

# **ПОНЯТИЕ О ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

# Основные понятия и определения

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных систем электрических цепей, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, отличающиеся по фазе одна от другой и создаваемые общим источником энергии.

Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, принято называть **фазой**. Таким образом, понятие "фаза" имеет в электротехнике два значения: первое — аргумент синусоидально изменяющейся величины, второе — часть многофазной системы электрических цепей. Цепи в зависимости от количества фаз называют двухфазными, трехфазными, шестифазными и т.п.

# Основные понятия и определения

Трехфазные цепи — наиболее распространенные в современной электроэнергетике. Это объясняется рядом их преимуществ по сравнению как с однофазными, так и с другими многофазными цепями:

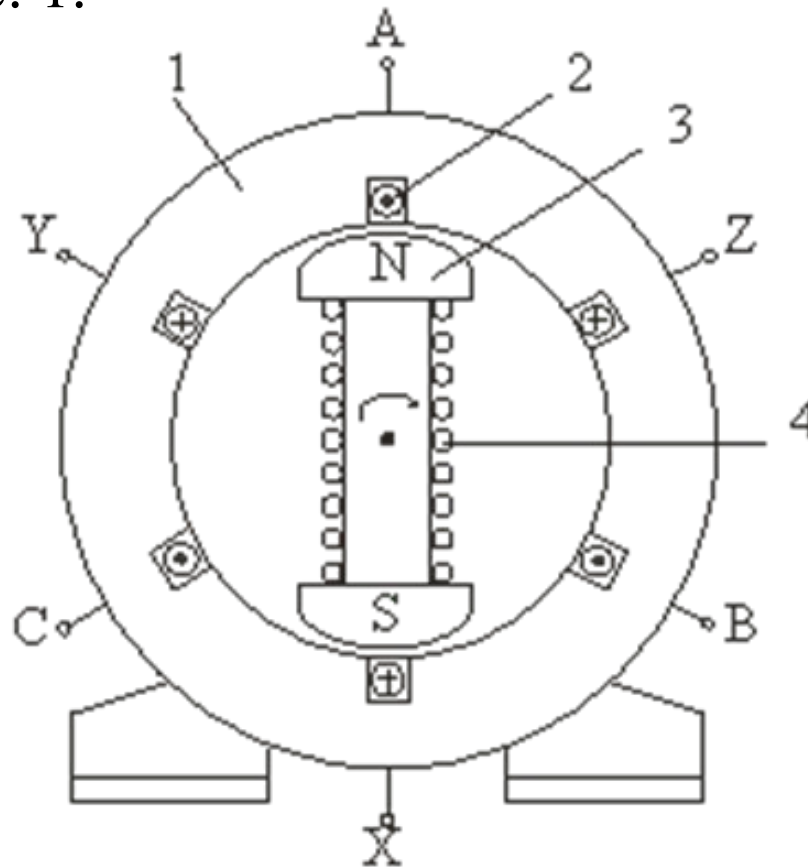
- экономичность производства и передачи энергии по сравнению с однофазными цепями;
- возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трехфазного асинхронного двигателя;
- возможность получения в одной установке двух эксплуатационных напряжений — фазного и линейного.

# Элементы трехфазных цепей

Трехфазная цепь состоит из трех основных элементов: трехфазного генератора, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую с трехфазной системой ЭДС; линии передачи со всем необходимым оборудованием; приемников (потребителей), которые могут быть как трехфазными (например, трехфазные асинхронные двигатели), так и однофазными (например, лампы накаливания).

# Элементы трехфазных цепей

Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину двух типов: турбогенератор и гидрогенератор. Модель трехфазного генератора схематически изображена на рис. 1.



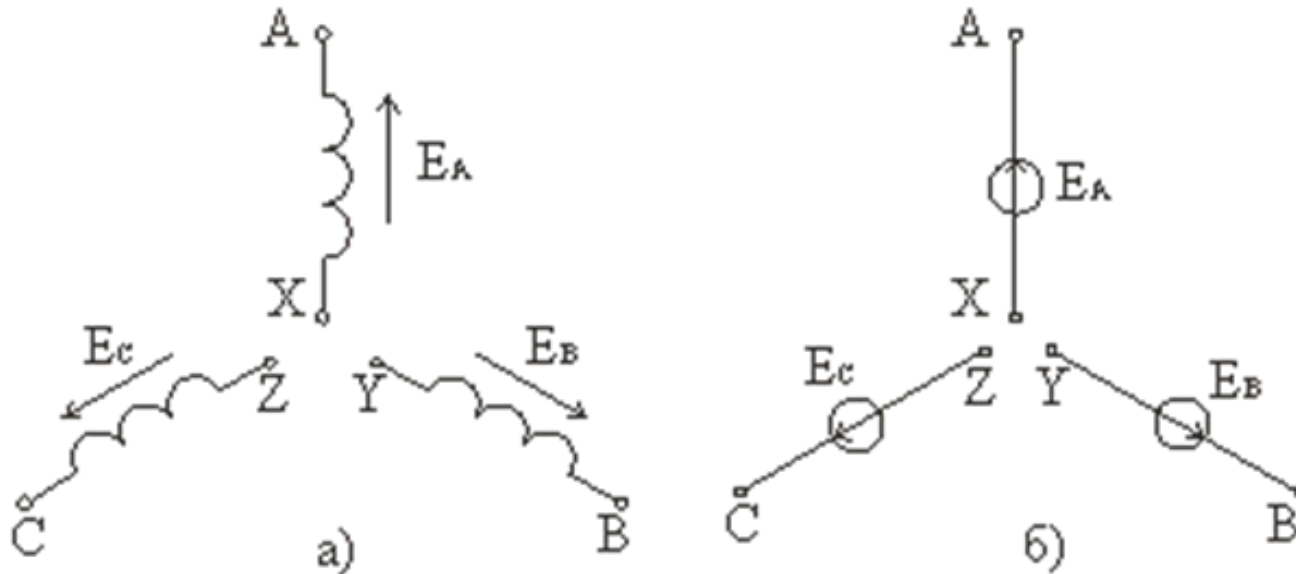
- 1 – статор
- 2 – обмотка, состоящая из трех частей или фаз
- 3 – ротор
- 4 – обмотка возбуждения постоянным током
- A, B и C – начала фаз
- X, Y, Z – концы фаз

# Элементы трехфазных цепей

При вращении ротора турбиной с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся друг от друга по фазе на  $120^\circ$  вследствие их пространственного смещения.

# Элементы трехфазных цепей

На схеме обмотку (или фазу) источника питания изображают как показано на рис. 2.

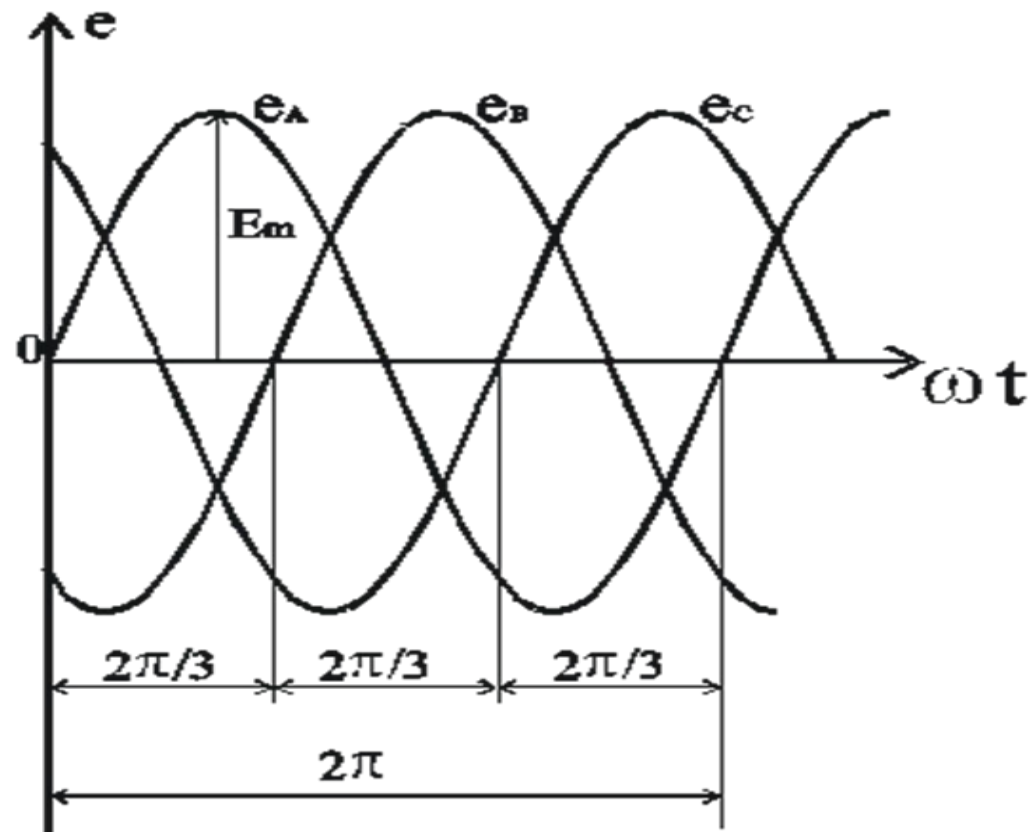


За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу. Обычно индуцированные в обмотках статора ЭДС имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе относительно друг друга на один и тот же угол  $120^\circ$ . Такая система ЭДС называется симметричной.

