

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

Кафедра «Электромеханические комплексы и системы»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Методические указания к лабораторным работам

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2011

Настоящие методические указания предназначены для студентов не-электротехнических специальностей, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника». В указания включены две лабораторные работы «Исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой» и «Исследование трехфазной цепи при соединении приемника треугольником».

Отдельно выделен раздел «Краткие сведения из теории», ознакомление с которым позволит студентам более качественно подготовиться к выполнению лабораторных работ, в частности, если необходимый материал еще не был прочитан на лекциях. Значительное внимание уделено методике построения векторных диаграмм, являющихся графической частью отчетов по выполненным лабораторным работам.

При оформлении отчетов необходимо соблюдать требования стандартов при изображении электрических схем и пользоваться чертежным инструментом.

1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Трехфазной цепью называется совокупность трех однофазных цепей А, В, С, в которых действует симметричная система электродвижущих сил (э.д.с.).

Симметричной называется система трех синусоидальных э.д.с. одинаковой частоты f и амплитуды E_m , сдвинутых по фазе на одну треть временного периода T .

Векторная диаграмма для амплитудных значений э.д.с. в этом случае представляет собой симметричную трехлучевую звезду векторов. На рисунке 1а представлена такая диаграмма для момента времени $t = 0$ с учетом того, что начальная фаза синусоиды э.д.с. фазы А равна нулю: $e_A = E_{m_A} \sin \omega t$.

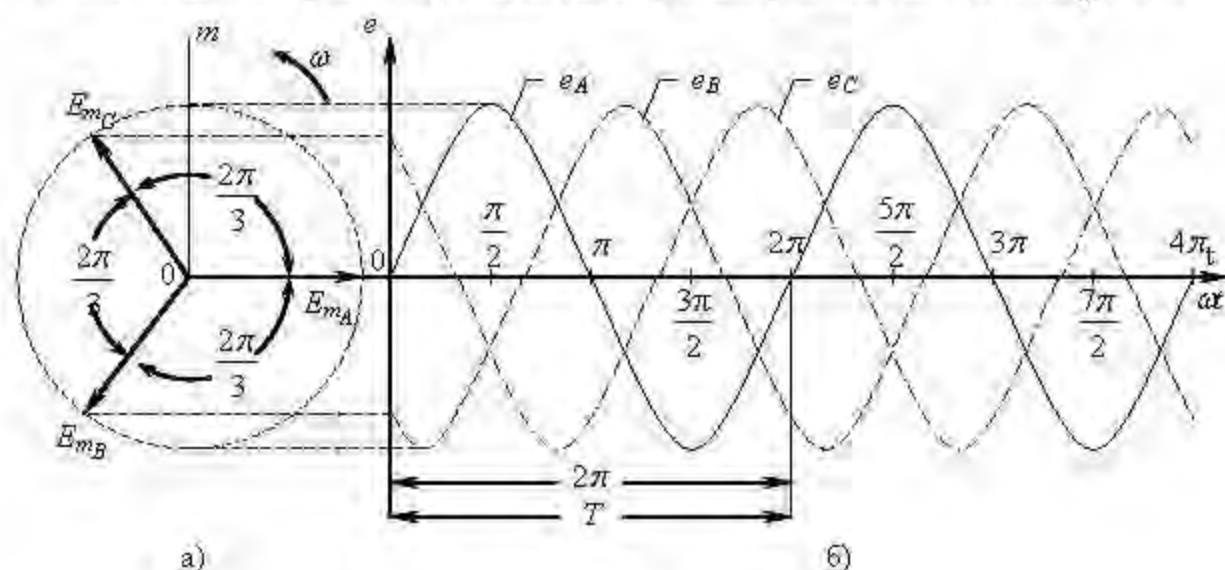


Рис. 1

Если вращать векторы диаграммы (рис. 1а) против часовой стрелки, проецируя их на вертикальную ось мгновенных значений « Om » с одновременной разверткой по горизонтальной оси, то получатся графики трех синусоидальных э.д.с. (рис. 1б), построенных в функции времени t и фазового угла ωt ($\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$, ω — угловая частота). Поскольку $E_{mA} = E_{mB} = E_{mC} = E_m$, то мгновенные значения э.д.с. в отдельных фаз записывается в виде: $e_A = E_m \sin \omega t$, $e_B = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$; $e_C = E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$.

Можно показать, что алгебраическая сумма мгновенных э.д.с. (рис. 1б) и геометрическая сумма векторов, изображающих эти э.д.с. (рис. 1а), равны нулю: $e_A + e_B + e_C = 0$ и $\vec{E}_{mA} + \vec{E}_{mB} + \vec{E}_{mC} = 0$.

Рассмотрим устройство и принцип действия простейшего генератора трехфазного тока, поперечный разрез которого показан на рисунке 2.

На неподвижном статоре, представляющем собой пустотельный цилиндр, набранный из листовой электротехнической стали, расположены три витка $A-X$, $B-Y$, $C-Z$, стороны каждого из которых находятся в двух диаметрально противоположных канавках (пазах). Магнитные оси этих витков сдвинуты относительно друг друга на одну треть пространственного периода (в показанном на рис. 3 двухполюсном генераторе — на 120 геометрических градусов).

Внутри статора вращается с постоянной угловой скоростью ω ротор, представляющий собой электромагнит постоянного тока $N-S$.

Три витка (рис. 2) $A-X$, $B-Y$, $C-Z$, расположенные на статоре, представляют собой три генератора однофазного синусоидального тока, каждый из которых в принципе может быть подключен двумя проводами к «своему» однофазному приемнику. В этом случае получается шестипроводная, электрически разобшенная трехфазная цепь.

На практике применяются электрически связанные трехфазные цепи, соединенные звездой или треугольником. Генератор и приемник могут быть соединены в трехфазной цепи одинаково, или один из них соединен звездой, а другой — треугольником.

При вращении ротора (рис. 2) его магнитная ось $N-S$ поочередно набегают на начала витков A , B , C , в результате чего амплитуды индуцированных э.д.с. E_{mA} , E_{mB} , E_{mC} (рис. 1а, б) будут сдвинуты по фазе на треть временного периода T (на угол $\frac{2\pi}{3}$ радиан).

Три витка $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ (рис. 2) на статоре простейшего генератора называются фазами генератора. Начала фаз генератора обозначаются

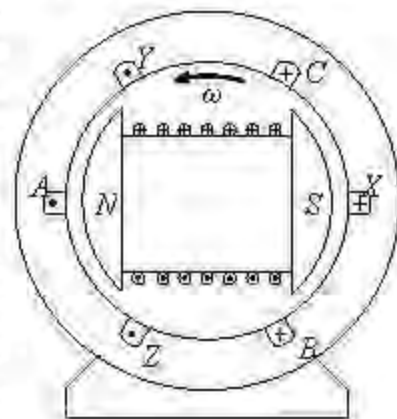


Рис. 2

большими буквами A, B, C , а концы фаз – большими буквами X, Y, Z латинского алфавита. Соответственно зажимы фаз приемника обозначаются малыми буквами ($a-x, b-y, c-z$).

За положительные направления напряжений (э.д.с.) и токов в фазах генератора принимаются направления от конца фазы к ее началу, а в фазах приемника – от начала к концу фазы.

При анализе трехфазных цепей принято считать генератор источником бесконечно большой мощности, у которого равны нулю внутренние сопротивления фаз, что позволяет э.д.с. генератора заменить соответствующими напряжениями: $E_{mA} = U_{mA}, E_{mB} = U_{mB}, E_{mC} = U_{mC}$. В дальнейшем вместо амплитуд синусоид будут использованы действующие (средние квадратичные за период) значения э.д.с., напряжений и токов

$\left(E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)$. Это связано с тем, что реально вольтметры и амперметры в цепях синусоидального тока измеряют действующие значения соответствующих синусоидальных величин.

1.2. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ, СОЕДИНЕННАЯ ЗВЕЗДОЙ

На рисунке 3 показана шестипроводная трехфазная цепь как совокупность трех самостоятельных, электрически не связанных однофазных цепей, подготовленных к соединению звездой.

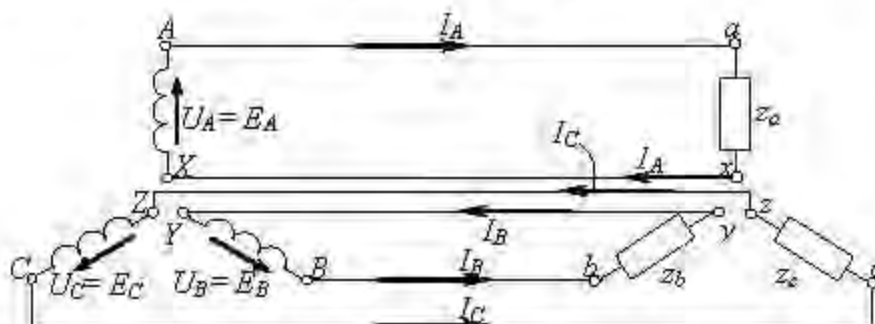


Рис. 3

Фазы генератора показаны как катушки индуктивности, буквами Z_a, Z_b и Z_c обозначены полные (кажущиеся) сопротивления фаз приемника.

Если объединить концы фаз генератора X, Y, Z в электрический узел N , концы фаз приемника в узел n и заменить три обратных провода $X-x, Y-y$ и $Z-z$ одним проводом $N-n$, то получится электрически связанная трехфазная цепь, получившая название «звезда с нейтральным проводом». Такая схема показана на рисунке 4. Электрический узел N получил название *нейтральная точка генератора*, узел n – *нейтральная точка приемника*.

Провод $N-n$, соединяющий эти нейтральные точки называются *нейтральным проводом*.

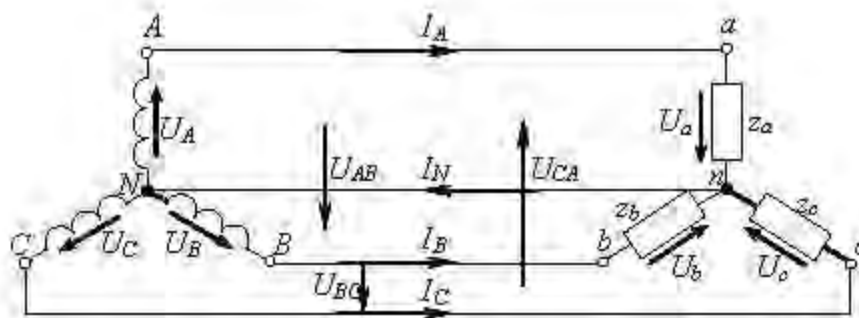


Рис. 4

Провода $A-a$, $B-b$, $C-c$, соединяющие начала фаз генератора с началами одноименных фаз приемника называются *линейными проводами*.

