

Тема лекции ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Трехфазные цепи. Способы получения трехфазного тока, характеристики, включение приемников.

Соединение звездой, симметричный и несимметричный режимы работы. Векторные диаграммы.

Соединение треугольником, симметричный и несимметричный режимы работы. Векторные диаграммы.

Измерение мощности в 3х фазных цепях.

Мощность генерирующих и приемных устройств. Измерения мощности.

Понятие о многофазных цепях и системах

Многофазная цепь — это цепь, содержащая несколько синусоидальных ЭДС, которые могут различаться частотой, амплитудой и фазой.

В энергетике наибольшее распространение получили именно трехфазные цепи благодаря высокой экономичности и техническому совершенству. (русский учёный М.О. Доливо-Добровольский теоретически и практически обосновал работу таких систем)

Преимущества трехфазной системы:

1. Экономичность производства, т.к. в одной системе генерируют сразу три источника ЭДС.
2. Просто получить два различных рабочих напряжения — фазное и линейное.
3. Можно получить вращающееся магнитное поле, требуемое для работы электродвигателей (широкое распространение получили асинхронные двигатели).

На рис. 1 схематично показано устройство генератора переменного тока с тремя обмотками на статоре. Для упрощения каждая обмотка показана состоящей только из двух проводов, заложенных в диаметрально противоположные пазы статора. Эти провода на заднем торце статора соединены друг с другом. На переднем торце статора они оканчиваются зажимами А, Х, Y, С, Z, которые служат для подсоединения внешней цепи.

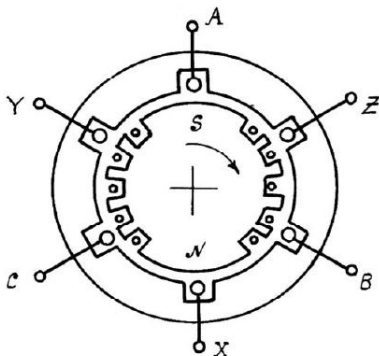


рис.1

Наводимые в обмотках э.д.с. максимальны, когда ось полюсов ротора пересекает проводники статора. Для разных обмоток это происходит в различные моменты времени. Поэтому наводимые э.д.с. не совпадают по фазе. Каждая из обмоток статора расположена в пространстве под углом 120° относительно двух других обмоток (по ходу либо против хода часовой стрелки). Поэтому и наводимые на обмотках э.д.с. сдвинуты на 120° , как показано на рис. 2 (эти э.д.с. обозначены e_A, e_B, e_C).

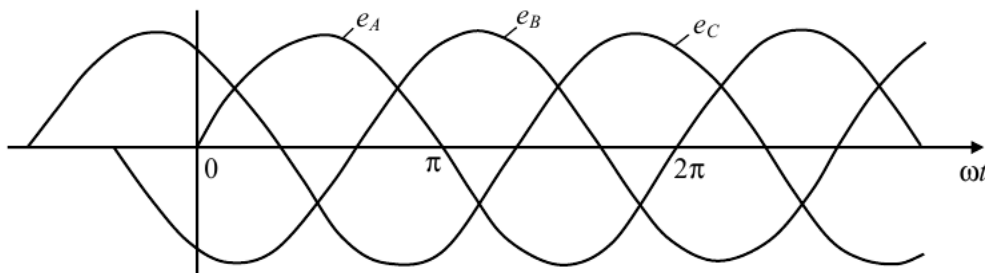


рис.2

Система трех э.д.с. одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых на 120° (или, что то же самое, на одну треть периода) друг относительно друга, называется *трехфазной системой*. Совокупность электрических цепей с трехфазными источниками питания называется *трехфазной системой электрических цепей*. Отдельные ее части называются *фазами*, например отдельные обмотки генератора называют фазными обмотками или, кратко, фазами генератора. Таким образом, в электротехнике термин «фаза» имеет два различных значения: он является, с одной стороны, понятием, характеризующим стадию периодического процесса, и, с другой стороны, наименованием составной части трехфазной системы электрических цепей.

Выводам фазных обмоток генераторов дают наименования «начало» и «конец». «Начала» обозначают первыми буквами латинского алфавита (А, В и С), а «концы» — последними буквами (Х, Y и Z). При разметке руководствуются следующим условием: при одинаковых положительных направлениях э.д.с. во всех обмотках от концов к началам (или наоборот) э.д.с. должны быть сдвинуты по фазе относительно друг друга симметрично:

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

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

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

Порядок, в котором э.д.с. в фазных обмотках генератора проходят через одинаковые значения, например через положительные максимумы, называют *последовательностью фаз* или *порядком чередования фаз*.

При указанном на рис. 1 направлении вращения ротора получаем последовательность фаз АВСА и т.д. Такая последовательность называется *пря-*

мой. Если изменить направление вращения ротора на противоположное, то последовательность фаз получится *обратной*.

Существуют различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. Самым неэкономичным способом явилось бы соединение каждой обмотки генератора с нагрузкой двумя проводами, на что потребовалось бы шесть соединительных проводов. В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют *в звезду* или *треугольник*. Аналогично соединяют и нагрузку. Число соединительных проводов при этом уменьшается с шести до четырех или трех.

На электрической схеме трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных друг к другу под углом 120° . При соединении звездой одноименные зажимы (например, «концы») трех обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора 0. Обмотки генератора обозначают буквами А, В, С и ставят их у «начала» обмоток. Схема соединения обмоток генератора звездой приведена на рис.3, а и соответствующая ей векторная диаграмма — на рис.3, б.