# Элементы трехфазных цепей

Трехфазная симметричная система ЭДС может изображаться графиками, тригонометрическими функциями, векторами и функциями комплексного переменного.

Графики мгновенных значений трехфазной симметричной системы ЭДС показаны на рис. 3.



# Элементы трехфазных цепей

Если ЭДС одной фазы (например, фазы А) принять за исходную и считать её начальную фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС можно записать в виде

$$e_A = E_m \sin \omega t,$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

# Элементы трехфазных цепей

Из графика мгновенных значений (рис. 3) следует

$$e_A + e_B + e_C = 0$$

Комплексные действующие ЭДС будут иметь выражения:

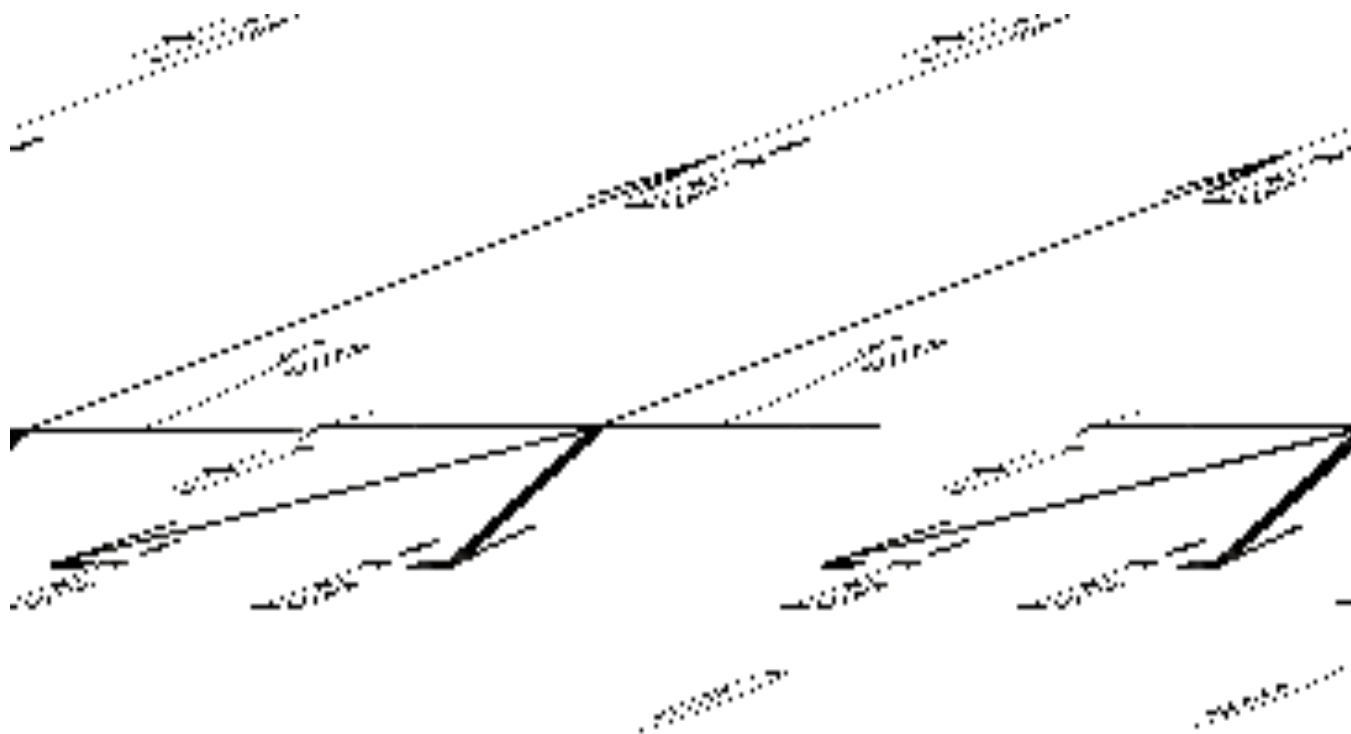
$$\dot{E}_A = E_m e^{j0^\circ} = E_m (1 + j0),$$

$$\dot{E}_B = E_m e^{-j120^\circ} = E_m (-1/2 - j/2),$$

$$\dot{E}_C = E_m e^{+j120^\circ} = E_m (-1/2 + j/2).$$

# Элементы трехфазных цепей

Векторная диаграмма трехфазной симметричной системы ЭДС показана на рис. 4а.



# Элементы трехфазных цепей

На диаграмме рис. 4а вектор  $\dot{E}_A$  направлен вертикально, так как при расчете трехфазных цепей принято направлять вертикально вверх ось действительных величин.

Из векторных диаграмм рис. 4 следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

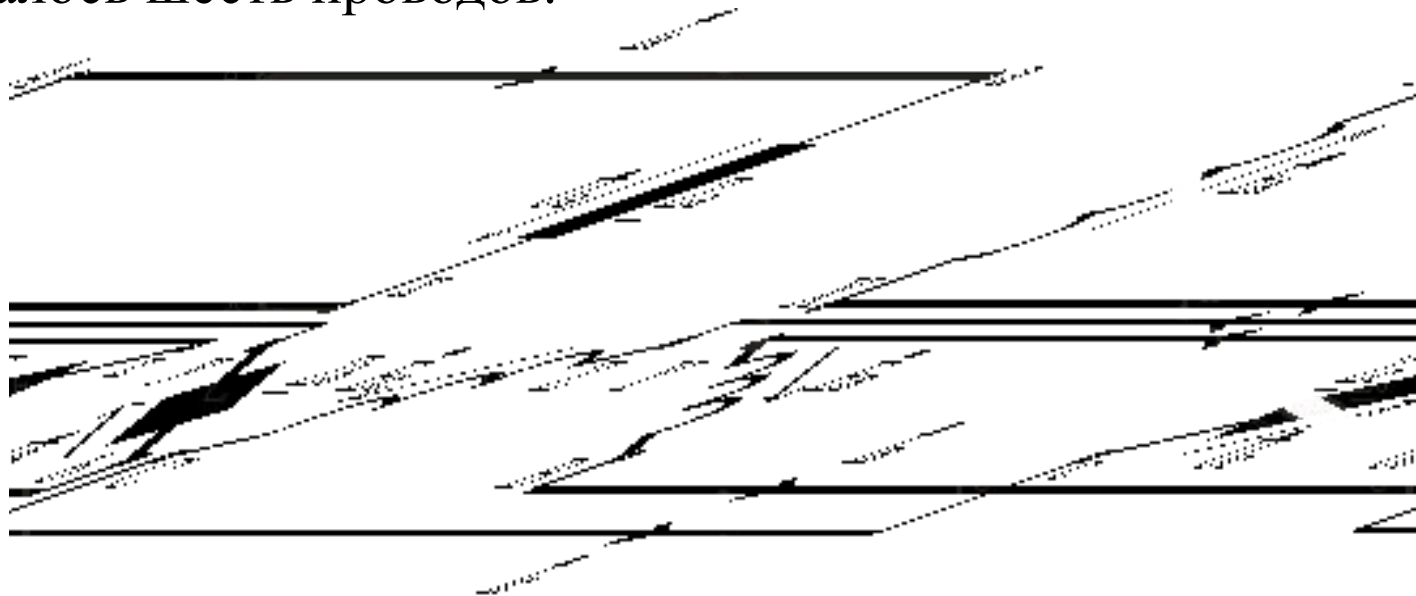
# Элементы трехфазных цепей

Систему ЭДС, в которой ЭДС фазы  $B$  отстает по фазе от ЭДС фазы  $A$ , а ЭДС фазы  $C$  по фазе — от ЭДС фазы  $B$ , называют системой прямой последовательности. Если изменить направление вращения ротора генератора, то последовательность фаз изменится (рис. 3.4б) и будет называться обратной.

Последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей. Для определения последовательности фаз имеются специальные приборы — фазоуказатели.