Фазным током генератора (или приемника) называется ток в фазе генератора (или приемника).

Линейным током называется ток в линейном проводе.

Фазным напряжением генератора (или приемника) называется напряжение (разность электрических потенциалов) между началом и концом одной и той же фазы генератора (или приемника).

Линейным напряжением называется напряжение между началами двух разных фаз генератора (или приемника).

Приведенные определения справедливы также и для схемы включения трехфазной цепи треугольником.

Применительно к генератору, соединенному звездой, фазное напряжение U_A — это напряжение (разность потенциалов) между началом фазы A и ее концом X (рис. 3), или между началом фазы A и нейтральной точкой N (рис. 4), потенциал которой является электрическим потенциалом всех трех концов фаз генератора X, Y, Z .

Соотношения между фазными и линейными величинами в схеме, соединенной звездой

Из самого принципа соединения звездой, является очевидным, что *линейный ток равен фазному*: $I_{л} = I_{ф}$.

Вектор тока в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа равен геометрической сумме векторов фазных (линейных) токов:

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

На рисунке 5 показана схема соединения фаз генератора звездой, на которой к началам двух разных фаз A и B подключен вольтметр V . Очевидно падение напряжения на внутренней цепи вольтметра будет представлять собой линейное напряжение U_{AB} .

При заданном (рис. 5) направлении обхода контура, образованного вольтметром V и фазами A и B генератора, можно составить векторное

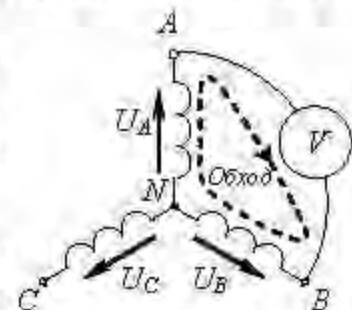


Рис. 5

уравнение по второму закону Кирхгофа: $\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B$. Переключив вольтметр на две другие пары зажимов, получим аналогичные равенства: $\vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C$, $\vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A$, то есть при соединении фаз генератора (или приемника) звездой вектор линейного напряжения равен геометрической разности двух соответствующих векторов фазных напряжений.

Решив полученные выше уравнения графически, можно показать, что векторы линейных напряжений \vec{U}_{AB} , \vec{U}_{BC} , \vec{U}_{CA} образуют симметричную звезду векторов, которая опережает звезду фазных напряжений \vec{U}_A , \vec{U}_B , \vec{U}_C на 30° . Векторы линейных напряжений можно представить также в виде сторон равностороннего (правильного) треугольника, вершинами являются концы векторов фазных напряжений.

На рисунке 6 такая диаграмма представлена в комплексной плоскости, причем вектор фазного напряжения \vec{U}_A совмещен с положительной полуосью +1 вещественных величин.

Согласно диаграмме на рис. 6 и с учетом того, что $U_A = U_B = U_C = U_\Phi$, можно записать комплексы фазных и линейных напряжений в виде:

$$\dot{U}_A = U_\phi e^{j0} = U_\phi; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120} = U_\phi (-0,5 - j0,865);$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_A e^{+j120} = U_\phi (-0,5 + j0,865); \quad \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_\phi (1,5 + j0,865);$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = -j1,73U_\phi; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_\phi (-1,5 + j0,865).$$

Приведенные соотношения, полученные из векторной диаграммы (рис.6), позволяют записать следующие равенства:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \quad (1)$$

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0 \quad (2)$$

Нетрудно убедиться, рассмотрев, например, прямоугольный треугольник Odq на рисунке 6, что линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз: $U_L = \sqrt{3} U_\Phi$.

При дальнейшем рассмотрении предполагается, как уже упоминалось ранее, что генератор трехфазного тока является идеальным источником (бесконечно большой мощности), у которого отсутствуют внутренние потери напряжения, то есть равны нулю сопротивления фаз.

Это означает, что такой генератор всегда вырабатывает симметричную систему фазных и линейных напряжений.

Кроме того, при выполнении лабораторных работ следует считать равными нулю сопротивления линейных про-

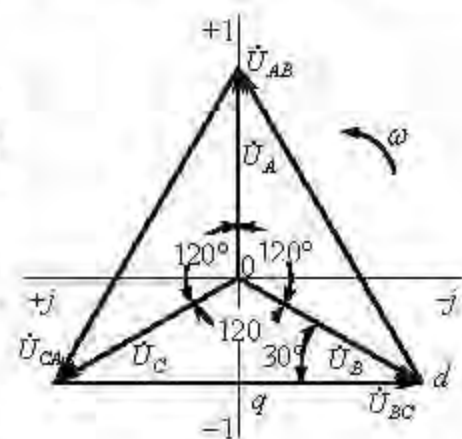


Рис. 6

водов $z_L = 0$ и нейтрального провода $z_N = 0$, а следовательно и потери напряжения в них.

С учетом принятых допущений можно утверждать, что на входные зажимы приемника a, b, c , соединенного звездой или треугольником, всегда подается симметричная система линейных напряжений, а при соединении приемника звездой (при наличии нейтрального провода) – симметричная система фазных напряжений генератора.

В этом случае электрические потенциалы линейных проводов будут равны потенциалам начал одноименных фаз генератора и приемника, а потенциал нейтрального провода будет равен потенциалам концов всех трех фаз генератора и приемника. Поэтому можно дать еще одно определение фазного и линейного напряжения для схемы «четырёхпроводная звезда».

Фазным напряжением называется напряжение между линейным проводом и нейтральным проводом.

Линейным напряжением называется напряжение между двумя линейными проводами.

Режимы работы цепи при соединении генератора и приемника звездой

Режимы работы такой цепи определяются видом нагрузки, которую создает приемник для генератора, а также наличием или отсутствием нейтрального провода (он замкнут или разомкнут). Существуют два основных вида нагрузки: симметричная и несимметричная.

Симметричной называется нагрузка, при которой комплексные сопротивления фаз приемника равны друг другу, то есть $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = z_\phi e^{j\varphi}$ при соединении звездой и $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi = z_\phi e^{j\varphi}$ при соединении треугольником.

Это означает, что фазные токи в фазах приемника одинаковы по величине и сдвинуты по фазе относительно «своих» фазных напряжений на угол $\varphi = \arctg \frac{x_\phi}{r_\phi}$, где r_ϕ и x_ϕ соответственно активное и реактивное сопротивления фаз приемника.

Применительно к симметричному приемнику, соединенному звездой с нейтральным проводом, в соответствии с законом Ома можно записать комплексы действующих значений фазных (линейных) токов: $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_\phi}$,

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_\phi}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_\phi}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа комплекс тока в нейтральном проводе \dot{I}_N равен алгебраической сумме комплексов фазных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{1}{\underline{Z}_\phi} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = 0, \quad (3)$$

то есть равен нулю, поскольку в ноль обращается выражение в скобках в соответствии с равенством (1). Таким образом при симметричной нагрузке ток $I_N = 0$ и необходимость в нейтральном проводе отпадает. Поэтому заведомо симметричные приемники, соединенные звездой (трехфазные асинхронные и синхронные двигатели и др.) подключаются к питающей сети тремя линейными проводами (по схеме «звезда без нейтрального провода»).

Несимметричной называется нагрузка, при которой комплексные сопротивления фаз приемника не равны друг другу: $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$.

Очевидно в этом случае система фазных токов не может быть представлена в виде симметричной звезды векторов, как в предыдущем случае, вследствие чего в нейтральном проводе $N-n$ (рис. 4) появляется ток $I_N > 0$. Это предполагает наличие разности электрических потенциалов между нейтральными точками генератора N и приемника n , которую можно измерить вольтметром, разомкнув нейтральный провод ($Z_N \rightarrow \infty$).

Эта разность потенциалов получила название «напряжение смещения нейтрали U_N », комплексное выражение которого можно рассчитать по формуле:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (4)$$

где $\underline{Y}_A = \frac{1}{Z_a}$; $\underline{Y}_B = \frac{1}{Z_b}$; $\underline{Y}_C = \frac{1}{Z_c}$ – комплексные проводимости фаз приемника;

$\underline{Y}_N = \frac{1}{Z_N}$ – комплексная проводимость нейтрального провода.

Можно показать, что при несимметричном приемнике и разомкнутом нейтральном проводе ($U_N > 0$) фазные напряжения на приемнике U_a , U_b , U_c будут различаться по величине в соответствии с равенствами, полученными согласно второму закону Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_N \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_N \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_N \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексы фазных напряжений генератора,

\dot{U}_N – комплекс напряжения смещения нейтрали.

Сравним равенства (5) при симметричной и несимметричной нагрузке при наличии нейтрального провода ($Z_N = 0 \Rightarrow \underline{Y}_N = \frac{1}{Z_N} \rightarrow \infty$) и при его обрыве

($Z_N \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{Y}_N = \frac{1}{Z_N} = 0$).

Если нейтральный провод при несимметричном приемнике замкнут $\underline{Z}_N = 0$, то правая часть равенства (4) становится равной нулю $\dot{U}_N = 0$, поскольку в знаменателе $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} \rightarrow \infty$. Поэтому в соответствии с равенствами (5) система фазных напряжений приемника становится симметричной, как и в генераторе: $\dot{U}_a = \dot{U}_A$, $\dot{U}_b = \dot{U}_B$, $\dot{U}_c = \dot{U}_C$.

Таким образом наличие нейтрального провода обеспечивает независимую работу фаз несимметричного приемника, поскольку напряжение на каждой фазе будет одним и тем же: $U_\phi = \frac{U_E}{\sqrt{3}}$, и изменение тока в каждой фазе скажется только на величине тока в нейтральном проводе.

Если нагрузка симметрична ($\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c$), то $U_N = 0$, поскольку в ноль обращается числитель в формуле (4), и в соответствии с равенствами (5) система фазных напряжений приемника будет симметричной, имеется ли нейтральный провод или отсутствует.