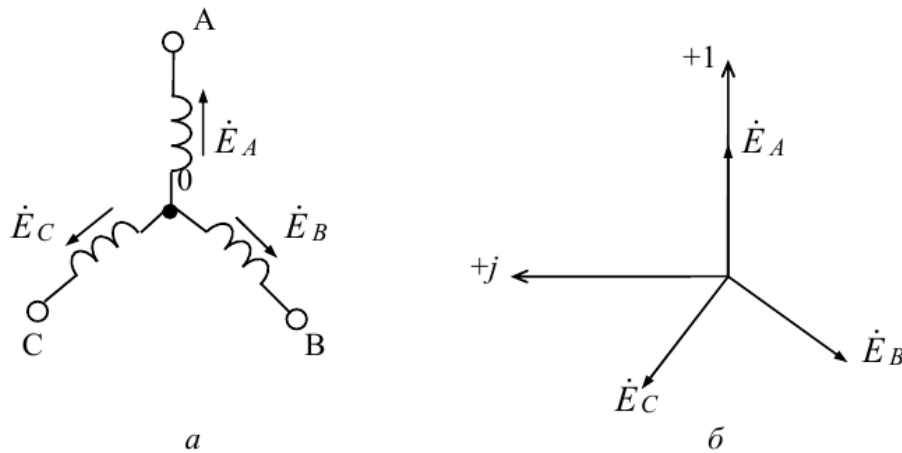


рис.3

Соединение обмоток генератора треугольником показано на рис. 4, а. Здесь конец первой обмотки генератора соединен с началом второй и т.д. Из векторной диаграммы э.д.с, приведенной на рис. 90, б, видно, что геометрическая сумма э.д.с. в замкнутом треугольнике равна нулю. Поэтому если к зажимам А, В, С не присоединена нагрузка, то по обмоткам генератора не будет протекать ток.

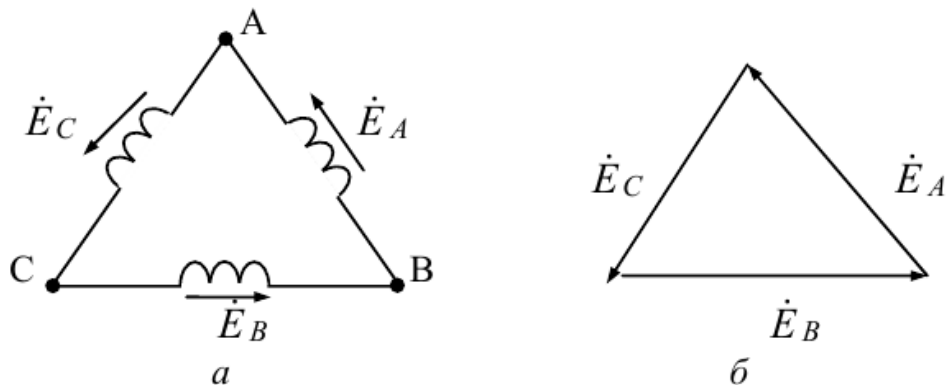


рис. 4

На рис. 4, б оси координат не показаны, но так как э.д.с. фазы А имеет нулевую начальную фазу, то можно мысленно представить, что ось + 1 совпадает с направлением вектора \dot{E}_A .

Пять простейших способов соединения трехфазного генератора с трехфазной нагрузкой изображены на рис. 5 — 6. Из этих рисунков видно, что схемы соединения обмоток генератора и нагрузок не зависят друг от друга.