# Способы соединения фаз обмотки генератора

В период зарождения трехфазных систем имелись попытки использовать несвязанную систему, в которой фазы обмотки генератора не были электрически соединены между собой и каждая фаза соединялась со своим приемником двумя проводами (рис. 3.5). Такие системы не получили применения вследствие их неэкономичности: для соединения генератора с приемником требовалось шесть проводов.

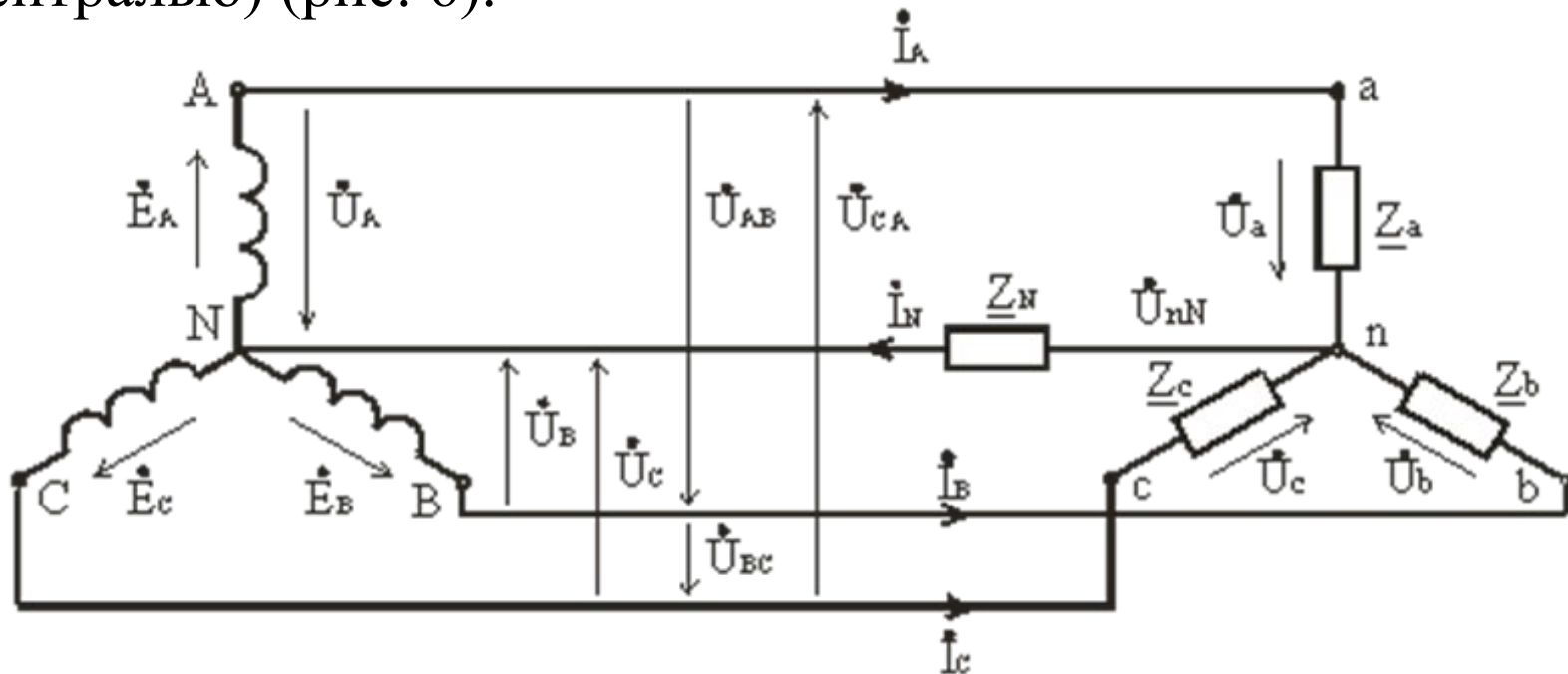


# Способы соединения фаз обмотки генератора

Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения "звезда" и "треугольник". При этом способ соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены "звездой", фазы потребителей соединяются либо "звездой", либо "треугольником".

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

При соединении фаз обмотки генератора (или трансформатора) звездой их концы  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соединяют в одну общую точку  $N$ , называемую нейтральной точкой (или нейтралью) (рис. 6).



# Соединение фаз генератора и приемника звездой

Провода  $A-a$ ,  $B-b$  и  $C-c$ , соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными, провод  $N-n$ , соединяющий точку  $N$  генератора с точкой  $n$  приемника, — нейтральным.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом будет четырехпроводной, без нейтрального провода — трехпроводной.

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

В трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. Фазное напряжение  $U_{\phi}$  — напряжение между началом и концом фазы или между линейным проводом и нейтралью ( $U_A, U_B, U_C$  у источника;  $U_a, U_b, U_c$  у приемника). Если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как и в источнике. ( $U_A = U_a, U_B = U_b, U_C = U_c$ ). За условно положительные направления фазных напряжений принимают направления от начала к концу фаз.

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

Линейное напряжение ( $U_{\text{л}}$ ) – напряжение между линейными проводами или между одноименными выводами разных фаз ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ). Условно положительные направления линейных напряжений приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам соответствующим второму индексу (рис. 6).

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

По аналогии с фазными и линейными напряжениями различают также фазные и линейные токи:

- Фазные ( $I_{\phi}$ ) – это токи в фазах генератора и приемников.
- Линейные ( $I_{\text{л}}$ ) – токи в линейных проводах.

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

При соединении в звезду фазные и линейные токи равны

$$I_{\Phi} = I_{\text{Л}}.$$

Ток, протекающий в нейтральном проводе, обозначают  $I_N$ .

По первому закону Кирхгофа для нейтральной точки  $n$  ( $N$ ) имеем в комплексной форме

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

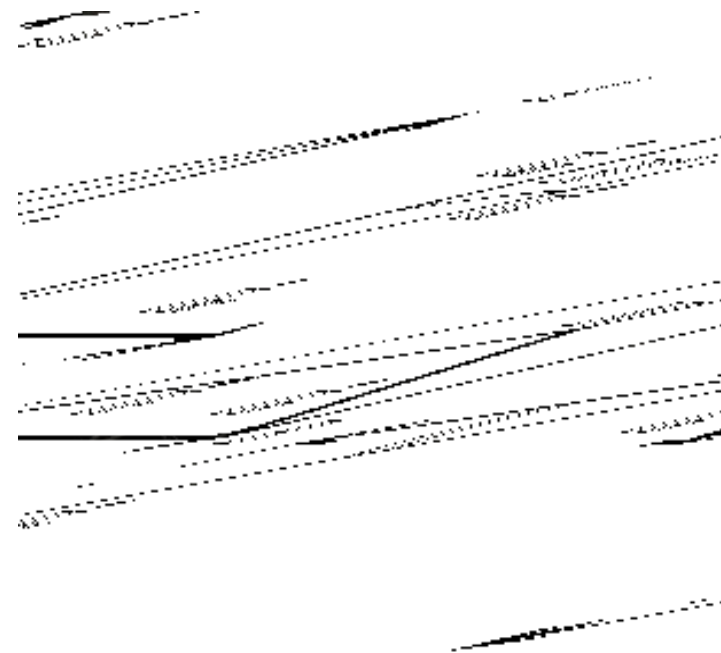
# Соединение фаз генератора и приемника звездой

В соответствии с выбранными условными положительными направлениями фазных и линейных напряжений можно записать уравнения по второму закону Кирхгофа.

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

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

Согласно этим выражениям на рис. 7 построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична:  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$  (общее обозначение  $U_L$ ), и опережают, соответственно, векторы фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  ( $U_\Phi$ ) на угол  $30^\circ$ .



