

Презентация

**«Трёхфазные
цепи»**

Трехфазная симметричная система ЭДС

Производство, передача и распределение электроэнергии в настоящее время осуществляются в основном посредством трехфазных систем. В разработку трехфазных систем большой вклад внесли ученые и инженеры разных стран. Наибольшая заслуга среди них принадлежит русскому электротехнику М. О. Доливо-Добровольскому, которым разработаны трехфазные генератор, трансформатор, асинхронный двигатель, четырехпроводные и трехпроводные цепи. Простое устройство, относительная дешевизна, высокая надежность в эксплуатации трехфазных генераторов, трансформаторов и двигателей, более экономичная передача энергии на расстояние по сравнению с однофазной системой способствовали широкому промышленному внедрению трехфазной системы переменного тока.

Трёхфазный генератор

Трёхфазный генератор состоит из двух основных частей: статора и ротора. На статоре расположены три одинаковые обмотки, смещенные одна относительно другой на 120° . Начала обмоток обозначают A, B, C а концы X, Y, Z . Подвижная часть генератора — ротор — является электромагнитом. При вращении ротора будет вращаться и его магнитный поток. В результате этого в каждой обмотке статора наведется синусоидальная ЭДС амплитуды E_m и частоты f сдвинутая по фазе относительно ЭДС соседней обмотки на 120° . Если ЭДС первой обмотки $e_a = E_m \sin \omega t$, то ЭДС второй обмотки $e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, а третьей $e_c = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$. Система трех переменных ЭДС одной амплитуды и частоты, сдвинутых по фазе на 120° , называется **трехфазной симметричной системой ЭДС**.

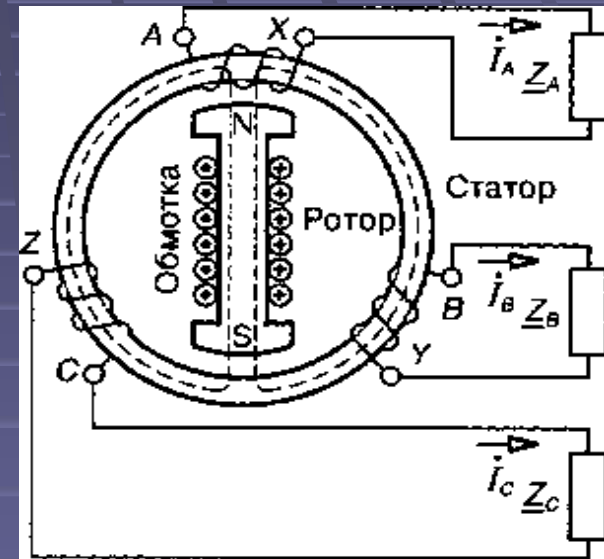


рис.1

Трёхфазная электрическая цепь

На рис.2 а показаны графики, а на рис.2 б — векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС. Если вектор ЭДС $\vec{E}_A$ совместить с положительным направлением оси вещественных чисел (рис. 3), то можно записать комплексы действующих значений ЭДС: $\vec{E}_A = E$, $\vec{E}_B = E e^{-j120^\circ}$ и $\vec{E}_C = E e^{-j240^\circ}$. ЭДС трехфазного генератора принимают амплитудные (или нулевые) значения в определенной последовательности. Рассмотренную последовательность А В С принято называть **прямой последовательностью фаз ЭДС**. К обмоткам генератора присоединим нагрузки сопротивлением $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_C$. (см. рис. 1). В результате образуются три самостоятельные электрические цепи с токами I_A , I_B и I_C . Каждую из них называют **фазой**.

Систему трех однофазных цепей, в которых действуют ЭДС одной частоты, сдвинутые по фазе на 120° , называют **трехфазной электрической цепью**.

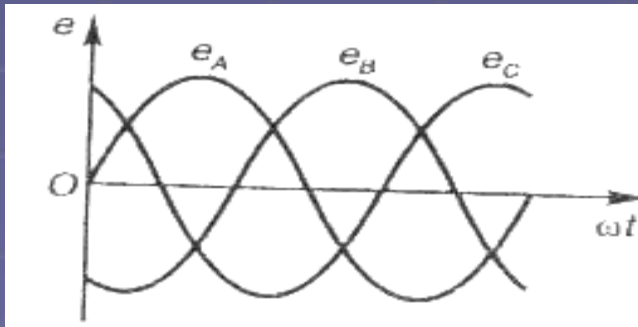


рис.2 а

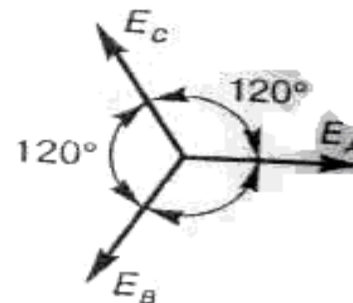


рис.2 б

Различают симметричный и несимметричный режимы работы трехфазной цепи. При симметричном режиме комплексные сопротивления трех фаз одинаковы и ЭДС образуют трехфазную симметричную систему. В этом случае токи фаз I_A , I_B и I_C будут равны по величине и сдвинуты относительно одноименных ЭДС на одинаковые углы (рис. 4).

При этом образуется трехфазная симметричная система токов. При несимметричном режиме комплексные сопротивления фаз не равны друг другу, при этом токи и их фазные сдвиги будут различными.

Основное свойство симметричных трехфазных систем синусоидальных величин заключается в том, что алгебраическая сумма их мгновенных значений в любой момент времени равна нулю. Также равна нулю и сумма комплексов, изображающих эти величины. Значит, при симметричной трехфазной системе ЭДС $e_A + e_B + e_C = 0$ и $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$, а при симметричной трехфазной системе токов $i_A + i_B + i_C = 0$ и $I_A + I_B + I_C = 0$.

Трехфазная система, схематически изображенная на рис.1, электрически не связана, так как ее отдельные фазы изолированы. Такая трехфазная система не имеет преимуществ перед однофазной и на практике не применяется. Для сокращения количества проводов между генератором и потреблением энергии применяют электрически связанные трехфазные системы. Для этого обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником.

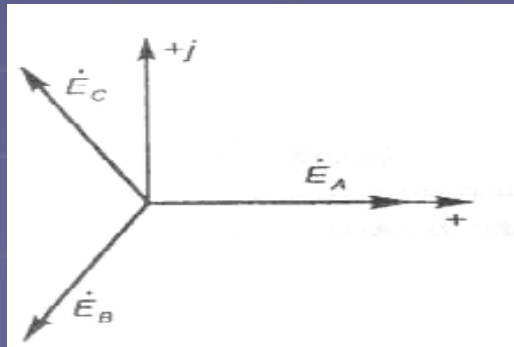


рис. 3

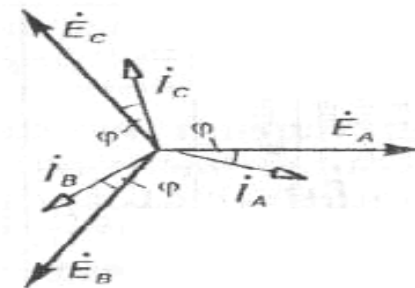


рис. 4

Соединение обмоток трехфазного генератора звездой

Фазные и линейные напряжения генератора.