Схема соединения звезда-звезда с нулевым проводом

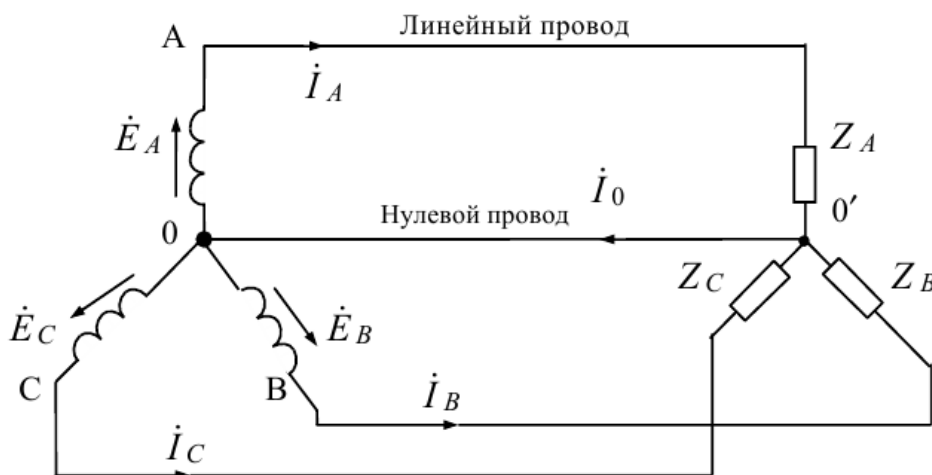


рис.5

Схема соединения звезда-звезда без нулевого провода

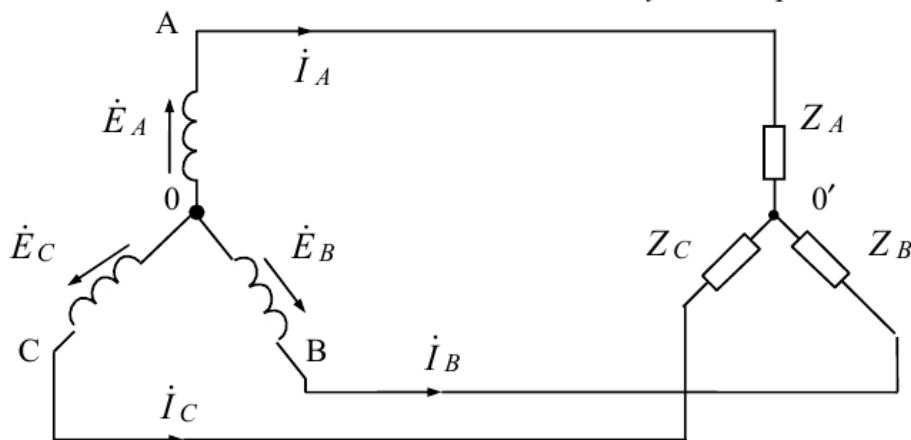


рис.6

Схема соединения звезда-треугольник

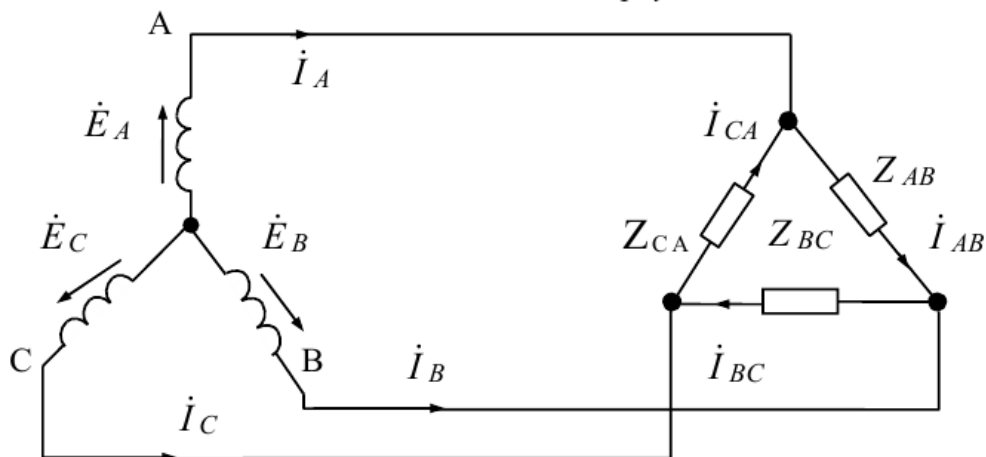


рис. 7

Схема соединения треугольник-треугольник

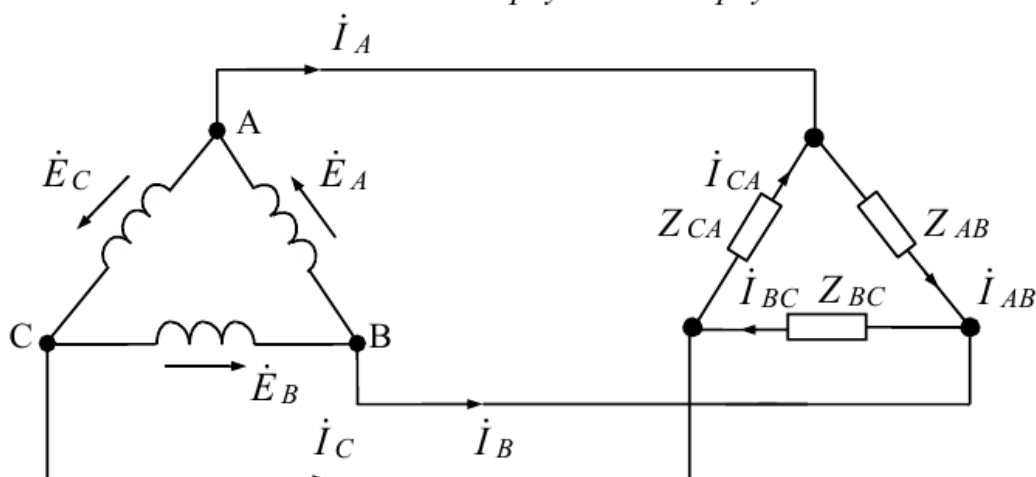


рис. 8

Схема соединения треугольник-звезда

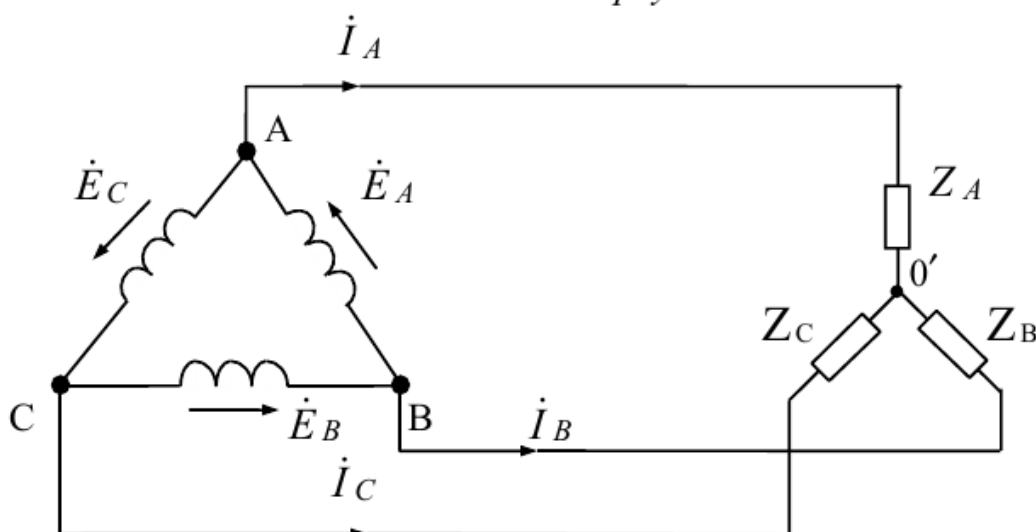


рис. 9

Точку, в которой объединены три вывода трехфазной нагрузки при соединении ее звездой, называют *нулевой точкой нагрузки* и обозначают O' . *Нулевым проводом* называют провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки. Ток нулевого провода обозначим I_0 . Положительное направление этого тока выберем от точки O' к точке O (см. рис. 5).