1.3. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ, СОЕДИНЕННАЯ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

На рисунке 7 показана электрически связанная трехпроводная схема, в которой генератор и приемник соединены треугольником.

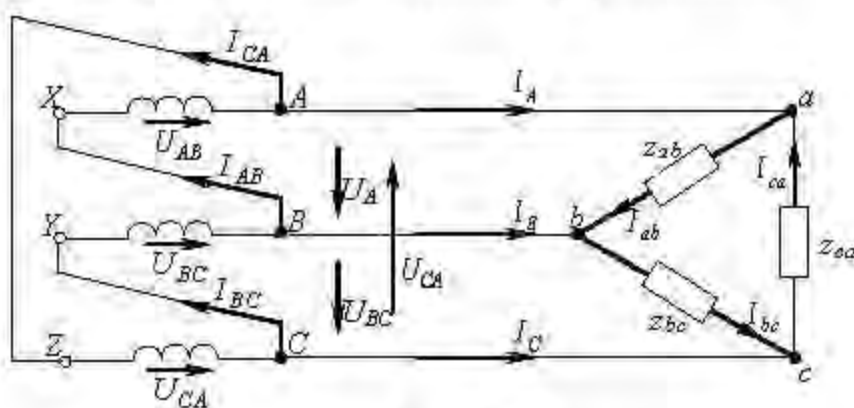


Рис. 7

Принцип соединения трех фаз треугольником удобнее показать на примере генератора. Конец первой (A-X) фазы X соединяется с началом второй B, конец второй Y — с началом C третьей, конец третьей Z — с началом A первой.

Такой же принцип соединения фаз в треугольник сохранен и применительно к приемнику (рис. 7), где обозначены только начала фаз a, b, c, которые электрически объединены с концами соответствующих фаз z, x, y.

При соединении треугольником фазы генератора образуют такой замкнутый контур, в котором находятся три источника э.д.с.: напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Однако ток в контуре под действием этих источников равен нулю, поскольку они образуют симметричную систему векторов ($\vec{U}_{AB} + \vec{U}_{BC} + \vec{U}_{CA} = 0$).

Следует обратить внимание на отличие в обозначениях фазных величин треугольника от соответствующих величин звезды.

Поскольку фазы треугольника оказываются включенными между двумя линейными проводами каждая, то величины фазных напряжений, токов, сопротивлений в отличие от звезды индексируются двумя буквами: U_{ab} , I_{bc} , Z_{ca} и т.д. Что касается линейных токов, то они как и при соединении звездой индексируются одной большой буквой: I_A , I_B , I_C .

Соотношения между линейными и фазными величинами

Из самого принципа соединения фаз генератора или приемника в треугольник становится очевидным, что фазное и линейное напряжения равны друг другу: $U_{\phi} = U_{\Delta}$.

Это объясняется тем, что конец предыдущей фазы получает потенциал начала следующей, в результате чего напряжение между началом и концом одной и той же фазы (фазное напряжение) становится одинаковым с напряжением между началами двух разных фаз (линейным напряжением).

Равенство линейного и фазного напряжений объясняется также тем, что каждая из фаз треугольника (рис. 7) оказывается включенной между двумя линейными проводами.

Поскольку на входные зажимы приемника a , b , c (рис. 7) всегда подается со стороны генератора бесконечной мощности, соединенного звездой или треугольником, симметричная система линейных напряжений, то можно сделать вывод: при соединении приемника треугольником обеспечивается независимость работы его фаз.

Аналогичный вывод был сделан ранее для приемника, соединенного звездой с нейтральным проводом в предположении, что сопротивлениями нейтрального и линейных проводов можно пренебречь ($z_N = 0$, $z_{\lambda} = 0$).

В обоих случаях фазные напряжения приемника не зависят от нагрузки и являются константами, поэтому изменение тока нагрузки в одной из фаз влияет только на величину тока нейтрального провода (при соединении звездой) или в двух линейных проводах (при соединении треугольником).

Что касается соотношений между линейными и фазными токами, то при рассмотрении этого вопроса необходимо учитывать наличие в схеме (рис. 7) электрических узлов A , B , C и a , b , c , в которых распределение токов подчиняется первому закону Кирхгофа.

Применив этот закон к узлам a , b , c , можно получить следующие зависимости в векторной форме:

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_A &= \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca} \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab} \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, вектор линейного тока равен геометрической разности векторов двух фазных токов, образующих с этим линейным током электрический узел.

Как следует из равенств (6), сумма линейных токов тождественно равна нулю:

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0. \quad (7)$$

Режимы работы трехфазной цепи при соединении приемника треугольником

Как и при соединении звездой симметричной называется нагрузка, если выполнено условие равенства комплексных сопротивлений фаз приемника: $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_\phi = z_\phi e^{j\varphi}$, а несимметричной, если это условие не выполняется: $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$.

При симметричном приемнике векторы фазных токов $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$, образуют симметричную трехлучевую звезду (рис. 8). На этом же рисунке проделаны графические операции в соответствии с равенствами (6).

Как видно из рисунка 8, показанные сплошными линиями векторы линейных токов $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ образуют симметричную трехлучевую звезду, которая отстает на 30° от звезды фазных токов.

Векторная диаграмма линейных токов может быть представлена более компактно в виде сторон правильного треугольника, показанных пунктиром. Как видно из треугольника на рисунке 8 сумма векторов линейных токов равна нулю. Причем эта сумма всегда должна быть равно нулю в соответствии с равенством (7), включая несимметричный режим.

Очевидно и при несимметричной нагрузке можно также показывать векторы линейных токов в виде векторного треугольника, вершинами которого будут концы векторов трех фазных токов, представленных в виде несимметричной звезды векторов.

Применительно к симметричному приемнику (рис. 8), рассмотрев прямоугольный треугольник ΔOqm , полученный опусканием высоты из вершины тупого угла равнобедренного треугольника, можно выразить отрезок $\overline{Om} = \frac{1}{2} I_{\bar{B}}$ и $\overline{Om} = U_{\delta} \cos 30^\circ = U_{\delta} \frac{\sqrt{3}}{2}$. Приравняв правые части, можно

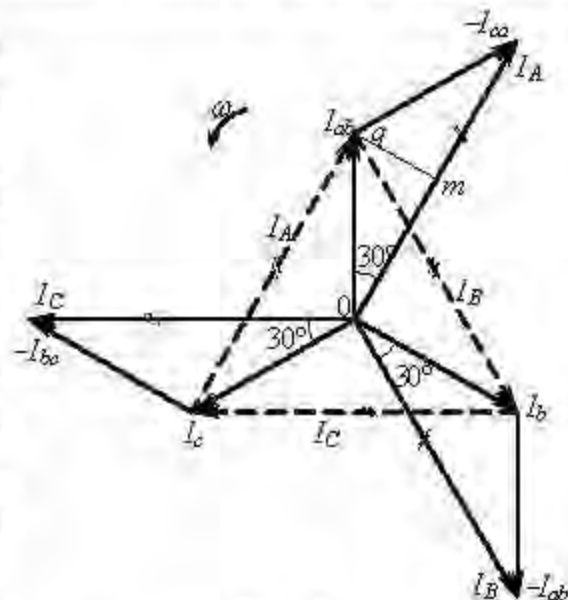


Рис. 8

получить соотношение $I_{\Sigma} = \sqrt{3}I_{\phi}$, то есть при симметричной нагрузке (и только при симметричной нагрузке) линейный ток в $\sqrt{3}$ больше фазного.

Очевидно при несимметричной нагрузке количественные связи между линейными и фазными токами определяются соотношениями (6).

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ НА ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

В соответствии с учебными планами курса «Электротехника и электроника» для закрепления теоретического материала раздела «Цепи трехфазного тока» предусмотрено выполнение студентами соответствующих лабораторных работ, в том числе по исследованию режимов работы трехфазной цепи при соединении приемников звездой и треугольником.

Лабораторные работы проводятся в лаборатории переменного тока кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ШУПС, где в качестве источника бесконечно большой мощности используется вторичная обмотка трехфазного трансформатора, соединенная по схеме «звезда с нейтральным проводом» с напряжением 220/127 В.

Выводы обмотки трансформатора A, B, C, N подключены к соответствующим клеммам лабораторных щитков, оборудованных коммутирующими аппаратами (автоматами), сигнальными лампами и плавкими предохранителями.

Лабораторные установки оснащены электроизмерительными приборами и измерительными комплектами, позволяющими получить всю необходимую информацию для оформления отчетов по выполненным лабораторным работам.

В качестве однофазных приемников электроэнергии возможно использование как активных, так и реактивных нагрузочных элементов.

При выполнении двух рассматриваемых работ в основном используются проволочные резисторы, являющиеся для трехфазной цепи активной нагрузкой. Исключением является один из режимов работы трехфазной цепи, когда в одну из фаз приемника, соединенного треугольником, включен конденсатор (реактивный приемник).

Рекомендации по построению векторных диаграмм напряжений, подаваемых на входные зажимы приемника

Графическая часть отчетов по выполненным лабораторным работам представляет собой векторные диаграммы, которые строятся по результатам электрических измерений напряжений и токов в трехфазных приемниках.

Векторные диаграммы строятся на миллиметровой бумаге со строгим соблюдением выбранных масштабов и обязательным использованием чертежного инструмента: циркуля, масштабной линейки и транспортира (или треугольника с углами 30° и 60°).

При соединении приемника звездой с нейтральным проводом или треугольником, на его входные зажимы a, b, c , n (звезда) или a, b, c (треугольник) всегда подается симметричная система фазных напряжений, векторная диаграмма которых представляет собой симметричную трехлучевую звезду векторов. Построение векторных диаграмм для различных режимов работы трехфазного приемника всегда начинается с построения такой диаграммы.

Существуют различные способы построения симметричной трехлучевой звезды векторов. Рассмотрим в качестве примера два варианта такого построения применительно к генератору, соединенному звездой. Оба метода можно пояснить, ссылаясь на рисунок 9.

Метод засечек, в котором основная роль отводится циркулю (он, кстати, будет необходим и в последующих векторных диаграммах, в частности для режимов работы приемника при обрыве нейтрального провода).