На электрической схеме обмотки статора трехфазного генератора располагают под углом 120° (рис.5). При соединении обмоток звездой их концы X, Y, Z соединяют в одну точку N, называемую **нейтралью генератора**.

От точки N к потребителям энергии прокладывают нейтральный провод. К потребителям энергии кроме нейтрального прокладывают три линейных провода, которые соединяют с началами обмоток A, B и C. Такая система называется **звездой с нейтральным проводом**. Напряжения между линейными и нейтральными проводами (т. е. между началом и концом обмоток генератора) называют **фазными** напряжениями и обозначают U_A , U_B , U_C (в общем виде U_ϕ). Фазные напряжения отличаются от ЭДС на внутреннее падение напряжения в обмотках. При незначительных сопротивлениях обмоток и малых токах внутреннее падение напряжения можно не учитывать.

При этом фазные напряжения будут мало отличаться от соответствующих ЭДС. Стрелки (рис.5) указывают положительное направление фазных напряжений.

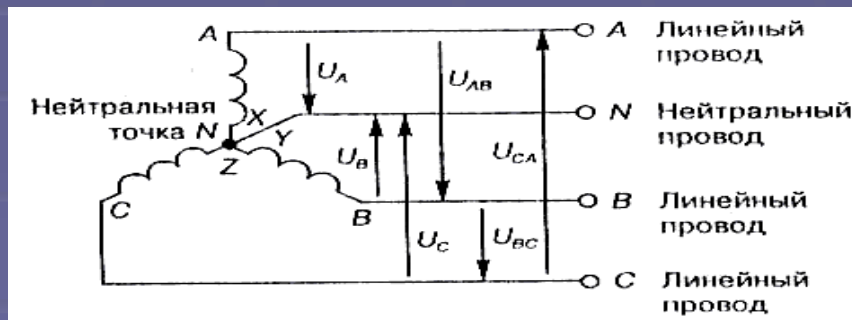


рис.5

Напряжения между линейными проводами (т. е. между началом обмоток) называют **линейными** напряжениями и обозначают U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} (в общем виде U_L). Причем порядок букв индексов указывает положительное направление этих напряжений во внешней цепи, например U_{AB} направлено от А к В. Обмотки статора синхронного генератора выведены на шесть контактных зажимов. Соединение этих шести зажимов при включении обмоток звездой показано на рис.6

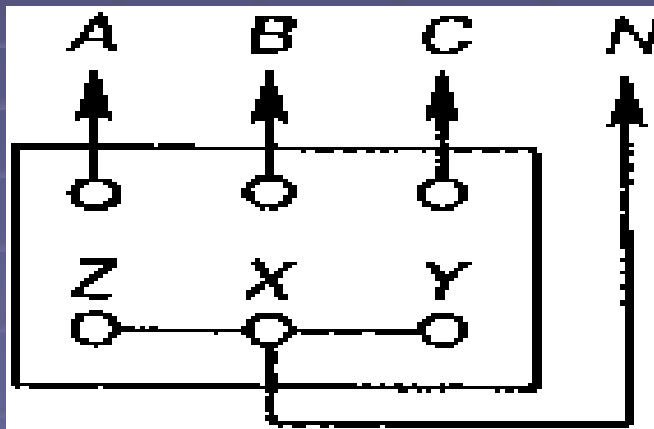


рис.6

Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

Выясним связь между фазными и линейными напряжениями. Пусть потенциалы точек А, В, С равны φ_A , φ_B , φ_C , а потенциал точки N примем равным нулю ($\varphi_N = 0$). Тогда мгновенные значения фазных напряжений $u_A = \varphi_A$, $u_B = \varphi_B$, $u_C = \varphi_C$. Линейные напряжения $u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = u_A - u_B$; $u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = u_B - u_C$; $u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A = u_C - u_A$. Таким образом, мгновенные значения линейных напряжений равны разностям мгновенных значений соответствующих фазных напряжений. Аналогично можно написать и уравнения для действующих значений напряжений:

$$U_A - U_B = U_{AB}; \quad U_B - U_C = U_{BC}; \quad U_C - U_A = U_{CA}$$

Полученные уравнения необходимы для построения векторной диаграммы напряжений трехфазного генератора (рис. 7). На векторной диаграмме сначала строят векторы фазных напряжений $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ — равных по значению, повернутых друг относительно друга на 120° . Для построения вектора линейного напряжения $\dot{U}_{AB}$ поступают следующим образом: к вектору $\dot{U}_A$ прибавляют вектор $-\dot{U}_B$, т.е. вектор, равный по абсолютной величине вектору $\dot{U}_B$, но противоположно направленный. Действительно, $\dot{U}_A + (-\dot{U}_B) = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_{AB}$. Аналогично строят векторы $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$ и $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$. Из построения видно, что векторы $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$ образуют симметричную систему, причем звезда векторов линейных напряжений опережает по фазе звезду векторов фазных напряжений на 30° .

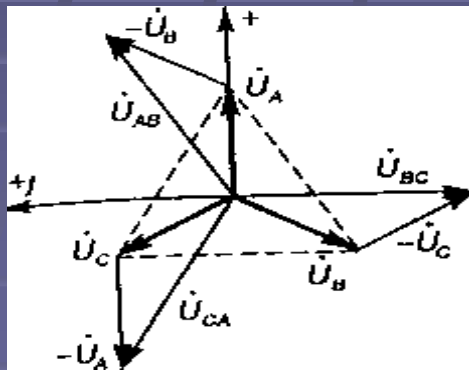


рис. 7

Связь между фазными и линейными напряжениями.

Переместим векторы линейных напряжений параллельно им самим так, чтобы они образовали замкнутый треугольник (рис.8). Затем из точки N на линию BC проведем перпендикуляр. В результате получим прямоугольный треугольник BND . Его гипотенуза NB выражает фазное напряжение генератора (U_{ϕ}), а катет BD — половину линейного напряжения ($U_{\text{л}} / 2$); угол $DBN = 30^\circ$. Поэтому $BD/NB = \cos 30^\circ$ или $U_{\text{л}} / 2 U_{\phi} = \sqrt{3}/2$.

Отсюда $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi}$

Таким образом, при соединении обмоток генератора звездой линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Если фазное напряжение генератора 127 В, то линейное напряжение $U_{\text{л}} = 1,73 \times 127 = 220$ В. При фазном напряжении $U_{\phi} = 220$ В линейное напряжение $U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot 220 = 380$ В.

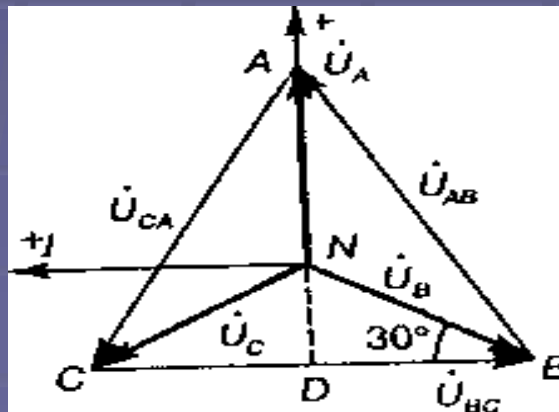


рис.8

На рис. 9 показана векторная диаграмма напряжений трехфазного генератора при неправильном соединении первой обмотки. Так как в точке N подключено начало обмотки A , а не конец ее X , то вектор фазного напряжения U_A повернут относительно своего нормального положения на 180° . Векторы линейных напряжений, как и ранее, соединяют концы векторов фазных напряжений. Из векторной диаграммы (рис. 9) видно, что линейное напряжение U_{BC} сохранит прежнее значение и будет $\sqrt{3}$ раз больше фазного. Изменяются линейные напряжения U_{AB} и U_{CA} . Треугольники ANC и ANB равносторонние. Поэтому линейные напряжения U_{AB} и U_{CA} равны фазным U_ϕ . Таким образом $U_{AB} = U_{CA} = U_\phi$, а $U_{BC} = \sqrt{3} U_\phi$.