# Соединение фаз генератора и приемника звездой

Действующие значения линейных напряжений можно определить графически по векторной диаграмме или по формуле, которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений:

$$U_{\text{Л}} = 2U_{\text{Ф}} \cos 30^\circ$$

или

$$U_{\text{Л}} = U_{\text{Ф}}.$$

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

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

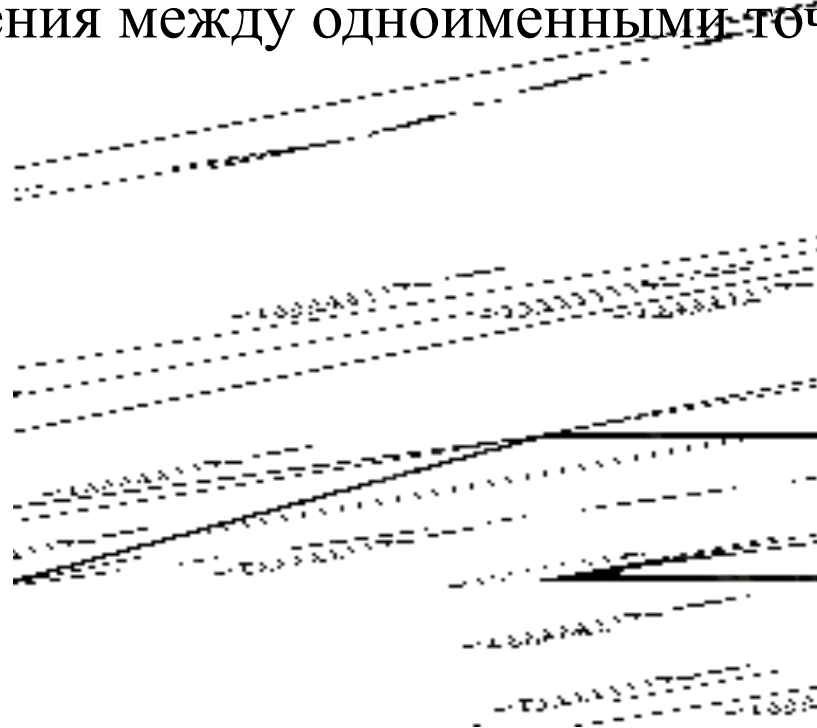
$$U_{\text{Л}}=660\text{В}; U_{\text{Ф}}=380\text{В};$$

$$U_{\text{Л}}=380\text{В}; U_{\text{Ф}}=220\text{В};$$

$$U_{\text{Л}}=220\text{В}; U_{\text{Ф}}=127\text{В}.$$

# Соединение фаз генератора и приемника звездой

Векторную диаграмму удобно выполнить топографической (рис. 8), тогда каждой точке цепи соответствует определенная точка на диаграмме. Вектор, проведенный между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжения между одноименными точками цепи.



# Классификация приемников в трехфазной цепи

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть либо однофазными, либо трехфазными. К однофазным приемникам относятся электрические лампы накаливания и другие осветительные приборы, различные бытовые приборы, однофазные двигатели и т.д. К трехфазным приемникам относятся трехфазные асинхронные двигатели и индукционные печи.

# Классификация приемников в трехфазной цепи

Обычно комплексные сопротивления фаз трехфазных приемников равны между собой:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Z e^{j\varphi}.$$

Такие приемники называют **симметричными**. Если это условие не выполняется, то приемники называют **несимметричными**. При этом, если  $Z_a = Z_b = Z_c$ , то трехфазный приемник называют **равномерным**, если  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ , то **однородным**.

# Четырехпроводная цепь

Для расчета трехфазной цепи применимы все методы, используемые для расчета линейных цепей. Обычно сопротивления проводов и внутреннее сопротивление генератора меньше сопротивлений приемников, поэтому для упрощения расчетов таких цепей (если не требуется большая точность) сопротивления проводов можно не учитывать ( $Z_L = 0$ ,  $Z_N = 0$ ). Тогда фазные напряжения приемника  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$  будут равны соответственно фазным напряжениям источника электрической энергии (генератора или вторичной обмотки трансформатора), т.е.  $U_a = U_A$ ;  $U_b = U_B$ ;  $U_c = U_C$ .

# Четырехпроводная цепь

Если полные комплексные сопротивления фаз приемника равны  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ , то токи в каждой фазе можно определить по формулам

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нейтральном проводе

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

# Симметричная нагрузка приемника

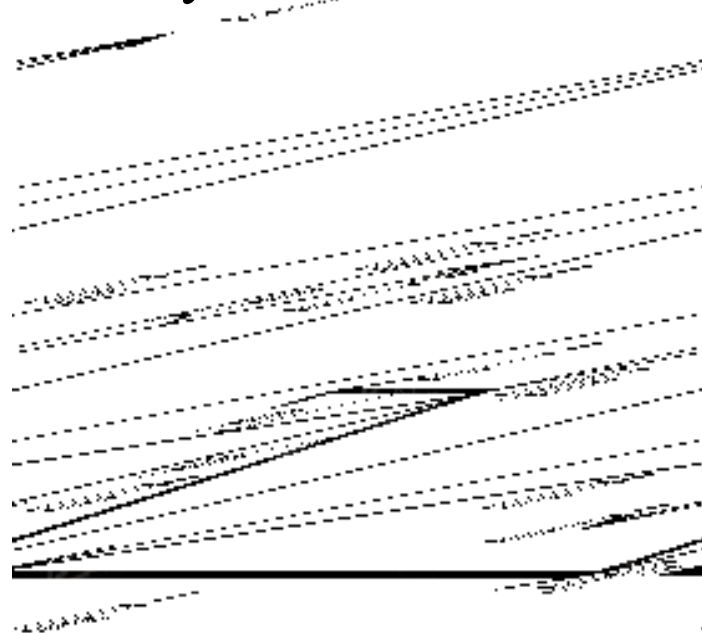
При симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке, когда  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ , т.е. когда  $R_a = R_b = R_c = R_\phi$  и  $X_a = X_b = X_c = X_\phi$ , фазные токи равны по значению и углы сдвига фаз одинаковы

$$I_a = I_b = I_c = I_\phi = U_\phi / Z_\phi,$$

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = \operatorname{arctg} (X_\phi / R_\phi).$$

# Симметричная нагрузка приемника

Построив векторную диаграмму токов для симметричного приемника (рис. 9), легко установить, что геометрическая сумма трех векторов тока равна нулю:  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ . Следовательно, в случае симметричной нагрузки ток в нейтральном проводе  $I_N = 0$ , поэтому необходимость в нейтральном проводе отпадает.



# Несимметричная нагрузка приемника

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда  $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  и  $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$  токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

# Несимметричная нагрузка приемника

При симметричной системе напряжений и несимметричной нагрузке, когда  $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  и  $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$  токи в фазах потребителя различны и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  равен геометрической сумме фазных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

# Несимметричная нагрузка приемника

Напряжения будут  $U_a = U_A$ ;  $U_b = U_B$ ;  $U_c = U_C$ ,  $U_\Phi = U_L / \sqrt{3}$ ,  
благодаря нейтральному проводу при  $Z_N = 0$ .

Следовательно, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные несимметричные нагрузки, например, электрические лампы накаливания. Режим работы каждой фазы нагрузки, находящейся под неизменным фазным напряжением генератора, не будет зависеть от режима работы других фаз.

