



Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ УГГУ



К.М. АБУБАКИРОВ, Л.В. ПЕТРОВЫХ, А.В. УГОЛЬНИКОВ,
С.Г. ХРОНУСОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
Лабораторный практикум
Часть 2.

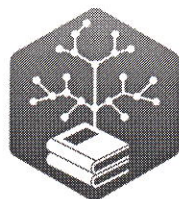
Для студентов всех специальностей очного и заочного обучения,
изучающих дисциплины «Электротехника и электроника» и
«Теоретические основы электротехники».

Екатеринбург
2017

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета,
"28" апреля 2017 г.
Председатель комиссии
В.П. Барановский проф. Барановский В.П.

ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ УГГУ



К.М. АБУБАКИРОВ, Л.В. ПЕТРОВЫХ, А.В. УГОЛЬНИКОВ,
С.Г. ХРОНУСОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
Лабораторный практикум
Часть 2.

Для студентов всех специальностей очного и заочного обучения,
изучающих дисциплины «Электротехника и электроника» и
«Теоретические основы электротехники».

Екатеринбург, 2017

Электронное издание УГГУ
УДК 621.3.01

№ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗДАНИЯ _____

РЕЦЕНЗЕНТ:

Х.Б. Юнусов, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭГП Уральского Государственного Горного Университета

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры «Электротехники» ДАТА 05.05.2017 г. (протокол №15) и рекомендованы В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОННОГО издания в УГГУ.

ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ УГГУ

**К.М. АБУБАКИРОВ, Л.В.ПЕТРОВЫХ, А.В. УГОЛЬНИКОВ,
С.Г. ХРОНУСОВ**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Часть 2.

: учебно-методический электронный комплекс/ К.М. АБУБАКИРОВ, Л.В.ПЕТРОВЫХ, А.В. УГОЛЬНИКОВ, С.Г. ХРОНУСОВ ; Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург:, 2017.- 55 с.

Лабораторный практикум содержит краткие сведения из теории расчета однофазных и трехфазных электрических цепей. Приведено содержание лабораторных и расчетно-графических работ.

Для студентов всех специальностей очного и заочного обучения, изучающих дисциплины «Электротехника и электроника» и «Теоретические основы электротехники»

УДК 621.3.01

© Уральский государственный
горный университет, 2017
© К.М.АБУБАКИРОВ, Л.В.ПЕТРОВЫХ,
А.В. УГОЛЬНИКОВ, С.Г. ХРОНУСОВ
2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
<i>Лабораторная работа 3. Исследование трехфазных цепей при соединении фаз потребителя звездой</i>	<i>15</i>
Цель работы	15
Общие сведения	15
Программа исследований	33
Опыт 1. Исследование 3- и 4-проводных цепей с активной нагрузкой	33
Опыт 2. Исследование 3- и 4-проводных цепей с разнородной нагрузкой	36
Содержание отчета по лабораторной работе 3	38
Контрольные вопросы	39
Расчетно-графическая работа 3	39
<i>Лабораторная работа 4. Исследование трехфазных цепей при соединении фаз потребителя треугольником.....</i>	<i>42</i>
Цель работы	42
Общие сведения	42
Программа исследований	44
Содержание отчета по лабораторной работе 4	52
Контрольные вопросы	52
Расчетно-графическая работа 4	53
Список литературы	55

Введение

Структура лабораторных работ по дисциплинам «Электротехника и электроника» и «Теоретические основы электротехники»:

- теоретическая часть;
- методические указания к выполнению лабораторной работы;
- расчетно-графическая работа (РГР).

Лабораторные работы выполняются в четыре этапа:

1. Подготовка к лабораторной работе.
2. Проведение экспериментов.
3. Оформление отчета.
4. Защита лабораторной работы.

Подготовка к лабораторной работе

Этот этап работы в основном определяет структуру и эффективность лабораторного занятия. При достаточной подготовке *студент может выполнить, оформить и защитить* лабораторную работу в течение одного занятия. Подготовка заключается в составлении «заготовки» отчета, предварительном ознакомлении с целью и содержанием лабораторной работы и изучении соответствующих теоретических вопросов.

«Заготовка» отчета должна содержать все разделы отчета, перечисленные в учебном пособии к лабораторной работе.

«Заготовку» рекомендуется выполнять аккуратно, с учетом требований, предъявляемых к отчету по лабораторной работе. Это позволит в короткие сроки окончательно оформить лабораторную работу и приступить к ее защите.

Проведение экспериментов

Эксперименты необходимо проводить под руководством преподавателя, *выполняя требования* Инструкций по технике безопасности и охране труда и *строго соблюдая* последовательность выполнения работы, изложенную в настоящем учебном пособии.

Примечания:

1. По окончании каждого опыта измеренные и вычисленные значения электрических величин следует *показать* преподавателю.
2. *К разборке* электрической схемы исследуемой цепи можно *приступить* только с *разрешения* преподавателя.
3. Векторные диаграммы необходимо строить в масштабе.
Рекомендуется выбирать масштаб, обеспечивающий минимальные размеры векторной диаграммы в пределах 40-45 мм.
4. Таблицы и текст отчета должны быть написаны чернилами или пастой черного, синего или фиолетового цвета, без помарок и исправлений или оформлены на компьютере.
5. Буквенные обозначения электрических величин и единицы измерений должны соответствовать стандарту [3].

Защита лабораторной работы

Лабораторную работу можно защищать:

- отвечая на вопросы, раскрывающие цель и содержание работы. Примерный перечень контрольных вопросов приведен в настоящем учебном пособии;
- по тестовым билетам;
- по правильно решенной и оформленной РГР, которая полностью раскрывает содержание лабораторной работы.

Измерительные приборы

Для успешного выполнения лабораторной работы необходимо правильно выбрать измерительные приборы и уметь ими пользоваться. *Измерительные приборы следует, учитывая при этом:*

- 1) род тока (постоянный или переменный ток);
- 2) назначение прибора (амперметр, вольтметр, ваттметр и т. п.);
- 3) пределы измерения электрической величины.

С целью уменьшения относительной погрешности измерений *рекомендуется* при выборе измерительного прибора выполнить условие:

$$A_{\text{из}} \geq (0,7-0,8) \cdot A_{\text{к}},$$

где $A_{\text{из}}$ и $A_{\text{к}}$ – соответственно значение величины и конечный предел шкалы измерительного прибора;

4) класс точности прибора (нормируемой наибольшей приведенной или относительной погрешности прибора).

В учебных целях можно использовать приборы с различным классом точности.

При проведении опытов, описанных в настоящем учебном пособии, используют щитовые (установлены на лабораторных стендах) и переносные измерительные приборы электромагнитной, электродинамической, электростатической и выпрямительной систем.

Условные обозначения на шкале измерительных приборов

	— прибор предназначен для включения в цепь <i>только постоянного тока</i> ;
	— прибор предназначен для включения в цепь <i>только переменного тока</i> ;
	— прибор предназначен для включения в цепь переменного и постоянного тока;
	— прибор электромагнитной системы;
	— прибор электромагнитной системы;
	— прибор электромагнитной системы;
	— прибор электродинамической системы;
	— прибор имеет металлический экран, защищающий измерительный механизм от влияния внешних магнитных полей;
	— прибор должен устанавливаться под углом, например 60° к горизонтальной плоскости;
	— прибор должен устанавливаться строго горизонтально;
	— прибор должен устанавливаться строго вертикально.

В лабораторной работе используются *ваттметры электродинамической системы*, измерительные механизмы которых *состоят из неподвижной токовой катушки* (обозначается на схеме линией удвоенной толщины) и *подвижной катушки напряжения* (обозначается на схеме тонкой линией). Каждая катушка имеет начало – генераторный зажим (обозначается *) и конец – выходной зажим (обозначается буквой или цифрой, например U , I , 150 В).

Рекомендации по подключению ваттметра

1. Токовую катушку ваттметра подключают по аналогии с амперметром последовательно с нагрузкой цепи. При этом *ток должен проходить от начала к концу катушки*, согласно принятому направлению тока в исследуемой цепи.

2. Катушку напряжения ваттметра подключают, как и вольтметр, параллельно участку цепи, мощность которого измеряют, учитывая, что *генераторный зажим катушки напряжения должен быть соединен с генераторным зажимом токовой катушки прибора*.

Графические изображения измерительных приборов, регламентируемые стандартами [3], и примеры их подключения приведены на рис.1.

Мощность, измеренную ваттметром, подсчитывают по формуле

$$P = C_w \cdot N, \quad (1)$$

где C_w – постоянная ваттметра (цена деления);

N – число делений шкалы ваттметра, полученное при отсчете показаний прибора;

$$C_w = \frac{I_{w.n} \cdot U_{w.n}}{N_{w.n}}, \quad (2)$$

где $I_{w.n}$ и $U_{w.n}$ – номинальные (предельно допустимые) ток и напряжение ваттметра, приведены в паспорте или на шкале прибора;

$N_{w.n}$ – число мелких делений всей шкалы ваттметра.

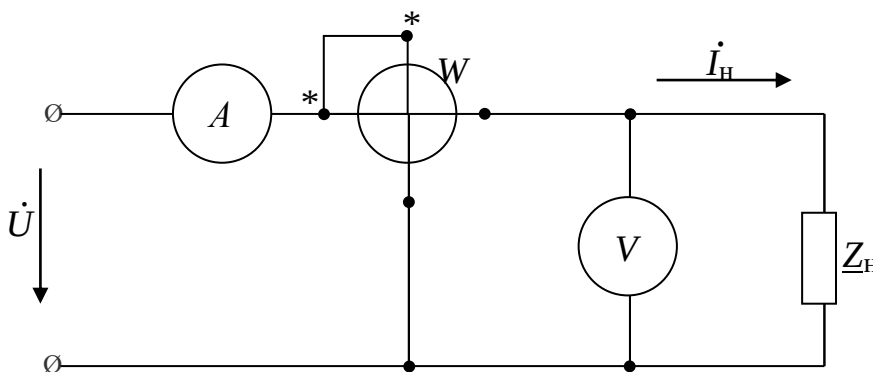


Рис. 1. Примеры подключения измерительных приборов:

A – амперметр; V – вольтметр; W – ваттметр

Пример. На шкале ваттметра приведены: $I_{w.H} = 5 \text{ A}$, $U_{w.H} = 150 \text{ В}$, $N_{w.H} = 75$.

Для этих условий $C_w = \frac{5 \cdot 150}{75} = 10 \text{ Вт/дел.}$

В приборах электромагнитной, электродинамической (кроме ваттметров) и электростатической систем шкалы неравномерные. Причем значительная неравномерность имеет место примерно на 15-20 % длины шкалы, считая ее от нулевой отметки, затем неравномерность уменьшается, а ближе к верхнему пределу шкалы прибора увеличивается снова.

Не рекомендуется проводить измерения электрических величин в начальной части шкалы прибора. С этой целью градуировка шкалы начинается с той ее части, которая имеет слабо-выраженную неравномерность. При этом, как правило, на шкале не указывается цена первого деления (рис. 2).

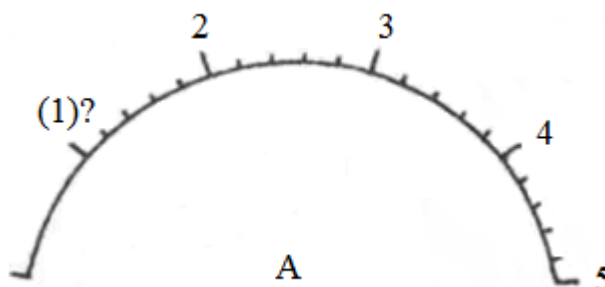


Рис. 2. Градуировка неравномерной шкалы амперметра

Следует помнить, что не указанная на шкале цена первого деления равна половине цены крупного ближайшего деления шкалы прибора (на рис. 2 цена первого деления указана в скобках).

