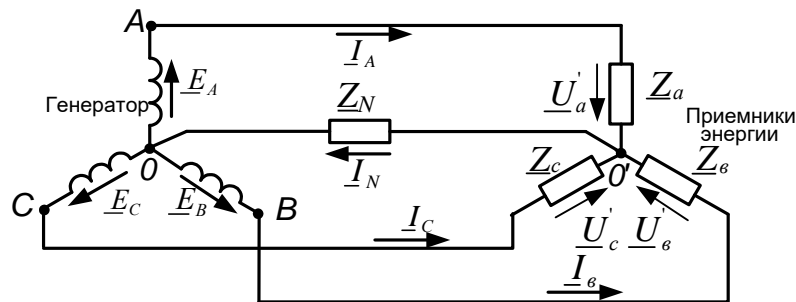


Рис. 1-10. Схема четырехпроводной трехфазной системы.

Трехфазную цепь при соединении *звезда-звезда* можно рассматривать как сложную цепь с двумя узлами:

- O - нулевая точка генератора и
- O' - нулевая точка приемника.

Для решения вопроса о распределении напряжений и токов в трехфазной системе при различных сопротивлениях фаз приемника рассмотрим трехфазную цепь, изображенную на рис. 1-10, где Z_N - сопротивление нейтрального провода, а сопротивления линейных проводов и обмоток генератора, если ими нельзя пренебречь, должны быть учтены в сопротивлениях приемника Z_A, Z_B, Z_C .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ. Провода, соединяющие генератор с нагрузкой, называются *линейными*. Провод, соединяющий нейтральные точки источника и нагрузки, называется *нейтральным*. Узел, который образуют обмотки фаз генератора или фазы приемника, называют *нейтралью* или *нейтральной точкой (нулевой точкой)*.

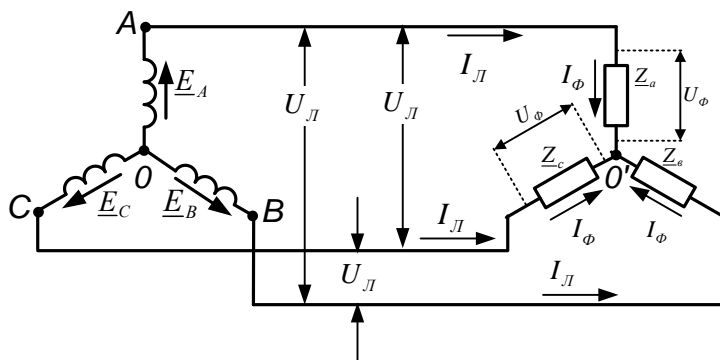


Рис. 1-11. Схема трехпроводной трехфазной системы.

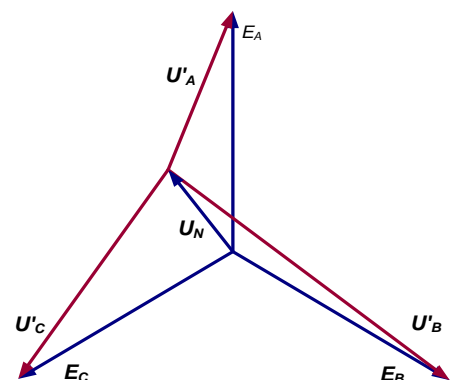


Рис. 1-12. Векторная диаграмма э.д.с. генератора и напряжений на фазах приемника энергии.

Воспользовавшись методом узлового напряжения, определим напряжение между нейтралью приемника энергии O' и нейтралью генератора O , которое называют *смещением нейтрали*:

$$\dot{U}_{O'O} = \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} = \frac{\sum (E \cdot Y)}{\sum Y}. \quad (1-9)$$

Напряжения на отдельных фазах приемника (пренебрегая сопротивлениями обмоток генератора и линейных проводов)

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{E}_A - \dot{U}_N; & \dot{U}'_B &= \dot{E}_B - \dot{U}_N; \\ \dot{U}'_C &= \dot{E}_C - \dot{U}_N. \end{aligned}$$

на рис. 1-12 построена векторная диаграмма, на которой показаны э. д. с. и напряжения $E_A, E_B, E_C, U_A, U'_B, U'_C$ и U_N .

Токи в отдельных фазах генератора и приемника (*фазные токи*) и равные им токи линейных проводов (*линейные токи*)

$$\dot{I}_A = \dot{U}'_A \cdot Y_A; \quad \dot{I}_B = \dot{U}'_B \cdot Y_B; \quad \dot{I}_C = \dot{U}'_C \cdot Y_C; \quad (1-10)$$

а ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \cdot Y_N, \quad (1-11)$$

причем по первому правилу Кирхгофа при принятых на рис. 1-10 *положительных направлениях линейных токов от генератора к приемнику, а тока в нейтральном проводе от приемников к генератору*

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (1-12)$$

Мощности в отдельных фазах приемника вычисляются по комплексам напряжений и токов;

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A \cdot \dot{I}_A^* &= P_A + jQ_A; & \dot{U}'_B \cdot \dot{I}_B^* &= P_B + jQ_B; \\ \dot{U}'_C \cdot \dot{I}_C^* &= P_C + jQ_C. \end{aligned} \quad (1-13)$$

Этот метод расчета пригоден и для трехпроводной цепи. Нужно только принять $Z_N = \infty$, т. е. $Y_N = 0$ и $I_N = 0$.

Пример 1-2. В цепь трехфазного тока включены сопротивления, соединенные звездой. $Z_A = 10$ ом; $Z_B = 4$ ом и $Z_C = 25$ ом. Сопротивление

нейтрального провода $Z_N = 0$. Электродвижущие силы, индуцируемые в отдельных фазах генератора, симметричны. $E_\phi = 120$ В.

Определить токи во всех участках цепи. Предварительно вычислим проводимости отдельных фаз:

$$Y_A = \frac{1}{Y_Z} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ Сим}; \quad Y_B = \frac{1}{Y_B} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ Сим}; \quad Y_C = \frac{1}{Y_C} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ Сим};$$

$$Y_N = \infty.$$

Направим вектор по действительной оси; тогда $E_A = 120$ в и векторы остальных э. д. с:

$$\begin{aligned} \dot{E}_B &= \dot{E}_A \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} = 120 \left(\cos \frac{2}{3}\pi - j \sin \frac{2}{3}\pi \right) = \\ &= (-60 - j\sqrt{3} \cdot 60) = (-60 - j104) \text{ В}; \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_A \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} = (-60 + j104) \text{ В}. \end{aligned}$$

Смещение нейтрали

$$\dot{U}_N = \frac{\Sigma(EY)}{\Sigma Y} = \frac{\Sigma(EY)}{\infty} = 0.$$

Токи

$$\dot{I}_A = \dot{U}'_A \cdot Y_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_N) Y_A = 120 \cdot 0,1 = 12 \text{ А};$$

$$I_A = 12 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}'_B \cdot Y_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_N) Y_B = (-60 - j104) \cdot 0,25 = (-15 - j26) \text{ А};$$

$$I_B = \sqrt{15^2 + 26^2} = 30,0 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}'_C \cdot Y_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_N) Y_C = (-60 + j104) \cdot 0,04 = (-2,4 + j4,16) \text{ А};$$

$$I_C = \sqrt{2,4^2 + 4,16^2} = 4,8 \text{ А};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = (12 - 15 - j26 - 2,4 + j4,16) = \\ &= (-5,4 - j21,8) \text{ А}; \end{aligned}$$

$$I_N = \sqrt{5,4^2 + 21,8^2} = 22,0 \text{ А}.$$

Иногда приходится вычислять токи в фазах приемника энергии, соединенного звездой (без нулевого провода), который непосредственно к

зажимам генератора не присоединен (рис. 1-13), причем линейные напряжения на зажимах приемника симметричны.

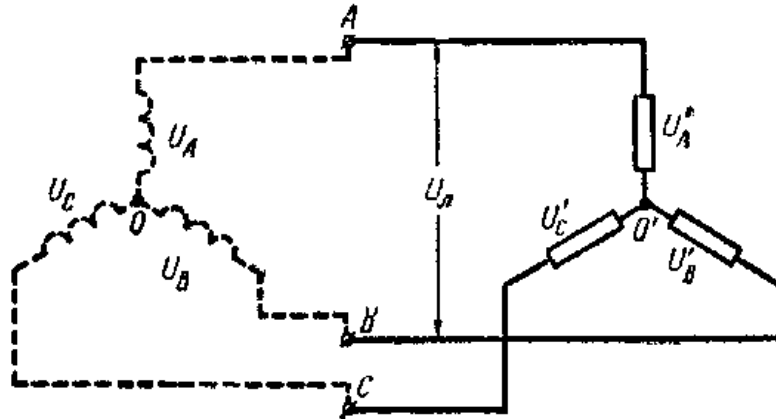


Рис. 1-13. Приемник энергии, соединенный звездой.

В этом случае можно представить себе, что эти напряжения создаются воображаемым генератором, соединенным звездой (внутреннее сопротивление генератора принимается равным нулю), который присоединен к зажимам цепи и фазные напряжения которого $U_A = U_B = U_C = U_\phi = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L$.

На рис. 2-13 пунктиром показан воображаемый трехфазный генератор.

1-5 РОЛЬ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ. НЕЙТРАЛЬНЫЙ ПРОВОД

Электродвижущие силы трехфазного генератора E_A , E_B и E_C обычно образуют симметричную систему, но при $U_N \neq 0$ напряжения U'_A , U'_B , U'_C получаются несимметричными, что очевидно из векторной диаграммы, приведенной на рис. 1-12.

Напряжения на зажимах приемников, включенных в различные фазы, тем сильнее отличаются друг от друга, чем больше смещение нейтрали U_N , поэтому в практических условиях стремятся уменьшить U_N до нуля. Получить U_N , равное нулю можно двумя способами.

Во-первых, напряжения на зажимах приемника будут симметричными, если выровнять нагрузку отдельных фаз.

Действительно, если нагрузка фаз равномерная $Y_A = Y_B = Y_C = Y_C$, то

$$\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C = Y_\phi (\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C) = 0.$$

При равномерной нагрузке

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N} = 0$$

и ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \cdot Y_N = 0.$$

Ясно, что в этом случае четвертый провод становится лишним и приемники энергии можно присоединить к генератору тремя проводами, образуя трехфазную трехпроводную цепь (рис. 1-11).

Во-вторых, напряжения на зажимах приемника будут симметричными при $Y_N = \infty$, т. е. если нейтральный провод выполнить с небольшим сопротивлением ($Z_N \approx 0$). В этом случае смещение нейтрали отсутствует независимо от нагрузки отдельных фаз:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot Y_A + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + \infty} = 0.$$

Приемники электрической энергии можно разделить на две группы:

- **к первой** относятся трехфазные электродвигатели, которые имеют симметричные обмотки и обеспечивают равномерную нагрузку фаз. Трехфазные электродвигатели включают в трехфазную цепь звездой без нейтрального провода;

- **ко второй группе** приемников относятся электрические лампы, нагревательные приборы и другие приемники, которые не могут обеспечить строго равномерной нагрузки фаз. Эти приемники энергии включают звездой с нейтральным проводом.

Ток в нейтральном проводе в большинстве случаев значительно меньше линейных токов. Поэтому в трехфазных установках нейтральный провод выполняется сечением, в 2-3 раза меньшим сечения линейных проводов.

Таким образом, при симметричной нагрузке нейтральный провод можно удалить и это не повлияет на фазные напряжения приемника. При несимметричной нагрузке и отсутствии нейтрального провода фазные напряжения нагрузки уже не связаны жестко с фазными напряжениями генератора, так как на нагрузку воздействуют только линейные напряжения генератора. Несимметричная нагрузка в таких условиях вызывает несимметрию ее фазных напряжений \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c и смещение ее нейтральной точки O' из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).

Направление смещения нейтрали зависит от последовательности фаз системы и характера нагрузки.

Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнять фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального линейного напряжения сети.

ЭТО ВАЖНО. Обрыв нейтрального провода при неодинаковых сопротивлениях фаз приемника влечет за собой *из-за смещения нейтрали* изменение фазных токов и напряжений приемника.

Изменение же фазных напряжений, как уже отмечалось, совершенно недопустимо. Поэтому в нейтральных проводах, никогда не устанавливают предохранителей.

Пример 1-3. Электрические лампы, соединенные звездой, включены в сеть трехфазного тока. В нормальных условиях (при наличии нейтрального провода) напряжение на зажимах ламп 120 В. Определить напряжение на зажимах каждой группы ламп при обрыве нейтрального провода, если сопротивления фаз: $Z_A = 40 \text{ Ом}$; $Z_B = 10 \text{ Ом}$; $Z_C = 20 \text{ Ом}$.