Вначале на листе миллиметровой бумаги строится прямоугольная система координат с началом в точке N (рис. 9) и задается масштаб напряжений (рекомендуется $1 \text{ см} = 20 \text{ В}$). С учетом масштаба радиусом, соответствующим величине фазного напряжения $U_A = U_B = U_C = U_\phi$, из начала координат N проводят окружность (рис. 9). Расстояние от точки A пересечения окружности с положительной полуосью ординат до точки N представляет собой вектор \vec{U}_A . Затем тем же раствором циркуля делают две засечки на окружности, поставив ножку циркуля в точку A' пересечения окружности с отрицательной полуосью ординат. Полученные точки пересечения B и C являются концами векторов \vec{U}_B и \vec{U}_C , а все три вектора будут иметь одинаковую длину и будут сдвинуты по отношению друг к другу на 120° , то есть образуют симметричную трехлучевую звезду векторов.

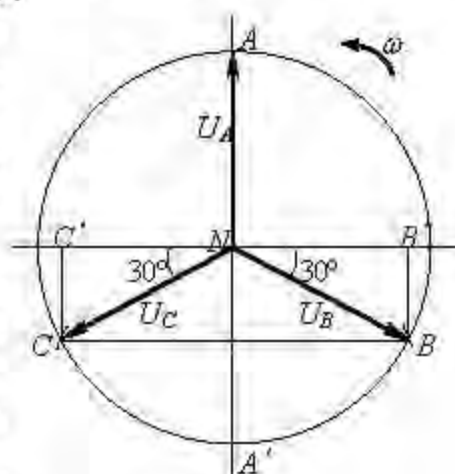


Рис. 9

Метод транспортира (или угольника) в сочетании с масштабной линейкой не требует применения циркуля.

Наметив систему прямоугольных координат с началом в точке N (рис. 9), откладывают по оси ординат отрезок AN , равный в соответствующем масштабе фазному напряжению U_ϕ и представляющий собой вектор \vec{U}_A . Затем с помощью транспортира (или угольника) устанавливают углы 30° (рис. 9) и получают точки B и C , выполняя условия равенства длин отрезков $NA = NB = NC$.

Поскольку полученная трехлучевая звезда векторов является исходной при построении всех последующих векторных диаграмм для различных режимов работы трехфазного приемника, то, сделав один раз построение такой диаграммы (двумя рассмотренными методами), можно упростить

дальнейшее оформление отчета. Для этого можно «перенести» построенную уже звезду векторов, воспользовавшись координатами (рис. 9) точек B и C , предварительно измерив их миллиметровой линейкой и задавшись положительным направлением вектора \vec{U}_A (с соблюдением масштаба), исходящим из начала координат N (рис. 9). Такими координатами по двум осям являются для точки B – отрезки BB' и NB' ; для точки C – отрезки CC' и $C'N$.

2.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА, ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНИКА, СОЕДИНЕННОГО ЗВЕЗДОЙ

Программа работы

Исследовать соединение приемников при:

- 1) симметричной нагрузке: а) с нейтральным проводом, б) без нейтрального провода;
- 2) обрыве одной фазы (a или b): а) с нейтральным проводом, б) без нейтрального провода;
- 3) обрыве двух фаз (a и b): а) с нейтральным проводом, б) без нейтрального провода;
- 4) несимметричной нагрузке: а) с нейтральным проводом, б) без нейтрального провода.

Схема лабораторной установки

На рисунке 10а показана схема, в которую включены четыре амперметра, три ваттметра, вольтметр V_N и показан переносный вольтметр V , позволяющий измерять линейные и фазные напряжения на клеммах A, B, C, N источника питания и a, b, c, n на входных зажимах приемника.

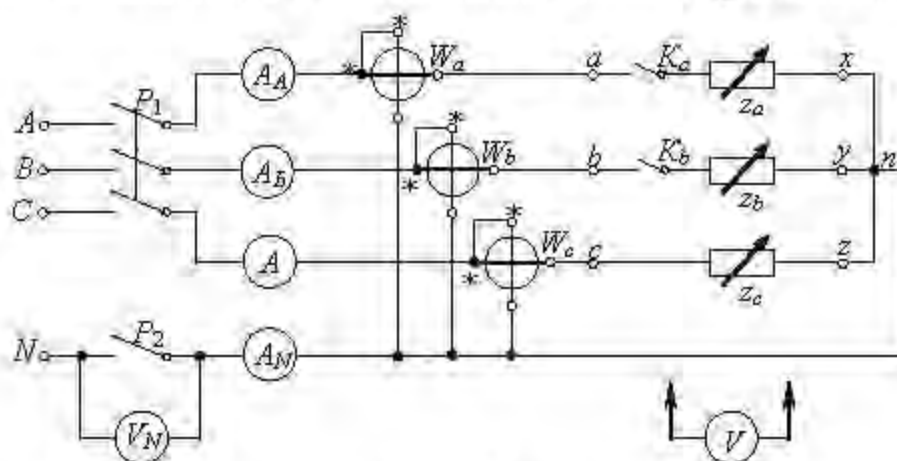


Рис. 10а

Вольтметр V_N включен на зажимы однополюсного рубильника P_2 , предназначенного для включения нейтрального провода $N-n$ или его размыкания (обрыва).

В качестве однофазных приемников во всех фазах включены регулируемые проволочные резисторы (активная нагрузка). Амперметры A_A, A_B, A_C измеряют фазные (линейные) токи I_A, I_B, I_C , амперметр A_N измеряет ток I_N в

нейтральном проводе. Ваттметры W_a , W_b , W_c измеряют активную мощность каждой из трех фаз приемника, так как по их токовым обмоткам протекают фазные токи, а вольтметровые цепи включены на «свои» фазные напряжения.

В целях упрощения выполнения работы собирается схема, показанная на рисунке 10б, в которой используется измерительный комплект типа К-505. В комплект встроены амперметр A и вольтметр V электромагнитной системы и ваттметр W ферродинамической системы. Переключатель фаз $A \leftrightarrow B \leftrightarrow C$ комплекта позволяет поочередно производить измерения тока, напряжения и мощности в фазах $a-x$, $b-y$, $c-z$ приемника.

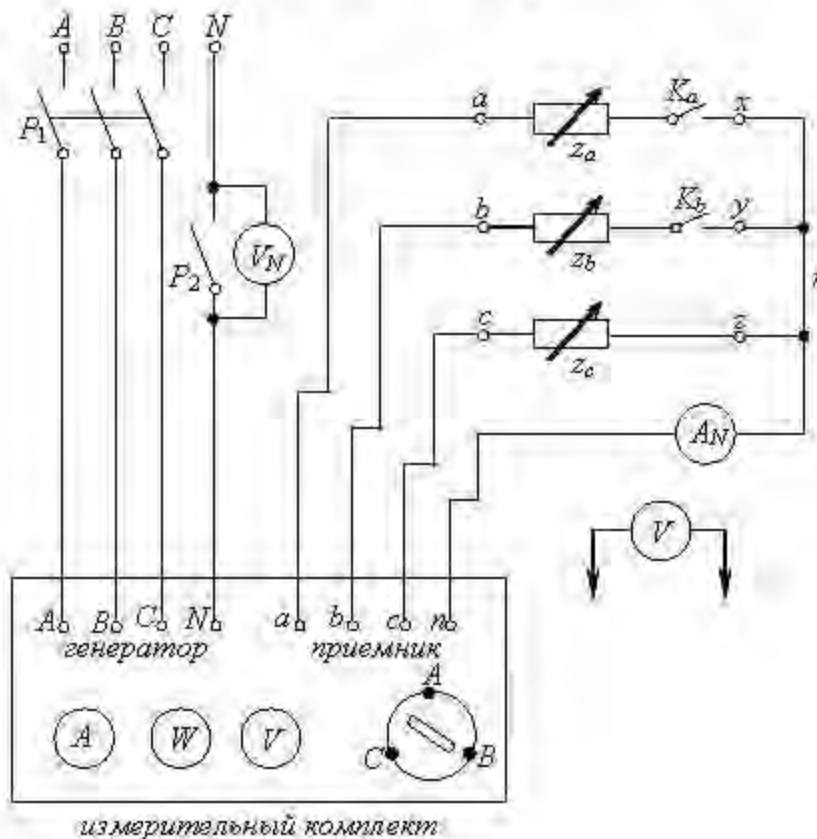


Рис. 10б

Для измерения линейных и фазных напряжений генератора (питающей сети) служит переносный вольтметр V (рис. 10б). При этом линейные напряжения измеряются на щитке между клеммами $A-B$, $B-C$, $C-A$ или между соответствующими клеммами на измерительном комплекте. Фазные напряжения генератора между клеммами $A-N$, $B-N$, $C-N$ измеряют обязательно на щитке.

Показания приборов заносят в таблицу наблюдений и вычислений (табл.1). Поскольку у генератора (питающей сети) система фазных напряжений всегда симметрична ($U_A = U_B = U_C = U_\Phi$), в таблице наблюдений заполняется одна графа U_Φ .

Порядок выполнения работы

Рекомендуется при выполнении настоящей работы соблюдать следующий порядок исследования: *каждый режим выполняется сначала с нейтральным проводом, а затем без него.*

Рассмотрим такой порядок на примере первого режима: симметричной нагрузки (с нейтральным проводом). После сборки схемы (рис. 10б) и ее проверки преподавателем или старшим лаборантом при замкнутом рубильнике P_2 включается трехполюсный рубильник (автомат) P_1 . С помощью переключателя фаз $A-B-C$ измерительного комплекта устанавливают в фазах приемника одинаковые по величине токи порядка 1,5 – 2,0 А, регулируя сопротивления проволочных резисторов ($I_A = I_B = I_C$).

Результаты измерений фазных токов, напряжений и активных мощностей в каждой фазе приемника, а также тока в нейтральном проводе I_N и напряжения смещения нейтрали U_N заносят в первую строку таблицы наблюдений и вычислений (табл. 1).

Затем размыкают рубильником P_2 нейтральный провод (рис. 10б) и проводят аналогичные измерения, записывая показания приборов в строку таблицы 1 «Симметричная нагрузка без нейтрального провода».

Вновь замыкают нейтральный провод и размыкают выключателем K_a фазу $a-x$ приемника (рис. 10б), снимают показания всех приборов и заносят данные во вторую строку таблицы 1. Затем размыкают нейтральный провод, проводят все измерения и заносят их результаты в соответствующую строку таблицы 1.