Провода, соединяющие точки A, B, C генератора с нагрузкой, называют *линейными*. Протекающие по ним токи так же называют *линейными* и обозначают I_A, I_B, I_C . Условимся за положительное направление линейных токов принимать направление от генератора к нагрузке. Модули линейных токов часто обозначают I_L (не указав никакого дополнительного индекса), особенно тогда, когда все линейные токи по модулю одинаковы.

Напряжение между линейными проводами называют линейным и часто снабжают двумя индексами, например U_{AB} ; модуль линейного напряжения обозначают $U_{\text{л}}$.

Протекающие по фазам генератора или нагрузки токи называют фазными токами генератора $I_{\text{ф}}$ или соответственно нагрузки, а напряжения на них — фазными напряжениями $U_{\text{ф}}$.

При соединении обмоток генератора в звезду (см. рис. 5—7) линейное напряжение по модулю в $\sqrt{3}$ раза больше фазного напряжения генератора. Это следует из векторной диаграммы фазных и линейных напряжений, представленной на рис. 10. Модуль линейного напряжения $U_{\text{л}}$ есть основание равнобедренного треугольника с острыми углами по 30° , следовательно.

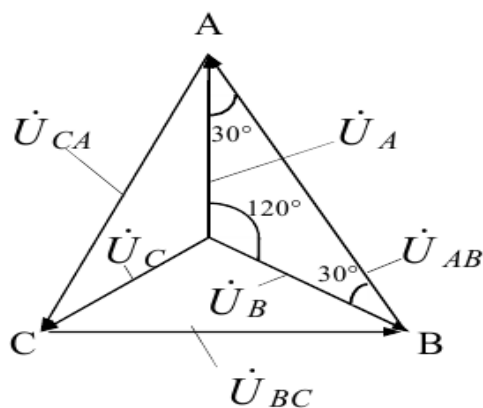


рис. 10

$$U_{\text{л}} = U_{AB} = U_{\text{ф}} 2 \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_{\text{ф}}.$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_{\text{л}} e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_{\text{л}} e^{j150^\circ}.$$

Линейный ток при соединении генератора в звезду равен фазному току генератора. При соединении генератора в треугольник линейное напряжение равно фазному напряжению генератора (см. рис. 8, 9).

При соединении нагрузки треугольником положительные направления для токов выбирают по часовой стрелке. Индексы у токов соответствуют выбранным для них положительным направлениям: первый индекс отвечает точке, от которой ток утекает, второй — точке, к которой ток притекает. Линейные токи здесь не равны фазным токам нагрузки и определяются через них по первому закону Кирхгофа (см. рис. 7, 8):

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

В широком смысле трехфазная цепь состоит из трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки (нагрузок) и соединительных проводов.

Фазой называют участок цепи, по которому протекает один и тот же ток. Токи отдельных участков трехфазных цепей сдвинуты относительно друг друга по фазе.

В *трехфазной симметричной системе ЭДС* три ЭДС одинаковой частоты ω и амплитуды E_m сдвинуты по фазе на $2\pi/3$:

В комплексной форме система ЭДС прямой последовательности

$\underline{E}_A = E_m e^{j0}$; $\underline{E}_B = E_m e^{-j\frac{2\pi}{3}}$; $\underline{E}_C = E_m e^{j\frac{2\pi}{3}}$. Можно выразить ЭДС фаз через оператор фазы $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$:
 $\underline{E}_A = E_m$; $\underline{E}_B = a^2 \underline{E}_A$; $\underline{E}_C = a \underline{E}_A$.
 При этом $a^3 = 1$; $1 + a + a^2 = 0$. В случае прямой или обратной последовательности $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$.

Нагрузка трехфазной цепи симметрична, если сопротивления ее фаз одинаковы, и несимметрична при разных сопротивлениях.

Ещё раз вспомним. Схему соединения цепи (рис. 11) называют звезда — звезда с нулевым проводом.

Точку, в которой объединены три конца трехфазного генератора (N) или нагрузки (n) при соединении звездой, называют *нулевой точкой*. *Нулевой провод* соединяет нулевые точки генератора и нагрузки. Ток нулевого

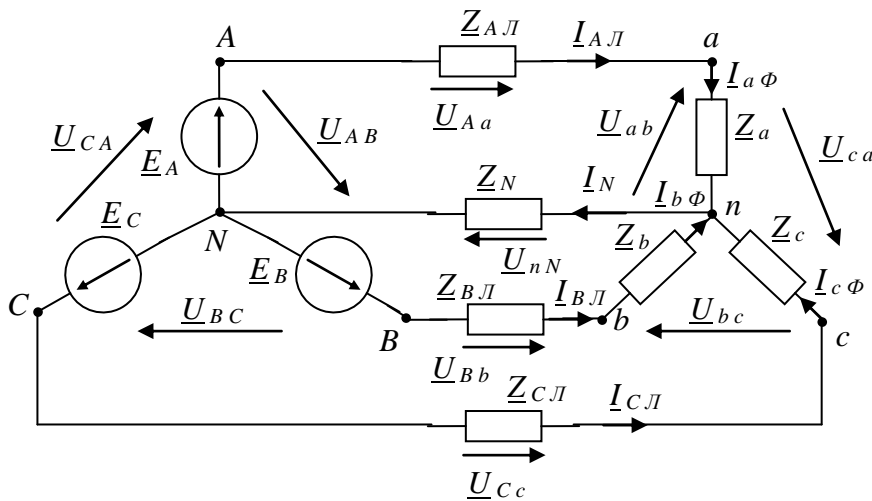


Рис. 11

провода обозначим \underline{I}_N , а его направление от n к N будем считать положительным.

Текущие по *линейным проводам* (Aa , Bb , Cc) токи будем называть *линейными* и обозначим $\underline{I}_{AЛ}$, $\underline{I}_{BЛ}$, $\underline{I}_{CЛ}$, считая направление от генератора к нагрузке положительным. *Линейным напряжением* называют напряжение между проводами, например \underline{U}_{AB} .