Совместим \dot{E}_A с действительной осью; тогда $\dot{E}_A = 120 \text{ В}$ и

$$\dot{E}_B = \dot{E}_A \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} = (-60 - j104) \text{ В};$$

$$\dot{E}_C = \dot{E}_A \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} = (-60 + j104) \text{ В}.$$

Проводимости отдельных фаз

$$Y_A = 0,025 \text{ См}; Y_B = 0,1 \text{ См}; Y_C = 0,05 \text{ См}.$$

Смещение нейтрали при обрыве нейтрального провода

$$U_N = \frac{\Sigma(\dot{E} \cdot Y)}{\Sigma Y} = \frac{120 \cdot 0,025 + (-60 - j104) \cdot 0,1 + (-60 + j104) \cdot 0,05}{0,025 + 0,1 + 0,05} =$$

$$= (-34,3 - j29,6) \text{ В};$$

напряжения на отдельных фазах

$$\dot{U}'_A = \dot{E}_A - \dot{U}_N = 120 + 34,3 + j29,6 = (154,3 + j29,6) \text{ В};$$

$$U'_A = \sqrt{154,3^2 + 29,6^2} = 160 \text{ В};$$

$$\dot{U}'_B = \dot{E}_B - \dot{U}_N = -60 - j104 + 34,3 + j29,6 = (-25,7 - j74,4) \text{ В};$$

$$U'_B = \sqrt{25,7^2 + 74,4^2} = 78,7 \text{ В};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{E}_C - \dot{U}_N = -60 + j104 + 34,3 + j29,6 = (-25,7 + j133,6) \text{ В};$$

$$U'_C = \sqrt{25,7^2 + 133,6^2} = 136 \text{ В};$$

Напряжения U'_A и U'_C превышают номинальное напряжение ламп, поэтому лампы, включенные в фазы A и C , могут перегореть.

1-6 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ

Исследование симметричной трехфазной системы при равномерной нагрузке фаз сводится к расчету одной фазы.

Пусть в цепь включен приемник, фазы которого имеют одинаковые сопротивления Z и соединены звездой (рис. 1-11).

В симметричной цепи фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}. \quad (1-14)$$

Фазный и линейный токи

$$I_\phi = I_L = \frac{U_\phi}{Z}. \quad (1-15)$$

Средняя или активная мощность фазы

$$P_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi_\phi.$$

Активная мощность цепи

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi_\phi,$$

так как

$$U_\phi \cdot I_\phi = \frac{U_L \cdot I_L}{\sqrt{3}}.$$

Реактивная мощность фазы

$$Q_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi_\phi.$$

Реактивная мощность цепи

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi_\phi.$$

Полная мощность цепи

$$S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L.$$

Пример 1-4. Обмотки трехфазного генератора соединены звездой. Электродвижущая сила каждой фазы 220 В. Приемниками являются три одинаковые катушки, активное сопротивление каждой из которых 6 Ом и индуктивное 8 Ом.

Определить фазный и линейный токи и общую среднюю мощность при соединении катушек звездой.

Полное сопротивление каждой фазы

$$z_{\phi} = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Фазное напряжение приемника приблизительно равно э. д. с. генератора, т. е. 220 В; при этом предполагается, что внутреннее сопротивление обмоток генератора мало.

Линейное напряжение

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot E_{\phi} = 380 \text{ В.}$$

Линейный ток, равный фазному ток

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности каждой фазы

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{r}{z} = \frac{6}{10} = 0,6.$$

Активная мощность цепи

$$P = 3 \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 22 \cdot 0,6 = 8720 \text{ Вт.}$$

1-7 ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА

Напряжения между отдельными точками цепи можно найти просто и наглядно графически, путем построения векторной диаграммы, которую называют **топографической**.

Топографическую диаграмму строят так, чтобы каждой точке цепи соответствовала определенная точка на диаграмме и чтобы вектор, проведенный в эту точку из начала координат, выражал по величине и фазе потенциал соответствующей точки цепи. На такой диаграмме отрезок, соединяющий две любые точки, определяет по величине и фазе напряжение между соответствующими точками цепи.

При построении топографической диаграммы удобно принять за точку с нулевым потенциалом нейтраль (нулевую точку 0) генератора. Тогда этой точке генератора на диаграмме соответствует начало координат.

Построим топографическую диаграмму для цепи, изображенной на [рис. 1-10](#). Полагаем, что точка 0 на диаграмме ([рис. 1-14](#)) соответствует нулевой точке генератора, потенциал которой равен нулю ($\varphi_0 = 0$). Откладывая из точки

0 векторы фазных э. д. с. E_A, E_B, E_C , получим точки A, B и C , соответствующие точкам A, B и C цепи.

Отрезок \overline{AB} , равный разности векторов $\dot{E}_A - \dot{E}_B$, представляет собой линейное напряжение $\dot{U}_{AB} = \dot{\varphi}_A - \dot{\varphi}_B$. Подобным же образом отрезки \overline{BC} и \overline{CA} выражают линейные напряжения \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} .

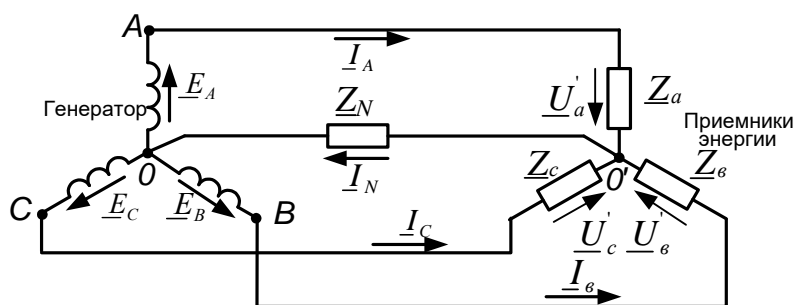


Рис. 1-10. Схема четырехпроводной трехфазной системы.

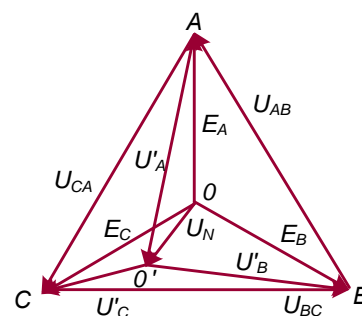


Рис. 1-14. Топографическая диаграмма цепи, изображенной на рисунке 1-10.

Отложив из точки O вектор $\dot{U}_N = \dot{U}_{O'O} = \dot{\varphi}_{O'} - \dot{\varphi}_O = \dot{\varphi}_{O'}$ (отрезок $\overline{O'O}$), представляющий собой потенциал нулевой точки приемника, мы получим на диаграмме точку O' . Отрезки $\overline{AO'}$, $\overline{BO'}$ и $\overline{CO'}$ выражают напряжения на фазах приемника \dot{U}'_A, \dot{U}'_B и \dot{U}'_C .

Если потенциалы нулевых точек генератора и приемника одинаковы (смещения нейтрали нет), то точка O' совпадает на диаграмме с точкой O ; при возникновении разности потенциалов U_N точка O' смещается в направлении вектора U_N (смещение нейтрали есть).

Рассмотрим, как строятся топографические диаграммы для некоторых частных случаев режима трехфазной цепи.

Первый случай.

Пусть при симметричной системе э. д. с. генератора, одинаковых сопротивлениях фаз приемника $Z_C = Z_B$ и отсутствии нулевого провода ($Z_N = \infty$) произошел обрыв одного из линейных проводов, например перегорел предохранитель в проводе A (рис. 1-15).

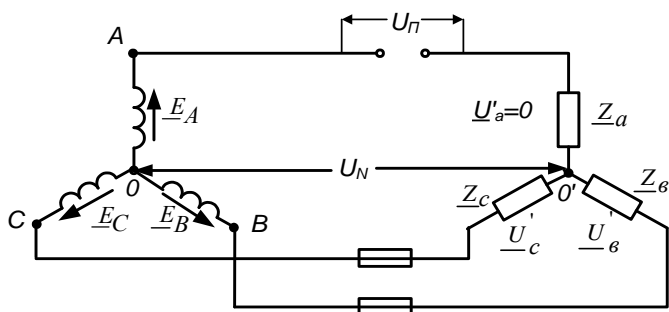


Рис 1-15. Схема трехпроводной трехфазной системы при разрыве одного из линейных проводов.

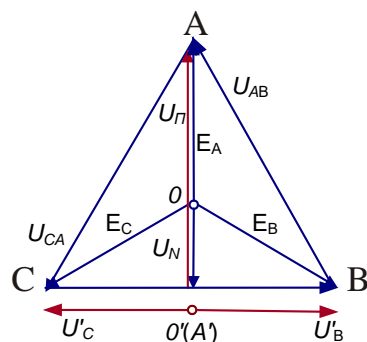


Рис 1-16. Топографическая диаграмма цепи, изображенной на рисунке 1-15.

В этом случае $Z_A = \infty$, или $Y_A = 0$ и

$$\dot{U}_N = \frac{\Sigma(\dot{E}Y)}{\Sigma Y} = \frac{\dot{E}_A \cdot 0 + \dot{E}_B \cdot Y_B + \dot{E}_C \cdot Y_C}{0 + Y_B + Y_C} = \frac{Y_B(\dot{E}_B + \dot{E}_C)}{2Y_B}, \quad (1-17)$$

или, так как $\dot{E}_B + \dot{E}_C = -\dot{E}_A$:

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A}{2}. \quad (1-18)$$

Напряжение на фазе приемника A равно нулю ($U'_A = 0$, т. е. $\varphi_{A'} = \varphi_0$), так как при обрыве провода ток равен нулю, но между зажимами перегоревшего предохранителя (точками A и A') появится напряжение, равное

$$\dot{U}_\Pi = \dot{E}_A - \dot{U}_N = \frac{3}{2}\dot{E}_A.$$

Напряжение на фазе приемника B

$$\dot{U}'_B = \dot{E}_B - \dot{U}_N = \dot{E}_B - \frac{\dot{E}_B + \dot{E}_C}{2} = \frac{\dot{E}_B - \dot{E}_C}{2} = \frac{\dot{U}_{BC}}{2};$$

напряжение на фазе приемника C

$$\dot{U}'_C = \dot{E}_C - \dot{U}_N = \dot{E}_C - \frac{\dot{E}_B + \dot{E}_C}{2} = \frac{\dot{E}_C - \dot{E}_B}{2} = -\frac{\dot{U}_{BC}}{2}.$$

Топографическая диаграмма (рис. 1-16) иллюстрирует полученные результаты.

Рассмотрим второй случай.

Пусть при симметричной системе напряжений генератора и одинаковых сопротивлениях фаз приемника B и C ($Z_B = Z_C$) произошло короткое

замыкание фазы A , т. е. $Z_A = 0$ (рис. 1-17). Нейтральный провод отсутствует ($Z_N = \infty$ и соответственно $Y_N = 0$).

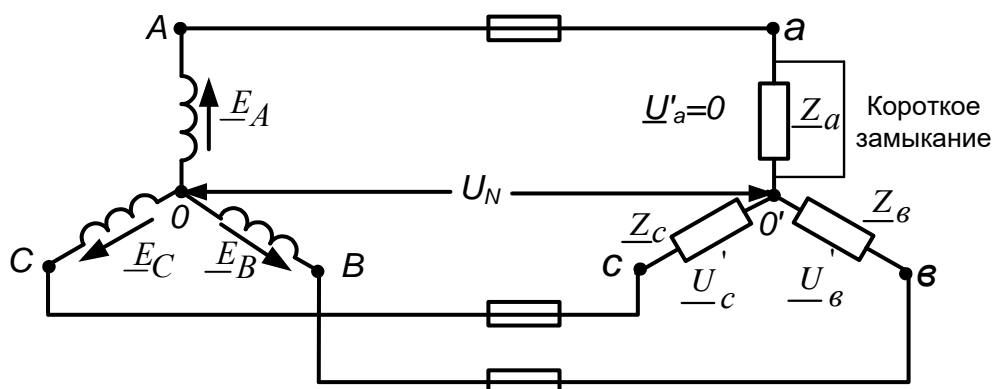


Рис. 1-17. Схема трехпроводной трехфазной системы при коротком замыкании одной из фаз приемника энергии.

Для определения смещения нейтрали умножим числитель и знаменатель формулы (12-9) на Z_A , после чего приравняем Z_A нулю:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A + \dot{E}_B Y_B Z_A + \dot{E}_C Y_C Z_A}{1 + Z_A(Y_B + Y_C)} = \dot{E}_A. \quad (1-19)$$

Напряжение на фазе приемника A равно нулю ($U'_A = 0$, т. е. $\varphi_A = \varphi_0$), так как $Z_A = 0$. Напряжение на фазе приемника B

$$\dot{U}'_B = \dot{E}_B - \dot{U}_N = \dot{E}_B - \dot{E}_A = -\dot{E}_{AB}.$$

Напряжение на фазе приемника C

$$\dot{U}'_C = \dot{E}_C - \dot{U}_N = \dot{E}_{CA}.$$

Топографическая диаграмма (рис. 1-18) иллюстрирует полученные результаты. Из диаграммы ясно, что *при коротком замыкании одной фазы приемника напряжения на других фазах приемника возрастают в $\sqrt{3}$ раз*. Иногда при соединении электрических ламп звездой это явление приводит к аварийному режиму. Действительно, *если короткое замыкание в одной из фаз произойдет в то время, когда будет оборван нейтральный провод, то все лампы, включенные в две другие фазы, перегорят из-за резкого повышения напряжения*. Поэтому нейтральный провод для повышения прочности часто выполняют из стали.