Аналогичные операции проводят и при разгрузке двух фаз $a-x$ и $b-y$ (при разомкнутых выключателях K_a и K_b).

Разгрузка (обрыв) одной или двух фаз приемника является для сети крайними случаями несимметричного режима. Чаще имеет место общий случай несимметричной нагрузки, когда все фазы приемника включены, но фазные (линейные) токи различаются по величине.

Для получения такого режима замыкаются выключатели K_a , K_b и рубильник P_2 (рис. 10б) и изменяются сопротивления фаз приемника Z_a , Z_b и Z_c таким образом, чтобы разность в токах I_A , I_B и I_C была не менее 0,5 А. Измерения проводятся при замкнутом и разомкнутом рубильнике P_2 , как в предыдущих режимах.

Содержание отчета

1. Программа лабораторной работы
2. Схемы соединений (рис. 10а и 10б).
3. Таблица данных электроизмерительных приборов.
4. Таблица измерений и вычислений.
5. Топографические векторные диаграммы по каждому пункту программы работы.
6. Выводы по работе или ответы на контрольные вопросы

Таблица 1

Таблица измерений и вычислений

Состояние системы	Нагрузка приемни- ка	Измеряются														Вычисляются												
		генератор				приемник										I_N	U_N	P_a	P_b	P_c	ΣP							
		U_ϕ	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	U_a	U_b	U_c	P_a	P_b	P_c	ΣP													
		вольт				ампер			вольт			ватт				A	B	ватт										
С нейтральным проводом	Симметричная																											
	Обрыв одной фазы																											
	Обрыв двух фаз																											
	Несимметричная																											
Без нейтрального провода	Симметричная																											
	Обрыв одной фазы																											
	Обрыв двух фаз																											
	Несимметричная																											

Указания по построению векторных диаграмм

Построение векторных диаграмм для всех пунктов программы лабораторной работы начинается с построения симметричной трехлучевой звезды векторов фазных напряжений генератора $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ (рис. 9). Звезда векторов напряжений строится с соблюдением выбранного масштаба (обычно рекомендуется $1 \text{ см} = 20 \text{ В}$). На этой же диаграмме показываются векторы линейных напряжений генератора $\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{BC}, \vec{U}_{CA}$ в виде сторон равностороннего треугольника, вершинами которого являются концы векторов фазных напряжений (рис. 6).

Такая векторная диаграмма генератора сохраняется для всех пунктов настоящей работы. Если ее дополнить векторной диаграммой фазных напряжений приемника (в том числе при обрыве нейтрального провода и несимметричном приемнике), то ее можно назвать «топографической».

Векторные диаграммы принято называть топографическими, если электрические потенциалы точек на диаграмме имеют те же буквенные обозначения, что и на соответствующих точках в схеме четырехпроводной звезды (рис. 4 и рис. 10а).

Покажем порядок построения такой топографической векторной диаграммы для случая симметричной нагрузки при наличии нейтрального провода (рубильник P_2 на схеме рисунка 10б замкнут).

Вначале строится звезда векторов фазных напряжений генератора $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$ с центром в точке N (рис. 11) одним из рассмотренных ранее методов. Длины векторов определяются измеренным напряжением U_ϕ питающей сети и выбранным масштабом напряжений. Концы векторов на диаграмме обозначаются буквами A, B, C . Затем строятся векторы линейных напряжений генератора (и приемника) $\vec{U}_{AB} = \vec{U}_{ab}, \vec{U}_{BC} = \vec{U}_{bc}, \vec{U}_{CA} = \vec{U}_{ca}$ в виде сторон правильного (равностороннего) треугольника. Очевидно при наличии нейтрального провода потенциал нейтральной точки n приемника равен потенциалу нейтральной точки N генератора, и обе точки находятся в центре тяжести векторного треугольника (рис. 11). Является очевидным, что длины построенных векторов в масштабе напряжений соответствуют напряжениям между двумя одноименными точками на электрической схеме (рис. 10б).

При наличии нейтрального провода, когда нейтральная точка n приемника совпадает с точкой N , фазные напряжения приемника и генератора

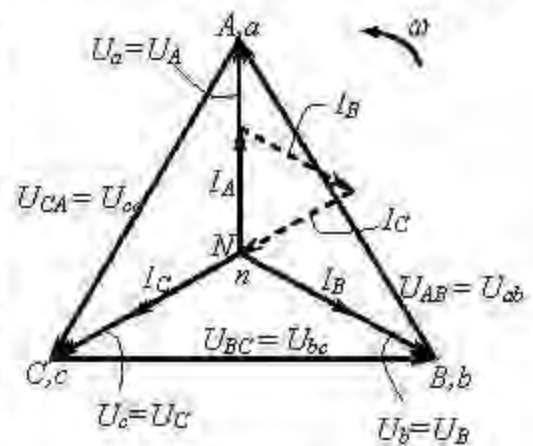


Рис. 11

равны друг другу $\vec{U}_a = \vec{U}_A, \vec{U}_b = \vec{U}_B, \vec{U}_c = \vec{U}_C$ (рис. 11) независимо от того, симметричный приемник или несимметричный.

Полученная векторная диаграмма фазных напряжений приемника $\vec{U}_a = \vec{U}_A, \vec{U}_b = \vec{U}_B, \vec{U}_c = \vec{U}_C$ позволяет увязать с ней векторную диаграмму токов, которая представляет собой графическое решение первого закона Кирхгофа для узловых точек N и n .

При симметричной нагрузке (по определению) фазные (линейные) токи I_L равны друг другу по величине $I_A = I_B = I_C$ и сдвинуты по фазе относительно «своих» фазных напряжений U_a, U_b, U_c на один и тот же угол $\varphi = 0$, так как в фазах приемника включены резисторы (активная нагрузка).

Задавшись масштабом для токов (рекомендуется $1 \text{ см} = 0,25 \text{ А}$), строят векторы токов и проводят их графическое сложение (рис. 11) для определения вектора в нейтральном проводе $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$. На векторной диаграмме эта операция показана с изображением векторов \vec{I}_B и \vec{I}_C пунктиром. Как видно из диаграммы конец третьего слагаемого \vec{I}_C совпадает с началом первого \vec{I}_A (в точке N, n), что означает $\vec{I}_N = 0$, подтверждая такие же показания амперметра A_N (рис. 10б).

Поскольку показания приборов в схеме (рис. 10б) при выполнении второй части рассматриваемого режима (при разомкнутом рубильнике P_2) полностью идентичны с первой частью, необходимость построения второй такой же диаграммы отпадает.

Векторная диаграмма при симметричной нагрузке, показанная на рисунке 11, справедлива как для случая с нейтральным проводом, так и без него. При построении топографической диаграммы для других предусмотренных программой лабораторной работы пунктов можно не показывать в вершинах треугольника линейных напряжений начала фаз приемника a, b, c , поскольку их потенциалы всегда совпадают с потенциалами начал фаз генератора (питающей сети) A, B, C .

Векторные диаграммы напряжений и токов, соответствующие разгрузке одной фазы (а-х) приемника при наличии и обрыве нейтрального провода представлены на рисунках 12а и 12б соответственно. **При обрыве фазы а-х** (ключ K_2 в схеме на рисунке 10б разомкнут) и **замкнутом нейтральном проводе**, ток $I_A = 0$. Токи I_B и I_C остаются равными по величине и совпадают по фазе с напряжениями U_b и U_c (рис. 12а). Ток в нейтральном проводе определяется в соответствии с первым законом Кирхгофа: $\vec{I}_N = \vec{I}_B + \vec{I}_C$. На векторной диаграмме эта операция проделана геометрическим сложением векторов по правилу многоугольника (треугольника). **При обрыве фазы а-х и обрыве нейтрального провода** векторная диаграмма принимает вид, показанный на рисунке 12б. Построив векторную диаграмму фазных и линейных напряжений генератора, находят положение (потенциал) нейтральной точки приемника n . Для этого с помощью циркуля его

растворами (радиусами), равными фазным напряжениям (с соблюдением масштаба) $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$, делают засечки из вершин треугольника линейных напряжений соответственно A, B, C . Точка пересечения этих засечек и есть точка n , которая должна оказаться на середине вектора \vec{U}_{BC} , так как при обрыве одной фазы и нейтрального провода получается однофазная цепь, подключенная к линейному напряжению U_{BC} .

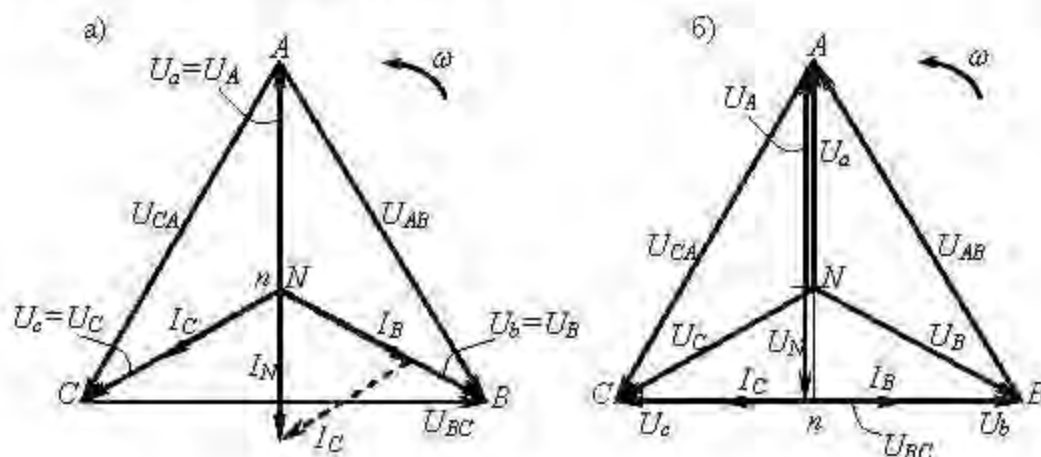


Рис. 12

Из точки n в вершины треугольника ABC проводятся фазные напряжения приемника \vec{U}_a, \vec{U}_b и \vec{U}_c . Нетрудно показать, что $U_a = \frac{3}{2}U_A = \frac{3}{2}U_\phi = 1,5U_\phi$, $U_b = U_c = \frac{U_{BC}}{2} = \frac{U_\phi}{2} = 0,5U_\phi$. Соединив точки N и n , получают вектор $\vec{U}_N = 0,5\vec{U}_\phi$ (рис. 12б). Векторы токов \vec{I}_B и \vec{I}_C совпадают с векторами напряжений \vec{U}_b и \vec{U}_c , находятся в противофазе и дают в сумме ноль: $\vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$, поскольку нейтральный провод отсутствует.