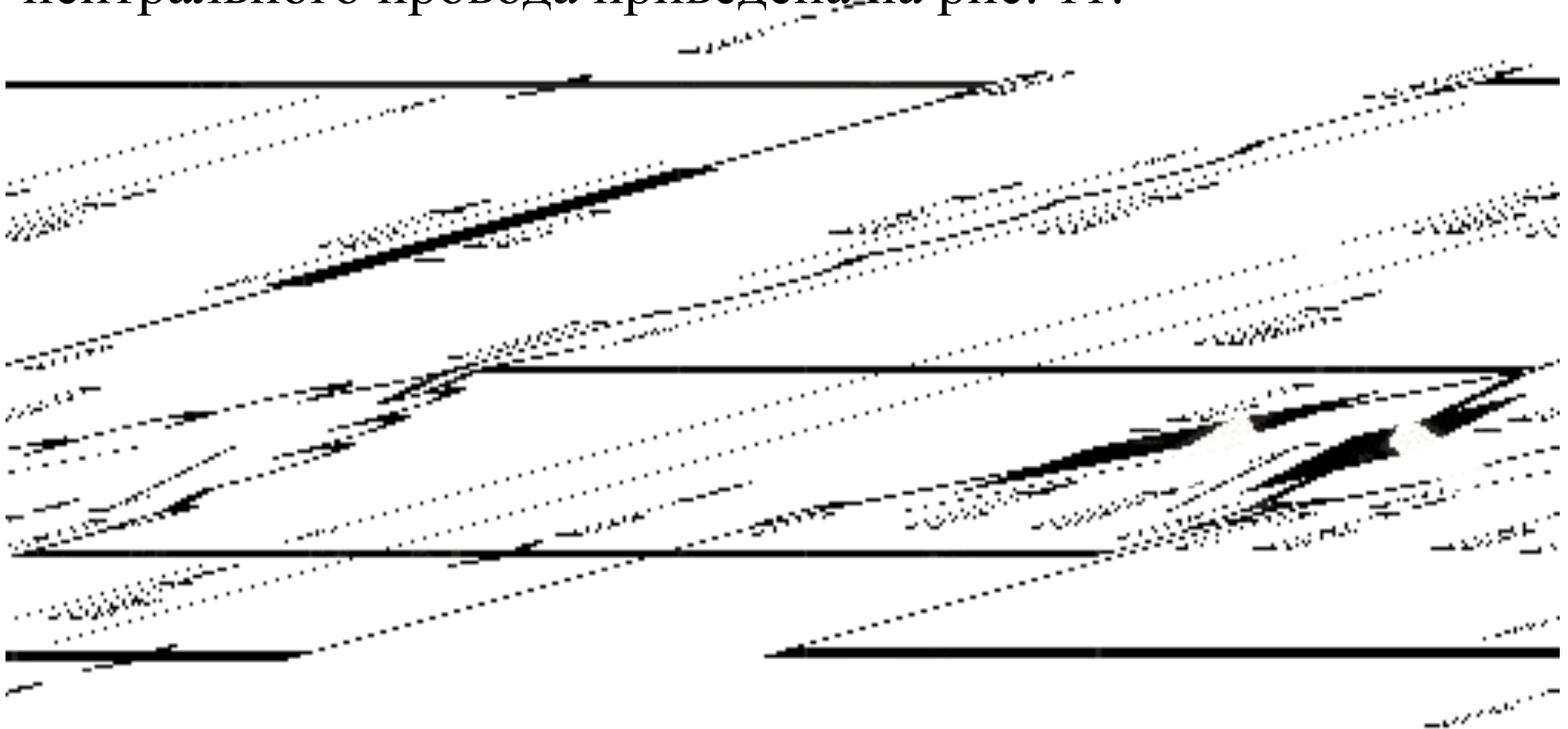
# Несимметричная нагрузка приемника

Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке  
приведена на рис. 10



# Трехпроводная электрическая цепь

Схема соединения источника и приемника звездой без  
нейтрального провода приведена на рис. 11.



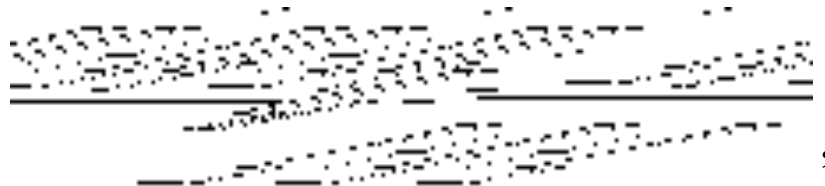
# Трехпроводная электрическая цепь

Соотношение между фазными и линейными напряжениями приемника также равно  $\sqrt{3}$ , т.е.  $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}$ , а токи в фазах определяются по тем же формулам, что и для четырехпроводной цепи. В случае симметричного приемника достаточно определить ток только в одной из фаз. Сдвиг фаз между током и соответствующим напряжением  $\varphi = \arctg (X / R)$ .

# Трехпроводная электрическая цепь

При несимметричной нагрузке  $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$  между нейтральными точками приемника и источника электроэнергии возникает напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ .

Для определения напряжения смещения нейтрали можно воспользоваться формулой межузлового напряжения, так как схема рис 11 представляет собой схему с двумя узлами,



где:  $\underline{Y}_a = 1 / \underline{Z}_a$ ;  $\underline{Y}_b = 1 / \underline{Z}_b$ ;  $\underline{Y}_c = 1 / \underline{Z}_c$  — комплексы проводимостей фаз нагрузки.

# Трехпроводная электрическая цепь

Очевидно, что теперь напряжения на фазах приемника будут отличаться друг от друга. Из второго закона Кирхгофа следует, что

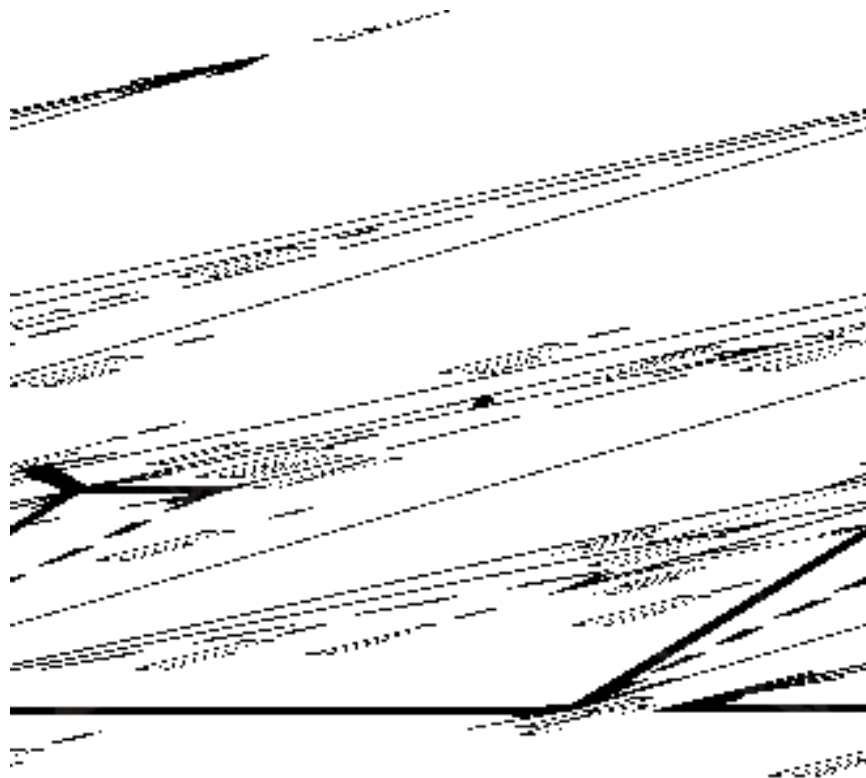
$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.$$

Зная фазные напряжения приемника, можно определить фазные токи:

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a / \underline{Z}_a = \underline{Y}_a \dot{U}_a; \dot{I}_b = \dot{U}_b / \underline{Z}_b = \underline{Y}_b \dot{U}_b; \dot{I}_c = \dot{U}_c / \underline{Z}_c = \underline{Y}_c \dot{U}_c.$$

# Трехпроводная электрическая цепь

Векторы фазных напряжений можно определить графически, построив векторную (топографическую) диаграмму фазных напряжений источника питания и  $U_{nN}$  (рис. 12).



# Трехпроводная электрическая цепь

При изменении величины (или характера) фазных сопротивлений напряжение смещений нейтрали  $U_{nN}$  может изменяться в широких пределах. При этом нейтральная точка приемника  $n$  на диаграмме может занимать разные положения, а фазные напряжения приемника  $\dot{U}_a$ ,  $\dot{U}_b$  и  $\dot{U}_c$  могут отличаться друг от друга весьма существенно.

# Трехпроводная электрическая цепь

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  $\dot{U}_a$ ,  $\dot{U}_b$ ,  $\dot{U}_c$  и смещение ее нейтральной точки  $n$  из центра треугольника напряжений (смещение нейтрали).

# Трехпроводная электрическая цепь

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

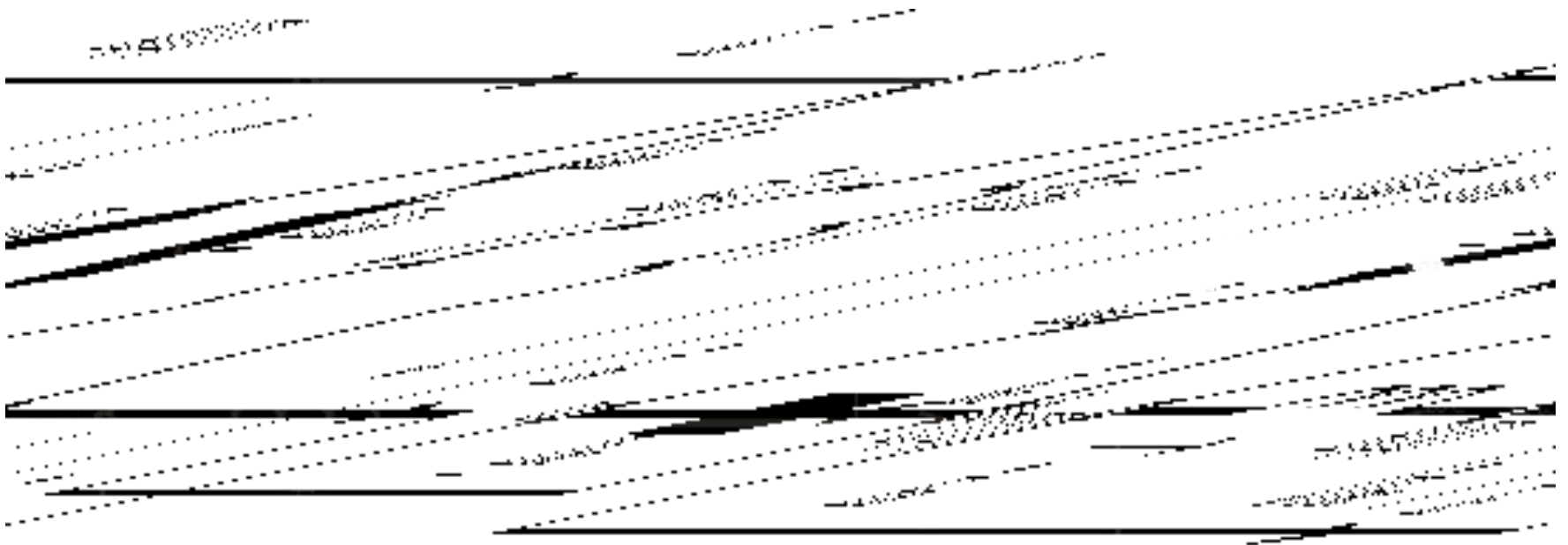
Поэтому нейтральный провод необходим для того, чтобы:

- выравнивать фазные напряжения приемника при несимметричной нагрузке;
- подключать к трехфазной цепи однофазные приемники с номинальным напряжением в раз меньше номинального линейного напряжения сети.