Дисциплина «Электротехника и электроника» имеет специфическую терминологию и содержит понятия, которые целесообразно рассмотреть [1, 2].

Мгновенное значение электрического тока – значение электрического тока в рассматриваемый момент времени.

Периодический электрический ток – электрический ток, мгновенные значения которого повторяются через равные промежутки времени.

Переменный электрический ток – электрический ток, изменяющийся с течением времени по величине и направлению.

Синусоидальный электрический ток – периодический ток, изменяющийся во времени по синусоидальному закону.

Период электрического тока (T) – наименьший интервал времени, в течение которого мгновенное значение тока, изменяясь по значению и направлению, принимает свое первоначальное для данного отсчета значение. Для синусоидального тока период соответствует 2π радиан (или 360°).

Частота электрического тока (f) – величина, обратная периоду электрического тока, вычисляется по формуле, Гц:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (3)$$

Угловая частота синусоидального электрического тока (ω) – скорость изменения фазы тока, с^{-1} :

$$\omega = 2\pi f. \quad (4)$$

Фаза синусоидального электрического тока – аргумент синусоидального тока. Например, в формуле $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ фазой тока является выражение $\omega t + \psi_i$.

Начальная фаза синусоидального электрического тока – значение фазы синусоидального тока в начальный момент времени. В приведенном выше примере начальной фазой является угол ψ_i .

По модулю и знаку начальной фазы определяют, какая из функций является опережающей, а это, в свою очередь, имеет существенное значение при исследовании электрических цепей.

Знак начальной фазы можно определить по знаку мгновенного значения функции при $t=0$, а **модуль** ее есть длина отрезка на оси абсцисс в масштабе аргумента функций, расположенного между началом координат и ближайшей к началу координат точкой, в которой функция, возрастая, пересекает ось абсцисс.

Пример: на рис. 3 приведены две функции тока:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_{i1});$$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t - \psi_{i2}),$$

мгновенные значения которых изменяются с периодом T .

При $t = 0$, $i_1 > 0$, $i_2 < 0$, следовательно, начальные фазы токов «+» ψ_{i1} и «-» ψ_{i2} (см. рис. 3).

Модули начальных фаз: для тока i_1 – отрезок 1-2; для тока i_2 – отрезок 2-3.

Период функций тока: T соответствует отрезку a_1 - a_3 , (но не a_1 - a_2 , хотя и $i_{a1} = i_{a2}$, так как в интервале a_1 - a_2 функция не изменяла своего знака).

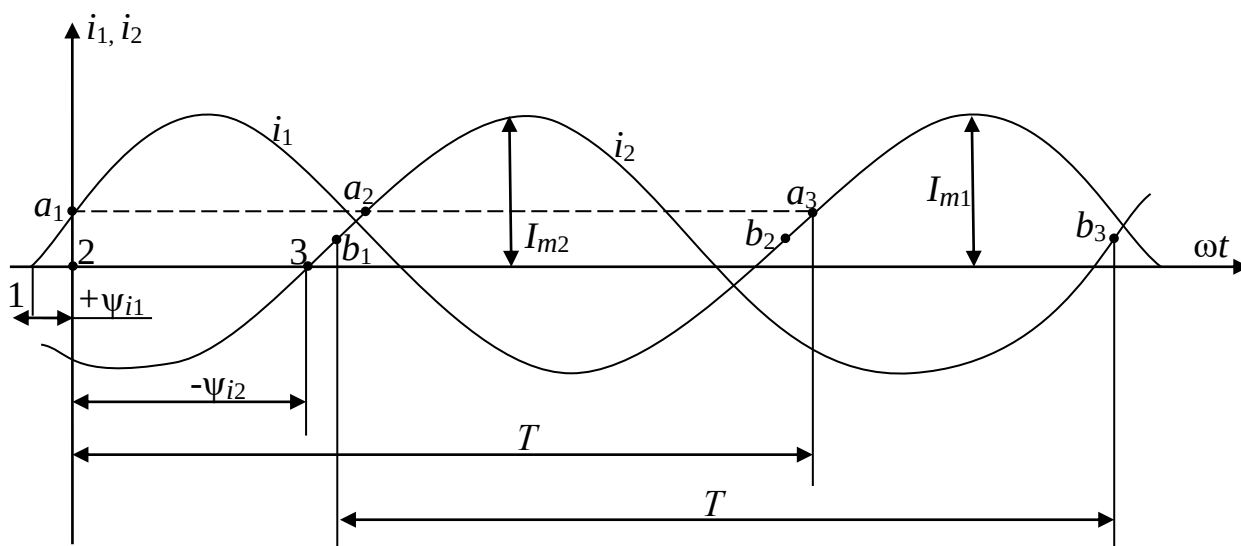


Рис. 3. К определению модуля и знака начальной фазы и периода тока

Действующий периодический электрический ток (I) – среднее квадратичное значение электрического тока за период, т. е. значение постоянного тока, выделяющего за период T на резисторе такое же количество тепла, что и периодический ток за тот же интервал времени. В общем виде

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (5)$$

Для синусоидального тока с начальной фазой ψ_i

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где I_m – максимальное (амплитудное) значение синусоидального тока.

Для синусоидальных ЭДС и напряжений действующие значения можно записать:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (7)$$

Шкалы амперметров и вольтметров электромеханических систем градуируют в действующих значениях тока и напряжения.

Используя выражение (7), можно определить максимальные токи, ЭДС и напряжения исследуемых электрических цепей.

Угол сдвига фаз между напряжением и током (φ) – алгебраическая величина, определяемая путем вычитания начальной фазы тока из начальной фазы напряжения:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (8)$$

Электрическая цепь – совокупность элементов, образующих путь для электрического тока.

Элемент электрической цепи – отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней отдельную функцию.

Примеры:

Резистор – элемент, обладающий активным сопротивлением.

Конденсатор – элемент, обладающий реактивным емкостным сопротивлением.

Катушка индуктивности – элемент, обладающий активным и реактивным индуктивным сопротивлениями.

Участок электрической цепи – часть электрической цепи, содержащая определенную совокупность ее элементов.

Ветвь электрической цепи – участок электрической цепи, по которому протекает один и тот же ток.

Узел электрической цепи – место соединения трех и более ветвей электрической цепи.

Синусоидальные функции можно изобразить на плоскости временными и векторными диаграммами.

Временные диаграммы наглядно показывают процессы изменения во времени мгновенных значений физических величин и могут быть построены в одной системе координат для функций с различными частотами, но требуют выполнения значительного объема графических работ.

Пример построения временных диаграмм синусоидального тока приведен на рис. 3.

Векторные диаграммы просты в построении, но в то же время они не дают наглядного представления о процессах изменения физических величин и могут быть построены в одной системе координат только для функций, имеющих одинаковую частоту.

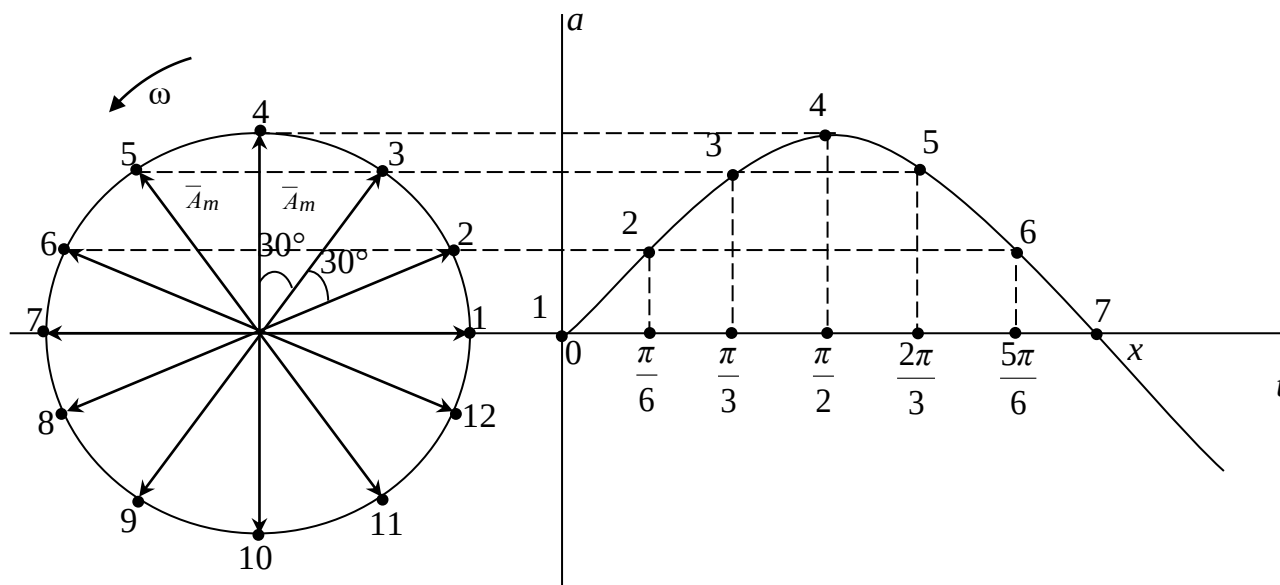
Векторные диаграммы строят на комплексной плоскости.

В электротехнике широко используют диаграммы – метод комплексных чисел (символический метод).

Комплексная плоскость – плоскость, проходящая через две взаимно перпендикулярные оси – вещественную и мнимую.

Реальные синусоидальные функции можно заменить соответствующими символами, в качестве которых используются комплексные числа.

Например, функцию $a=A_m\sin(\omega t+\psi_a)$ можно представить вектором $\overline{A_m}$, вращающимся с угловой частотой $\omega=\text{const}$ от точки, формирующей начальную фазу ψ_a (рис. 4).



В комплексной форме записи эта функция будет выглядеть

при $t=0$, $\omega t=0$, $\underline{A} = A_m e^{j\psi_a}$ – показательная форма записи комплексного числа.

$$A = A' + jA''$$
$$\underline{\underline{A}} = A(\cos \psi_g + j \sin \psi_g),$$

$A' = A \cos \psi_a$ – вещественная (действительная) часть комплексного числа;

$$A = \sqrt{(A')^2 + (A'')^2} \text{ – модуль комплексного числа;}$$

$\psi_a = \operatorname{arctg} \frac{A''}{A'}$ – аргумент комплексного числа;

e – основание натурального логарифма, $e^{j\psi_a} = \cos \psi_a + j \sin \psi_a$.

Любое комплексное число можно изобразить вектором на комплексной плоскости (рис. 5).

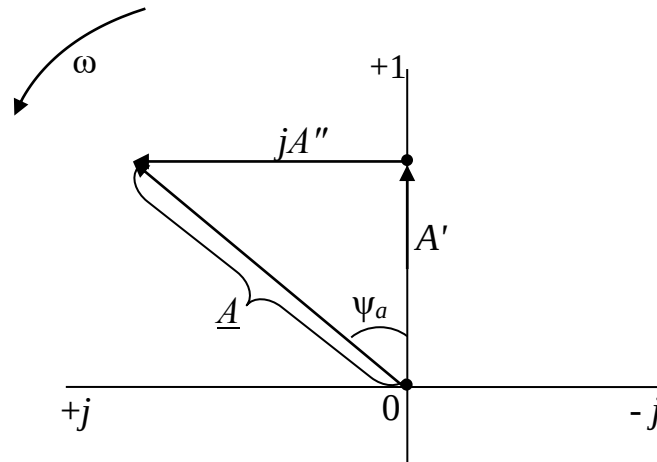


Рис. 5. Изображение комплексного числа на плоскости

Сопряженное комплексное число – это комплексное число с противоположным знаком при мнимой части.

Если комплексное число имеет вид $\underline{A} = A' + jA''$, сопряженное комплексное число – $\underline{A}^* = A' - jA''$ (рис. 6).