Векторные диаграммы напряжений и токов, соответствующие разгрузке двух фаз (а-х и б-у) приемника при наличии нейтрального провода и без него представлены на рисунках 13а и 13б соответственно. **При обрыве двух фаз** (ключи K_a и K_b в схеме на рисунке 10б разомкнуты) **и наличии нейтрального провода** (P_2 замкнут) $I_A = 0$ и $I_B = 0$, и существует замкнутая цепь одной фазы $c-z$, ток которой I_C равен току нейтрального провода $I_C = I_N$, фазы $a-x$ и $b-y$, а также линейные провода $A-a, B-b$ (рис. 10б) обесточены. Векторная диаграмма для этого случая имеет вид, показанный на рисунке 13а. **При обрыве двух фаз и нейтрального провода** (рубильник P_2 на схеме рисунка 10б разомкнут) цепь оказывается разомкнутой, и все участки цепи обесточены ($I_A = I_B = I_C = 0$), за исключением высокоомных цепей вольтметров, токами в которых всегда пренебрегают ввиду их малости. Векторная диаграмма для этого режима показана на рисунке 13б. Токи на диаграмме отсутствуют; по результатам измерений показаны три вектора напряжения

$\vec{U}_N = \vec{U}_C$, $\vec{U}_a = -\vec{U}_{CA}$ и $\vec{U}_b = \vec{U}_{BC}$. Их величины и направления обусловлены тем, что потенциал нейтральной точки n оказался в вершине C треугольника линейных напряжений. Напряжение на фазе $c-z$ приемника $U_c = 0$, поскольку падение напряжения $U_c = I_c Z_c = 0$, т.к. $I_c = 0$. Напряжение смещения нейтрали $\vec{U}_N = \vec{U}_C$ по величине равно фазному напряжению генератора $U_N = U_\phi$, поскольку вольтметр V_N при разомкнутом рубильнике P_2 (рис. 10а) подключен одним зажимом к нейтральной точке N генератора, а другим через обесточенную фазу $c-z$ приемника подключен к линейному проводу $C-c$ питающей сети. Равенство фазных напряжений разомкнутых фаз $a-b$ и $c-z$ соответствующим линейным напряжениям объясняется тем, что на нейтральную точку n приемника при разомкнутом рубильнике P_2 через цепь незамкнутой фазы $c-z$ подается потенциал линейного провода $C-c$.

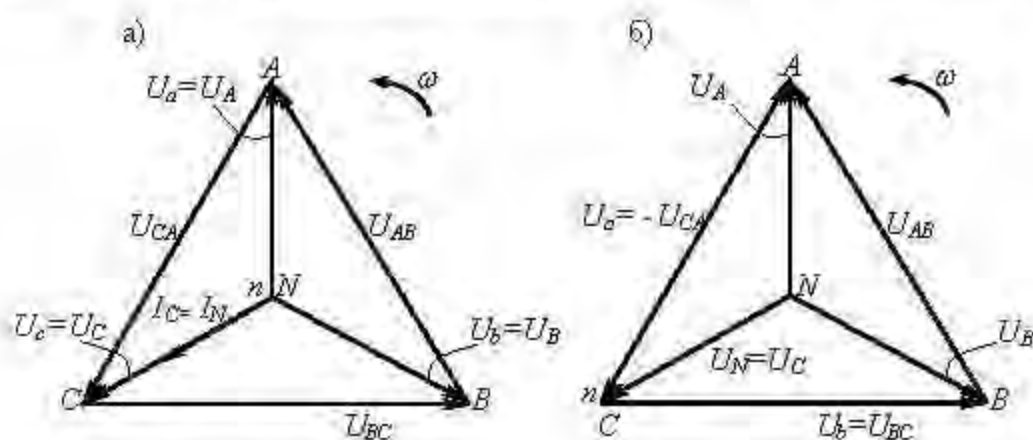


Рис. 13

Векторные диаграммы для общего случая несимметричной нагрузки, когда по трем фазам приемника протекают разные по величине токи $I_A \neq I_B \neq I_C$, показаны на рисунках 14а и 14б. Как и в предыдущих случаях вначале строятся *векторные диаграммы напряжений генератора* в виде симметричной звезды и правильного треугольника (рис. 6). **Векторная диаграмма при наличии нейтрального провода** показана на рисунке 14а, где векторы токов $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ с учетом масштаба построены совпадающими со «своими» фазными напряжениями $\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$. Вектор тока в нейтральном проводе $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ строится графически сложением векторов по правилу многоугольника (четырёхугольника). Измерив длину вектора \vec{I}_N и учтя масштаб, можно сравнить результат с величиной тока I_N измеренного амперметром A_N (рис. 10а, б), убедившись в правильности сделанных графических построений. **Векторная диаграмма при обрыве нейтрального провода и несимметричном приемнике** приведена на рисунке 14б. Изобразив векторную диаграмму фазных и линейных напряжений генератора, необходимо *построить несимметричную звезду векторов фазных напряжений приемника*

$\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c$. Является очевидным, что следует сначала определить на диаграмме положение нейтральной точки n приемника, которая является центром этой звезды. Для этого используется метод засечек, которые делаются (с учетом масштаба напряжений) циркулем с раствором, соответствующим каждому из измеренных фазных напряжений приемника. Например, первую засечку делают при растворе циркуля, равном в масштабе фазному напряжению U_a , поставив ножку циркуля в вершину треугольника A . Затем делают две аналогичные засечки из точек B и C . Точка пересечения трех засечек и есть точка n . Соединив ее с вершинами треугольника A, B, C , получают звезду векторов фазных напряжений приемника. Соединив нейтральную точку генератора N с точкой n , получают вектор напряжения смещения нейтрали \vec{U}_N , длину которого можно измерить и (с учетом масштаба) сравнить с полученными данными измерения U_N вольтметром V_N (рис. 10а, б).

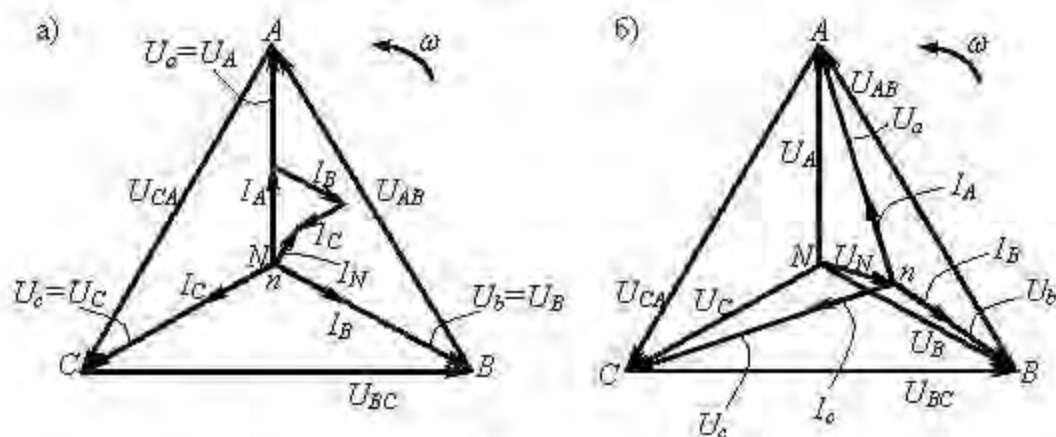


Рис. 14

Расчетные формулы для заполнения раздела таблицы измерений и вычислений (табл. 1) «Вычисления». Поскольку все режимы исследуются применительно к активному приемнику (все фазы приемника резисторы), то следует рассчитать активные мощности приемника по результатам измерения фазных токов и напряжений с учетом того, что угол $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi = 0$ и $\cos \varphi = 1$.

Активные мощности приемника:

$$P_a = U_a I_A \cos \varphi_a = U_a I_A; \quad P_b = U_b I_B \cos \varphi_b = U_b I_B,$$

$$P_c = U_c I_C \cos \varphi_c = U_c I_C$$

Активная мощность всей цепи равна сумме активных мощностей отдельных фаз и вычисляется по формуле:

$$P_Y = P_a + P_b + P_c$$

При симметричной нагрузке активная мощность вычисляется по формуле:

$$P_Y = 3P_\delta = 3U_\delta I_\delta \cos \varphi = \sqrt{3}U_E I_E \cos \varphi$$

Полученные расчетом данные рекомендуется сравнить с результатами измерений ваттметрами.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип соединения звездой?
2. Что называется фазным и линейным током и напряжением?
3. Роль нейтрального провода.
4. Почему в нейтральном проводе не ставят предохранителей?
5. Что означает независимая работа фаз приемника?
6. Что такое симметричная и несимметричная нагрузка трехфазной цепи?
7. Как строятся топографические векторные диаграммы при соединении трехфазной цепи звездой?

2.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЕМНИКА, СОЕДИНЕННОГО ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Программа работы

Исследовать соединение приемников при:

- 1) симметричной нагрузке фаз;
- 2) обрыве одной фазы;
- 3) обрыве двух фаз;
- 4) обрыве линейного провода;
- 5) несимметричной нагрузке фаз (активной по характеру во всех фазах и разной по величине);
- б) равномерной нагрузке, когда в одну фазу вместо активного сопротивления включено емкостное сопротивление (конденсатор).

Схема лабораторной установки

На рисунке 15 показана схема, в которую включены шесть амперметров, два ваттметра и показан переносный вольтметр V , позволяющий измерять напряжения на входных зажимах фаз приемника a, b, c .

В качестве фаз приемника Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} используются проволочные резисторы, представляющие для генератора (питающей сети) активную нагрузку. Также на схеме показан конденсатор x_c с регулируемой емкостью для выполнения пункта б программы работы.

Амперметры A_{ab}, A_{bc}, A_{ca} (рис. 15), измеряющие фазные токи приемника, должны быть выбраны на один предел измерения (например, 2,5 А), а линейные амперметры A_A, A_B, A_C – на другой, более высокий предел (например, 5 А), поскольку линейные токи по величине как правило больше фазных.