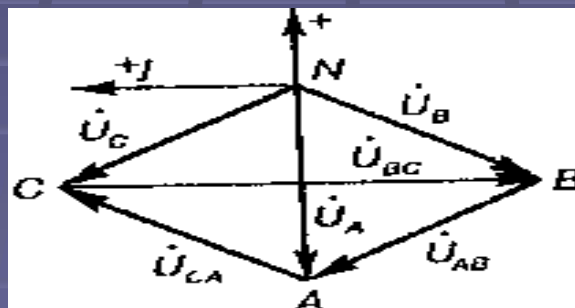


рис. 9

Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником

Электрическая схема соединения обмоток генератора треугольником.

Для соединения обмоток генератора треугольником (рис. 10) конец первой обмотки X соединяют с началом второй B , конец второй Y — с началом третьей C и конец третьей Z — с началом первой A . От начала каждой обмотки A, B, C к потребителям энергии прокладывают линейный провод. При этом соединении нейтральный провод отсутствует. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником получают трехпроводную, электрически связанную трехфазную систему. На рис. 11 показан щиток генератора, обмотки которого соединены треугольником.

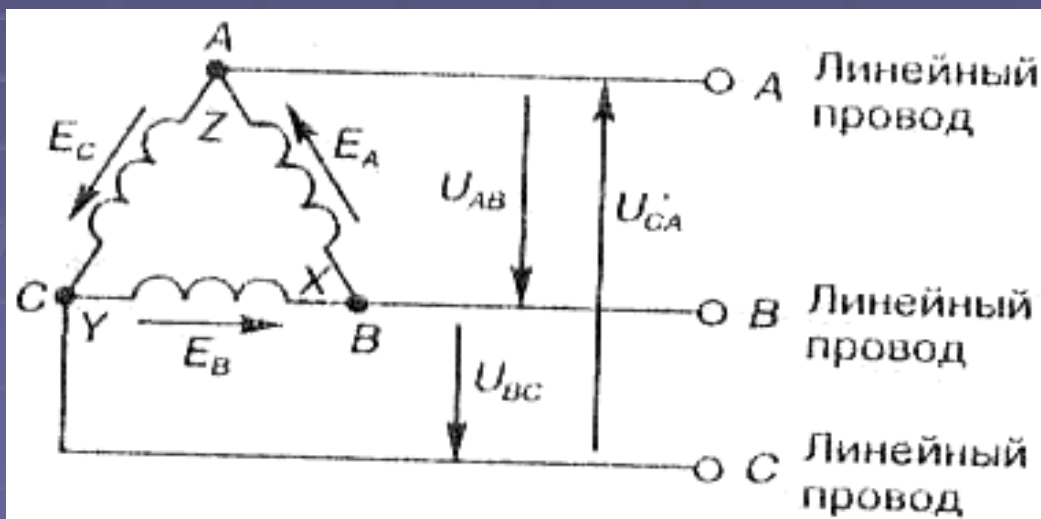


рис. 10

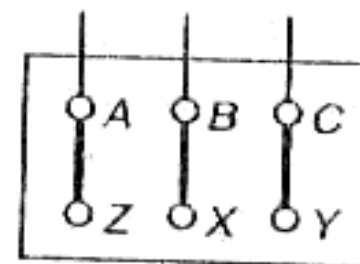


рис. 11

Связь между фазными и линейными напряжениями

Обозначим линейные напряжения генератора U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Напомним, что фазные напряжения измеряются между началом и концом каждой обмотки генератора, а линейные — между линейными проводами. При соединении треугольником каждая обмотка генератора присоединена к соответствующим линейным проводам (рис.10). Например, к линейным проводам A и B подключена обмотка $A — X$, а к линейным B и C — обмотка $B — Y$. Поэтому линейное напряжение в то же время является и фазным, т.е. $U_{л} = U_{ф}$

Ток в замкнутом контуре обмоток статора

При соединении треугольником обмотки статора образуют замкнутый контур с действующими ЭДС E_A , E_B , E_C . Ток в замкнутом контуре прямо пропорционален сумме фазных ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению контура. Так как $E_A + E_B + E_C = 0$ (рис.12), то при отключенных приемниках энергии уравнительного тока в обмотках генератора не возникает. Опасно неправильное соединение обмоток генератора треугольником.

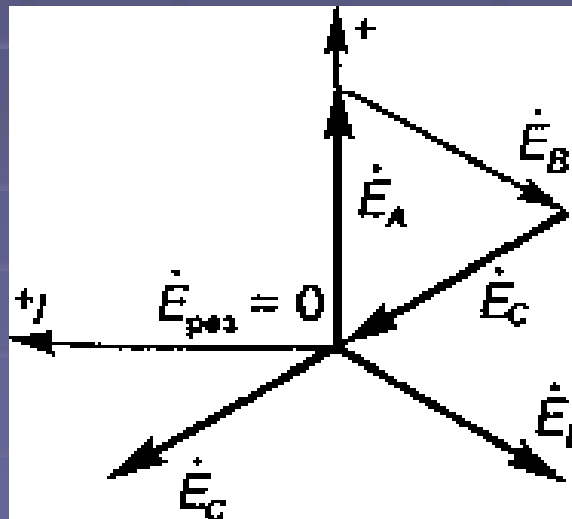


рис.12

На рис.13, а показана одна из неправильных схем соединения. Начало второй обмотки B перепугано с ее концом Y . Поэтому на векторной диаграмме вектор ЭДС E_B (рис.13,б) повернут относительно своего обычного положения на 180° .

Результирующую ЭДС обмоток находят сложением ЭДС E_A , E_B и E_C . В этом случае она в два раза больше фазной ЭДС. В результате в замкнутом контуре с незначительным сопротивлением обмоток генератора появится ток очень большого значения.