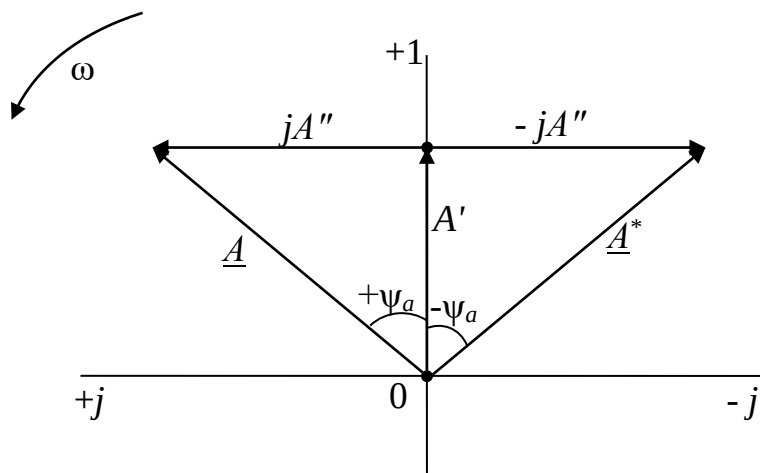


Рис. 6. Изображение комплексного числа и сопряженного ему комплексного числа

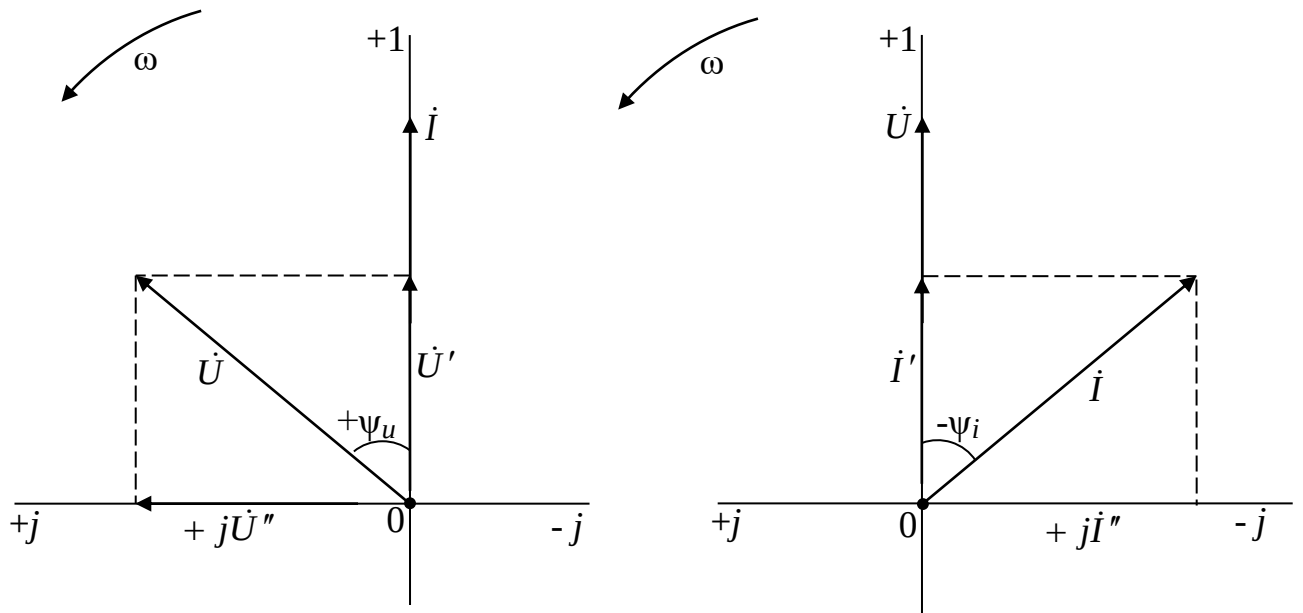


Рис. 7. Изображение тока и напряжения на комплексной плоскости

Пример построения векторов комплексов действующих напряжения и тока однофазной цепи, заданных уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= U \cdot e^{+j\psi_a} = U' + jU''; \\ \dot{I} &= I \cdot e^{-j\psi_a} = I' - jI'',\end{aligned}\tag{9}$$

где U' и U'' , I' и I'' – соответственно вещественные и мнимые части комплексов действующих напряжения и тока (рис. 7).

Лабораторная работа 3

Исследование трехфазных цепей при соединении фаз потребителя звездой

Цель работы

Установить экспериментально и аналитически соотношения между токами и напряжениями для соединения трех- и четырехпроводной звездой в трехфазной электрической цепи при симметричной и несимметричной нагрузках для полнофазного и неполнофазного режимов работы нагрузки.

Общие сведения

В электротехнической практике трехфазным источником питания является генератор, неподвижный якорь которого имеет симметричную трехфазную обмотку, а индуктор с расположенной на нем обмоткой возбуждения (ОВ) приводится во вращательное движение первичным двигателем (турбина, дизель и т. п.).

Согласно Правилам устройств электроустановок (ПУЭ), начала фазных обмоток якоря генератора маркируют заглавными буквами *A, B, C*, а концы – соответственно буквами *X, Y, Z*.

В рабочем режиме генератора в каждой фазе якорной обмотки наводится синусоидальная ЭДС.

Трехфазная симметричная обмотка конструктивно выполнена из трех однофазных обмоток, сдвинутых друг относительно друга на магнитопроводе якоря генератора на 120° или $(2/3)\pi$ радиан (рис. 3.1). Благодаря этому фазные ЭДС генератора отличаются друг от друга только своими начальными фазами.

Мгновенные значения ЭДС фазных обмоток генератора записываются в следующем виде, начальную фазу ЭДС обмотки *A-X* генератора при этом принимаем равной нулю:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \end{aligned} \tag{3.1}$$

где E_m – максимальные амплитудные значения фазных ЭДС генератора.

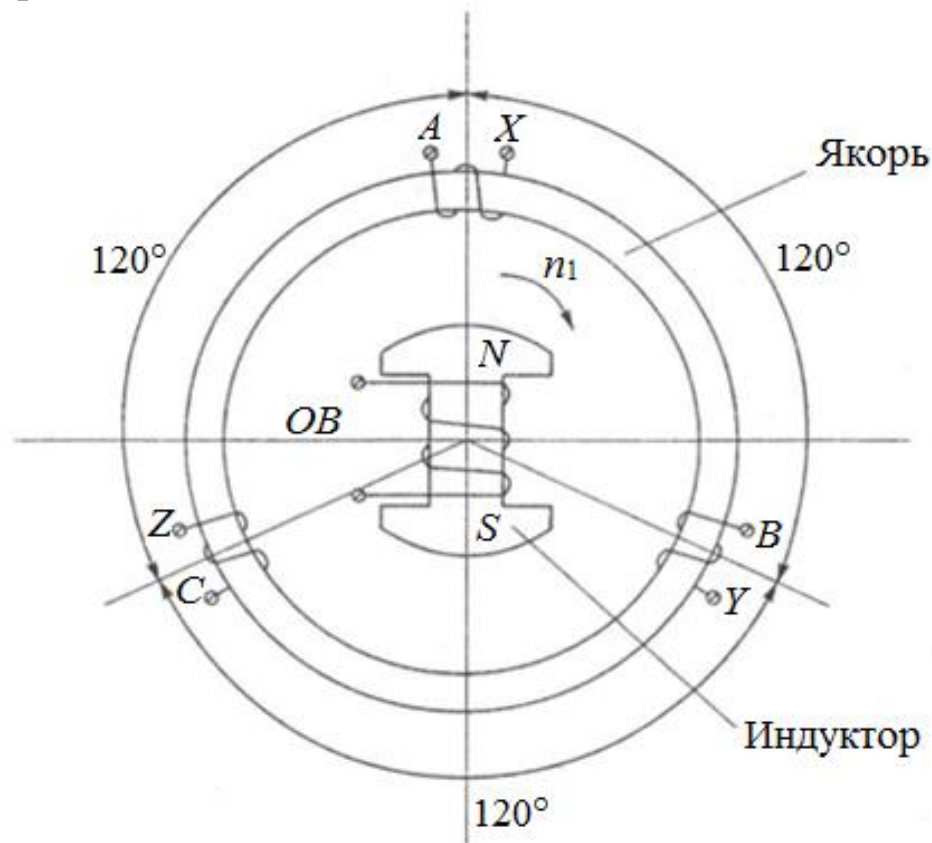


Рис. 3.1. Простейший трехфазный генератор синусоидального напряжения

Временные диаграммы фазных симметричных ЭДС трехфазного генератора приведены на рис. 3.2.

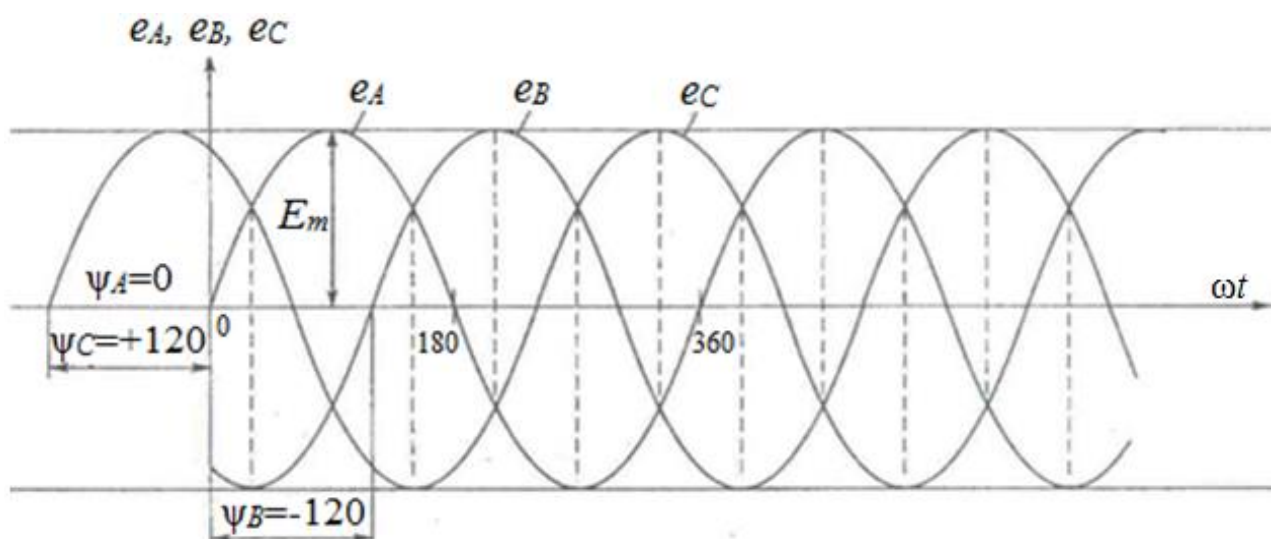


Рис. 3.2. Временные диаграммы фазных симметричных ЭДС трехфазного генератора

Запишем в комплексной форме действующие значения фазных ЭДС:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= E_A; \\ \dot{E}_B &= E_B \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{E}_C &= E_C \cdot e^{+j120^\circ}.\end{aligned}\quad (3.2)$$

Для симметричных фазных ЭДС трехфазного генератора должны выполняться условия:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= 0; \\ \dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C &= \dot{E}_\Phi.\end{aligned}\quad (3.3)$$

Как правило, фазные обмотки якоря трехфазного генератора соединяют звездой, т. е. концы всех фазных обмоток соединяют в один узел, образуя тем самым *нейтраль (N) источника питания*.

Схема соединения фазных обмоток трехфазного генератора звездой приведена на рис. 3.3.