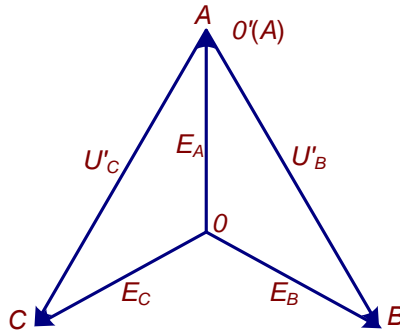


Рис. 1-8. Топографическая диаграмма цепи, изображенной на рис.1-7.

1-8 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

При соединении приемников треугольником (рис. 1-19) сопротивление каждой фазы Z_{AB} , Z_{BC} и Z_{CA} подключается непосредственно к соответствующим линейным проводам. Поэтому линейное напряжение следует рассматривать как фазное напряжение приемника.

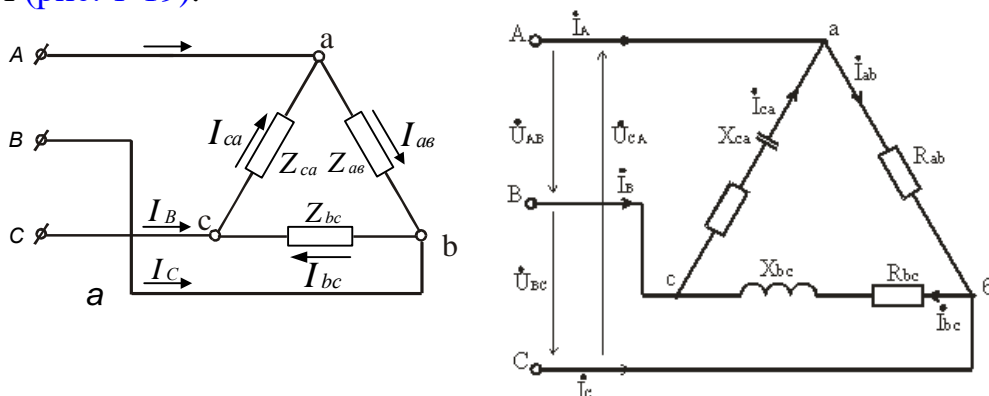
Комплексы токов в отдельных фазах приемника

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \dot{U}_{AB} \cdot Y_{AB}; \quad (1-20)$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \dot{U}_{BC} \cdot Y_{BC}; \quad (1-21)$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \dot{U}_{CA} \cdot Y_{CA}. \quad (1-22)$$

причем положительное направление фазных токов выбирают от А к В, от В к С и от С к А (рис. 1-19).



а) б)
 Рис. 1-19. Приемник энергии, соединенный треугольником.

За положительное направление линейных токов примем, как и раньше, направление от генератора к приемнику; тогда по первому правилу Кирхгофа для точки А можно написать:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_{CA} = \dot{I}_{AB}, \quad (1-23)$$

откуда

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}. \quad (1-24)$$

Аналогично для точки В

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \quad (1-25)$$

и для точки С

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (1-26)$$

Таким образом, *комплексный линейный ток равен разности комплексных фазных токов тех фаз, которые соединены с данным линейным проводом*, т. е. *вектор линейного тока находится как разность векторов соответствующих фазных токов* (рис. 1-20, а).

Мощности в отдельных фазах приемника вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_{AB}^* &= P_{AB} + jQ_{AB}; \\ \dot{U}_{BC} \cdot \dot{I}_{BC}^* &= P_{BC} + jQ_{BC}; \\ \dot{U}_{CA} \cdot \dot{I}_{CA}^* &= P_{CA} + jQ_{CA}. \end{aligned} \quad (1-27)$$

На рис. 1-20 представлены векторные диаграммы, на которых изображены напряжения и токи при соединении приемников треугольником. На рис. 1-20, а векторы проведены из общего начала. Иногда для большей наглядности векторы перемещают параллельно самим себе и диаграмма принимает вид, изображенный на рис. 1-20, б.

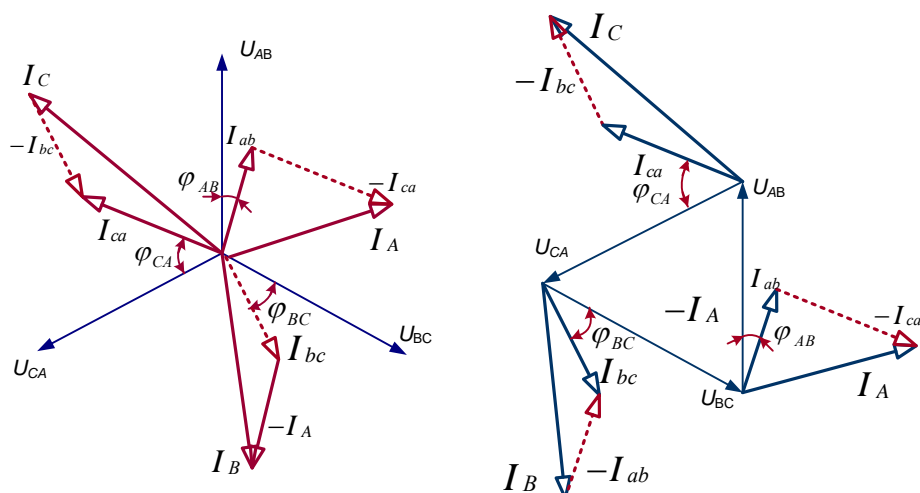


Рис. 1-20. Векторная диаграмма цепи, изображенной на рис. 12-19.

Пример 12-5.

Три приемника, сопротивления которых

$$Z_{AB} = (12 + j16) \text{ Ом},$$

$$Z_{BC} = 12 \text{ Ом},$$

$$Z_{CA} = (8 + j6) \text{ Ом},$$

соединены треугольником и включены в сеть с симметричными линейными напряжениями

$$U_{\text{Л}} = 220 \text{ В}.$$

Определить фазные и линейные токи.

Решение.

Представим линейные напряжения комплексными числами, направив U_{AB} по действительной оси, т. е. примем $U_{AB} = 220 \text{ В}$. Тогда

$$\dot{U}_{BC} = 220e^{-j\frac{2}{3}\pi} = (-110 - j190) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = 220e^{j\frac{2}{3}\pi} = (-110 + j190) \text{ В}.$$

Фазные токи

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} = \frac{220}{12 + j16} = (6,6 - j8,8) \text{ А};$$

$$I_{AB} = \sqrt{6,6^2 + 8,8^2} = 11 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}} = \frac{-110 - j190}{12} = (-9,17 - j15,8) \text{ A};$$

$$I_{BC} = \sqrt{9,17^2 + 15,8^2} = 18,3 \text{ A};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{-110 + j190}{8 + j6} = (2,6 + j21,8) \text{ A};$$

$$I_{BC} = \sqrt{2,6^2 + 21,8^2} = 22 \text{ A}.$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 6,6 - j8,8 - 2,6 - j21,8 = (4 - j30,6) \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -9,17 - j15,8 - 6,6 + j8,8 = (-15,8 - j7) \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 2,6 + j21,8 + 9,17 + j15,8 = (11,8 + j37,6) \text{ A};$$

$$I_A = \sqrt{4,2^2 + 20,6^2} = 30,8 \text{ A};$$

$$I_B = \sqrt{15,8^2 + 7^2} = 17,3 \text{ A};$$

$$I_C = \sqrt{11,8^2 + 37,6^2} = 39,4 \text{ A}.$$

1-9 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЭНЕРГИИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ

Если система линейных напряжений \dot{U}_{AB} , $\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j\frac{2}{3}\pi}$, $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{AB} \cdot e^{+j\frac{2}{3}\pi}$ симметрична и нагрузка фаз равномерна $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z$, то фазные токи

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}} = \dot{U}_{AB} \cdot Y;$$

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}} = \dot{U}_{BC} \cdot Y = \dot{U}_{AB} \cdot Y^{-j\frac{2}{3}\pi};$$

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}} = \dot{U}_{CA} \cdot Y = \dot{U}_{AB} \cdot Y^{j\frac{2}{3}\pi},$$

т. е. фазные токи образуют симметричную систему. Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют 120° .

Линейные токи, равные разностям соответствующих фазных токов, при равномерной нагрузке образуют также симметричную систему токов (рис. 1-21).

ЭТО ВАЖНО. При симметричной нагрузке векторы линейных напряжений и токов образуют равносторонний треугольник. Соотношение между величинами линейного и фазных токов может быть найдено из векторной диаграммы (рис. 1-21). Из диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного тока в $\sqrt{3}$ раз. Линейный ток I_A отстает по фазе от фазного тока I_{AB} на угол 30° ; на тот же угол отстают I_B от I_{BC} и I_C от I_{CA} .

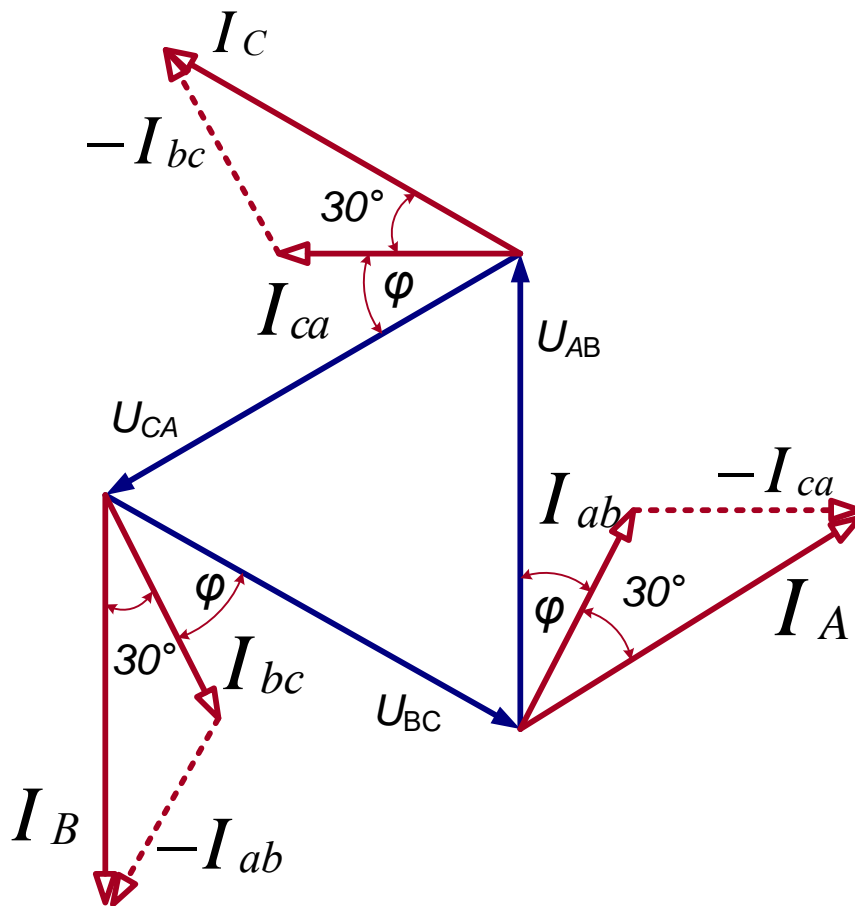


Рис. 1-21. Векторная диаграмма при равномерной нагрузке фаз приемника, соединенного треугольником.

При равномерной нагрузке фаз расчет трехфазной цепи, соединенной треугольником, можно свести к расчету одной фазы.

Фазное напряжение

$$U_\phi = U_L;$$

(1-31)

фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}; \quad (1-32)$$

линейный ток

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}; \quad (1-33)$$

общая активная мощность всех трех фаз

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}; \quad (1-34)$$

так как

$$U_{\phi} I_{\phi} = \frac{U_{\text{л}} I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}.$$

Реактивная мощность фазы

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}.$$

Реактивная мощность цепи

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}.$$

Полная мощность

$$S = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

Пример 1-6.

Обмотки трехфазного двигателя соединены треугольником. Активная мощность двигателя составляет 3 кВт при напряжении 120 В и $\cos \varphi = 0,8$. Определить линейный и фазный токи.

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 0,8} = 18 \text{ А},$$

$$I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{18}{\sqrt{3}} = 10,4 \text{ А}.$$

1-10 ВКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Электрические лампы изготавливаются на номинальные напряжения 127 и 220 В. Способ их включения в цепь трехфазного тока зависит от величины линейного напряжения трехфазной сети. Лампы с номинальным напряжением 127 В включаются звездой с нейтральным проводом при линейном напряжении

сети 220 В или треугольником при линейном напряжении сети 127 В. Лампы с номинальным напряжением 220 В соответственно включаются звездой в сеть с линейным напряжением 380 В и треугольником в сеть с напряжением 220 В.