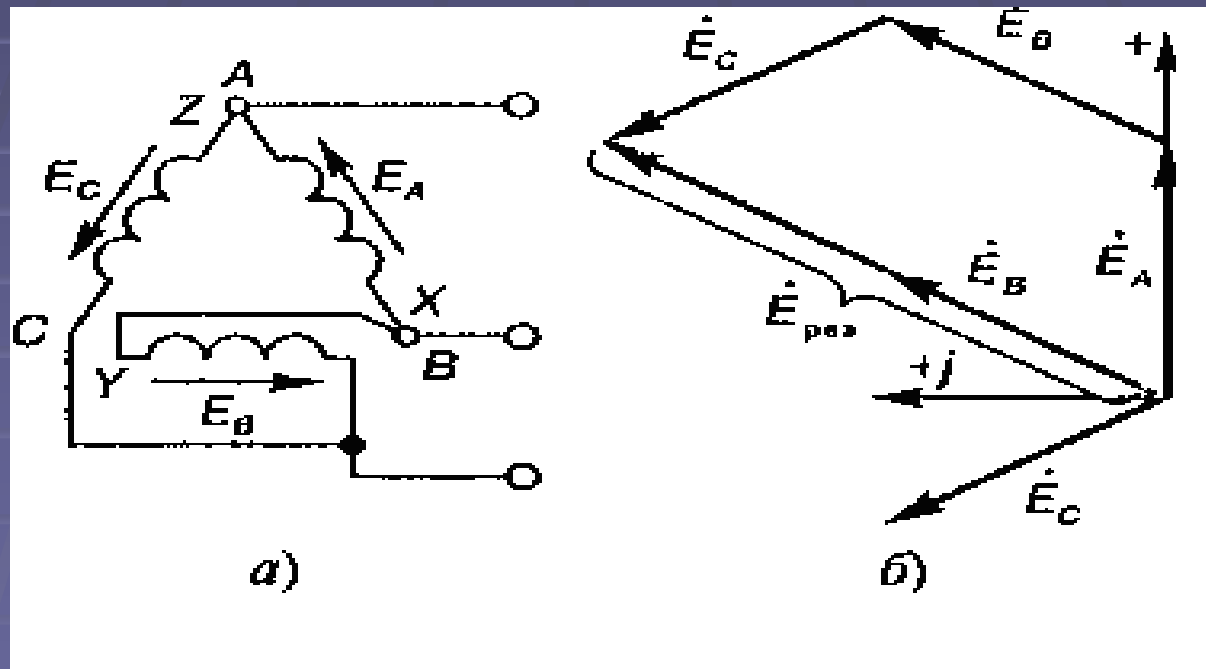


рис.13

Соединение приемников энергии звездой

Фазные и линейные напряжения и токи.

Трехфазные приемники электрической энергии (электрические двигатели) и группы однофазных приемников (электрические лампы, нагревательные приборы и т.д.), так же как и обмотки генератора, соединяют звездой или треугольником. Рассмотрим соединение звездой. Такое соединение применяется в том случае, когда каждая фаза приемника рассчитана на напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньшее линейного напряжения сети. Осветительную нагрузку при этом разделяют на три приблизительно одинаковые по мощности группы — фазы приемника (рис.14). Фазу 1 подключают к линейному проводу А и нейтральному N, фазу 2 — к В и N, а фазу 3 — к С и N.

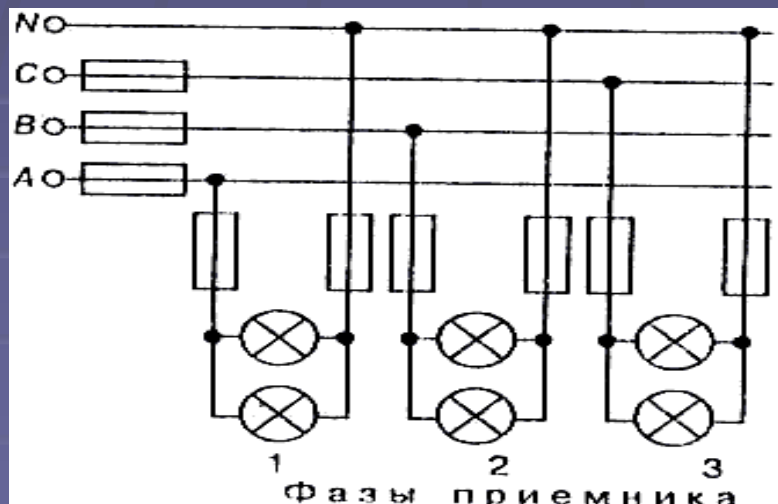


рис.14

На рис. 15 показана схема соединения звездой обмоток трехфазного электродвигателя. Концы обмоток соединены в общую (нейтральную) точку, а к началам обмоток A , B и C подключены соответствующие линейные провода. На рис. 16 показана схема четырехпроводной трехфазной цепи. В ней соединены звездой не только фазы приемника энергии, но и фазы питающего генератора (или трансформатора). Начала фаз генератора A , B , C соединяются с началами фаз приемника A' , B' , C' линейными проводами. Нейтральная точка N генератора соединяется с нейтральной точкой N' приемника энергии нейтральным проводом. Ток, напряжение и мощность каждой фазы приемника называются **фазными**.

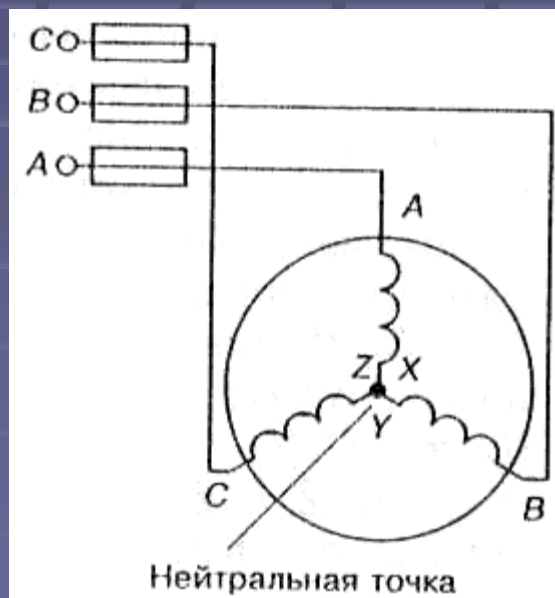


рис. 15

Схема четырехпроводной трехфазной цепи

Ток первой фазы обозначают I_A , второй — I_B и третьей — I_C . Положительное направление этих токов совпадает с положительным направлением ЭДС обмоток генератора. Токи в линейных проводах называются **линейными**. В рассматриваемой схеме одноименные фазы приемника, генератора и соответствующий линейный провод соединены последовательно. Поэтому токи I_A , I_B и I_C являются также линейными и фазными токами генератора. Фазные напряжения приемника энергии обозначим U_A , U_B , U_C , а фазные напряжения генератора соответственно U_A , U_B , U_C .

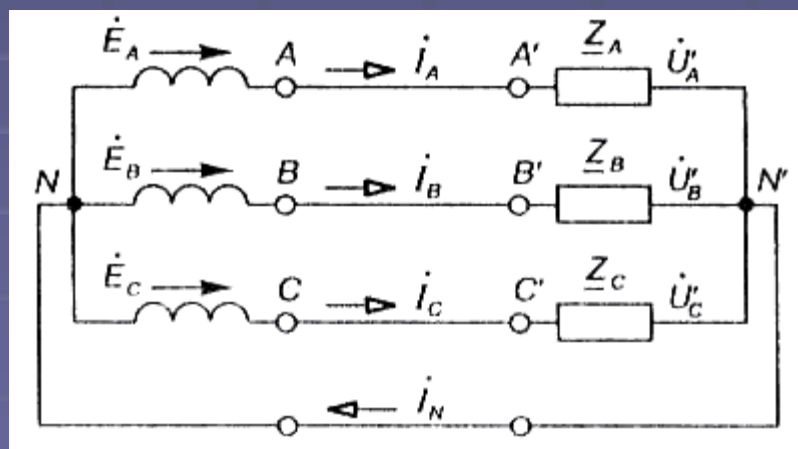


рис. 16

Расчет четырехпроводной трехфазной цепи

Сопровитления соединительных проводов зависят от протяженности линии электропередачи. В коротких линиях эти сопротивления незначительны и их можно не учитывать. При этом отсутствует падение напряжения в проводах, а фазные напряжения приемника равны соответствующим фазным напряжениям генератора: $U'_A = U_A$, $U'_B = U_B$, $U'_C = U_C$.