Фаза генератора — это каждая из трех обмоток генератора, *фаза нагрузки* — каждая из трех нагрузок. Им соответствуют фазовые токи \underline{I}_Φ , например $\underline{I}_{a\Phi}$, и напряжения \underline{U}_Φ , например \underline{U}_{ab} .

Симметричный режим трехфазной цепи

Трехфазная цепь с симметричной нагрузкой, соединенной звездой. При соединении звезда — звезда с нулевым проводом (рис. 11) линейные токи равны фазовым токам нагрузки:

$$\underline{I}_{AЛ} = \underline{I}_{aФ}; \quad \underline{I}_{BЛ} = \underline{I}_{bФ}; \quad \underline{I}_{CЛ} = \underline{I}_{cФ}.$$

По первому закону Кирхгофа ток в нулевом проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_{AЛ} + \underline{I}_{BЛ} + \underline{I}_{CЛ} = \underline{I}_{aФ} + \underline{I}_{bФ} + \underline{I}_{cФ}.$$

Так как в симметричном режиме потенциалы нулевых точек генератора и нагрузки одинаковы, то можно рассчитывать токи отдельно для каждой фазы:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_{AЛ} + \underline{Z}_a}; \quad \underline{I}_B = a^2 \underline{I}_A; \quad \underline{I}_C = a \underline{I}_A.$$

Фазовые напряжения нагрузки

$$\underline{U}_{an} = \underline{I}_A \underline{Z}_a; \quad \underline{U}_{bn} = a^2 \underline{U}_{an}; \quad \underline{U}_{cn} = a \underline{U}_{an}.$$

По второму закону Кирхгофа линейные напряжения в нагрузочных контурах

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{an} - \underline{U}_{bn} = -a^2 \underline{U}_{an} = \left(1 + 0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \underline{U}_{an} =$$

$$= \sqrt{3} \underline{U}_{an} e^{j \frac{\pi}{6}}; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{bn} - \underline{U}_{cn}; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{cn} - \underline{U}_{an}.$$

Линейные напряжения на стороне генератора

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{BN}; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{BN} - \underline{U}_{CN}; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{CN} - \underline{U}_{AN}.$$

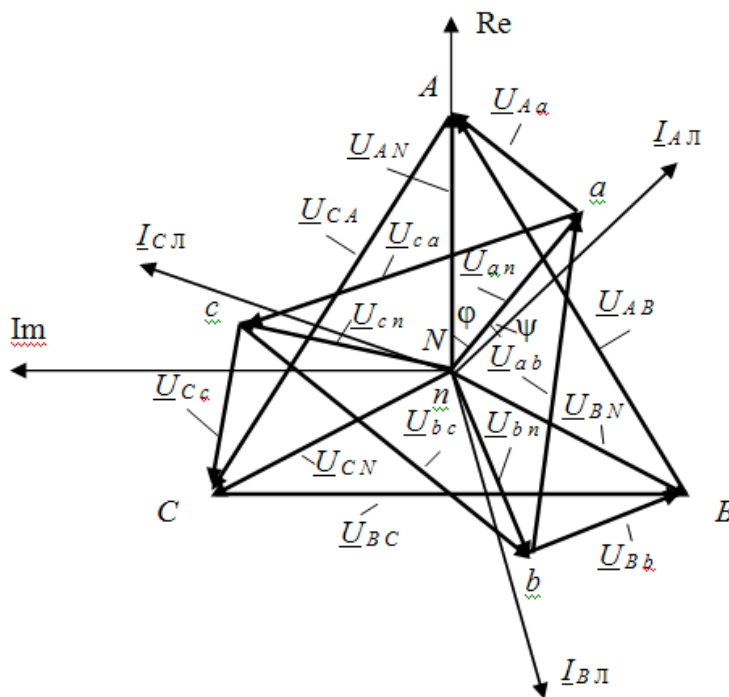


рис. 12

При построении векторной диаграммы (рис. 12) для схемы (рис. 11) векторы на комплексной плоскости располагают в следующей последовательности: $\underline{U}_{AN}, \underline{U}_{BN}, \underline{U}_{CN}, \underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}, \underline{I}_{AЛ}, \underline{I}_{BЛ}, \underline{I}_{CЛ}, \underline{U}_{an}, \underline{U}_{bn}, \underline{U}_{cn}, \underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}, \underline{U}_{Aa}, \underline{U}_{Bb}, \underline{U}_{Cc}$. Углы сдвига фаз φ и ψ определяют через активные ($R_{Л}, R_{Н}$) и реактивные ($X_{Л}, X_{Н}$) сопротивления линии и нагрузки соответственно:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L + X_H}{R_L + R_H}; \quad \psi = \arctg \frac{X_H}{R_H}.$$

Трехфазная цепь с симметричной нагрузкой, соединенной треугольником.