Обмотки трехфазных электродвигателей изготавливаются на номинальные фазные напряжения 127, 220 и 380 В. Каждый трехфазный электродвигатель может быть включен или звездой в трехфазную сеть с линейным напряжением, превышающим его фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз, или треугольником, если линейное напряжение сети равно номинальному фазному напряжению его обмотки. Обычно на паспорте трехфазного электродвигателя даются соответствующие указания, например:

<i>треугольник</i>	$\frac{220}{380} \text{ В}$
<i>звезда</i>	$\frac{220}{380} \text{ В}$

1-11 СВОЙСТВА СУММ ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ И ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Независимо от способа соединения приемников энергии алгебраическая сумма мгновенных значений линейных токов в трехпроводной трехфазной цепи равна нулю. В самом деле, выбрав положительные направления линейных токов от генератора к приемнику при соединении приемников энергии звездой, для нулевой точки можно написать по первому правилу Кирхгофа:

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

При соединении приемников энергии треугольником

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Из полученных соотношений следует, что если токи изображены векторами, то сумма векторов линейных токов равна нулю, а если линейные токи представлены комплексами, то сумма комплексов линейных токов равна нулю;

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (1-35)$$

Поэтому у системы близко друг к другу расположенных проводов, например в кабеле, получается очень слабое магнитное поле. Это позволяет применить стальную броню, защищающую провода от механических повреждений. Если бы сумма токов оказалась не равной нулю, то магнитное поле было бы значительным, в этом случае стальная броня перемагничивалась бы и заметно нагревалась. Иногда на практике три жилы трехфазного кабеля соединяют параллельно, используя его как однофазный кабель; в этом случае стальная броня с кабеля снимается.

Алгебраическая сумма линейных напряжений, как уже указывалось, также равна нулю. Действительно независимо от способа соединения цепи

мгновенное значение линейного напряжения равно разности потенциалов между проводами линии, т. е.

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B;$$

$$u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C;$$

$$u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A,$$

а сумма линейных напряжений

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = \varphi_A - \varphi_B + \varphi_B - \varphi_C + \varphi_C - \varphi_A = 0$$

или

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (1-36)$$

Полученные результаты подтверждаются графическими построениями; сумма векторов линейных напряжений равна нулю, т. е. векторы линейных напряжений при всех условиях образуют замкнутый треугольник (рис. 1-5, 1-14 и др.).

Имея в виду это свойство линейных напряжений, можно при помощи вольтметра определить углы сдвига фаз между напряжениями трехфазной системы.

Измерим вольтметром V (рис. 1-22) действующие значения линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} . Если $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$, то система напряжений симметрична. В этом случае векторы линейных напряжений образуют равносторонний треугольник с одинаковым сдвигом фаз 120° между смежными линейными напряжениями. Если напряжения U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} не равны друг другу, то, построив в масштабе замкнутый треугольник линейных напряжений, мы сможем определить углы сдвига фаз между ними.

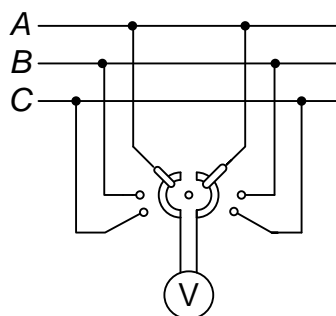


Рис. 1-22. Вольтметр с переключателем для измерения трех линейных напряжений.

1-12 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКА СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЗВЕЗДУ

Рассмотрим расчет трехфазной цепи при соединении приемников энергии треугольником с учетом сопротивления подводящих проводов (рис. 1-23).

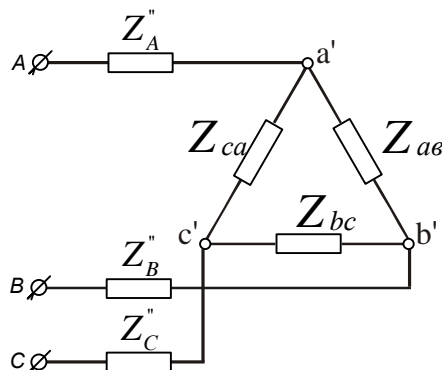


Рис. 1-23. Трехпроводная линия с приемниками, соединенными треугольником.

Этот расчет можно упростить, если треугольник сопротивлений заменить равнозначной звездой. Как известно, сопротивления лучей звезды связаны с сопротивлениями сторон треугольника следующими формулами:

$$\begin{aligned} Z'_A &= \frac{Z_{AB} Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}; \\ Z'_B &= \frac{Z_{BC} Z_{AB}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}; \\ Z'_C &= \frac{Z_{CA} Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}}. \end{aligned} \quad (1-37)$$

Если нагрузка фаз равномерна, т. е. $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = Z_{\Delta}$, то сопротивление луча звезды

$$Z_Y = \frac{Z_{\Delta}}{3}; \quad (1-38)$$

таким образом, сопротивление луча эквивалентной звезды должно быть в 3 раза меньше сопротивления стороны треугольника.

В результате преобразования получается цепь, изображенная на рис. 1-24, которая в общем случае рассчитывается как несимметричная звезда.

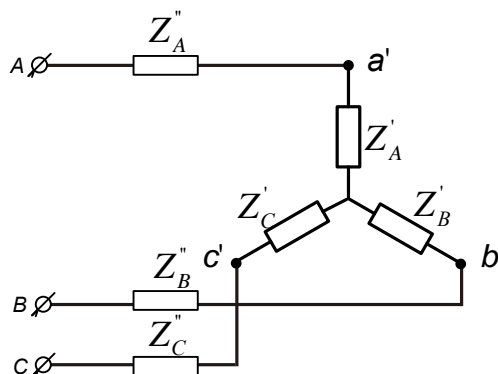


Рис. 1-24. Трехфазная линия с приемниками, соединенными звездой. Рассмотрим подробно ход расчета такой цепи на примере.

Пример 12-7.

Группа ламп соединена треугольником. Сопротивления фаз соответственно равны:

$$Z_{AB} = 10 \text{ ом};$$

$$Z_{BC} = 20 \text{ ом и}$$

$$Z_{CA} = 20 \text{ ом.}$$

Сопротивление каждого подводящего провода составляет 1 ом (индуктивностью пренебрегаем). Линейные напряжения на зажимах генератора симметричны и равны 208 В.

Определить фазные и линейные токи.

Решение:

Заменим треугольник равнозначной звездой.

Сопротивления лучей звезды

$$Z'_{A} = Z'_{B} = \frac{Z_{AB}Z_{CA}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}} = \frac{10 \cdot 20}{50} = 4 \text{ Ом};$$

$$Z'_{B} = \frac{Z_{CA}Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CA}} = \frac{20 \cdot 20}{50} = 8 \text{ Ом.}$$

Сопротивления соединительных проводов включены последовательно с сопротивлениями соответствующих лучей звезды, поэтому полные сопротивления и проводимости каждой фазы:

$$Z_A = Z'_A + Z''_A = 4 + 1 = 5 \text{ Ом}; \quad Y_A = \frac{1}{Z_A} = 0,2 \text{ Сим};$$

$$Z_B = Z'_B + Z''_B = 4 + 1 = 5 \text{ Ом}; \quad Y_B = \frac{1}{Z_B} = 0,2 \text{ Сим};$$

$$Z_C = Z'_C + Z''_C = 8 + 1 = 9 \text{ Ом}; \quad Y_C = \frac{1}{Z_C} = 0,111 \text{ Сим}.$$

Фазные напряжения генератора

$$U_\phi = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120 \text{ В}.$$

Приняв $\dot{U}_A = 120 \text{ В}$,

имеем

$$\dot{U}_B = (-60 - j104) \text{ В}; \quad \dot{U}_C = (-60 + j104) \text{ В};$$

смещение нейтрали

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \frac{\dot{U}_A \dot{Y}_A + \dot{U}_B \dot{Y}_B + \dot{U}_C \dot{Y}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ &= \frac{120 \cdot 0,2 + (-60 - j104) \cdot 0,2 + (-60 + j104) \cdot 0,111}{0,2 + 0,2 + 0,111} = \\ &= (10,4 - j18) = 20,8 \cdot e^{-j60^\circ} \end{aligned}$$

Линейные токи:

$$\dot{I}_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \dot{Y}_A = (120 - 10,4 + j18) 0,2 = (21,9 + j3,6) = 22,2 e^{j9,3} \text{ А};$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \dot{Y}_B = (-60 - j104 - 10,4 + j18) 0,2 = (-14,1 - j17,2) = \\ &= 22,24 e^{j50,65} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \dot{Y}_C = (-60 + j104 - 10,4 + j18) 0,111 = \\ &= (-7,8 + j13,6) = 15,7 e^{-j120} \text{ А}. \end{aligned}$$

Чтобы найти фазные токи в сопротивлениях Z_{AB} , Z_{BC} и Z_{CA} , нужно предварительно определить линейные напряжения U'_{AB} , U'_{BC} и U'_{CA} между точками $A'B'$, $B'C$ и $C'A'$, для чего вначале вычислить фазные напряжения в лучах звезды:

$$\dot{U}'_A = \dot{I}_A Z'_A = (21,9 + j3,6) \cdot 4 = (87,5 + j14,4) \text{ В};$$

$$\dot{U}'_B = \dot{I}_B Z'_B = (-14,1 - j17,2) \cdot 4 = (-56,4 - j68,8) \text{ В};$$

$$\dot{U}'_C = \dot{I}_C Z'_C = (-7,8 + j13,6) \cdot 8 = (-62,4 + j107,8) \text{ В.}$$

Линейные напряжения:

$$\dot{U}'_{AB} = \dot{U}'_A - \dot{U}'_B = 87,5 + j14,4 + 56,4 + j68,8 = (143,9 + j83,2) \text{ В;}$$

$$\dot{U}'_{BC} = \dot{U}'_B - \dot{U}'_C = -56,4 - j68,8 + 62,4 - j107,8 = (6,0 - j176,6) \text{ В;}$$

$$\dot{U}'_{CA} = \dot{U}'_C - \dot{U}'_A = -62,4 + j107,8 - 87,5 - j14,4 = (-149,9 + j93,4) \text{ В.}$$

Фазные токи в сопротивлениях, соединенных треугольником:

$$\dot{I}'_{AB} = \frac{\dot{U}'_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{143,9 + j83,2}{10} = \frac{166,2e^{j30}}{10} =$$

$$= 16,62e^{j30} = 16,62 \cos 30 + j16,62 \sin 30 = (14,4 + j8,31) \text{ А;}$$

$$\dot{I}'_{BC} = \frac{\dot{U}'_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{6,0 - j176,6}{20} = (0,3 - j8,83) \text{ А;}$$

$$\dot{I}'_{CA} = \frac{\dot{U}'_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{-149,9 + j93,4}{20} = (-7,5 + j4,67) \text{ А.}$$

1-13 МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. УРАВНОВЕШЕННАЯ ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

Мгновенная мощность трехфазной системы равна сумме мгновенных мощностей отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (1-39)$$

Средняя или активная мощность

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T p_A dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_B dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_C dt = \\ &= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = \\ &= I_A^2 R_A + I_B^2 R_B + I_C^2 R_C. \end{aligned} \quad (1-40)$$

т. е. *активная мощность трехфазной системы равна сумме активных мощностей отдельных фаз.*

При равномерной нагрузке фаз

$$\begin{aligned}U_A &= U_B = U_C, \\I_A &= I_B = I_C, \\ \varphi_A &= \varphi_B = \varphi_C,\end{aligned}$$

поэтому

$$P = 3U_\varphi I_\varphi \cos \varphi_\varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi. \quad (1-41)$$

В этом выражении

I – линейный ток,

U – линейное напряжение,

Φ – угол сдвига фаз между фазным напряжением и фазным током.

$$Q = 3U_A I_A \sin \varphi_A. \quad (1-42)$$

Реактивной мощностью трехфазной цепи называется алгебраическая сумма реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C. \quad (1-43)$$

При равномерной нагрузке реактивные мощности отдельных фаз равны, поэтому

$$Q = 3U_\varphi I_\varphi \sin \varphi_\varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi. \quad (1-44)$$

Полная мощность трехфазной системы при равномерной нагрузке фаз

$$S = \sqrt{3}UI. \quad (1-45)$$

Установленные таким образом понятия реактивной и полной мощности позволяют применить для трехфазной цепи ряд расчетных формул, полученных для однофазной цепи, как, например,

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}.$$

При равномерной нагрузке фаз мгновенные мощности в отдельных фазах

$$\begin{aligned}p_A &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi); \\p_B &= U_m \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \cdot I_m \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi);\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_C &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \cdot I_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \varphi\right) = \\
 &= \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{U_m I_m}{2} \cos\left(2\omega t + \frac{4}{3}\pi - \varphi\right);
 \end{aligned}$$

Сумма мгновенных значений

$$p_A + p_B + p_C = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi, \quad (1-46)$$

так как

$$\frac{U_m I_m}{2} = U_\phi I_\phi, \quad (1-47)$$

а

$$\begin{aligned}
 &\frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi) + \frac{U_m I_m}{2} \cos\left(2\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi\right) + \\
 &+ \frac{U_m I_m}{2} \cos\left(2\omega t + \frac{4}{3}\pi - \varphi\right) = 0;
 \end{aligned}$$

где U_ϕ - фазное напряжение, одинаковое для всех фаз;
 I_ϕ - фазный ток, одинаковый для всех фаз.