Ваттметры W_1 и W_2 включены по так называемой «схеме двух ваттметров», применяемой для измерения активной мощности в *трехпроводных* трехфазных цепях.

Можно показать, что алгебраическая сумма $P_{W1} \pm P_{W2}$ показаний двух ваттметров равна сумме активных мощностей всех трех фаз. Применительно к приемнику, соединенному треугольником, можно записать:

$$P_{W1} \pm P_{W2} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$$

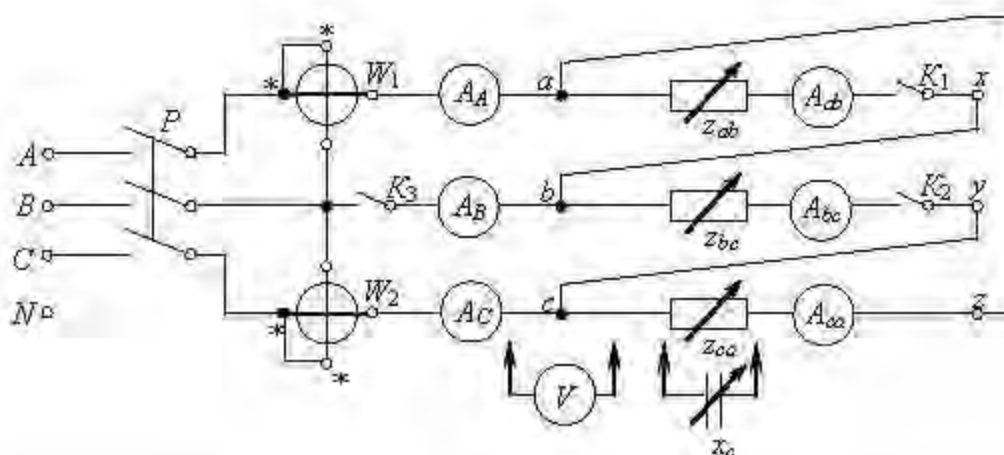


Рис. 15

Недостатком этого метода является отсутствие информации, как суммарная мощность распределяется по трем фазам приемника (за исключением случая симметричной нагрузки).

Следует обратить внимание на схему включения ваттметров. Ток-овые обмотки ваттметров включаются в два любых линейных провода (например, A и C , как показано на рисунке 15), обмотки напряжения своими началами («звездочки») соединяются со «звездочками» токовых обмоток, а концами подключаются к «свободному» линейному проводу ($B-b$).

Выключатели K_1 и K_2 (рис. 15) предназначены для размыкания фаз соответственно $a-x$ и $b-y$, а выключатель K_3 предусмотрен для выполнения пункта 4 программы лабораторной работы (разрыв линейного провода $B-b$).

Трехполюсный рубильник (автомат) P , расположенный на лабораторном щитке, позволяет включить и выключить напряжение питающей сети, подаваемое на вход схемы лабораторной установки (рис. 15).

Порядок выполнения работы

Перед сборкой схемы рекомендуется расположить измерительные приборы и приемники (резисторы) на рабочем месте в соответствии с тем, как это указано на схеме (рис. 15). Собирать схему удобнее отдельными блоками. Например, вначале собрать часть схемы от клемм A, B, C на щитке, включая ваттметры, ключ K_3 и линейные амперметры A_A, A_B, A_C , не подключая их к началам a, b, c приемника. Затем отдельно собрать схему (рис. 15) треугольника (выключатели K_1 и K_2 вмонтированы в проволочные резисторы, которые являются фазами приемника). После этого можно закончить сборку схемы, подключив линейные амперметры к началам фаз приемника.

После проверки правильности сборки схемы преподавателем или старшим лаборантом разрешается включить напряжение рубильником (автоматом) P (рис. 15). Работа выполняется в порядке, указанном в программе.

Вначале устанавливается симметричный режим работы приемника. При включенных выключателях K_1, K_2, K_3 и рубильнике P (рис. 15) устанавливают одинаковые по величине токи в фазах I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , регулируя со-

противление резисторов и наблюдая за показаниями амперметров A_{ab} , A_{bc} , A_{ca} . Поскольку во всех фазах включены резисторы (активная нагрузка) и токи в фазах совпадают по фазе со «своими» фазными напряжениями, то нагрузка будет симметричной.

Снимают показания всех приборов и заносят результаты измерения в первую строку таблицы измерений и вычислений (табл.2).

Фазные напряжения измеряются переносным вольтметром V (рис. 15), который поочередно подключается к парам клемм a , b , c приемника или линейных амперметров A_A , A_B , A_C .

Проделанная настройка резисторов на симметричный режим сохраняется и при выполнении пунктов 2,3 и 4 программы работы.

Обрыв (разгрузка) фаз производится выключателями K_1 и K_2 (пункты 2 и 3 программы). Обрыв линейного провода осуществляется выключателем K_3 при замкнутых ключах K_1 и K_2 (пункт 4 программы).

Несимметричная нагрузка в общем случае (пункт 5 программы) создается различными сопротивлениями резисторов в фазах приемника. Изменяя сопротивления резисторов (при замкнутых выключателях K_1 , K_2 , K_3), добиваются разницы в фазных токах не менее 0,5 А.

Равномерная нагрузка – это частный случай несимметричной нагрузки, при которой величины токов в фазах равны, а углы сдвига по фазе между токами и «своими» фазными напряжениями различны. Такой режим (пункт 6 программы) достигается заменой резистора в фазе $c-a$ конденсатором (рис. 15) с сопротивлением x_c , в результате чего углы сдвига в фазах приемника будут разными: $\varphi_{ab} = 0$, $\varphi_{bc} = 0$, $\varphi_{ca} = -\pi/2$, то есть вектор тока \vec{I}_{ca} будет опережать «свое» напряжение \vec{U}_{ca} на угол 90° .

Равенство величин токов в фазах достигается совместным регулированием сопротивлений резисторов и емкости батареи конденсаторов, то есть добиваются равенства $r_1 = r_2 = x_c$, где r_1 и r_2 – сопротивления резисторов в фазах $a-x$ и $b-y$, а x_c – емкостное сопротивление в фазе $c-z$.

Результаты измерений для всех шести пунктов программы заносятся в соответствующие строки таблицы измерений и вычислений (табл.2).

Содержание отчета

1. Программа лабораторной работы
2. Схема соединений (рис. 15).
3. Таблица данных электроизмерительных приборов.
4. Таблица измерений и вычислений.
5. Векторные диаграммы по каждому пункту программы работы.
6. Выводы по работе или ответы на контрольные вопросы.

Указания по построению векторных диаграмм

Построение векторных диаграмм для всех пунктов программы лабораторной работы начинается с построения с соблюдением масштаба напряжений (1 см = 20 В) симметричной трехлучевой звезды векторов фазных напряжений приемника, соединенного треугольником, которые одновременно являются линейными напряжениями генератора (питающей трехпроводной сети): $\vec{U}_{ab} = \vec{U}_{AB}$, $\vec{U}_{bc} = \vec{U}_{BC}$, $\vec{U}_{ca} = \vec{U}_{CA}$.

Вначале рассмотрим **построение векторной диаграммы** напряжений и токов для случая **симметричной нагрузки** (рис. 16).

Поскольку симметричный режим характеризуется равенством величин фазных токов $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}$ и равенством углов сдвига $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = 0$ (активная нагрузка – резисторы), то задавшись масштабом тока (1 см = 0,25 А), можно определить длину I_{ϕ} векторов фазных токов и построить их совпадающими со «своими» фазными напряжениями (рис. 16). Ранее было показано (рис. 8), что векторы линейных токов $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ могут быть изображены в виде сторон векторного треугольника, вершинами которого являются концы векторов фазных токов, если они построены в виде трехлучевой звезды векторов.

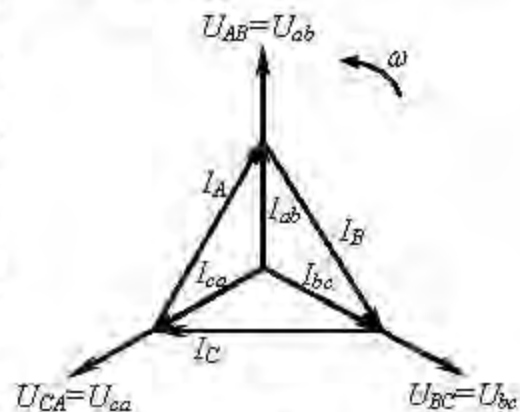


Рис. 16

Так как режим симметричный, то векторы фазных токов $\vec{I}_{ab}, \vec{I}_{bc}, \vec{I}_{ca}$ (рис. 16) образуют симметричную звезду векторов, а векторный треугольник со сторонами $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$ является равносторонним.

Векторная диаграмма при обрыве одной фазы строится в том же порядке: изображается симметричная звезда векторов фазных напряжений, а затем строятся векторы фазных токов \vec{I}_{bc} и \vec{I}_{ca} , поскольку $I_{ab} = 0$, а величины токов I_{bc} и I_{ca} сохраняются (рис. 17). С учетом равенства нулю тока I_{ab} система равенств (6) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_A &= -\vec{I}_{ca} \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{bc} \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc} \end{aligned} \right\}$$

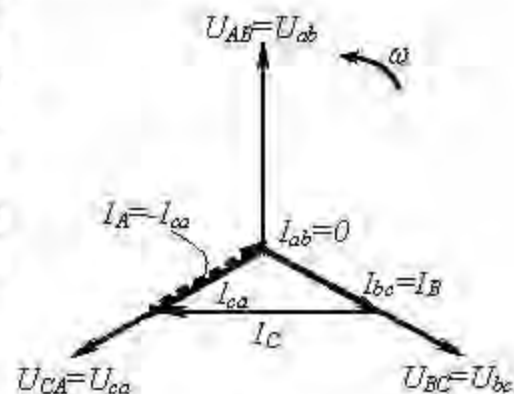


Рис. 17

Таблица измерений и вычислений

Нагрузка	Измеряются											Вычисляются						
	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_1	P_2	ΣP	P_{ab}	P_{bc}	P_{ca}	ΣP	Q	S
	ампер						вольт			ватт			ватт			вар	ВА	
Симметричная																		
Обрыв (разгрузка) одной фазы																		
Обрыв двух фаз																		
Обрыв линейного провода В																		
Несимметричная																		
Равномерная																		

Векторная диаграмма при обрыве двух фаз (рис.18) строится с учетом того, что $\bar{I}_{ab} = 0$, $\bar{I}_{bc} = 0$ и остается неизменным ток \bar{I}_{ca} в фазе $c-a$. Сделав соответствующие уточнения в системе уравнений для линейных токов (6), получим:

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_A &= -\bar{I}_{ca} \\ \bar{I}_B &= 0 \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{ca} \end{aligned} \right\}$$

Таким образом один линейный ток I_B равен нулю, а два других равны по величине фазному току оставшейся включенной фазе $c-a$.