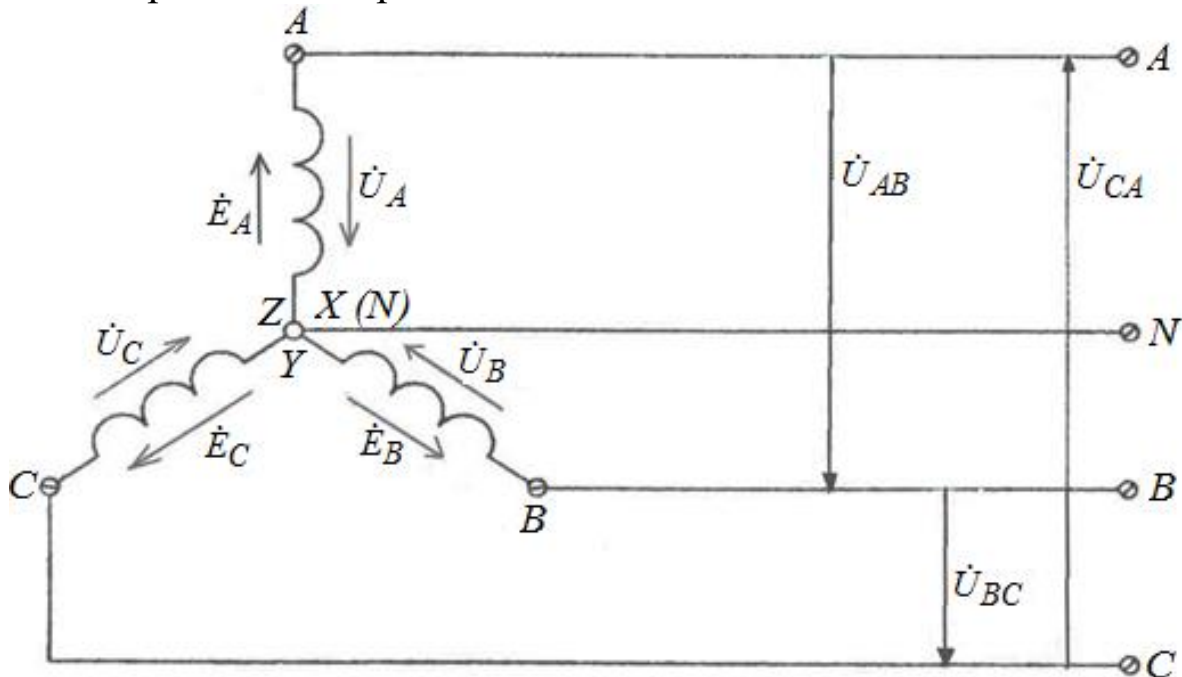


Рис. 3.3. Соединение фазных обмоток трехфазного генератора звездой

При симметричных фазных ЭДС потенциал нейтрали трехфазного генератора равен нулю ($\varphi_N=0$).

Ток нагрузки, протекая по фазным обмоткам якоря генератора, создает падение напряжения на этих обмотках, комплексы действующих значений которых вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_A &= \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_A; \\ \Delta \dot{U}_B &= \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_B; \\ \Delta \dot{U}_C &= \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_C,\end{aligned}\quad (3.4)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – комплексы действующих значений токов фазной нагрузки генератора; $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ – комплексы полных сопротивлений фазных обмоток генератора.

В режиме нагрузки с зажимов фазных обмоток генератора подается в сеть напряжение, комплексы действующих значений которого вычисляют на основе второго закона Кирхгофа, используя формулы:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{E}_A - \Delta \dot{U}_A; \\ \dot{U}_B &= \dot{E}_B - \Delta \dot{U}_B; \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C - \Delta \dot{U}_C.\end{aligned}\quad (3.5)$$

При симметричных токах нагрузки и полных сопротивлений фазных обмоток генератора симметричными являются фазные напряжения генератора.

По аналогии с ЭДС можно записать выражения для мгновенных значений фазных напряжений генератора:

$$\begin{aligned}u_A &= U_m \sin \omega t; \\ u_B &= U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_C &= U_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}).\end{aligned}\quad (3.6)$$

где U_m – максимальные значения фазных напряжений генератора.

Комплексы действующих значений фазных напряжений генератора:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U; \\ \dot{U}_B &= U \cdot e^{-j120^\circ} = U \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U(-0,5 - j0,866); \\ \dot{U}_C &= U \cdot e^{-j120^\circ} = U \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U(-0,5 + j0,866).\end{aligned}\quad (3.7)$$

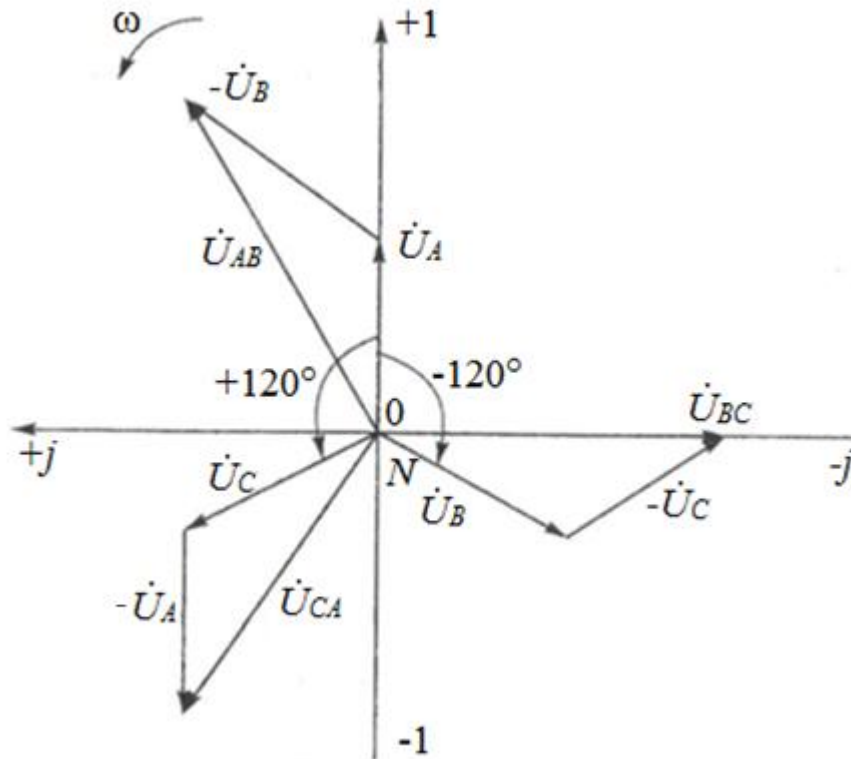
При симметричных фазных напряжениях генератора:

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi = U. \quad (3.8)$$

Линейные (междуфазные) напряжения генератора определяют как разность фазных напряжений:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\quad (3.9)$$

Векторные диаграммы фазных и линейных напряжений строят на комплексной плоскости, используя уравнения (3.7)-(3.9), (см. рис. 3.4).



При расчете и анализе трехфазных цепей широко используют топографическую диаграмму напряжений, приведенную на рис. 3.5.

19

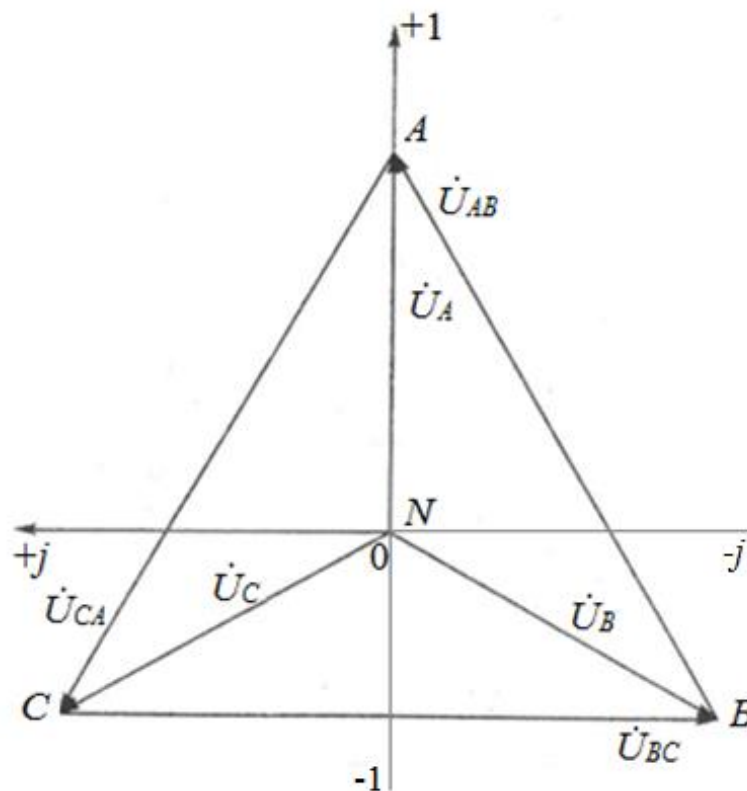


Рис. 3.5. Топографическая диаграмма линейных напряжений источника питания

Нагрузка может быть одно- и многофазная.

Фаза нагрузки – это участок цепи, к которому подведено напряжение одной фазы источника питания (рис. 3.6).

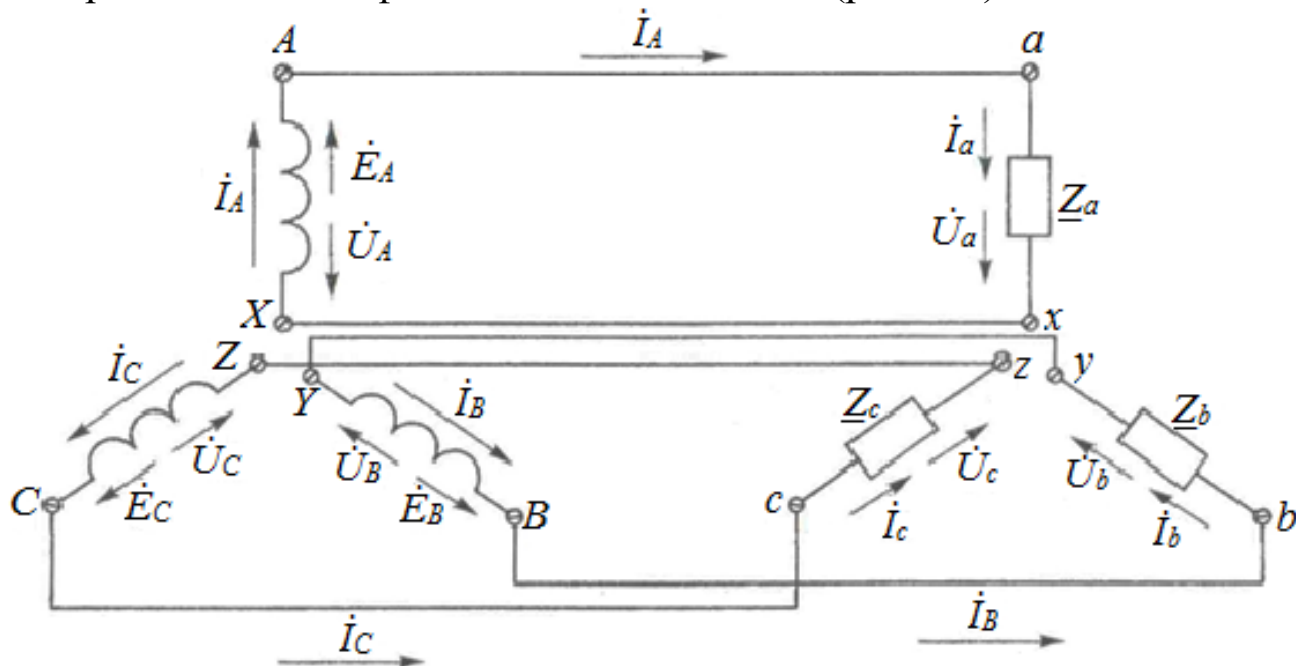


Рис. 3.6. Несвязанная схема пофазного подключения потребителя электрической энергии к источнику питания:

На рис. 3.6 $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – действующие значения фазных токов генератора; $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ – действующие значения фазных токов нагрузки потребителя; $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ – комплексы полных сопротивлений фазной нагрузки; $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ – действующие значения фазных напряжений нагрузки

Начала фаз нагрузки (потребителя) обозначают строчными буквами a, b, c , а концы – соответственно буквами x, y, z .