Следует иметь в виду, что в цепь нейтрального провода нельзя ставить предохранитель, так как перегорание предохранителя приведет к разрыву нейтрального провода и появлению значительных перенапряжений на фазах нагрузки.

# Соединение фаз генератора и приемника треугольником

При соединении источника питания треугольником (рис. 13) конец  $X$  одной фазы соединяется с началом  $B$  второй фазы, конец  $Y$  второй фазы — с началом  $C$  третьей фазы, конец третьей фазы  $Z$  — с началом первой фазы  $A$ . Начала  $A$ ,  $B$  и  $C$  фаз подключаются с помощью трех проводов к приемникам.



# Соединение фаз генератора и приемника треугольником

Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

# Соединение фаз генератора и приемника треугольником

Соединение фаз источника в замкнутый треугольник возможно при симметричной системе ЭДС, так как

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Если соединение обмоток треугольником выполнено неправильно, т.е. в одну точку соединены концы или начала двух фаз, то суммарная ЭДС в контуре треугольника отличается от нуля и по обмоткам протекает большой ток. Это аварийный режим для источников питания, и поэтому недопустим.

Напряжение между концом и началом фазы при соединении треугольником — это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению.

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Пренебрегая сопротивлением линейных проводов, линейные напряжения потребителя можно приравнять линейным напряжениям источника питания:  $U_{ab} = U_{AB}$ ,  $U_{bc} = U_{BC}$ ,  $U_{ca} = U_{CA}$ . По фазам  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$ ,  $Z_{ca}$  приемника протекают фазные токи  $\dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_{bc}$  и  $\dot{I}_{ca}$ . Условное положительное направление фазных напряжений  $\dot{U}_{ab}$ ,  $\dot{U}_{bc}$  и  $\dot{U}_{ca}$  совпадает с положительным направлением фазных токов. Условное положительное направление линейных токов  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  принято от источников питания к приемнику.

# Соединение фаз генератора и приемника треугольником

В отличие от соединения звездой при соединении треугольником фазные токи не равны линейным. Токи в фазах приемника определяются по формулам

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи можно определить по фазным, составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов а, b и с (рис 13)

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

# Соединение фаз генератора и приемника треугольником

Сложив левые и правые части системы уравнений, (3.20), получим

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,$$

т.е. сумма комплексов линейных токов равна нулю как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

# Симметричная нагрузка

При симметричной нагрузке

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}e^{j\varphi},$$

$$\text{т.е. } Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z, \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi.$$

# Симметричная нагрузка

Так как линейные (они же фазные) напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  симметричны, то и фазные токи образуют симметричную систему

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

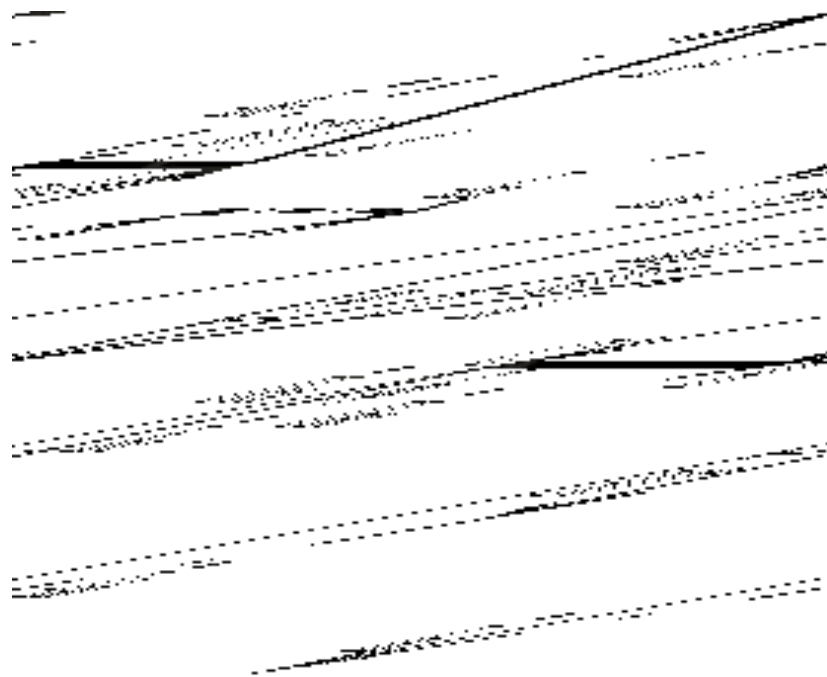
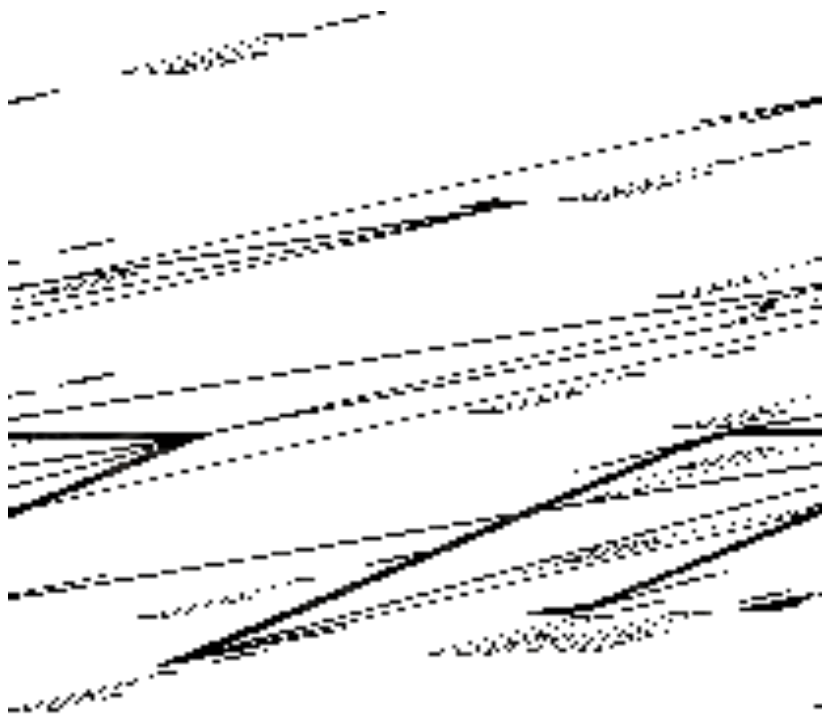
Абсолютные значения их равны, а сдвиги по фазе относительно друг друга составляют  $120^\circ$ .

# Симметричная нагрузка

Линейные токи

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc};$$

образуют также симметричную систему токов (рис.14, 15).



# Симметричная нагрузка

На векторной диаграмме (рис. 15) фазные токи отстают от фазных напряжений на угол  $\varphi$  (полагаем, что фазы приемника являются индуктивными, т.е.  $\varphi > 0^\circ$ ). Здесь принято, что напряжение  $U_{AB}$  имеет нулевую фазу. Из диаграммы следует, что любой линейный ток больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз. Линейный ток  $\dot{I}_A$  отстает по фазе от фазного тока  $\dot{I}_{ab}$  на угол  $30^\circ$ , на этот же угол отстает  $\dot{I}_B$  от  $\dot{I}_{bc}$ ,  $\dot{I}_C$  от  $\dot{I}_{ca}$ .

Таким образом, при соединении треугольником действующее значение линейного тока при симметричной нагрузке в  $\sqrt{3}$  раз больше действующего значения фазного тока и  $U_L = U_\Phi$ ;  $I_L = I_\Phi$ .