Фазные токи приемника энергии определяются по закону Ома: $I_A = U_A / \underline{Z}_A$, $I_B = U_B / \underline{Z}_B$, $I_C = U_C / \underline{Z}_C$, где $U_A = U_A$, $U_B = U_A e^{-j120^\circ}$, $U_C = U_A e^{j120^\circ}$, $\underline{Z}_A = z e^{j\varphi_A}$, $\underline{Z}_B = z e^{j\varphi_B}$, $\underline{Z}_C = z e^{j\varphi_C}$. Ток в нейтральном проводе по первому закону Кирхгофа равен сумме фазных токов:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

При симметричной системе фазных напряжений и симметричной нагрузке, т. е. при равенстве комплексов сопротивлений фаз приемника, токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ образуют симметричную трехфазную систему токов. В этом случае $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ и ток в нейтральном проводе отсутствует. При этих условиях отключение нейтрального провода не изменяет режима работы трехфазного приемника энергии. Поэтому к трехфазному электродвигателю (рис.15) подключают только линейные провода. При несимметричной нагрузке или системе фазных напряжений в нейтральном проводе имеется некоторый ток I_N , который можно определить по первому закону Кирхгофа, применяя комплексные числа, или графически.

Мощность трехфазной цепи

Мощность трехфазной цепи равна сумме мощностей отдельных фаз, т. е.

$P = P_A + P_B + P_C$. Активная мощность первой фазы приемника $P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$, где U_A и I_A — напряжение и ток первой фазы приемника; φ_A — угол сдвига между напряжением U_A и током I . Активная мощность второй фазы приемника $P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$, а третьей $P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$. При симметричной нагрузке активные мощности фаз приемника $P = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$. При этом условии активная мощность трехфазной цепи $P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$. При соединении приемников энергии звездой $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$ и $I_\phi = I_L$. Подставив эти значения в формулу активной мощности трехфазной цепи, получим

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Роль нейтрального провода при соединении приемников энергии звездой

Обрыв фазы приемника при отключенном нейтральном проводе.

Ранее были рассмотрены свойства трехфазной системы при соединении приемников энергии звездой. При симметричной нагрузке, когда $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$, отключение нейтрального провода не меняет режима работы электрической цепи. Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 17. Векторы линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} образуют замкнутый треугольник, а векторы фазных напряжений приемника и генератора U_A , U_B , U_C расходятся к вершинам А, В, С из точки N' , которая находится в центре треугольника. Такая диаграмма справедлива и для симметричной нагрузки с нейтральным проводом. На рассмотренной диаграмме все фазы приемника энергии находятся под одинаковым напряжением $U_{\phi} = U_L \sqrt{3}$.

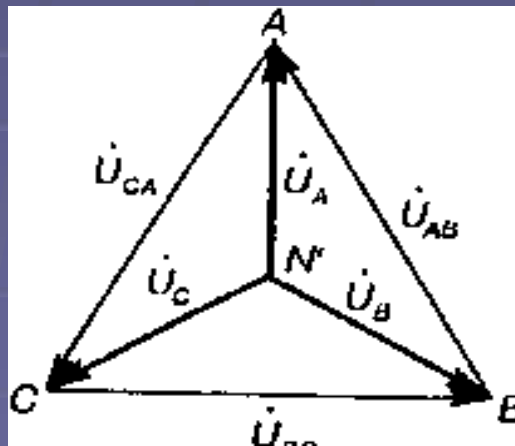


рис. 17

Рассмотрим один из несимметричных режимов работы трехфазной цепи при отключенном нейтральном проводе. Допустим, что произошел разрыв фазы A ($Z_A = \infty$) при одинаковых сопротивлениях фаз B и C ($Z_B = Z_C$) и симметричных напряжениях генератора (рис.18). При этом цепь с последовательным соединением двух равных сопротивлений Z_B и Z_C будет находиться под линейным напряжением U_{BC} . Падения напряжения на них будут одинаковы и равны половине напряжения U_{BC} . Следовательно, нейтральная точка N' окажется посередине отрезка BC (рис. 19). Соединив точку N' с вершинами треугольника A , B и C , получим векторы фазных напряжений U_A , U_B , U_C .

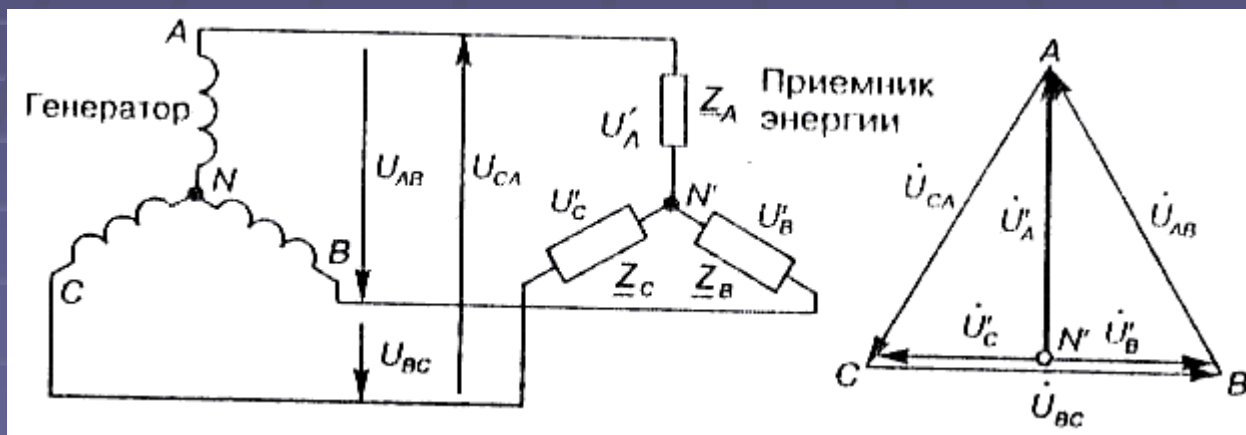


рис.18

рис. 19

Короткое замыкание фазы приемника при отключенном нейтральном проводе

Рассмотрим несимметричную нагрузку, когда $\underline{Z}_A = 0$ (короткое замыкание первой фазы приемника), $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ (рис. 20). При этом варианте линейный провод А непосредственно соединяется с нейтральной точкой приемника энергии. Поэтому напряжение на первой фазе приемника уменьшается до нуля, а на второй и третьей — увеличивается до линейного напряжения: $U'_A = 0$; $U'_B = U_{AB}$; $U'_C = U_{CA}$. При этом нейтральная точка N' совпадает с вершиной А треугольника (рис.21).