В электротехнике за положительные направления принято считать:

а) для источника питания направление:

тока – от конца к началу фазы источника питания;

напряжения – от начала к концу фазы источника питания;

б) для потребителя – направление *напряжения и тока* – от начала к концу фазы потребителя.

В практике эксплуатации электрических сетей фазы потребителя соединяют звездой и треугольником.

При соединении фаз потребителя звездой электрические цепи могут быть четырех- и трехпроводными.

Четырехпроводная трехфазная электрическая цепь

Четырехпроводная трехфазная электрическая цепь формируется на основе трехфазной цепи (см. рис. 3.6) посредством объединения трех проводов, соединяющих концы фаз источника питания и нагрузки в один провод (рис. 3.7).

При соединении фаз потребителя звездой образуется *нейтраль нагрузки (n)*, являющаяся, по аналогии с нейтралью источника питания, общей точкой концов фаз потребителя.

Провода, соединяющие начала соответствующих фаз источника питания и потребителя, называются *линейными проводами* ($A-a, B-b, C-c$), а токи, протекающие по ним, – *линейными токами* (I_A, I_B, I_C) I_L .

Токи I_A, I_B, I_C – фазные токи I_Φ . Для соединения нагрузки звездой $I_L = I_\Phi$.

Провод, соединяющий узлы N и n трехфазной цепи, называют *нейтральным проводом*.

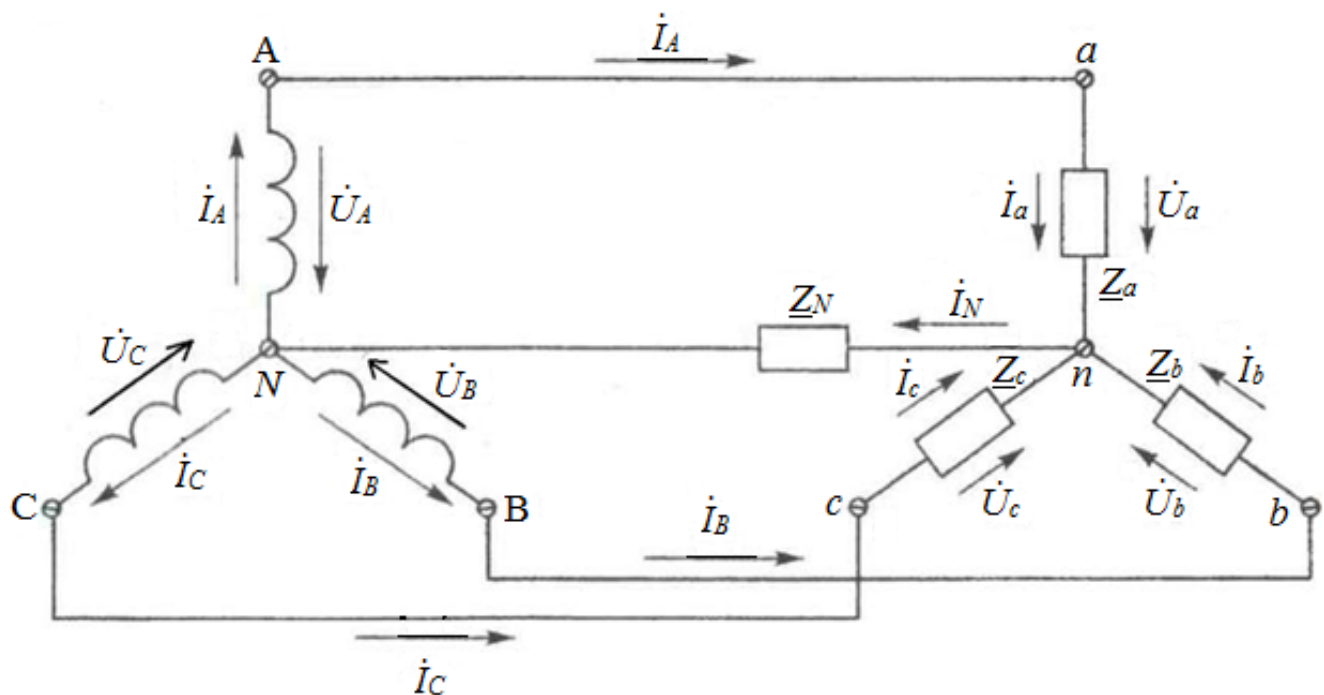


Рис. 3.7. Четырехпроводная трехфазная электрическая цепь

В общем случае расчеты в четырехпроводной трехфазной цепи производят по следующим формулам:

– определяют напряжение смещения между нейтральными точками:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (3.10)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексы действующих значений фазных напряжений источника; $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – комплексы полных проводимостей фаз нагрузки и нейтрального провода:

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}; \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}; \quad \underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}; \quad \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}.$$

– Определяют комплексы фазных напряжений нагрузки:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_N; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_N; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_N. \end{aligned} \quad (3.11)$$

– Определяют комплексы фазных токов нагрузки:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \dot{U}_a \cdot \underline{Y}_a; \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \dot{U}_b \cdot \underline{Y}_b; \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \dot{U}_c \cdot \underline{Y}_c. \quad (3.12)$$

– По первому закону Кирхгофа для узловой точки «n» определяют ток в нейтральном проводе:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (3.13)$$

Нагрузка может быть симметричной и несимметричной. В первом случае должны выполняться условия:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c;$$

$$\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c.$$

То есть фазная нагрузка должна быть *однородной* по характеру и одинаковой по значению (например, во все фазы потребителя включены одинаковые по значению активные сопротивления).

Во втором случае имеет место неравенство $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$, обусловленное неоднородностью нагрузки (например, в фазу *a* включено активное, в фазу *b* – индуктивное, в фазу *c* – емкостное сопротивление):

$$\infty \geq \underline{Z}_N \geq 0. \quad (3.14)$$

При обрыве нейтрального провода (аварийная ситуация) $Z_N = \infty$. В этом случае четырехпроводная схема становится трехпроводной.

Для симметричной нагрузки выполняется условие:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (3.15)$$

Поэтому при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен нулю ($\dot{I}_N = 0$).

Если для упрощения расчетов пренебречь потерями в соединительных проводах, то фазные напряжения на нагрузке будут равны соответствующим фазным напряжениям источника (генератора):

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A = U; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B = U \cdot e^{-j120^\circ} = U \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C = U \cdot e^{-j120^\circ} = U \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right), \end{aligned} \quad (3.16)$$

где U – модуль (значение) фазных напряжений.

На рис. 3.8 представлена схема для соединения нагрузки четырехпроводной звездой при $Z_N = 0$.

Фазные токи и ток в нейтральном проводе вычисляют по формулам (3.12) и (3.13).

Векторные диаграммы напряжений и токов источника и нагрузки при различных режимах работы для соединения четырехпроводной звездой представлены на рис. 3.9-3.11 для случая, когда в фазах

нагрузки активные сопротивления (на рис. 3.11, а и 3.11, б при аварийных режимах работы рассматриваемой цепи).