Таким образом, при равномерной нагрузке фаз сумма мгновенных мощностей не зависит от времени и равна активной мощности:

$$P = P = 3 P_\phi$$

Обладающая этим свойством трехфазная система называется *уравновешенной*. Отсюда следует важный для практики вывод: **трехфазный электродвигатель развивает на валу постоянную мощность в противоположность однофазному, который развивает переменную в течение периода мощность.**

Пример 1-8.

Три катушки с сопротивлениями $z = 10$ Ом соединены звездой и подключены к сети с $U_L = 120$ В. Определить активную мощность фазы и всей цепи, если активное сопротивление каждой катушки $r = 6$ Ом.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{6}{10} = 0,6.$$

Фазное напряжение и фазный (он же линейный) ток

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{120}{\sqrt{3}} = 69 \text{ В}; \quad I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z} = \frac{69}{10} = 6,9 \text{ А.}$$

Активная мощность фазы

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = 69 \cdot 6,9 \cdot 0,6 = 286 \text{ Вт.}$$

Активная мощность цепи

$$P = 3 P_{\phi} = 3 \cdot 286 = 858 \text{ Вт.}$$

Пример 1-9.

Активная мощность трехфазной цепи составляет 20 кВт, а реактивная 15 кВАр. Чему равен $\cos \varphi$ цепи?

Решение:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{20^2 + 15^2} = 25 \text{ кВА};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{20}{25} = 0,8.$$

1 -14. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Измерение активной мощности в трехфазных цепях

Измерение активной мощности в трехфазных цепях производят с помощью трех, двух или одного ваттметров, используя различные схемы их включения.

Схема включения ваттметров для измерения активной мощности определяется:

- схемой сети (трех- или четырехпроводная);
- схемой соединения фаз приемника (звезда или треугольник);
- характером нагрузки (симметричная или несимметричная);
- доступностью нейтральной точки.

При несимметричной нагрузке в четырехпроводной цепи активную мощность измеряют тремя ваттметрами (рис. 1-25), каждый из которых измеряет мощность одной фазы – фазную мощность.

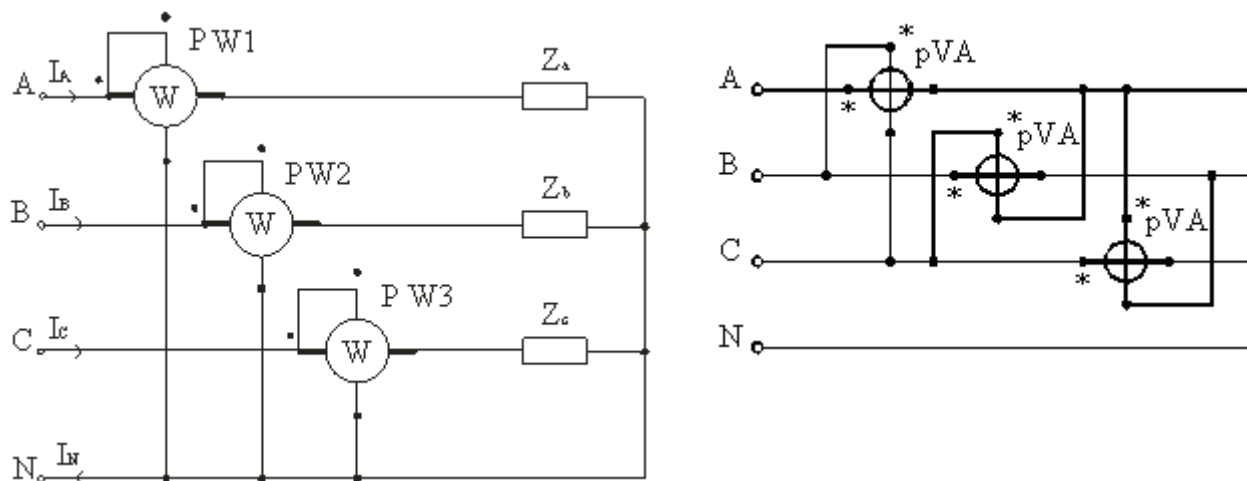


Рис. 1-25. Схема измерения мощности в четырехпроводной цепи трехфазного тока

Активная мощность приемника определяют по сумме показаний трех ваттметров

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (1.48)$$

где $P_1 = U_A I_A \cos \varphi_A$; $P_2 = U_B I_B \cos \varphi_B$; $P_3 = U_C I_C \cos \varphi_C$.

ЭТО ВАЖНО. Измерение мощности тремя ваттметрами возможно при любых условиях.

При симметричном приемнике и доступной нейтральной точке активную мощность приемника определяют с помощью одного ваттметра, измеряя активную мощность одной фазы P_Φ по схеме рис. 1-26. Активная мощность всего трехфазного приемника равна при этом утроенному показанию ваттметра: $P = 3 P_\Phi$.

На рис. 1-26 а приведена схема включения ваттметра при соединении фаз приемника звездой, когда нулевая точка приемника доступна. Для измерения мощности при соединении приемников энергии треугольником ваттметр включается, как показано на рис. 1-26 б.

В обоих случаях по последовательной обмотке ваттметра проходит фазный ток, а параллельная обмотка включена под фазное напряжение.

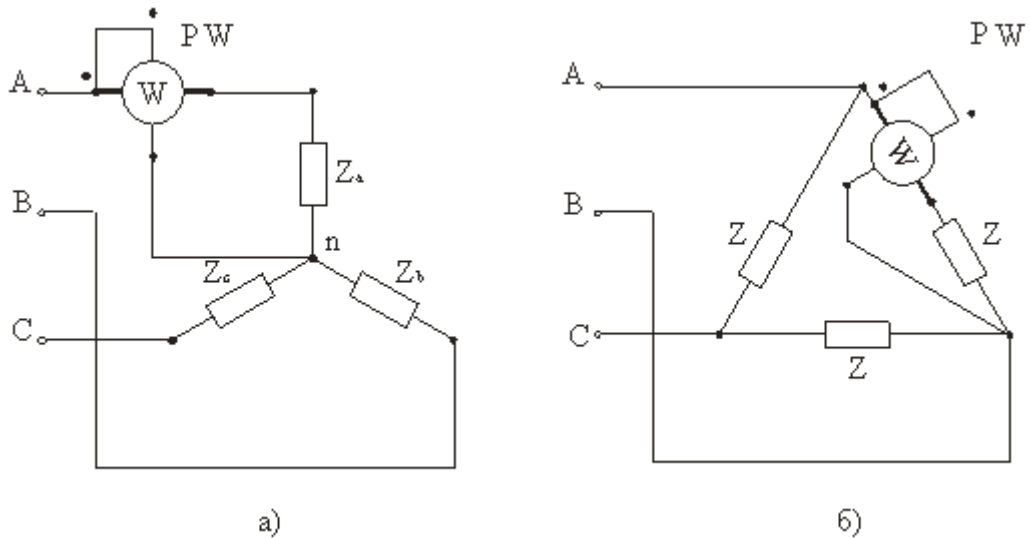


Рис. 1-26. Схема включения ваттметра для измерения мощности в цепи трехфазного тока при равномерной нагрузке.

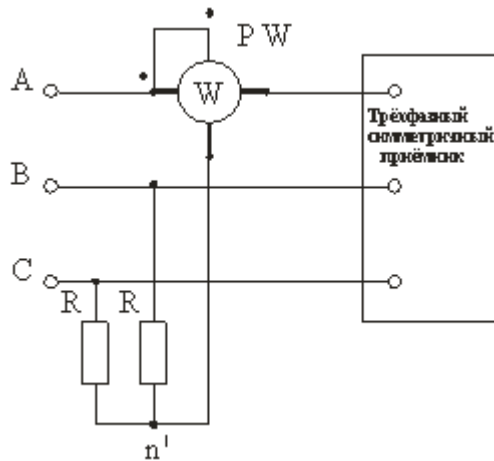


Рис. 1-27.

На рис. рис. 1-27 показано включение прибора непосредственно в одну из фаз приемника. В случае, если нейтральная точка приемника недоступна или зажимы фаз приемника, включенного треугольником не выведены, применяют схему рис. 1-27 с использованием искусственной нейтральной точки n' . В этой схеме дополнительно в две фазы включают резисторы с сопротивлением $R = R_v$.

ЭТО ВАЖНО. Измерение активной мощности симметричного приемника в трехфазной цепи одним ваттметром применяют только при полной гарантии симметричности трехфазной системы.

Измерение активной мощности двумя ваттметрами.

В трехпроводных трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках и любом способе соединения приемников широко распространена схема измерения активной мощности приемника двумя ваттметрами (рис. 1-28). Показания двух ваттметров при определенной схеме их включения позволяют определить активную мощность трехфазного приемника, включенного в цепь с симметричным напряжением источника питания.

На рис. 1-28 показана одна из возможных схем включения ваттметров: здесь токовые катушки включены в линейные провода с токами I_A и I_B , а катушки напряжения – соответственно на линейные напряжения U_{AC} и U_{BC} .

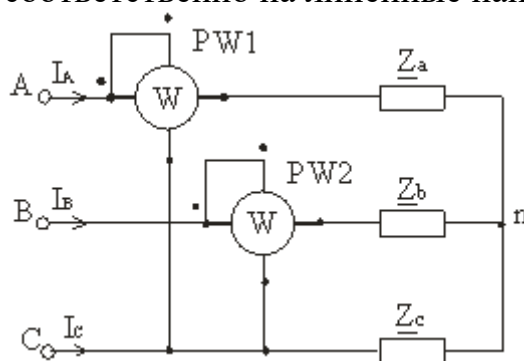


Рис. 1-28. Схема включения ваттметров для измерения мощности трехфазного тока методом двух ваттметров

Докажем, что сумма показаний ваттметров, включенных по схеме рис. 1-28, равна активной мощности P трехфазного приемника.

Мгновенное значение общей мощности трехфазного приемника, соединенного звездой

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C. \quad (1.49)$$

преобразуется при помощи уравнения

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad \text{или} \quad -(i_A + i_B) = i_C, \quad (1.50)$$

Подставляя значение i_C в выражение для p , получаем выражение мгновенной мощности трехфазного приемника, соединенного звездой, учитываемого обоими ваттметрами:

$$\begin{aligned} p &= u_A i_A + u_B i_B - u_C (i_A + i_B) = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = \\ &= u_{AC} i_A + u_{BC} i_B. \end{aligned} \quad (1.51)$$

Выразив мгновенные значения u и i через их амплитуды, можно найти среднюю (активную) мощность

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt, \quad (1.52)$$

которая составит

$$P = U_{AC} I_A \cos(\angle U_{AC} I_A) + U_{BC} I_B \cos(\angle U_{BC} I_B) = P_1 + P_2. \quad (1.53)$$

Так как U_{AC} , U_{BC} , I_A и I_B – соответственно линейные напряжения и токи, то полученное выражение справедливо и при соединении потребителей треугольником.

Следовательно, сумма показаний двух ваттметров действительно равна активной мощности P трехфазного приемника.

При симметричной нагрузке

$$I_A = I_B = I_L, \quad U_{AC} = U_{BC} = U_L.$$

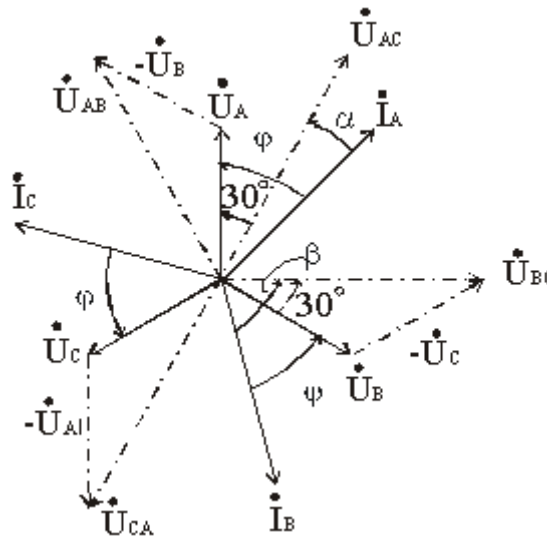


Рис. 1.29

Из векторной диаграммы (рис. 1.29) получаем, что угол α между векторами U_{AC} и I_A равен $\alpha = \varphi - 30^\circ$, а угол β между векторами U_{BC} и I_B составляет $\beta = \varphi + 30^\circ$.

В рассматриваемом случае показания ваттметров можно выразить формулами

$$P_1 = U_L I_L \cos(\varphi - 30^\circ), \quad (1.54)$$

$$P_2 = U_L I_L \cos(\varphi + 30^\circ). \quad (1.55)$$

Сумма показаний ваттметров

$$P_1 + P_2 = U_L I_L [\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ)] = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi. \quad (1.56)$$

Ввиду того, что косинусы углов в полученной формуле могут быть как положительными, так и отрицательными, в общем случае активная мощность приемника, измеренная по методу двух ваттметров, равна алгебраической сумме показаний.