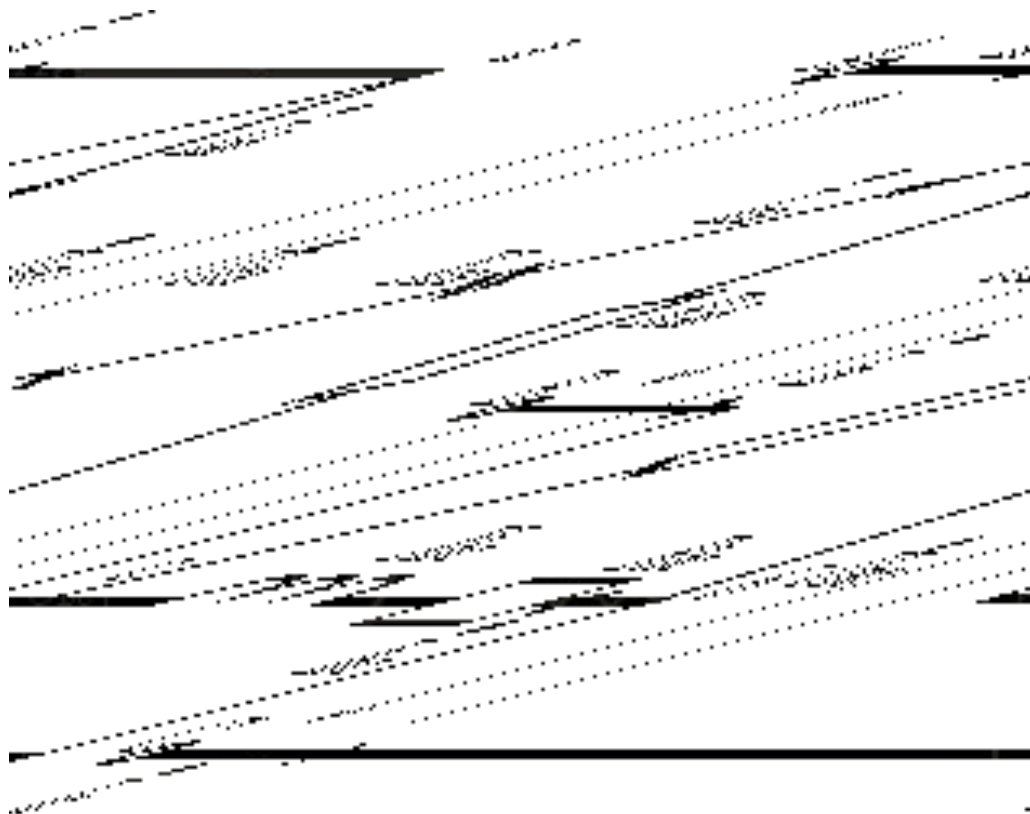
# Симметричная нагрузка

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

Фазное напряжение  $U_{\Phi} = U_{\text{Л}}$ . Фазный ток  $I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi}$ , линейный ток  $I_{\text{Л}} = I_{\Phi}$ , угол сдвига по фазе  $\varphi = \arctg (X_{\Phi} / R_{\Phi})$ .

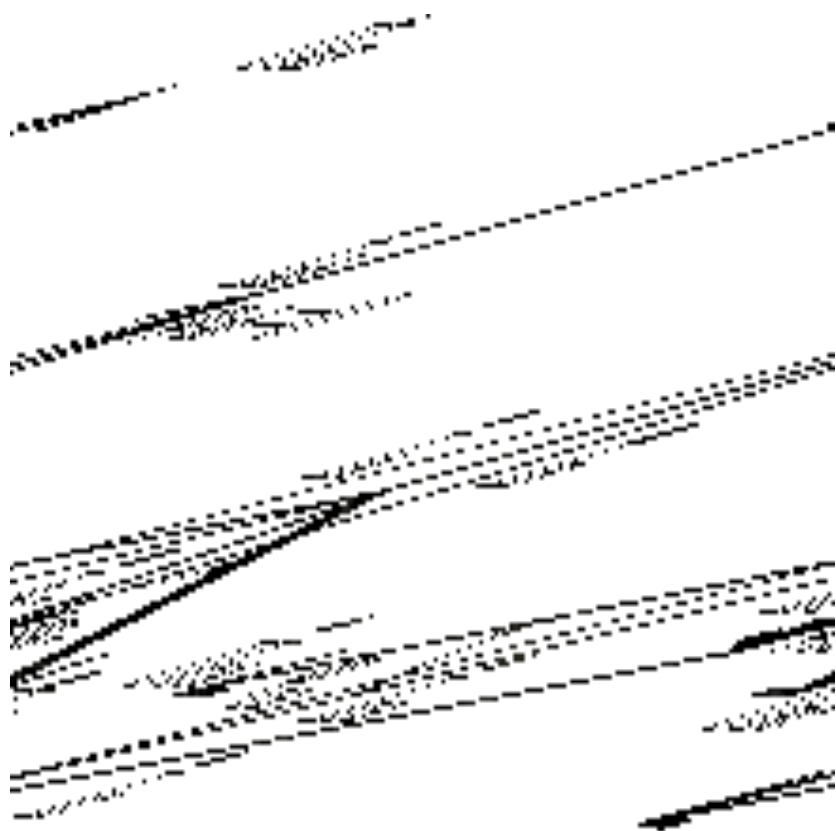
# Несимметричная нагрузка

В общем случае при несимметричной нагрузке  $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ . Обычно она возникает при питании от трехфазной сети однофазных приемников. Например, для нагрузки, рис. 16, фазные токи, углы сдвига фаз и фазные мощности будут в общем случае различными.



# Несимметричная нагрузка

Векторная диаграмма для случая, когда в фазе  $ab$  имеется активная нагрузка, в фазе  $bc$  – активно-индуктивная, а в фазе  $ca$  – активно-емкостная приведена на рис. 3.16, топографическая диаграмма – на рис. 3.17.



# Несимметричная нагрузка

Построение векторов линейных токов произведено в соответствии с выражениями

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Важной особенностью соединения фаз приемника треугольником является то, что при изменении сопротивления одной из фаз режим работы других фаз остается неизменным, так как линейные напряжения генератора являются постоянными. Будет изменяться только ток данной фазы и линейные токи в проводах линии, соединенных с этой фазой. Поэтому схема соединения треугольником широко используется для включения несимметричной нагрузки.

# Несимметричная нагрузка

При расчете для несимметричной нагрузки сначала определяют значения фазных токов  $\dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_{bc}$ ,  $\dot{I}_{ca}$  и соответствующие им сдвиги фаз  $\varphi_{ab}$ ,  $\varphi_{bc}$ ,  $\varphi_{ca}$ . Затем определяют линейные токи в комплексной форме или с помощью векторных диаграмм (рис. 16, 17).

# Мощности трехфазной цепи

В трехфазных цепях, так же как и в однофазных, пользуются понятиями активной, реактивной и полной мощностей.

## Соединение потребителей звездой

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_a + P_b + P_c,$$

где

$$P_a = U_a I_a \cos \varphi_a; P_b = U_b I_b \cos \varphi_b; P_c = U_c I_c \cos \varphi_c;$$

$U_a, U_b, U_c; I_a, I_b, I_c$  – фазные напряжения и токи;

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  – углы сдвига фаз между напряжением и током.

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей звездой

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c,$$

где

$$Q_a = U_a I_a \sin \varphi_a;$$

$$Q_b = U_b I_b \sin \varphi_b;$$

$$Q_c = U_c I_c \sin \varphi_c.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей звездой

Полная мощность отдельных фаз

$$S_a = U_a I_a; S_b = U_b I_b; S_c = U_c I_c.$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S = \overline{S_a + S_b + S_c}.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей звездой

При симметричной системе напряжений ( $U_a = U_b = U_c = U_\Phi$ ) и симметричной нагрузке ( $I_a = I_b = I_c = I_\Phi$ ;  $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$ ) фазные мощности равны  $P_a = P_b = P_c = P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi$ ;  $Q_a = Q_b = Q_c = Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi$ .

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3 P_\Phi = 3 U_\Phi I_\Phi \cos \varphi.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей звездой

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3 Q_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

Отсюда следует, что в трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и симметричной нагрузке достаточно измерить мощность одной фазы и утроить результат.

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

В общем случае несимметричной нагрузки активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей отдельных фаз

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca},$$

где

$$P_{ab} = U_{ab} I_{ab} \cos \varphi_{ab};$$

$$P_{bc} = U_{bc} I_{bc} \cos \varphi_{bc};$$

$$P_{ca} = U_{ca} I_{ca} \cos \varphi_{ca};$$

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}; I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  – фазные напряжения и токи;

$\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$  – углы сдвига фаз между напряжением и током.

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

Реактивная мощность соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca},$$

где

$$Q_{ab} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab};$$

$$Q_{bc} = U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc};$$

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

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

Полная мощность отдельных фаз

$$S_{ab} = U_{ab} I_{ab};$$

$$S_{bc} = U_{bc} I_{bc};$$

$$S_{ca} = U_{ca} I_{ca}.$$

Полная мощность трехфазного приемника

$$S_{\Sigma} = S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

При симметричной системе напряжений

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_{\Phi}$$

и симметричной нагрузке

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\Phi}; \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi$$

фазные мощности равны

$$P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi;$$
$$Q_{ab} = Q_{bc} = Q_{ca} = Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

Активная мощность симметричного трехфазного приемника

$$P = 3 P_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi.$$

Аналогично выражается и реактивная мощность

$$Q = 3 Q_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = 3 S_{\Phi} = 3 U_{\Phi} I_{\Phi}.$$

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины  $U_L$  и  $I_L$ .