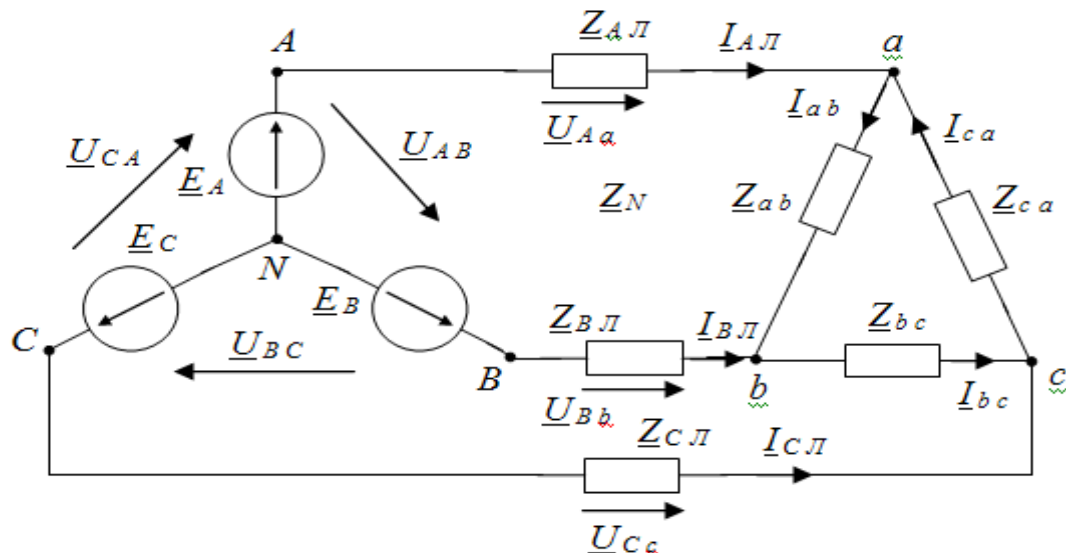


рис. 13

Рассмотрим случай, когда сопротивлением линейных проводов можно пренебречь ($Z_{AЛ} = Z_{BЛ} = Z_{CЛ} = 0$). При этом линейные напряжения генератора равны соответствующим линейным напряжениям нагрузки: $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc}$, $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca}$ (рис. 13).

Токи в схеме (рис. 13) могут быть вычислены по формулам:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = a^2 \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_{ca} = a \underline{I}_{ab}; \\ \underline{I}_{AЛ} &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_{BЛ} = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_{CЛ} = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \end{aligned} \quad (1)$$

При равномерной нагрузке

$$\underline{I}_{AЛ} = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = \left(1 + 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \underline{I}_{ab} = \sqrt{3} \underline{I}_{ab} e^{-j \frac{\pi}{6}},$$

$\underline{I}_{BЛ}$ и $\underline{I}_{CЛ}$ можно вычислить по формулам.

Несимметричный режим трехфазной цепи

Трехфазная цепь с несимметричной нагрузкой, соединенной звездой. В трехфазной цепи (рис. 8.2), если нагрузка несимметрична и есть нулевой провод ($\underline{Z}_N \neq 0$), то ток $\underline{I}_N \neq 0$ и напряжение $\underline{U}_{nN} \neq 0$. По методу узловых напряжений напряжение смещения нейтрали

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (2)$$

где

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_{AЛ} + \underline{Z}_a}; \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_{BЛ} + \underline{Z}_b}; \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_{CЛ} + \underline{Z}_c}; \quad \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}.$$

Если нулевой провод отсутствует, то $\underline{Y}_N = 0$.

Линейные токи, равные фазовым, могут быть выражены через \underline{U}_{nN} :

$$\begin{aligned} \underline{I}_{AЛ} = \underline{I}_{aФ} &= \underline{E}_A - \underline{U}_{nN} \underline{Y}_A; & \underline{I}_{BЛ} = \underline{I}_{bФ} &= \underline{E}_B - \underline{U}_{nN} \underline{Y}_B; \\ \underline{I}_{CЛ} = \underline{I}_{cФ} &= \underline{E}_C - \underline{U}_{nN} \underline{Y}_C. \end{aligned} \quad (3)$$

Ток нулевого провода

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad \text{или} \quad \underline{I}_N = \underline{U}_{nN} \underline{Y}_N.$$

Фазовые напряжения на стороне нагрузки

$$\underline{U}_{an} = \underline{I}_{aФ} \underline{Z}_a; \quad \underline{U}_{bn} = \underline{I}_{bФ} \underline{Z}_b; \quad \underline{U}_{cn} = \underline{I}_{cФ} \underline{Z}_c.$$

Линейные напряжения

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{an} - \underline{U}_{bn}; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{bn} - \underline{U}_{cn}; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{cn} - \underline{U}_{an}.$$

Трехфазная цепь с несимметричной нагрузкой, соединенной треугольником.

Если в схеме цепи (рис. 13) нагрузка несимметрична или не выполняется условие равенства линейных сопротивлений, то для расчета цепи можно применить эквивалентное преобразование треугольника в звезду. Сопротивления эквивалентной звезды в схеме, имеющей после преобразования вид схемы рис. 11:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; & \underline{Z}_b &= \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \\ \underline{Z}_c &= \frac{\underline{Z}_{bc} \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \end{aligned}$$

Далее расчет ведется по формулам (2) и (3). Токи в фазах нагрузки можно найти из уравнений (1).

Пример 1. В схеме цепи (рис. 14) с симметричной системой фазовых напряжений ($U_\Phi = 220$ В) симметричная нагрузка соединена звездой сопротивлений $\underline{Z} = 3 + j4$ Ом, несимметричная нагрузка соединена треугольником сопротивлений $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 50$ Ом, $R_3 = 100$ Ом. Сопротивление линейных проводов $\underline{Z}_Л = 3 + j3$ Ом. Определить линейные токи $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$.