При симметричном приемнике показания ваттметров P_1 и P_2 будут равны только при $\varphi = 0^\circ$. Если $\varphi > 60^\circ$, то показания второго ваттметра P_2 будет отрицательным.

Для измерения активной мощности в трехфазных цепях промышленных установок широкое применение находят двухэлементные трехфазные электродинамические и ферродинамические ваттметры, которые содержат в одном корпусе два измерительных механизма и общую подвижную часть. Катушки обоих механизмов соединены между собой по схемам, соответствующим рассмотренному методу двух ваттметров. Показание двухэлементного ваттметра равно активной мощности трехфазного приемника.

1-15. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Ценным свойством всех многофазных систем переменного тока является простота получения вращающегося магнитного поля.

Это постоянное по величине магнитное поле, вращающееся внутри электрической машины вокруг ее оси.

На использовании вращающегося магнитного поля основано устройство самых распространенных электродвигателей — асинхронных трехфазных двигателей, а так- же имеющих большое практическое значение синхронных двигателей. Кроме того, посредством вращающегося магнитного поля приводятся в действие многие измерительные приборы и аппараты регулирования и управления.

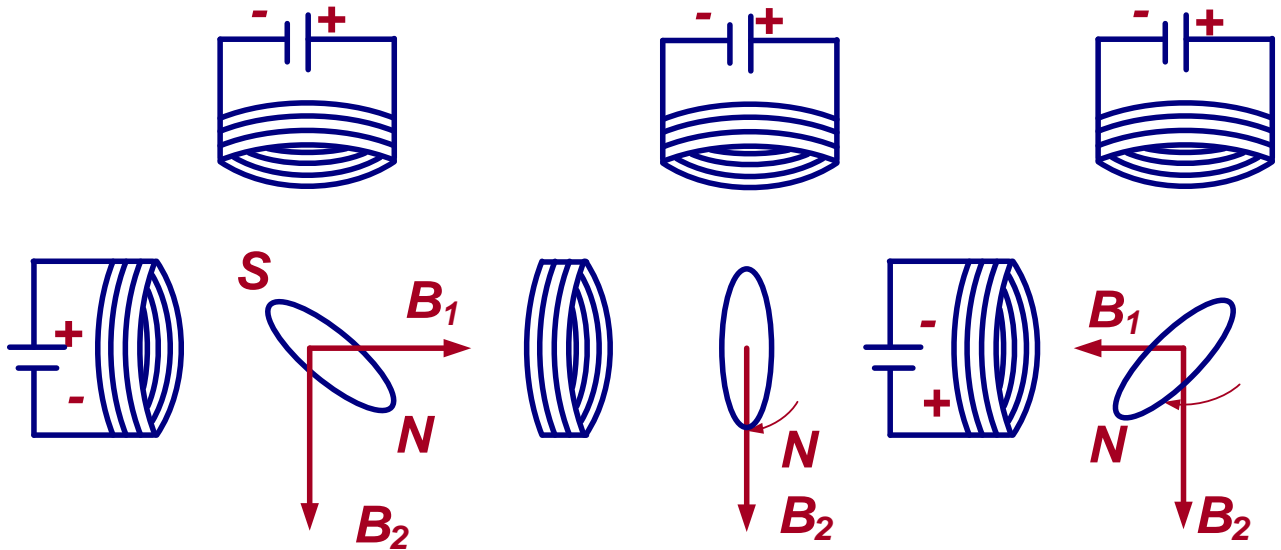


Рис. 1.30. Воздействие на положение магнитной стрелки изменением направления постоянных токов в двух катушках.

Путем последовательного изменения направления постоянного тока в двух катушках, оси которых образуют угол 90° , можно заставить магнитную стрелку поворачиваться в пределах 360° (рис. 1.30). Но переключаемый постоянный ток легко заменить переменным током, который сам будет изменять направление. При этом необходимо, чтобы изменения направления тока в двух катушках происходили не одновременно. Этому требованию удовлетворяют два переменных тока, сдвинутых по фазе по отношению друг к другу на четверть периода.

ЭТО ВАЖНО. Чтобы получить вращающееся магнитное поле, необходимо выполнить два условия:

1. Иметь хотя бы две пространственно смещенные катушки.
2. Подключить к катушкам несовпадающие по фазе токи.

На рис. 1.31 показана система из двух одинаковых катушек, оси которых образуют угол 90° . Для придания большей равномерности магнитному полю каждая из катушек разделена на две части. Так как токи сдвинуты по фазе на четверть периода, то магнитные индукции в полях, ими возбуждаемых, должны быть также сдвинуты по фазе по отношению друг к другу. Этому условию сдвига по фазе удовлетворяют синусоида и косинусоида, в соответствии, с чем индукция поля первой катушки

$$B_A = B_m \sin \omega t,$$

а индукция поля второй катушки

$$B_B = B_m \cos \omega t.$$

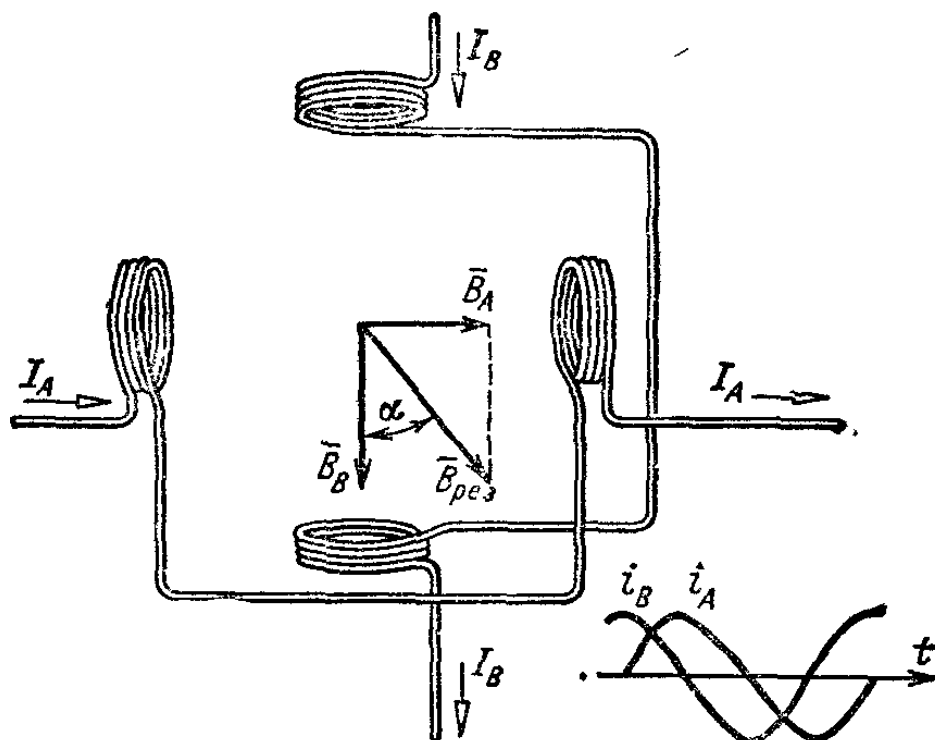


Рис. 1.31. Схема получения двухфазного вращающегося магнитного поля.

Накладываясь в середине устройства, два переменных магнитных поля образуют результирующее магнитное поле, индукция в котором будет

$$B_{рез} = \sqrt{B_A^2 + B_B^2},$$

так как направления полей катушек взаимно перпендикулярны (рис. 1.31). Подставив в выражение $B_{рез}$ значения B_A и B_B как функции времени, получим;

$$B_{рез} = B_m \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Следовательно, результирующее магнитное поле устройства постоянно по величине, хотя оно и складывается из двух переменных магнитных полей.

Определим теперь положение результирующего поля в пространстве. По отношению к вертикальной оси это поле образует угол α , определяемый условием

$$\operatorname{tg} \alpha = B_A/B_B = \sin \omega t / \cos \omega t = \operatorname{tg} \omega t,$$

поэтому $\alpha = \omega t$, т. е. угол, образуемый осью результирующего поля, по отношению к оси катушки B равномерно изменяется и за время одного периода переменного тока

$$\alpha = \omega t = 2\pi T/T = 2\pi,$$

т. е. поле делает полный оборот.

В секунду поле делает f оборотов, а число оборотов поля в минуту

$$n = f \cdot 60,$$

Таким образом, при стандартной промышленной частоте

$$n = 50 \cdot 60 = 3\,000 \text{ об/мин},$$

Описанная система именуется *двухфазным* вращающимся магнитным полем. Для возбуждения его нужна двухфазная система переменных токов. Такая система требует для передачи энергии не менее трех проводов. Так как равные по величине векторы двух фазных токов системы I_A и I_B образуют угол 90° , то, следовательно, вектор тока в общем проводе I_0 определяется как гипотенуза равнобедренного прямоугольного треугольника с катетами $I_A = I_B = I_\phi$. На основании чего этот ток

$$I_0 = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} = \sqrt{2}I_\phi$$

Значительно выгоднее получение вращающегося магнитного поля **посредством трехфазной системы токов**, как это было предложено М. О. Доливо-Добровольским. Для получения трехфазного вращающегося поля нужны три одинаковые катушки (рис. 1.31), оси которых образуют углы по 120° . Мгновенные значения индукции в поле катушек, питаемых трехфазной системой токов,

$$\begin{aligned} B_A &= B_m \sin \omega t; \\ B_B &= B_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ B_C &= B_m \sin (\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$

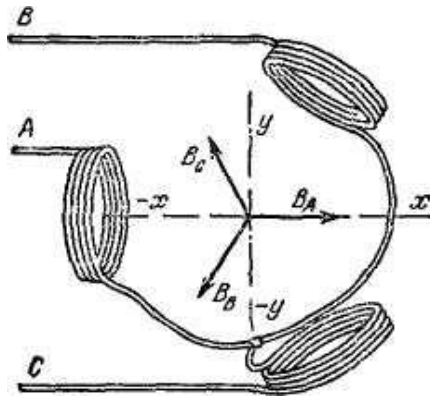


Рис. 1-31. Схема получения трехфазного вращающегося магнитного поля.

В общей части поля эти магнитные индукции складываются векторно, образуя магнитную индукцию результирующего поля.

Это поле удобно определить через составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям. С этой целью построим в пространстве оси x и y ,

проходящие через общее поле катушек, причем оси x дадим направление оси катушки A .

Определим теперь составляющую результирующего поля по оси x . Она будет равна алгебраической сумме проекций на эту ось мгновенных значений трех индукций:

$$\begin{aligned} B_x &= B_A \cos 0^\circ + B_B \cos(-120^\circ) + B_C \cos(-240^\circ) = \\ &= B_A + B_B(-1/2) + B_C(-1/2). \end{aligned}$$

Подставив выражения магнитной индукции как синусоидальных величин, получим проекции векторов на оси x и y для мгновенных значений:

$$\begin{aligned} B_x &= B_m \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= B_m \left[\sin \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t + \frac{1}{4} \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \omega t \right] = \\ &= 1,5 B_m \sin \omega t \end{aligned}$$

$$B_x = 1,5 B_m \sin \omega t$$

Составляющая результирующего магнитного поля по оси Y будет:

$$\begin{aligned} B_y &= B_A \sin 0^\circ + B_B \sin(-120^\circ) + B_C \sin(-240^\circ) = \\ &= B_B \left(-\sqrt{3}/2 \right) + B_C \sqrt{3}/2 \end{aligned}$$

или после подстановки значений индукций как синусоидальных величин

$$\begin{aligned} B_y &= B_m \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] = \\ &= 1,5 B_m \cos \omega t \end{aligned}$$

Результирующая магнитная индукция

$$B_{\text{рез}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = 1,5 B_m \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = 1,5 B_m$$

т. е. результирующее поле постоянно по величине, а угол α , образуемый им с осью Y , определяется из условия

$$\operatorname{tg} \alpha = B_x / B_y = \sin \omega t / \cos \omega t = \operatorname{tg} \omega t;$$

следовательно,

$$\alpha = \omega t.$$

Магнитное поле вращается в плоскости осей катушек с угловой скоростью ω . Оно последовательно совпадает по направлению с осью той из катушек, ток в которой достигает максимального значения, т. е. оно вра-

щается в направлении последовательности фаз трехфазной системы токов, питающих катушки.

Сопоставим теперь условия двухфазного и трехфазного вращающихся полей. При двухфазной системе необходимы два провода, рассчитанных на силу тока I , и третий провод, рассчитанный на силу тока $I_0 = \sqrt{2}I$. Магнитная индукция во вращающемся двухфазном поле равна B_m . При трехфазной системе необходимы три провода, рассчитанных каждый на силу тока I , а индукция во вращающемся поле здесь $1,5B_m$.

Следовательно, для двухфазной системы нужно большее сечение проводов, а вращающееся поле создается в 1,5 раза слабее, чем в трехфазной системе. По этим причинам двухфазная система, изобретенная раньше трехфазной (инженером Н. Тесла), в настоящее время применяется только в некоторых специальных устройствах.