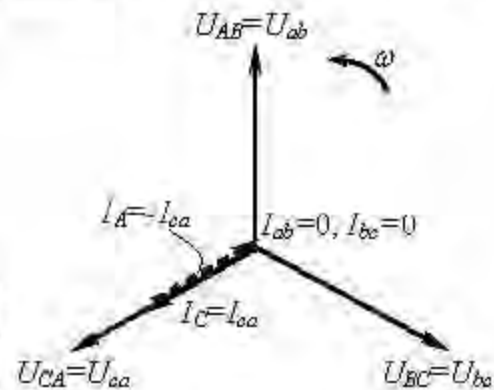


Рис. 18

В рассмотренных режимах разгрузки одной и двух фаз приемника наглядно проявляется *независимость работы фаз треугольника*.

Векторная диаграмма при несимметричной нагрузке всех трех фаз приемника (рис. 19). Порядок построения, как и в предыдущих режимах, сохраняется: вначале строится симметричная звезда векторов фазных напряжений \vec{U}_{ab} , \vec{U}_{bc} , \vec{U}_{ca} , а звезда векторов фазных токов \vec{I}_{ab} , \vec{I}_{bc} , \vec{I}_{ca} оказывается несимметричной, поскольку длины векторов (в масштабе токов) не равны друг другу $I_{ab} \neq I_{bc} \neq I_{ca}$. Очевидно несимметричной будет и система векторов линейных токов \bar{I}_A , \bar{I}_B , \bar{I}_C , показанных на диаграмме (рис. 19) в виде сторон векторного треугольника, стороны которого не равны друг другу $I_A \neq I_B \neq I_C$.

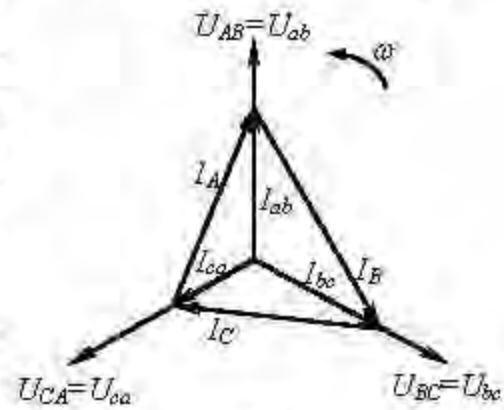


Рис. 19

Векторная диаграмма при равномерной нагрузке отличается от предыдущих тем, что в одной из фаз приемника (фазе $c-z$) векторы тока и напряжения не совпадают друг с другом, а ток \bar{I}_{ca} опережает напряжение на 90° ($\varphi_{ca} = -90^\circ$). Это объясняется тем, что в фазу $c-z$ вместо резисторов включен реактивный элемент – конденсатор с емкостью C (рис. 15).

Построение диаграммы начинается с изображения звезды векторов фазных напряжений (рис. 20). Затем строятся одинаковые по длине векторы фазных токов: в фазах $a-x$ и $b-y$ совпадающими со своими фазными напряжениями, а вектор тока \bar{I}_{ca} изображается опережающим фазное напряжение \vec{U}_{ca} на 90° . Как видно из диаграммы (рис. 20) векторы фазных токов \vec{I}_{ab} , \vec{I}_{bc} , \vec{I}_{ca} одинаковые по величине, образуют *несимметричную звезду векторов*.

Несимметричной оказывается и система трех векторов линейных токов $\vec{I}_A, \vec{I}_B, \vec{I}_C$, показанных пунктиром в виде сторон векторного треугольника, вершинами которого являются концы векторов фазных токов (рис. 20).

Это свидетельствует о том, что равномерная нагрузка при одинаковых величинах фазных токов является частным случаем несимметричной.

Следует обратить внимание (рис. 20), что один из линейных токов I_C меньше фазного (при симметричной нагрузке $I_E = \sqrt{3}I_\phi$).

Векторная диаграмма при обрыве линейного провода B–b представляет собой векторную диаграмму однофазной цепи (рис. 21 б). Данный режим осуществляется размыканием выключателя K_3 (схема на рис. 15) при замкнутых ключах K_1 и K_2 , причем до этого приемник, соединенный треугольником, представлял собой симметричную активную нагрузку: $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca} = r$, где r – активное сопротивление одной фазы.

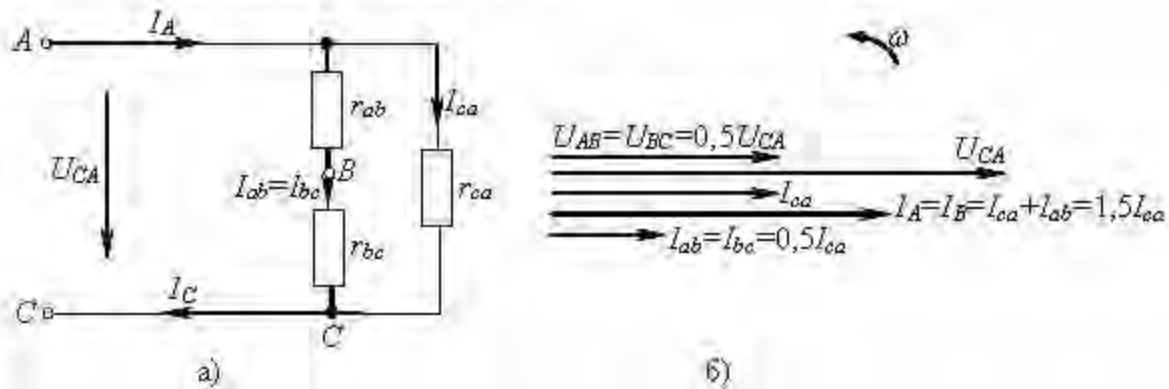


Рис. 21

Получилась по существу уже не трехфазная, а однофазная цепь с двумя параллельными ветвями (рис. 21 а), включенная на однофазное напряжение U_{CA} (соответствующее линейное напряжение трехфазного источника питания). Поэтому она должна рассчитываться и анализироваться с использованием методов расчета однофазных цепей.

Активные сопротивления двух параллельных ветвей, включенных между электрическими узлами А и С однофазной цепи (рис. 21 а) соответственно равны $r_{ab} + r_{bc} = 2r$ и $r_{ca} = r$. Токи в параллельных ветвях: $I_{ca} = \frac{U_{CA}}{r}$,

$$I_{ab} = I_{bc} = \frac{U_{CA}}{2r} = 0,5I_{ca}; \text{ ток в неразветвленной цепи } I_A = I_C = I_{ca} + I_{ab} = 1,5I_{ca}.$$

Напряжение на входе цепи $U_{CA} = U_{AB} + U_{BC}$, откуда $U_{AB} = U_{BC} = 0,5U_{CA}$.

Поскольку в рассматриваемой однофазной цепи включены только резисторы, то векторы напряжений и токов на всех участках цепи совпадают по фазе. На рисунке 21б показаны векторные диаграммы для всех ветвей, построенные с учетом соответствующих масштабов и полученных выше соотношений для напряжений и токов однофазной цепи.

Расчетные формулы для заполнения раздела таблицы измерений и вычислений (табл. 2) «Вычисления».

Активные мощности фаз:

$$P_{ab} = U_{AB}I_{ab} \cos \varphi_{ab}; \quad P_{bc} = U_{BC}I_{bc} \cos \varphi_{bc}; \quad P_{ca} = U_{CA}I_{ca} \cos \varphi_{ca}.$$

Суммарная активная мощность цепи:

$$\Sigma P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$$

при чисто активной нагрузке $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = 0$ ($\cos 0 = 1$).

Реактивная мощность каждой фазы вычисляется по формуле:

$$Q_{\delta} = U_{\delta}I_{\delta} \sin \varphi \quad (\text{при } \varphi = 0 \Rightarrow \sin \varphi = 0),$$

а полная (кажущаяся) мощность

$$S_{\delta} = U_{\delta}I_{\delta} \text{ или } S_{\delta} = \sqrt{P_{\delta}^2 + Q_{\delta}^2} \quad (\text{из треугольника мощностей}).$$

Контрольные вопросы

1. Как соединить фазы приемника треугольником?
2. Что называется фазными и линейными токами и напряжениями, и как соотносятся фазные и линейные величины при соединении треугольником?
3. Какая разница между симметричной и равномерной нагрузкой?
4. При каких условиях соединение треугольником обеспечивает независимую работу фаз приемника?
5. В чем преимущества и недостаток схемы двух ваттметров, применяемой при измерении активной мощности в трехпроводных трехфазных цепях?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.С., Немцов М.Б. Электротехника. – М.: Академия, 2007.
2. Методика решения типовых задач по расчету цепей трехфазного тока. Методические указания. Сост. Хожанов А.И., Рудаков Б.В., Филимонов А.Г. – СПб: ПГУПС, 2000.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Краткие сведения из теории.....	2
1.1. Основные определения.....	2
1.2. Трехфазная цепь, соединенная звездой.....	4
1.3. Трехфазная цепь, соединенная треугольником.....	9
2. Лабораторная работа. Исследование режимов работы трехфазных цепей на лабораторных установках.....	12
2.1. Лабораторная работа. Исследование приемника, соединенного звездой.....	14
2.2. Лабораторная работа. Исследование приемника, соединенного треугольником.....	23
Библиографический список.....	30

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Методические указания к лабораторным работам

**Составители: Рудаков Борис Владимирович,
Филимонов Аркадий Григорьевич**

Редактор и корректор
Компьютерная верстка *Н.А. Ведерникова*

План 2011г., № 142

Подписано в печать с оригинал-макета

Формат 60×84 1/16. Бумага для множ. апп. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 2,0. Тираж 1000 экз.

Заказ

Петербургский государственный университет путей сообщения

190031, СПб., Московский пр., 9.

Типография ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.