Решение. Преобразуем симметричную звезду нагрузки в треугольник сопротивлений

$$\underline{Z}_\Delta = 3\underline{Z} = 9 + j12 = 15e^{j53,1^\circ} \text{ Ом.}$$

Сопротивления параллельно включенных пар сторон треугольника

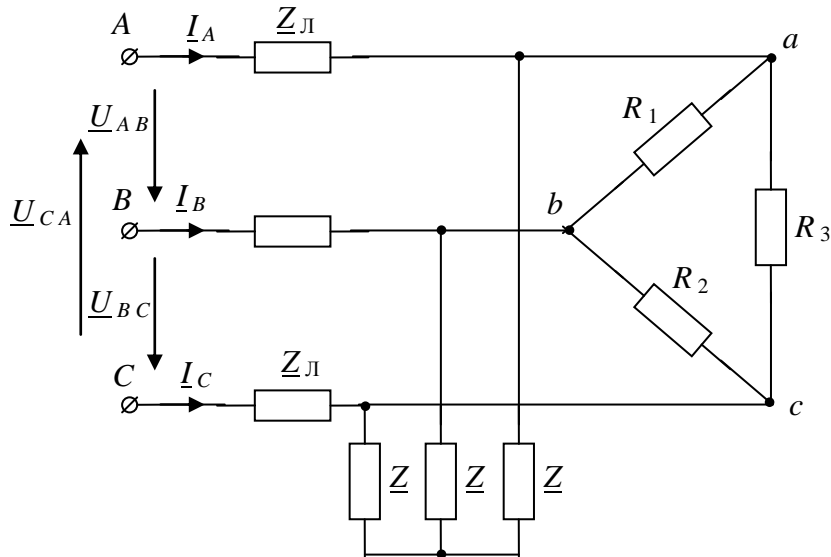


Рис. 14

$$\underline{Z}_1 = \frac{R_1 \underline{Z}_\Delta}{R_1 + \underline{Z}_\Delta} = \frac{20 \cdot 15 e^{j53,1^\circ}}{20 + 9 + j12} = 9,56 e^{j30,6^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{R_2 \underline{Z}_\Delta}{R_2 + \underline{Z}_\Delta} = 12,4 e^{j41,6^\circ} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{R_3 \underline{Z}_\Delta}{R_3 + \underline{Z}_\Delta} = 13,7 e^{j46,8^\circ} \text{ Ом}.$$

Преобразуем получившийся треугольник в эквивалентную звезду с сопротивлениями

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 3,69 e^{j36,8^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 3,36 e^{j91,6^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 4,8 e^{j47,8^\circ} \text{ Ом}.$$

Эквивалентные сопротивления фаз

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_\text{Л} + \underline{Z}_a = 7,9 e^{j41,2^\circ} \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_\text{Л} + \underline{Z}_b = 7,55 e^{j36,1^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_\text{Л} + \underline{Z}_c = 9,03 e^{j46,5^\circ} \text{ Ом}.$$

Линейные токи:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_A} = 27,8 e^{-j41,2^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_B} = 29,1 e^{-j156^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_C} = 24,4 e^{j73,5^\circ} \text{ А}.$$

Измерение мощности в трехфазных цепях

Активная мощность трехфазной системы определяется суммой активных мощностей фаз нагрузки и активной мощности в сопротивлении нулевого провода:

$$P = P_A + P_B + P_C + P_N.$$

Реактивная мощность трехфазной системы представляет собой сумму соответствующих реактивных мощностей:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_N.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При симметричной нагрузке

$$P_N = Q_N = 0; \quad P_A = P_B = P_C = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi;$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi,$$

где φ_Φ — угол между напряжением U_Φ на фазе нагрузки и током I_Φ фазы нагрузки.

Если учесть, что $3U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3} \sqrt{3} U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3} U_L I_L$, где U_L — линейное напряжение на нагрузке, I_L — линейный ток нагрузки, то

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_\Phi;$$

$$Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_\Phi;$$

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

Рассмотрим схему измерения мощности двумя ваттметрами (рис. 15), рис. 15 которая не требует подключения к нейтрали нагрузки и позволяет измерять мощность всех трех фаз при симметричной или несимметричной нагрузке:

$$P = \operatorname{Re} \left[\underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \underline{I}_C^* \right], \quad (5)$$

где \underline{I}_A^* , \underline{I}_B^* , \underline{I}_C^* — сопряженные комплексы токов фаз.

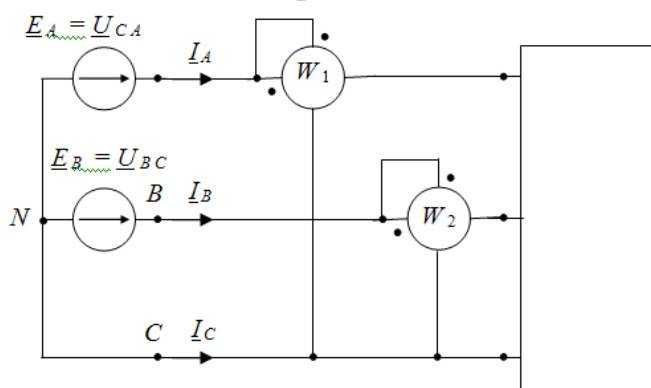


рис.15

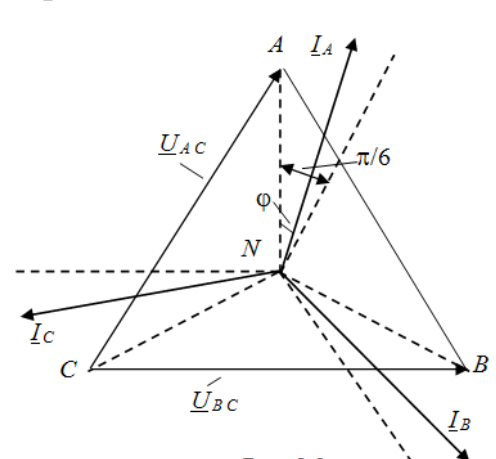


рис.16

Подставив уравнение $\underline{I}_C^* = -\underline{I}_A^* - \underline{I}_B^*$ в (5), получим

$$P = \operatorname{Re} \left[\underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* - \underline{E}_C \underline{I}_A^* - \underline{E}_C \underline{I}_B^* \right] = \operatorname{Re} \left[\underline{I}_A^* (\underline{E}_A - \underline{E}_C) + \underline{I}_B^* (\underline{E}_B - \underline{E}_C) \right].$$

$$P_1 = \operatorname{Re} \left(\underline{U}_A \underline{I}_A^* \right), \quad P_2 = \operatorname{Re} \left(\underline{U}_{BC} \underline{I}_B^* \right).$$

Из рис. 15 Из сравнения последних двух выражений получим мощность трехфазной системы: $P_{3\Phi} = P_1 + P_2$.