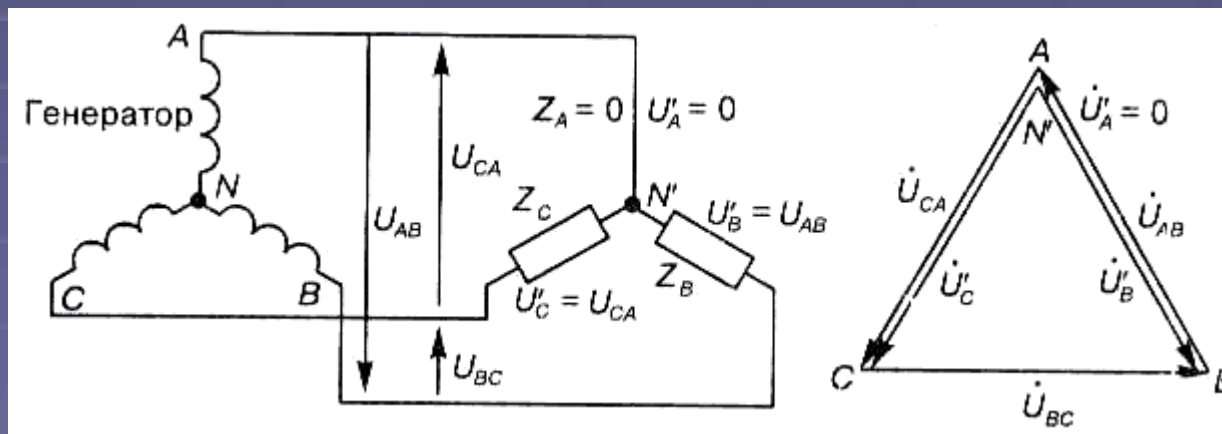


рис. 20

рис.21

При переходе от первого варианта несимметричной нагрузки ко второму, т. е. при уменьшении сопротивления $\underline{Z}_A$ от ∞ до 0 и $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C$, нейтральная точка будет перемещаться вверх по прямой линии (см. рис. 19) в точку А. При этом напряжение на первой фазе приемника будет уменьшаться от $0,86 U_{л}$ до 0, а второй и третьей — увеличиваться от $U_{л}/2$ до $U_{л}$. Из приведенного можно сделать следующий вывод: *при несимметричной нагрузке и отключенном нейтральном проводе происходит смещение точки N' приемника из центра треугольника линейных напряжений генератора. В результате этого изменяются фазные напряжения приемника электрической энергии. Более загруженные фазы приемника (с меньшим полным сопротивлением) оказываются под меньшим фазным напряжением, а менее загруженные (с большим полным сопротивлением) — под большим.*

Определение фазных напряжений приемника

Для определения фазных напряжений приемника используется метод комплексных чисел. Сначала определяют напряжение между точками N' и N (см. рис. 16), называемое *напряжением смещения нейтрали*. Его комплексное значение определяют по методу узлового напряжения:

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — комплексы фазных напряжений генератора; $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ — комплексные проводимости фаз приемника; $\underline{Y}_N$ — комплексная проводимость нейтрального провода. При отключенном нейтральном проводе $\underline{Y}_N = 0$. Комплексы фазных напряжений приемника:

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_{N'N}; \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N}; \dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N}.$$

На рис. 22 показана топографическая диаграмма трехфазной цепи при несимметричной нагрузке, соединенной звездой. Обозначенным здесь точкам A , B , C , N , N' соответствуют одноименные точки электрической цепи (рис.16). При наличии нейтрального провода, сопротивлением которого можно пренебречь ($\underline{Y}_N = \infty$), напряжение смещения нейтрали $U_{NN} = 0$. В этом случае точка N' на топографической диаграмме сместится в точку N . В результате фазные напряжения приемника энергии будут одинаковыми. Таким образом, нейтральный провод обеспечивает выравнивание напряжений на фазах потребителя при несимметричной нагрузке. Четырехпроводные трехфазные системы широко применяются для осветительной нагрузки. При этом номинальное напряжение ламп равно фазному напряжению сети. Во избежание разрыва цепи нейтрального провода в нем не устанавливают предохранителей и выключателей.

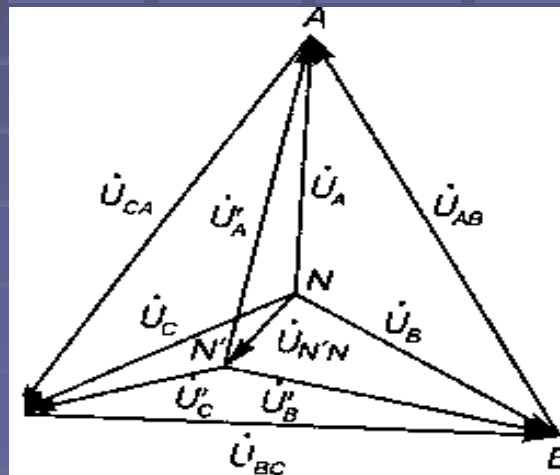


рис. 22

Соединение приемников энергии треугольником

Соединение треугольником осветительной нагрузки и обмоток электродвигателя.

Нам уже известно, что при соединении звездой фазы приемника энергии должны быть рассчитаны на напряжение $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$. Например, осветительные приборы, соединенные звездой и включенные в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В, должны иметь номинальное (расчетное) напряжение 127 В. Если номинальное напряжение каждой фазы приемника равно линейному напряжению генератора, применяют соединение треугольником. Для этого осветительную нагрузку разбивают на три одинаковые группы—фазы приемника (рис.24). Фазу 1 подключают к линейным проводам *A* и *B*, фазу 2 — к *B* и *C*, а фазу 3 — к *C* и *A*. Обмотки трехфазного электродвигателя соединяют треугольником следующим образом: конец первой обмотки *X* (рис. 25) соединяют с началом второй *B*, конец второй *Y* — с началом третьей *C* и конец третьей *Z* — с началом первой *A*. Затем начала обмоток подключают к линейным проводам сети *A*, *B* и *C*. При соединении треугольником нейтральный провод не требуется.

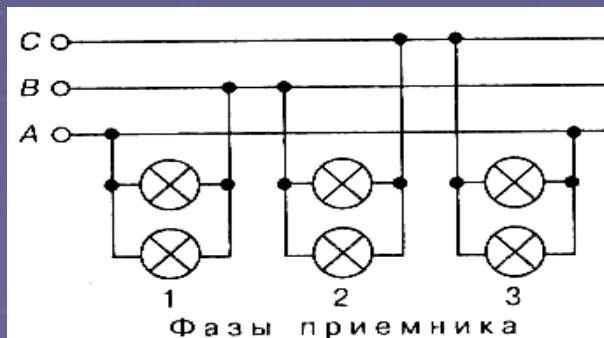


рис.24

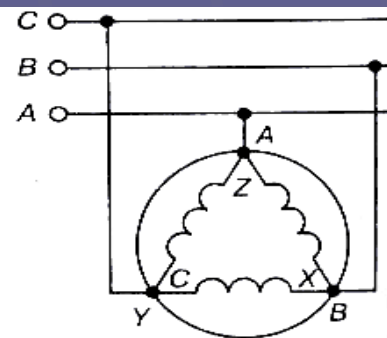


рис. 25

Определение фазных и линейных токов

На рис. 26 дана общая схема соединения приемников электрической энергии треугольником, где $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{BC}$, $\underline{Z}_{CA}$ — сопротивления фаз приемника, I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} — фазные токи, а I_A , I_B , I_C — линейные.