Подвижное устройство, помещенное во вращающееся магнитное поле, может вращаться в нем асинхронно или синхронно.

Поместим во вращающееся магнитное поле металлическую рамку на осях (рис. 1-32) так, чтобы ось вращения рамки совместились с осью вращения поля. Поле будет пересекать рамку, и индуцировать в ней э. д. с. тем большую, чем быстрее поле пересекает рамку, так как согласно закону электромагнитной индукции:

$$e = -\omega t \Phi / dt$$

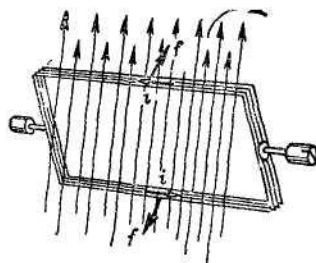
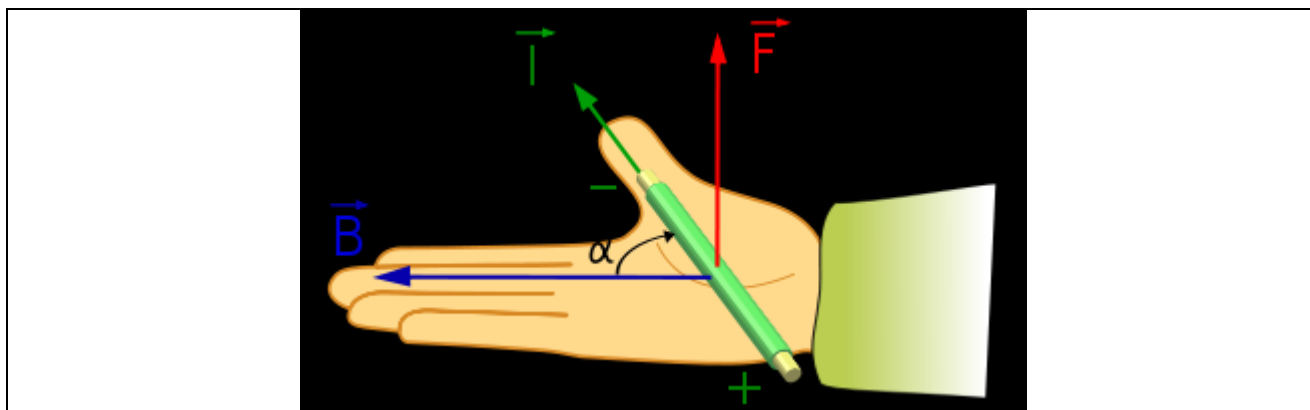


Рис. 1-32. Металлическая рамка во вращающемся магнитном поле

Направление э. д. с, индуцируемых в двух сторонах рамки, можно определить по правилу правой руки. Только необходимо учесть, что движение магнитного поля по отношению к проводнику эквивалентно движению проводника в противоположную сторону. Следовательно, определяя направление э. д. с, нужно поставить ладонь навстречу магнитным линиям, а отставленный большой палец направить против движения магнитного поля, тогда вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной э. д. с.. Электродвижущие силы, индуцируемые в двух сторонах рамки, направлены в витке, который образует рамка, согласно, т. е. они складываются.



Правило правой руки:

«Если большой палец правой руки расположить по направлению тока, то направление обхвата проводника четырьмя пальцами покажет направление линий магнитной индукции».

Так как рамка представляет собой замкнутый виток, то индуцированные в ней э. д. с. вызывают некоторый индуцированный ток i . Воздействие вращающегося магнитного поля на этот ток создает две силы $f = Bil$, приложенные к двум сторонам рамки. Направление этих сил можно определить по правилу левой руки. Они образуют пару сил и создают вращающий момент, действующий на рамку. Под действием этого момента рамка должна вращаться в направлении вращения поля.

Однако чем быстрее будет вращаться рамка, тем относительно медленнее будут пересекать ее стороны линии магнитного вращающегося поля, т. е. будет уменьшаться скорость v движения поля по отношению к рамке. Вследствие этого будет уменьшаться сила тока i , индуцируемого в рамке. В свою очередь это вызывает ослабление вращающего момента, действующего на рамку. Если рамка догонит вращающееся поле, то э. д. с. и ток в ней исчезнут, так как прекратится пересечение сторон рамки вращающимся магнитным полем, вследствие чего станет равным нулю и вращающий момент, действующий на рамку.

По этим причинам рамка вращается с асинхронной скоростью (от греческого слова «асинхронос» - неодновременный) медленнее поля, т. е. рамка, делает оборот неодновременно с оборотом поля. Скорость вращения рамки n оборотов в минуту устанавливается автоматически такой, чтобы вращающий момент, создаваемый индуцированным током, равнялся тормозящему моменту, обусловленному трением в осях, трением о воздух и т. п. Чем больше механические силы, тормозящие рамку, тем медленнее она будет вращаться и тем больше будет сила тока, индуцируемого в ней.

Эффект вращающегося магнитного поля используется для создания асинхронных и синхронных трехфазных двигателей.

1-16. ПРИНЦИП ДЕЙСВИЯ АСИНХРОННОГО И СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЕЙ

Простейшим по устройству и наиболее распространенным в промышленности типом двигателя переменного тока является трехфазный асинхронный двигатель, изобретенный в 1888 г. М. О. Доливо-Добровольским.

Неподвижная часть машины называется *статор*, подвижная – *ротор*. Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. На рис. 1-33 показан сердечник статора в сборе. Станина (1) выполняется литой, из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из чугуна или алюминия. На внутренней поверхности листов (2), из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается трёхфазная обмотка (3). Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия.

Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых фазами:

- *начала фаз* обозначаются буквами c_1, c_2, c_3 ,
- *концы* – c_4, c_5, c_6 .

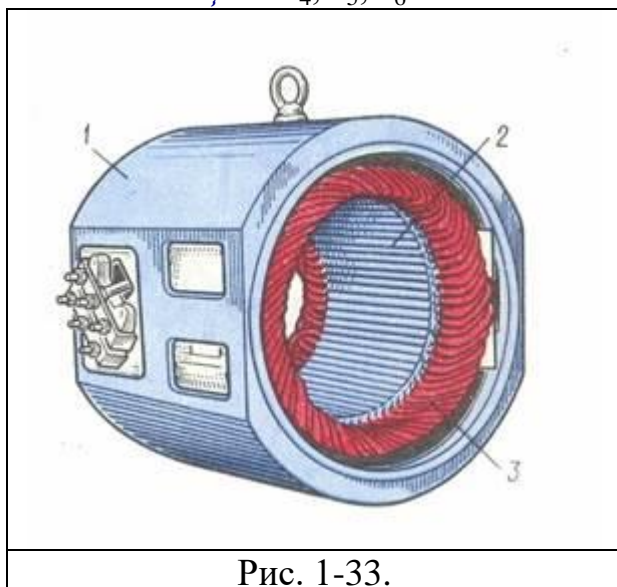


Рис. 1-33.

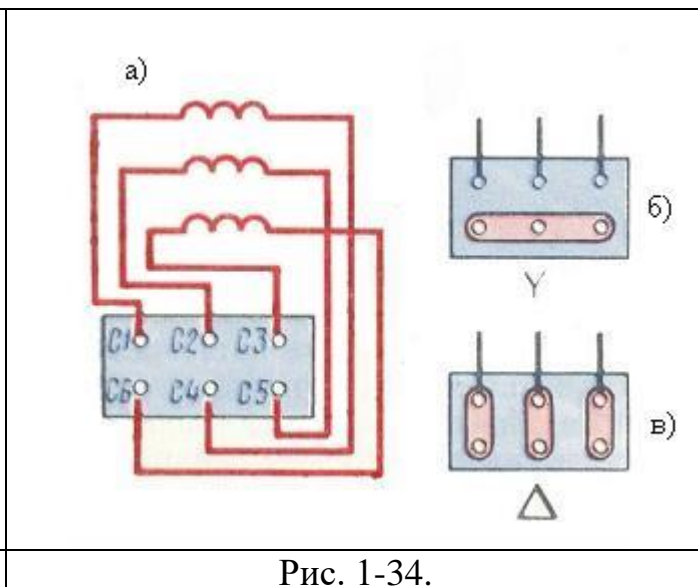


Рис. 1-34.

Начала и концы фаз выведены на клеммник (рис. 1.34 а), закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда (рис. 1.34 б) или треугольник (рис. 1.34 в). Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от *линейного напряжения сети* и *паспортных данных* двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора.

Например, 660/380, Y/Δ. Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{л} = 660\text{В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{л} = 380\text{В}$ – по схеме треугольник.

Основное назначение *обмотки статора* – создание в машине вращающегося магнитного поля.

Сердечник ротора (рис. 1-35) набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с *короткозамкнутым* ротором и *фазным* ротором (с контактными кольцами).

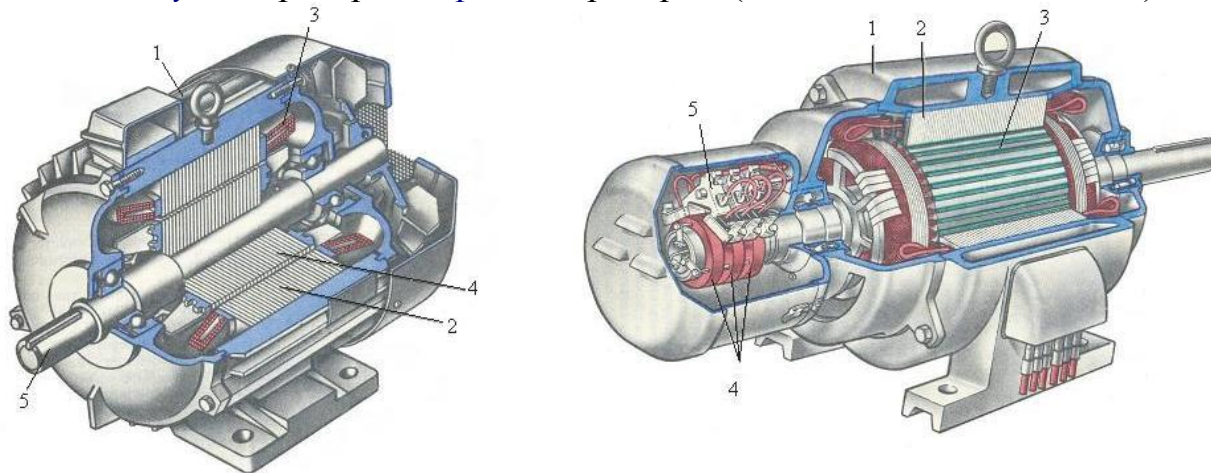


Рис. 1-35.

Вид асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – сердечник статора, 3 – обмотка статора, 4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 5 – вал.

Вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 – станина, 2 – обмотка статора, 3 – ротор, 4 – контактные кольца, 5 – щетки.

Вращающееся магнитное поле, созданное обмотками статора, наводит в замкнутой обмотке ротора токи. Механическое взаимодействие этих токов с вращающимся полем приводит ротор во вращение в том же направлении, в котором вращается поле.

При *асинхронном вращении* поле делает n_1 оборотов в минуту, а подвижная часть, называемая обычно ротором, только n оборотов в минуту. Относительное отставание ротора от поля характеризуется *скольжением*

$$s = (n_1 - n) / n_1.$$

Если во вращающееся магнитное поле поместить очень легкую магнитную стрелку, то она будет вращаться вместе с полем с синхронной скоростью (греческое слово «синхронос» - совпадающий по времени), т. е. поле и стрелка будут совершать один оборот за одно и то же время. Магнитные силы, стремясь установить стрелку, по направлению поля, будут поддерживать это вращение.

Но если подвижный магнит относительно тяжел (рис. 1-36), то под действием вращающегося поля он не стронется с места. Воздействуя на такой неподвижный магнит, вращающееся поле в течение половины оборота будет создавать вращающий момент, а в течение второй половины оборота -

тормозящий момент, так как магнитные силы будут тянуть магнит то в сторону вращения поля, то в противоположную сторону.

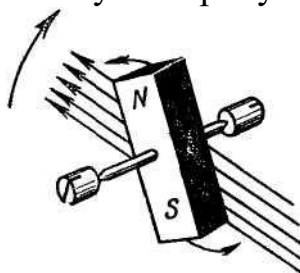


Рис. 1-36. Постоянный магнит во вращающемся магнитном поле.

Если же с помощью какого-либо приспособления разогнать магнит до скорости поля, т. е. до синхронной скорости, то, войдя в синхронизм, магнит будет вращаться со скоростью поля. Он сохранит эту синхронную скорость и когда ему придется преодолевать какую-либо тормозящую силу, но в этом случае магнит будет отставать от вращающегося поля на некоторый постоянный угол. Этот угол будет тем больше, чем больше будет тормозящая сила. Если эта сила станет слишком большой, то магнит остановится - выпадет из синхронизма. Вращаться медленнее поля он не может.

При нормальной нагрузке скольжение асинхронных двигателей в среднем составляет 2-4 %.