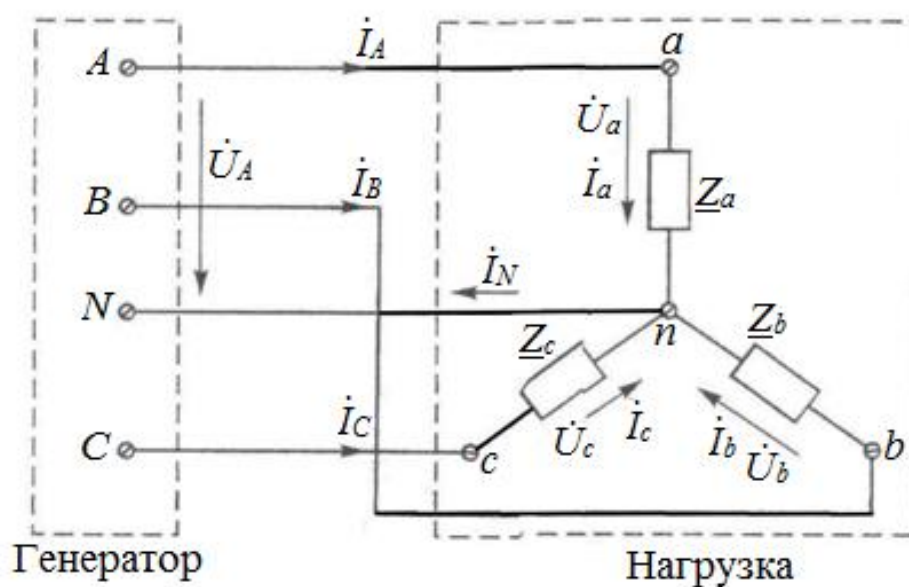


Рис. 3.8. Соединение нагрузки четырехпроводной звездой

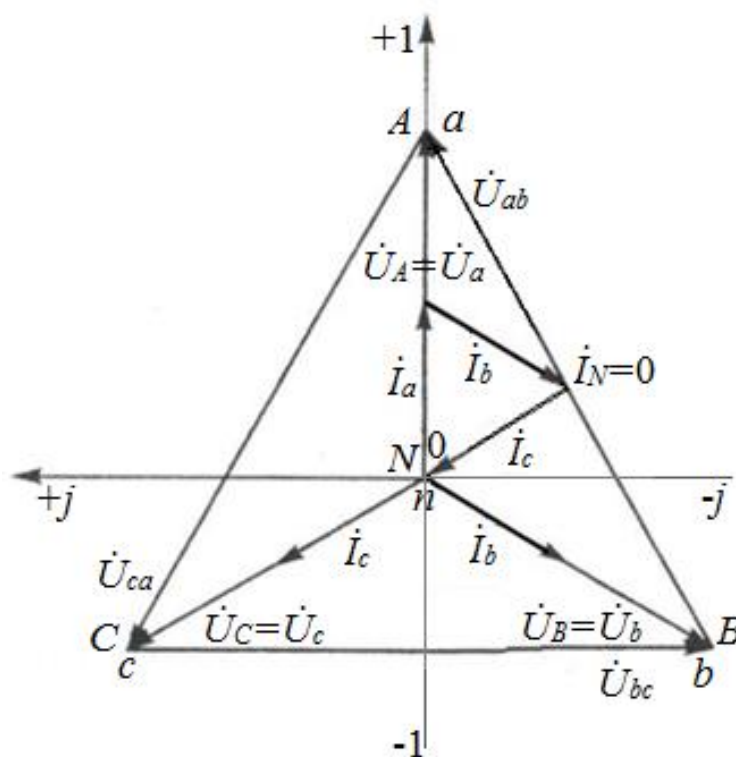


Рис. 3.9. Векторная диаграмма напряжений и токов: $R_a=R_b=R_c$

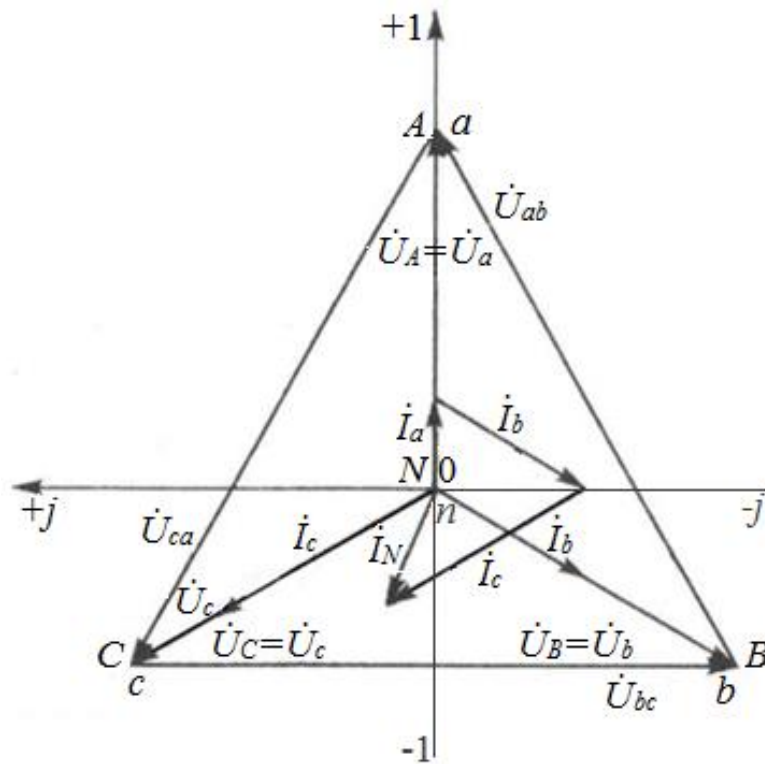


Рис. 3.10. Векторная диаграмма напряжений и токов: $R_a > R_b > R_c$

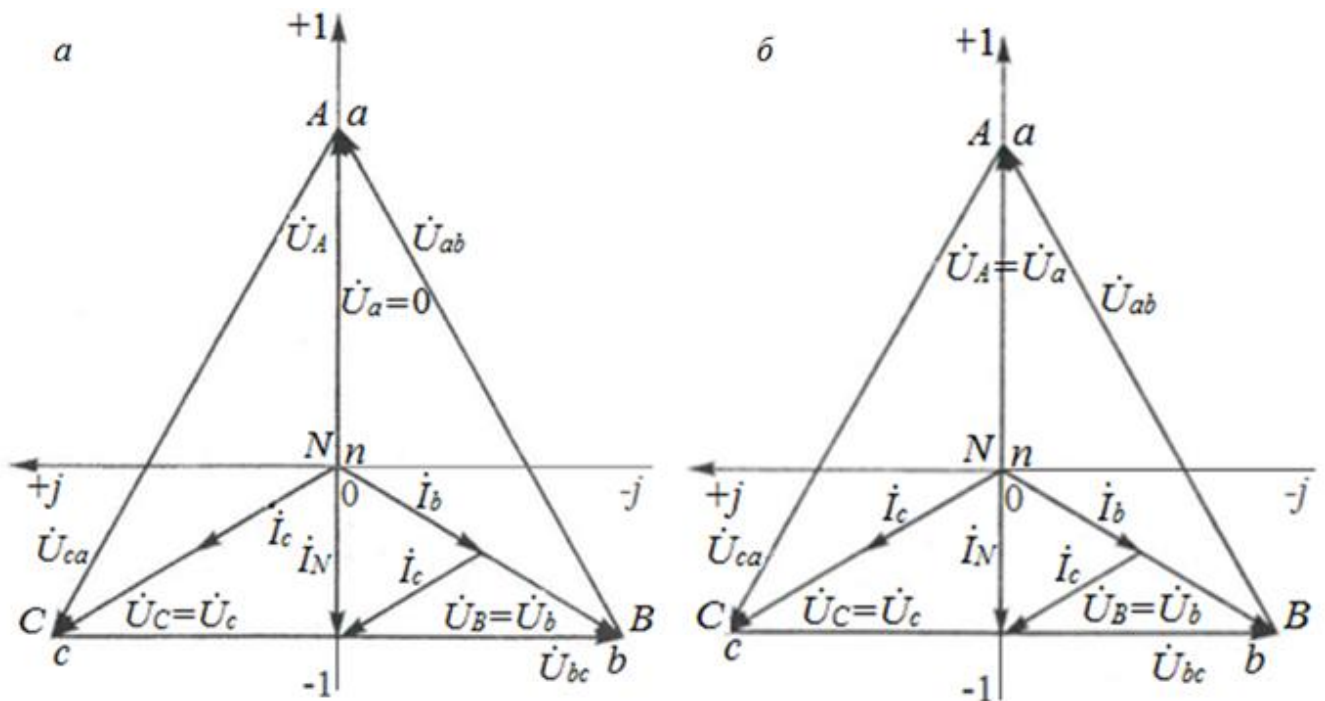


Рис. 3.11. Векторные диаграммы напряжений и токов:
 а – $R_a = R_b = R_c$ (обрыв линии A-a); б – $R_a = \infty$; $R_b = R_c$ (обрыв фазы а)

Примечание. Если пренебречь потерями напряжения в соединительных проводах для четырехпроводной звезды, независимо от величины и характера нагрузки фазные и линейные напряжения на нагрузке равны напряжениям источника.

Трехпроводная трехфазная электрическая цепь

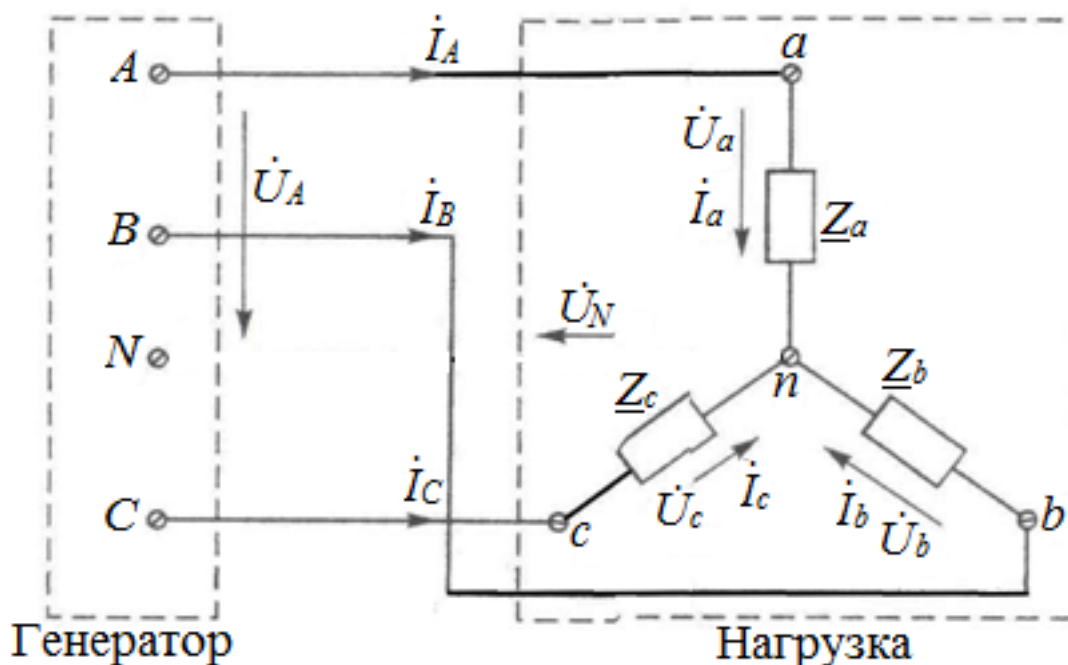


Рис. 3.12. Соединение нагрузки трехпроводной звездой

На рис. 3.12 представлено соединение нагрузки трехпроводной звездой в трехфазной электрической цепи. Генератор (источник энергии) представлен клеммами A, B, C, N .

Расчеты в трехпроводной трехфазной электрической цепи в общем случае производят по следующим формулам:

– определяют напряжение смещения между нейтральными точками:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (3.17)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – комплексы действующих значений фазных напряжений источника; $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ – комплексы полных проводимостей фаз нагрузки;

– определяют комплексы действующих значений фазных напряжений нагрузки

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{U}_N; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{U}_N; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{U}_N. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Примечание. Комплексы фазных напряжений источника $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – это симметричная трехфазная система напряжений (напряжения одинаковы по модулю и сдвинуты друг относительно друга на угол в 120°).

– определяют токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \dot{U}_a \cdot \underline{Y}_a; \\ \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \dot{U}_b \cdot \underline{Y}_b; \\ \dot{I}_c &= \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \dot{U}_c \cdot \underline{Y}_c. \end{aligned} \quad (3.19)$$

В случае симметричной нагрузки в фазах (сопротивления фаз одинаковы по значению и по характеру) напряжение смещения между нейтральными точками $\dot{U}_N = 0$, фазные напряжения нагрузки равны соответствующим фазным напряжениям источника: $\dot{U}_a = \dot{U}_A$; $\dot{U}_b = \dot{U}_B$; $\dot{U}_c = \dot{U}_C$.

На рис. 3.13-3.15 представлены векторные диаграммы напряжений и токов для источника и нагрузки при различных режимах работы в трехпроводной трехфазной электрической цепи в случае, когда нагрузка в фазах потребителя – активные сопротивления.

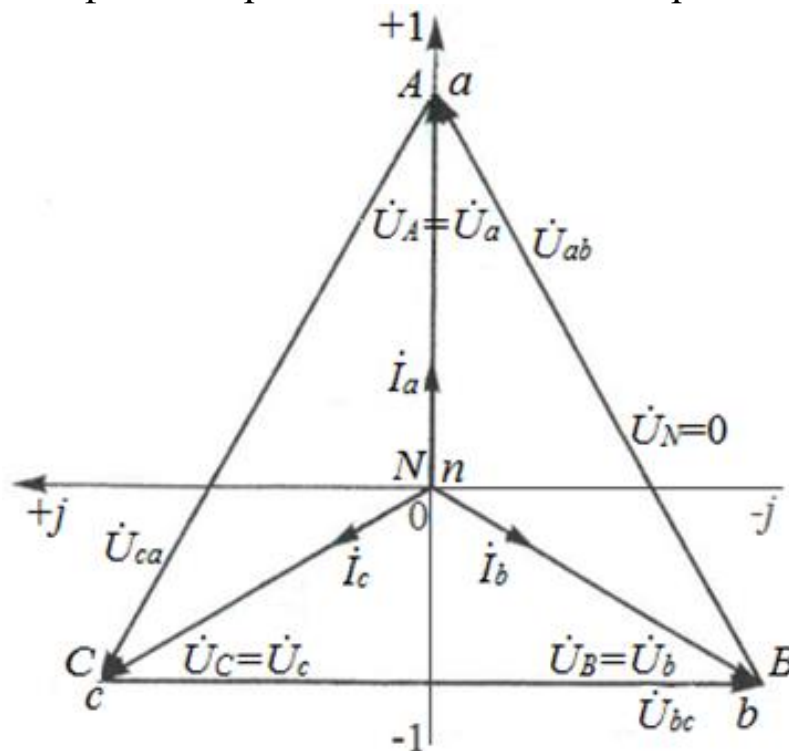


Рис. 3.13. Векторная диаграмма напряжений и токов: $R_a = R_b = R_c$

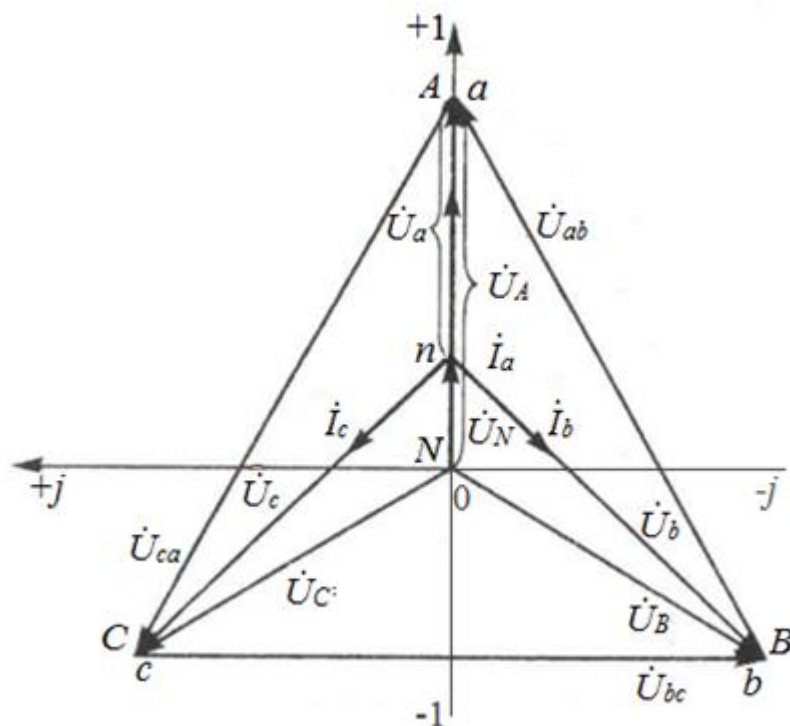


Рис. 3.14. Векторная диаграмма напряжений и токов: $R_a < R_b = R_c$

При $R_a < R_b = R_c$ (см. рис. 3.14) соотношения $U_a < U_b = U_c$ и $I_a > I_b = I_c$ следуют из расчетов по формулам (3.17) - (3.19).