Положительные фазные токи направлены от начала фаз к их концам, а положительные линейные токи — от генератора к приемнику энергии. При соединении треугольником каждая фаза приемника энергии находится под линейным напряжением, т. е.

$$U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$$

Фазные токи определяют по закону Ома: $I_{AB} = U_{AB} / \underline{Z}_{AB}$, $I_{BC} = U_{BC} / \underline{Z}_{BC}$, $I_{CA} = U_{CA} / \underline{Z}_{CA}$. Для определения линейных токов составим уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов схемы. Для узлов А $I_A + I_{CA} - I_{AB} = 0$. Отсюда первый линейный ток

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

Аналогично определяем второй и третий линейные токи:

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

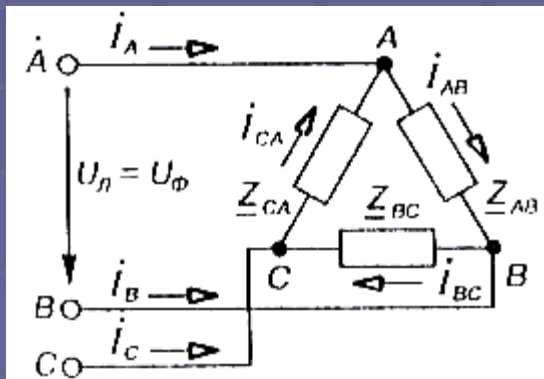


рис. 26

Таким образом, линейные токи равны разности соответствующих фазных токов. На рис. 27 показана векторная диаграмма напряжений и токов при симметричной нагрузке, соединенной треугольником. Фазные напряжения, равные линейным напряжениям, выражаются векторами U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Фазные токи I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} равны по величине и сдвинуты относительно фазных напряжений на одинаковые углы φ . Было установлено, что первый линейный ток $I_A = I_{AB} - I_{CA}$. Для построения вектора I_A к вектору I_{AB} прибавим вектор $-I_{CA}$, равный по абсолютной величине вектору I_{CA} , но направленный в противоположную сторону. Действительно, $I_{AB} + (-I_{CA}) = I_{AB} - I_{CA} = I_A$. Аналогично строим векторы $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ и $I_C = I_{CA} - I_{BC}$. Из точки O на вектор линейного тока опустим перпендикуляр OD . В полученном прямоугольном треугольнике BOD гипотенуза BO выражает фазный ток (I_Φ), а катет BD — половину линейного тока $I_L / 2$; угол OBD равен 30° . Поэтому $BD/BO = \cos 30^\circ$, или $I_L / 2 I_\Phi = \sqrt{3}/2$. Отсюда

$$I_L = \sqrt{3} I_\Phi$$

Таким образом, при симметричной нагрузке фаз приемника, соединенного треугольником, линейный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз.

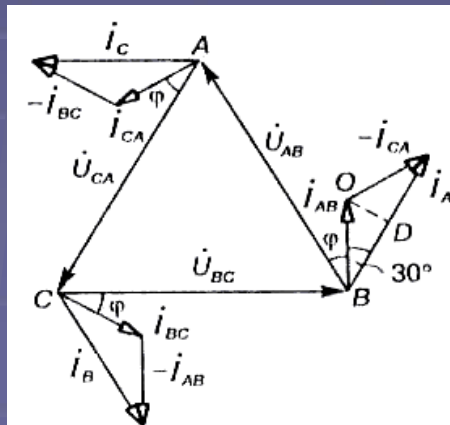


рис. 27

Активная мощность трехфазной цепи

Активная мощность приемника энергии, соединенного треугольником

$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$. Активная мощность первой фазы приемника $P_{AB} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB}$, где U_{AB} и I_{AB} - напряжение и ток первой фазы; φ_{AB} — угол сдвига между напряжением U_{AB} и током I_{AB} . Активная мощность второй фазы приемника $P_{BC} = U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC}$, а третьей фазы $P_{CA} = U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}$. При симметричной нагрузке активные мощности фаз равны: $P_{AB} = P_{BC} = P_{CA} = P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi$. Тогда активная мощность трехфазной цепи $P = 3 P_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi$. Так как $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$, а при симметричной нагрузке $I_{\Phi} = I_{\text{Л}} / \sqrt{3}$, то

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}} \cdot \cos \varphi$$

Такая же формула активной мощности была получена при симметричной нагрузке, соединенной звездой.

Вращающееся магнитное поле трехфазной системы

Получение вращающегося магнитного поля.

Одним из основных достоинств трехфазной системы является возможность получения вращающегося магнитного поля, которое широко применяется в электрических машинах, измерительных приборах и аппаратах переменного тока. Рассмотрим магнитное поле катушки, по которой ходит синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$. На рис. 28 катушка изображена в виде витка, ее начало обозначено H , а конец — K . В первый полупериод ток i положителен. Его можно направить от начала к концу катушки. Пользуясь правилом буравчика, легко определить направление вектора магнитной индукции поля B . При положительных токах этот вектор направлен по оси катушки вправо. В следующий полупериод ток i отрицателен и вектор магнитной индукции B направлен влево. Таким образом, магнитное поле катушки с синусоидальным током изменяется (пульсирует) вдоль оси катушки и называется *пульсирующим*.

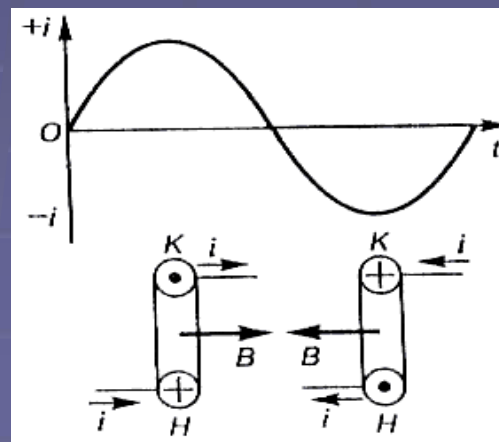


рис. 28

Рассмотрим статор трехфазного двигателя с тремя одинаковыми катушками, смещенными друг относительно друга на 120° . Если катушки подключить к симметричной трехфазной сети, то в них возникнут токи $i_A = I_m \sin \omega t$; $i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$, $i_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$. Графики этих токов изображены на рис. 29, где схематически показан статор трехфазного двигателя с тремя катушками. Как и ранее, условимся ток с положительным знаком считать направленным от начала катушки к ее концу, а с отрицательным знаком — от ее конца к началу. Положительное направление тока будем обозначать

крестиком в начале катушки и точкой в конце. Проследим за направлением магнитного потока, созданного тремя катушками в течение четырех моментов времени t_0 , t_2 , t_4 и t_6 . В начальный момент времени t_0 по первой катушке двигателя ток не проходит $i_A = 0$. Во второй катушке ток отрицательный. Поэтому в конце второй катушки Y поставим крестик, а в начале этой катушки B — точку. В третьей катушке ток положительный. Значит, в начале катушки C нужно поставить крестик, а в конце катушки Z — точку. Теперь, когда обозначено направление тока, по правилу буравчика находим направление магнитных силовых линий. Вокруг проводников C и K магнитные силовые линии замыкаются по ходу часовой стрелки, а вокруг проводников Z и B — против нее. Тогда результирующий магнитный поток направлен вниз. Основываясь на указанных рассуждениях, нетрудно получить картину поля и для последующих моментов времени t_2 , t_4 и t_6 .