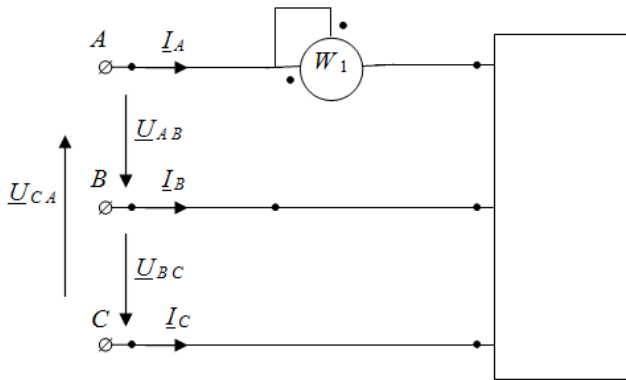


рис. 17

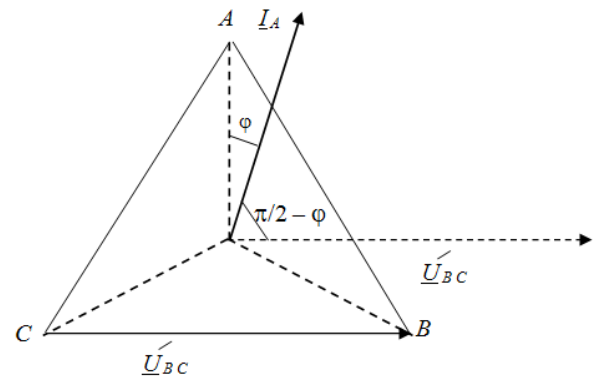


рис.18

Реактивную мощность можно измерить с помощью одного ваттметра (рис. 17). Векторная диаграмма (рис. 18) иллюстрирует данный способ.

$$P_w = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$$

Показание ваттметра достаточно умножить на $\sqrt{3}$, чтобы получить суммарную реактивную мощность трехфазной цепи $Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$.

Аварийные режимы в трехфазных цепях

Проанализируем некоторые аварийные режимы, для простоты считая нагрузку резистивной.

В случае *обрыва фазы A нагрузки* или *обрыва линейного провода A при соединении звезда — звезда* точка нейтрали нагрузки n смещается на вектор \underline{U}_{BC} , поскольку нагрузка чисто активная, и делит его пополам. Следовательно, токи неповрежденных фаз $\underline{I}_B = -\underline{I}_C$ уменьшаются по модулю в $\sqrt{3}/2$ раз (рис. 19).

В случае *короткого замыкания нагрузки в фазе A при соединении звезда — звезда* точка n совмещается с точкой A. Напряжения на неповрежденных фазах возрастают до линейных, т. е. увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, так же, как и токи этих фаз \underline{I}_B и \underline{I}_C , а уменьшение угла между ними до $\pi/3$ приводит к утроению тока в короткозамкнутой фазе A (рис. 20).

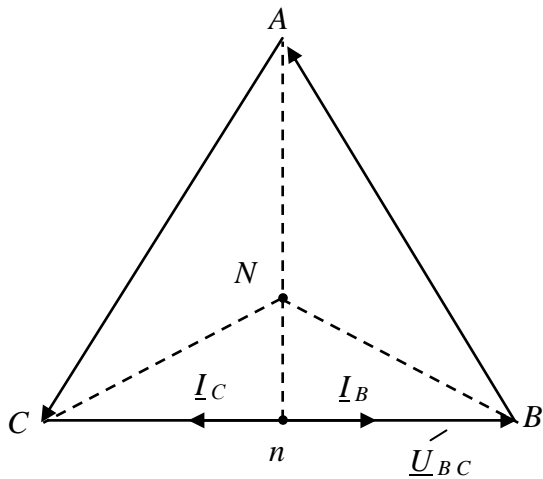


Рис. 19

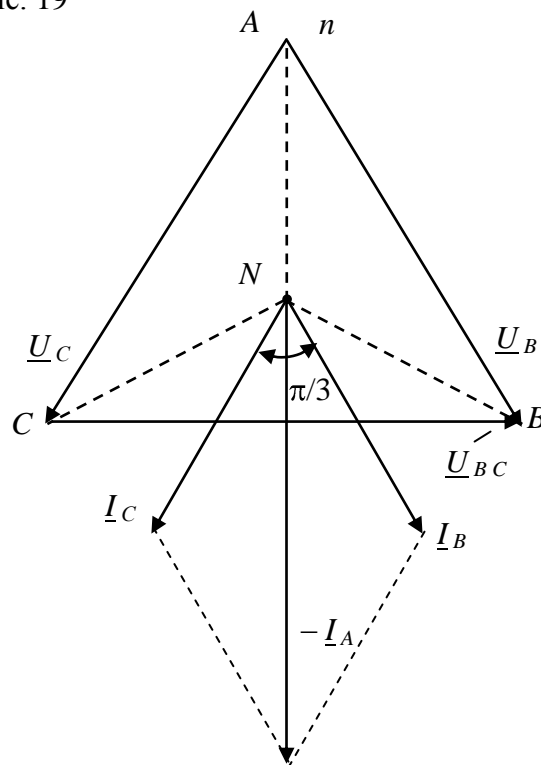


Рис. 20

При обрыве линейного провода в соединении звезда — треугольник токи двух фаз нагрузки, примыкающих к оборванному проводу, уменьшаются в два раза, а ток третьей фазы не изменяется.

При обрыве фазы нагрузки в соединении звезда — треугольник ток оборванной фазы отсутствует, а токи двух других фаз остаются неизменными.