Для случая $R_a > R_b > R_c$ по расчетам по формулам (3.17) - (3.19) получается: $U_a > U_b > U_c$, $I_a < I_b < I_c$.

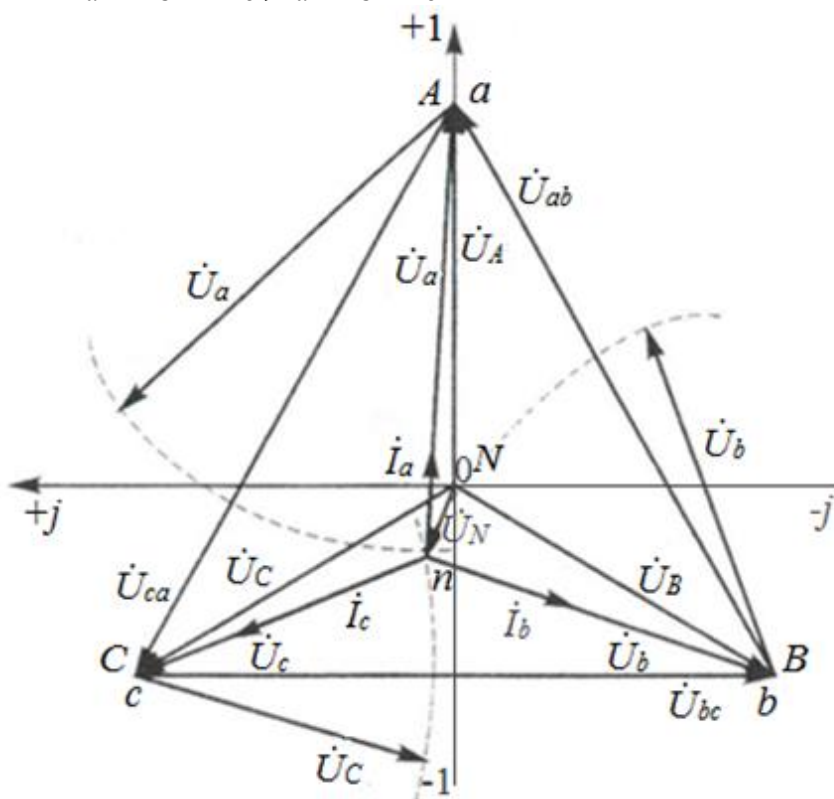


Рис. 3.15. Векторная диаграмма напряжений и токов:
 $R_a > R_b > R_c$, $U_a > U_b > U_c$, $I_a < I_b < I_c$

Векторная диаграмма напряжений строится следующим образом:

векторная диаграмма напряжения источника (генератора) – симметричная трехфазная система напряжений (см. рис. 3.15). Нейтраль нагрузки n и напряжение смещения U_N определяются так: из вершин Aa , Bb , Cc треугольника линейных напряжений делаются засечки радиусами, значения которых соответствуют в масштабе напряжениям U_a , U_b , U_c . Точка пересечения трех засечек и будет являться нейтралью n нагрузки.

Аварийные режимы работы в трехфазной трехпроводной электрической цепи

Аварийные режимы работы в трехфазной трехпроводной электрической цепи в случае, когда нагрузка в фазах – активная, представлены на схемах 3.16, 3.18 и векторные диаграммы напряжений и токов – на рис. 3.17, 3.19, 3.20.

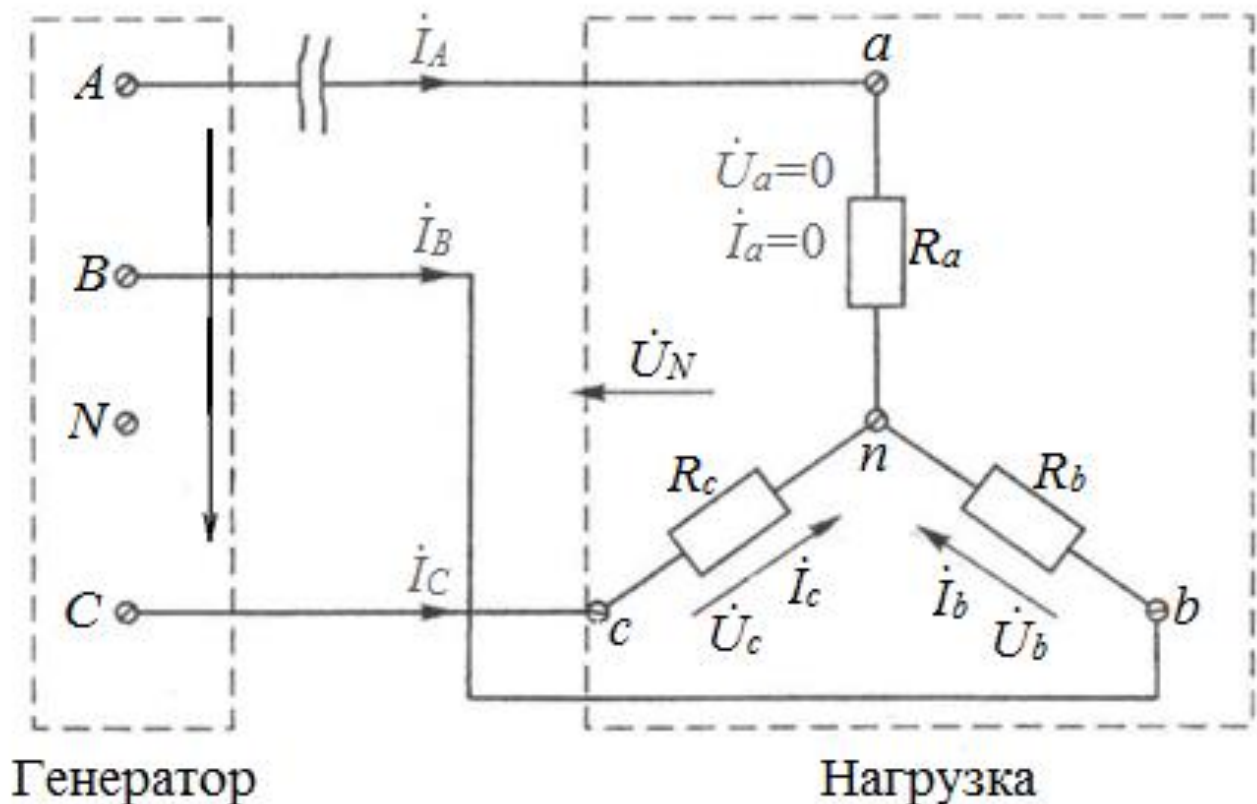


Рис. 3.16. Схема при обрыве цепи линейного провода $A-a$

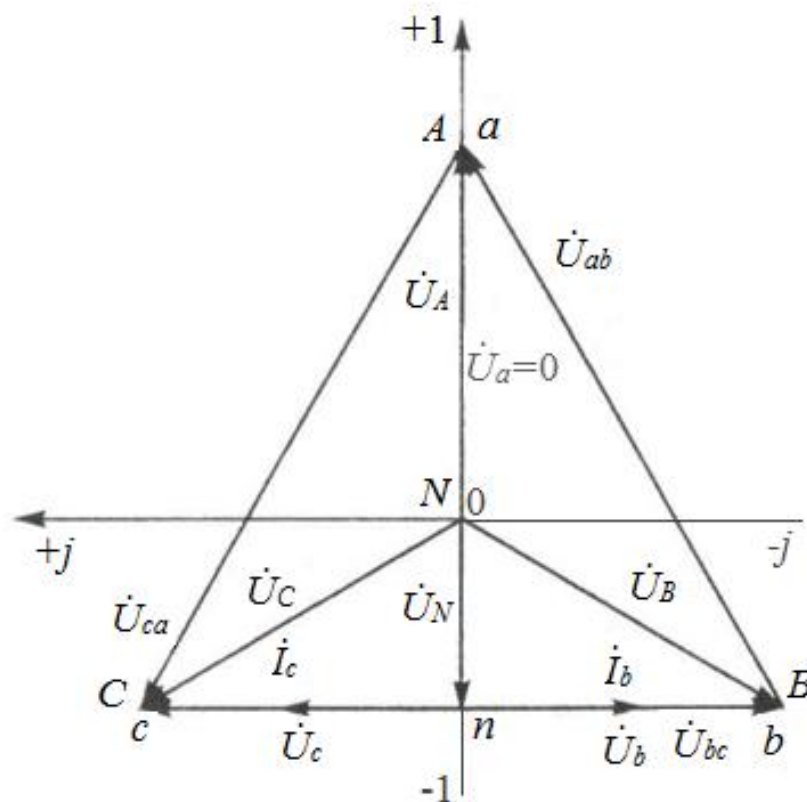


Рис. 3.17. Векторная диаграмма напряжений при обрыве линии $A-a$

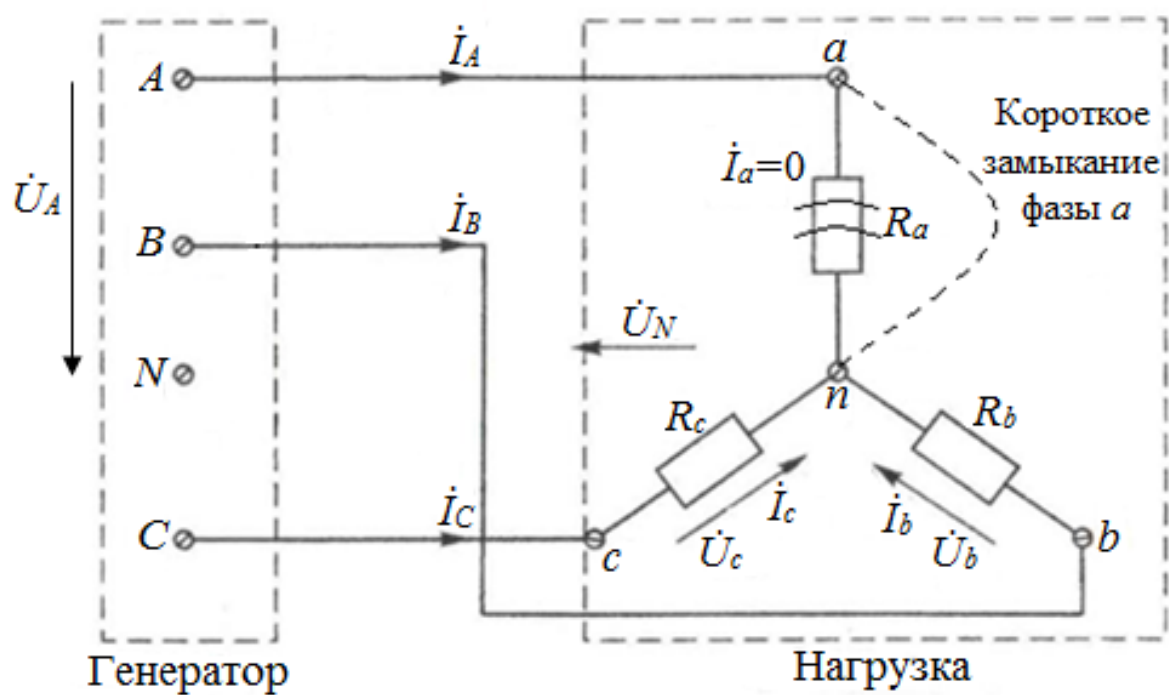


Рис.3.18. Схема при обрыве фазы a
(пунктиром при коротком замыкании фазы a) $R_b = R_c$