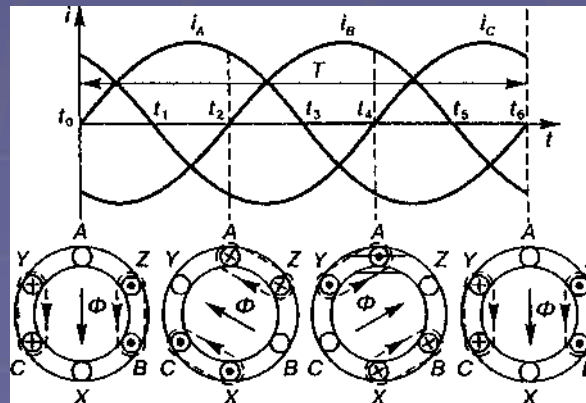


рис. 29

Сравнив направления полученных магнитных потоков, сделаем следующий вывод: *общий магнитный поток статора вращается по ходу часовой стрелки с угловой скоростью один оборот за период T .* При частоте $f = 50$ Гц магнитное поле вращается с угловой скоростью 50 об/с, или 3000 об/мин. Если требуется изменить направление вращения поля, то достаточно изменить последовательность фаз, т.е. поменять токи в двух катушках, например, первую катушку присоединить к фазе B , а вторую — к A . Магнитная индукция вращающегося поля не зависит от времени и в 1,5 раза больше амплитуды магнитной индукции каждой катушки, т.е. $B = 1,5 B_m$.

Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Статор трехфазного двигателя при наличии в его катушках трехфазного тока создает вращающееся магнитное поле. Выясним, какое влияние оказывает это поле на ротор двигателя, в пазах которого имеется короткозамкнутая обмотка. Допустим, что вначале ротор неподвижен. При этом вращающееся магнитное поле пересекает неподвижную, короткозамкнутую обмотку ротора иводит в ней ЭДС. В результате в обмотке появится ток, который взаимодействует с магнитным полем статора. Механические силы этого взаимодействия заставляют ротор вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле статора, но с меньшей скоростью. Частота вращения ротора n_2 не может быть равна частоте магнитного поля статора n_1 , так как при равенстве этих величин вращающееся поле не будет пересекать проводники обмотки ротора, в них исчезнет ток, а значит, и действующие на ротор механические силы. Вследствие неравенства частот n_2 и n_1 рассмотренный трехфазный электродвигатель называется *асинхронным двигателем*

Вращающееся магнитное поле

двухфазной системы

Устройство двухфазного статора. Векторная диаграмма токов и напряжения.

Вращающееся магнитное поле можно получить с помощью двухфазной системы переменных токов в двух перпендикулярно расположенных катушках. Двухфазную систему образуют два переменных тока одной амплитуды и частоты, сдвинутых друг относительно друга на 90° . Для создания вращающегося магнитного поля применяется двухфазный статор с двумя обмотками, сдвинутыми одна относительно другой на угол 90° . Такой статор схематически изображен на рис. 30, а. Начало первой обмотки обозначено A , а ее конец — X . Начало второй — B , а конец — Y . Последовательно со второй обмоткой статора включен конденсатор емкости C . Вторую обмотку с емкостью и первую соединяют параллельно и включают в сеть с напряжением U , (рис. 30, б). Общий ток источника I состоит из двух токов: I_A и I_B . Ток I_A проходит по первой обмотке статора, обладающей активным и индуктивным сопротивлением. Поэтому он отстает по фазе от напряжения U на угол φ_1 , (рис. 30, в). Ток второй обмотки I_B за счет емкости C опережает напряжение U на угол φ_2 . Емкость конденсатора выбирают с таким расчетом, чтобы $\varphi_1 + \varphi_2 = 90^\circ$, а $I_A - I_B$. Таким образом получают два одинаковых тока, сдвинутых по фазе на угол 90° .

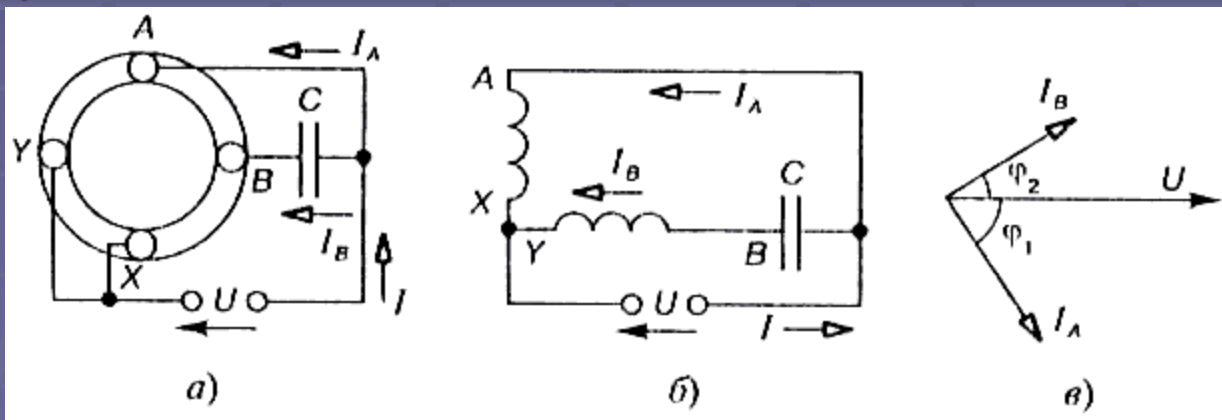


рис. 30

Получение вращающегося магнитного поля двухфазной системы

Мгновенные значения токов в обмотках статора можно выразить следующими уравнениями: $i_A = I_m \sin \omega t$; $i_B = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$,

Графики этих токов показаны на рис.31. В начальный момент времени t_0 ток $i_A = 0$, а

$i_B = I_m$, т.е. достигает амплитудного положительного значения. Значит, в начале второй обмотки B нужно поставить крестик, а в конце Y — точку. Затем по правилу буравчика найдем направление результирующего магнитного потока Φ , направленного от X к A . Аналогично определим направление потока Φ для моментов времени t_1 , t_2 , t_3 и t_4 . Из построения

(рис. 31) видно, что результирующий магнитный поток совершает полный оборот за один период переменного тока. Для изменения направления вращения поля нужно поменять местами провода, подходящие к одной из обмоток статора. Индукция вращающегося магнитного поля постоянна и равна амплитуде индукции одной катушки $B = B_m$. Вращающееся магнитное поле двухфазной системы используется в однофазных асинхронных двигателях, различных электроизмерительных приборах и других устройствах.

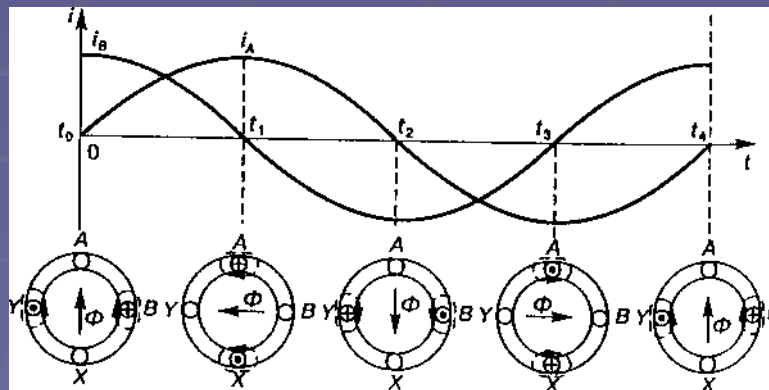


рис. 31