Синхронное вращение используется в синхронных двигателях, применяемых главным образом в тех случаях, когда нужен двигатель значительной мощности, вращающийся с постоянной скоростью.

Трехфазный генератор, как и многие другие типы электрических машин, обладает свойством обратимости: он может работать как синхронный двигатель. Поэтому конструктивно синхронный двигатель мало отличается от генератора.

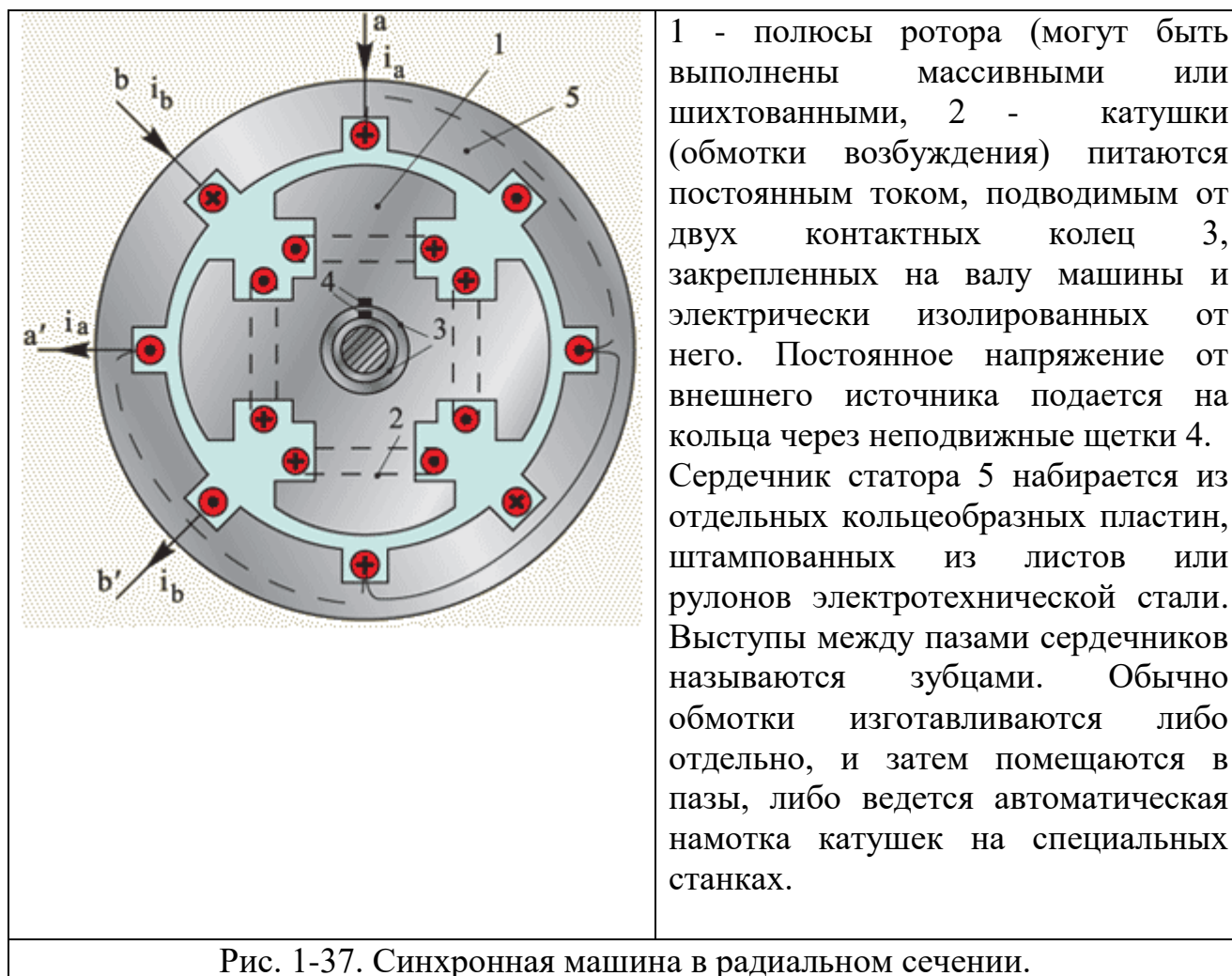


Рис. 1-37. Синхронная машина в радиальном сечении.

Если присоединить обмотку статора к источнику (сети) трехфазного тока, а обмотку ротора (обмотку возбуждения) – к источнику постоянного тока, то вращающееся магнитное поле статора будет периодически создавать на валу моменты разных знаков. Поэтому ротор не сможет прийти во вращение – он будет вибрировать.

Для пуска двигателя необходимо сначала (при разомкнутой обмотке возбуждения) привести ротор во вращение до частоты вращения, близкой к синхронной.

Если после этого включить обмотку возбуждения, то двигатель «втянется в синхронизм». Ротор будет вращаться синхронно с полем статора.

Для пуска синхронного двигателя может быть использована специальная пусковая обмотка ротора, действующая так же, как и в асинхронном двигателе.

Пример 1.

Определить число оборотов магнитного поля машин с числом пар полюсов $p = 1, 2, 3$ и 4 , работающих от сети с частотой тока $f = 50$ Гц.

Решение. Число оборотов магнитного поля

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = \frac{3000}{p}.$$

$$\text{При } p=1 \quad n_1 = \frac{3000}{1} = 3000 \text{ об / мин.}$$

$$\text{При } p=2 \quad n_1 = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ об / мин.}$$

$$\text{При } p=3 \quad n_1 = \frac{3000}{3} = 1000 \text{ об / мин.}$$

$$\text{При } p=4 \quad n_1 = \frac{3000}{4} = 750 \text{ об / мин.}$$

Пример 2.

Магнитное поле машины, включенной в сеть с частотой тока 50 Гц, делает 1500 об/мин. Определить число оборотов магнитного поля этой машины, если она будет включена в сеть с частотой тока 60 Гц.

Решение. Число пар полюсов машины

$$n_1 = \frac{60f}{p},$$

откуда

$$p = \frac{60f}{n_1} = \frac{3000}{1500} = 2.$$

Число оборотов магнитного поля при новой частоте

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ об / мин.}$$

1-17. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФАЗ И СПОСОБЫ ЕЕ НАХОЖДЕНИЯ

Последовательностью фаз называется порядок, в котором проходят через положительные максимумы токи или напряжения трехфазной системы.

Различают **прямую** и **обратную** последовательность фаз.

Прямая последовательность фаз, когда положительный максимум тока наступает сначала в фазе *A*, затем в фазе *B*, в фазе *C*, снова в фазе *A* и т. д.

Обратная последовательность фаз, когда порядок чередования максимума тока изменяется, наступает сначала в фазе *A*, затем в фазе *C*, в фазе *B*, снова в фазе *A* и т. д.

Часто необходимо знать последовательность фаз в проводах трехфазной цепи, например, чтобы определить направление вращения асинхронного двигателя, включенного в сеть. Для определения последовательности фаз можно воспользоваться **фазоуказателем**, работа которого основана на явлении вращающегося магнитного потока.

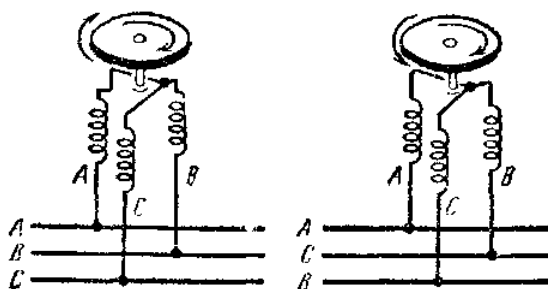


Рис. 1-38. Схема фазоуказателя с вращающимся диском

Фазоуказатель состоит из трех катушек, начала которых помечены буквами *A*, *B* и *C* (или цифрами 1, 2 и 3). Эти начала присоединяются к проводам трехфазной цепи, причем катушка *A* присоединяется к любому из трех проводов. Этот провод в дальнейшем считается проводом фазы *A*. Катушки *B* и *C* присоединяются к двум другим проводам.

Над катушками на острие насажен легкий алюминиевый диск, который вращается в направлении вращения магнитного потока. Причина вращения та же, что и ротора асинхронного двигателя. На диске нарисована стрелка (рис.1-38.). Если диск вращается в направлении стрелки, последовательность фаз — прямая, т. е. катушка *B* присоединена к фазе *B*, а катушка *C* к фазе *C*, если в обратную сторону, - обратная, т. е. катушка *B* присоединена к фазе *C*, а катушка *C* к фазе *B*.

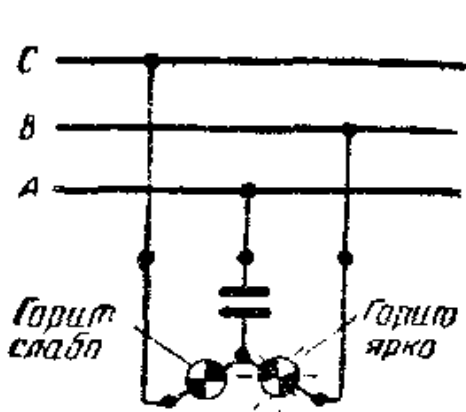


Рис. 1-39. Схема фазоуказателя с конденсатором.

Для определения последовательности фаз можно воспользоваться и фазоуказателем другого типа. Присоединим к проводам трехфазной цепи две лампы и конденсатор, соединенные звездой (рис. 1-39), приняв за фазу *A* ту, в которую включен конденсатор.

Предположим, что по величине проводимости каждой лампы и конденсатора одинаковые (y) и представим проводимости фаз комплексными числами:

$$Y_A = jy; Y_B = Y_C = y.$$

Имея в виду, что линейные напряжения симметричны, а фазное напряжение генератора равно U_ϕ , представим фазные напряжения комплексными числами и выразим смещение нейтрали:

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ &= \frac{jU_\phi y + U_\phi y e^{-j\frac{2}{3}\pi} + U_\phi y e^{+j\frac{2}{3}\pi}}{2y + jy} = \\ &= \frac{jU_\phi - \frac{1}{2}U_\phi - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi - \frac{1}{2}U_\phi + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi}{2 + j} = \\ &= 0,2U_\phi + j0,6U_\phi \end{aligned}$$

Напряжение на лампе, включенной в фазу *B*:

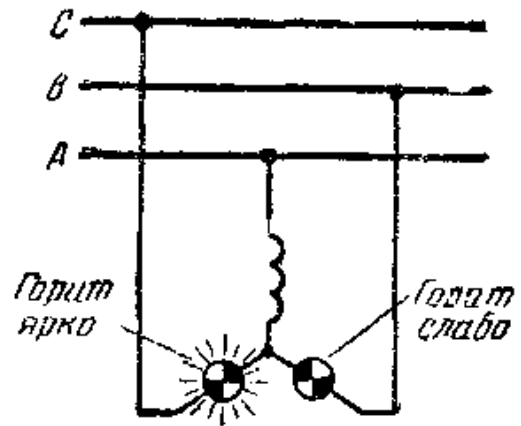


Рис. 1-40. Схема фазоуказателя с реактивной катушкой.

$$\begin{aligned}\dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_N = -\frac{1}{2}U_\phi - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi - (-0,2U_\phi + j0,6U_\phi) = \\ &= -0,3U_\phi - j1,47U_\phi;\end{aligned}$$

$$\dot{U}'_B = \sqrt{(0,3U_\phi)^2 + (1,47U_\phi)^2} = 1,49U_\phi.$$

Напряжение на лампе, включенной в фазу *C*:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_N = -\frac{1}{2}U_\phi + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_\phi - (-0,2U_\phi + j0,6U_\phi) = \\ &= -0,3U_\phi + j0,27U_\phi;\end{aligned}$$

$$\dot{U}'_C = \sqrt{(0,3U_\phi)^2 + (0,27U_\phi)^2} = 0,4U_\phi.$$

По яркому накалу лампы легко определить фазу B.

Для определения последовательности фаз можно вместо конденсатора воспользоваться катушкой с большим индуктивным сопротивлением по сравнению с ее активным сопротивлением (рис. 1-40). Считая фазу, к которой присоединена катушка, за *A*, фазу *B* определим по лампе со слабым накалом нити и фазу *C* - по яркому накалу лампы.

Контрольные вопросы

1. Что такое трехфазный переменный ток?
2. Как получается трехфазный переменный ток?
3. Что называется шести-, четырех- и трехпроводной системой трехфазного тока?
4. Объясните устройство и принцип работы трехфазного генератора.
5. В каком случае не нужен нулевой провод при соединении обмотки генератора и приемников звездой?
6. Каково соотношение между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении источников и потребителей энергии звездой и треугольником?
7. Какие достоинства имеет схема соединения приемников треугольником?

8. Каким выражением определяется мощность трехфазного тока при симметричной нагрузке?
9. Каким образом трехфазный ток может создавать вращающееся магнитное поле?
10. Каким образом можно изменить направление вращения магнитного поля симметричной трехфазной системы катушек?
11. От чего зависит скорость вращения магнитного поля симметричной трехфазной системы?