При соединении фаз симметричного приемника звездой  $U_{\text{ф}} = U_L / \sqrt{3}$ ,  $I_{\text{ф}} = I_L$ , при соединении треугольником  $U_{\text{ф}} = U_L$ ,  $I_{\text{ф}} = I_L / \sqrt{3}$ . Поэтому независимо от схемы соединения фаз приемника активная мощность при симметричной нагрузке определяется одной и той же формулой

$$P = U_L I_L \cos \varphi.$$

где  $U_L$  и  $I_L$  – линейное напряжение и ток;  $\cos \varphi$  – фазный.

# Мощности трехфазной цепи

## Соединение потребителей треугольником

Обычно индексы "л" и "ф" не указывают и формула принимает вид

$$P = U I \cos \varphi.$$

Соответственно реактивная мощность

$$Q = U I \sin \varphi.$$

и полная мощность

$$S = U I.$$

При этом надо помнить, что угол  $\varphi$  является углом сдвига фаз между фазными напряжением и током, и, что при неизмененном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник его мощность увеличивается в три раза:

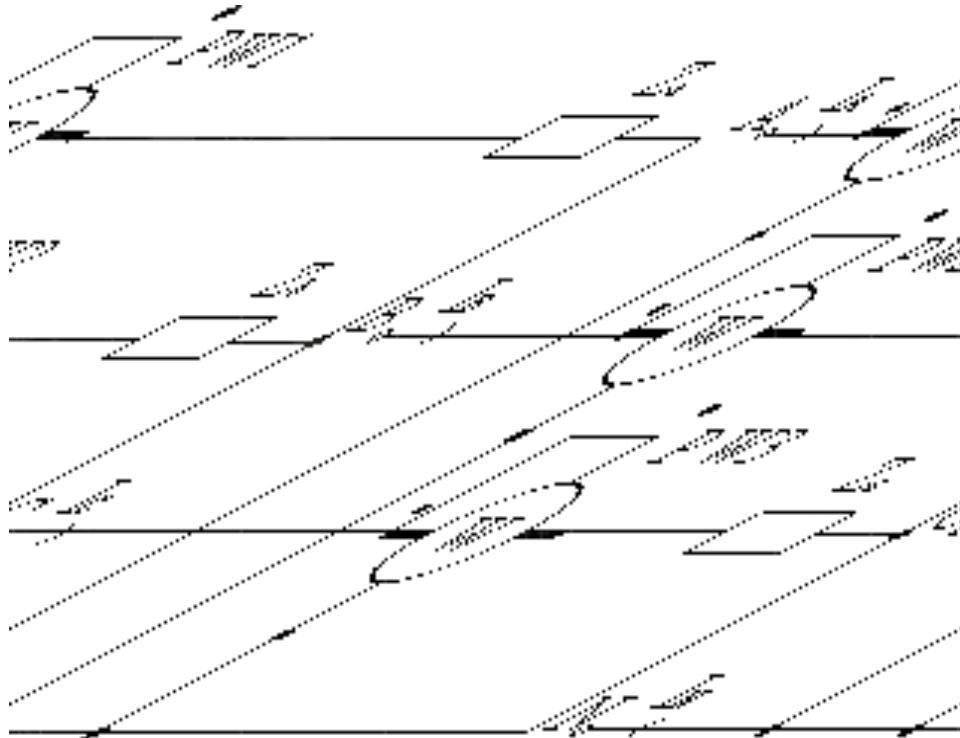
$$\Delta P = Y 3P.$$

# 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.

# Измерение активной мощности в трехфазных цепях

При несимметричной нагрузке в четырехпроводной цепи активную мощность измеряют тремя ваттметрами (рис. 19), каждый из которых измеряет мощность одной фазы – фазную мощность.



# Измерение активной мощности в трехфазных цепях

Активная мощность приемника определяют по сумме показаний трех ваттметров

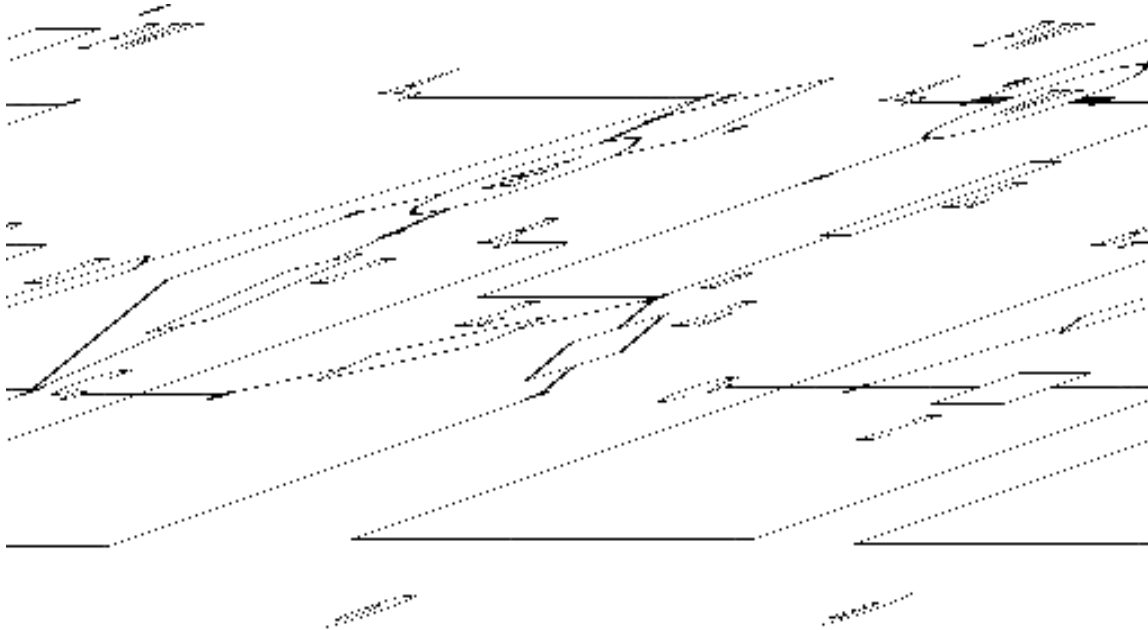
$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

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

Измерение мощности тремя ваттметрами возможно при любых условиях.

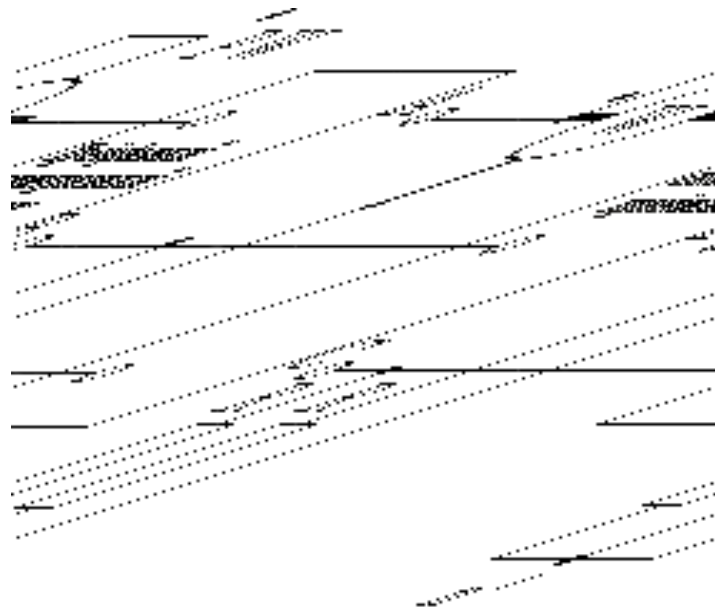
# Измерение активной мощности в трехфазных цепях

При симметричном приемнике и доступной нейтральной точке активную мощность приемника определяют с помощью одного ваттметра, измеряя активную мощность одной фазы  $P_{\Phi}$  по схеме рис. 20. Активная мощность всего трехфазного приемника равна при этом утроенному показанию ваттметра:  $P = 3 P_{\Phi}$ .



# Измерение активной мощности в трехфазных цепях

На рис. 20 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. 21 с использованием искусственной нейтральной точки  $n'$ .



# Измерение активной мощности в трехфазных цепях

В этой схеме дополнительно в две фазы включают резисторы с сопротивлением  $R = R_V$ .

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