При обрыве фазы a , $R_a = \infty$, $Y_a = 0$, $Y_b = Y_c = g$ напряжение смещения

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \cancel{\underline{Y}_a} + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\cancel{\underline{Y}_a} + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2} = -\frac{\dot{U}_A}{2};$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 1,5\dot{U}_A;$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N = \frac{\dot{U}_{BC}}{2};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_N = -\frac{\dot{U}_{BC}}{2}.$$

При коротком замыкании в фазе a (на рис. 3.18 короткое замыкание показано пунктиром $R_a = 0$; $\underline{Y}_a = \infty$, напряжение смещения $\dot{U}_N$ определяется по формуле (3.17).

$$\dot{U}_N = \frac{\infty}{\infty} - \text{неопределенность.}$$

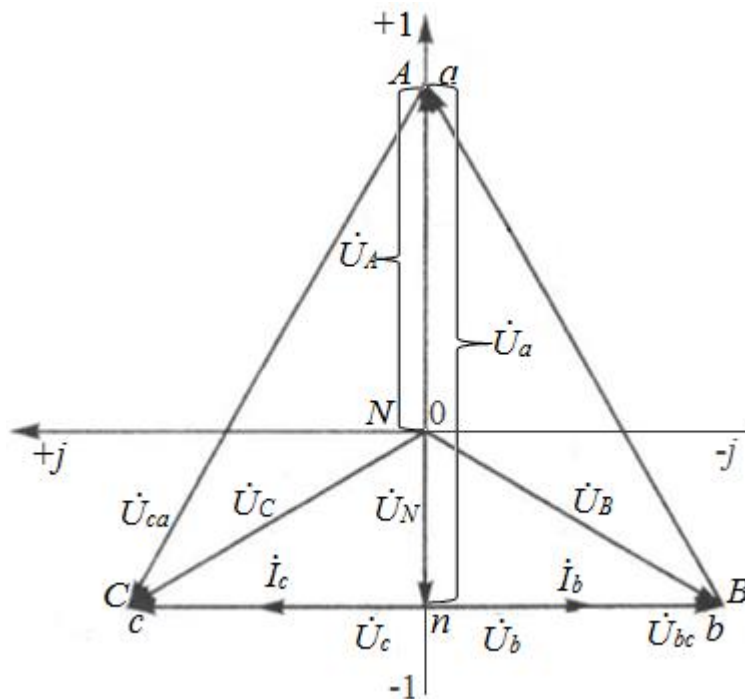


Рис. 3.19. Векторная диаграмма напряжений при обрыве фазы $A-a$, $R_b = R_c$

Для того чтобы избавиться от неопределенности, три слагаемых числителя и три слагаемых знаменателя делим на y_a :

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot 1 + 0 + 0}{1 + 0 + 0} = \dot{U}_A;$$

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 0;$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N = -\dot{U}_{AB};$$

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

Фазные напряжения на нагрузке $U_a = 0$, U_b , U_c равны линейным (увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с нормальным режимом), токи I_b , I_c увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, ток I_a – в 3 раза по отношению с нормальным режимом работы.

На рис. 3.20 представлены векторные диаграммы напряжений и токов.

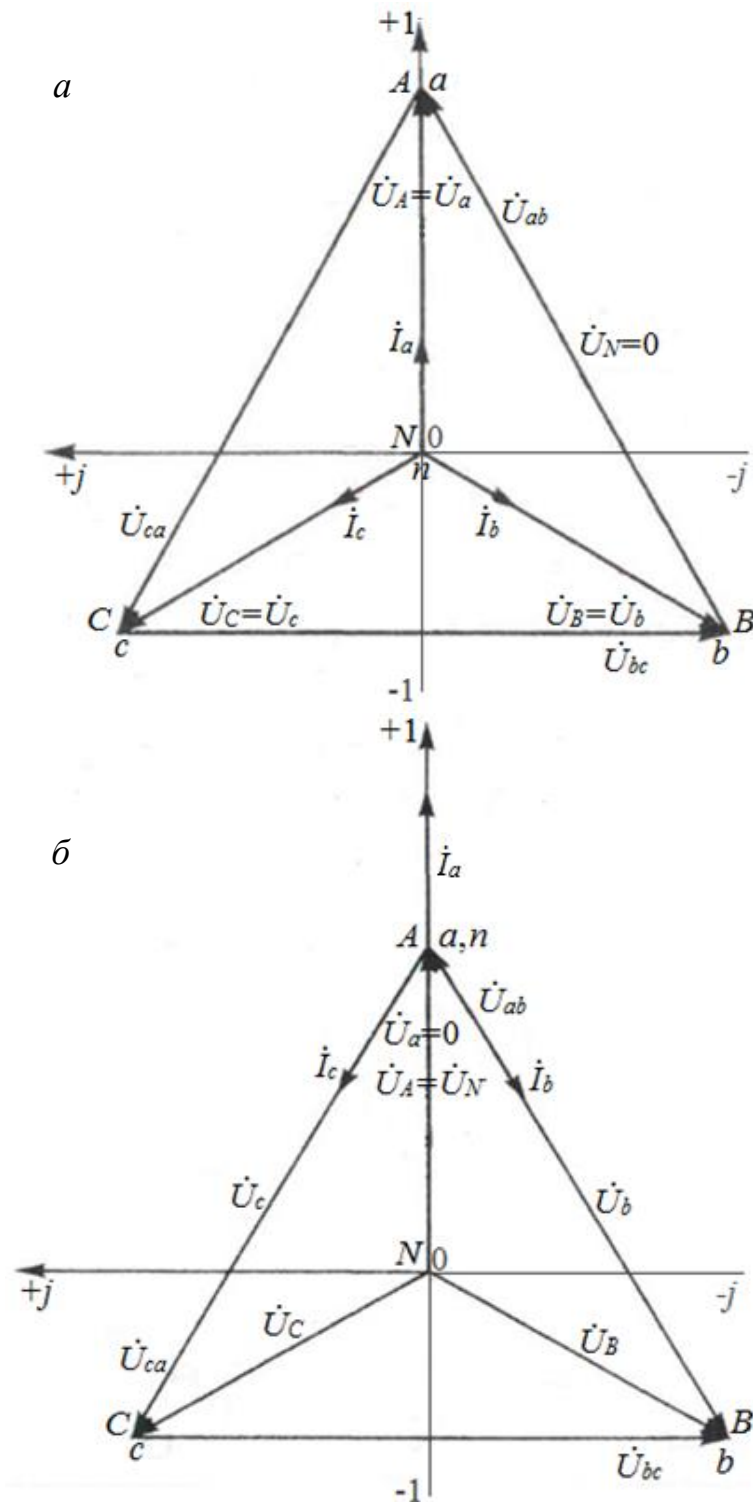


Рис. 3.20. Векторные диаграммы напряжений и токов при нормальном режиме работы (а) и коротком замыкании в фазе а (б)

Примечание. В трехпроводной звезде при несимметричных режимах работы нагрузки возникает напряжение смещения между нейтральными точками и фазные напряжения на нагрузке искажаются (т. е. фазные напряжения – несимметричны).

Программа исследований

Опыт 1. Исследование 3- и 4-проводных цепей с активной нагрузкой

Последовательность выполнения работ:

1. Собрать схему опыта, приведенную на рис. 3.21.

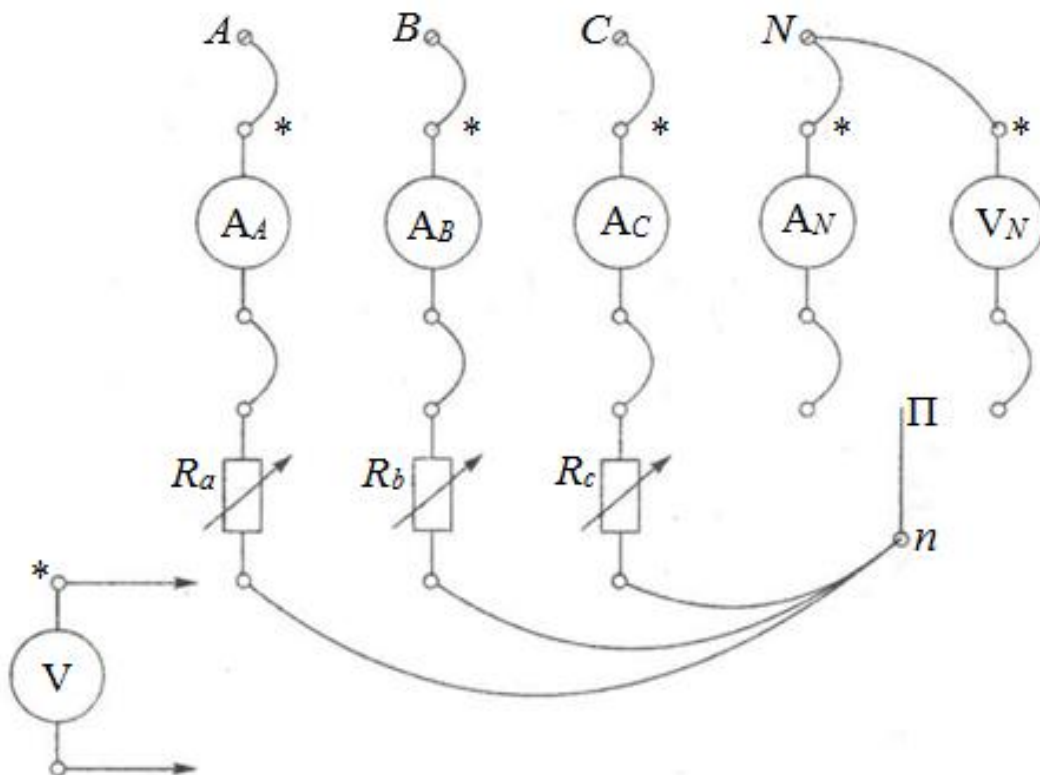


Рис. 3.21. Схема опыта по исследованию 3- и 4- проводных цепей с активной нагрузкой

Примечание. Четырехпроводная цепь формируется при замыкании переключателем Π зажимов $N-A_N-\Pi-n$, так как сопротивление измерительной цепи амперметра A_N и соединительных проводов мало, и можно считать, что $\underline{Z}_n \approx \infty$.

Трехпроводная цепь образуется при замыкании переключателем Π зажимов $N-V_N-\Pi-n$, поскольку сопротивление измерительной цепи вольтметра велико (десятки и сотни кОм), и можно считать, что $\underline{Z} \approx \infty$.

2. Измерить в сети фазное напряжение U_A , U_B , U_C и линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Измеренные значения напряжений записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Напряжения трехфазного источника

Измерено					
фазные напряжения			линейные напряжения		
U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В

По данным измерений записать в цифрах фазное напряжение источника в показательной и алгебраической форме, по этим данным вычислить линейное напряжение и так же в алгебраической и показательной формах. Получить отношение между линейным и фазным напряжением источника.

3. Установить регулировочными устройствами резисторов R_a , R_b , R_c заданные преподавателем фазные токи и измерить значения фазных напряжений (U_a , U_b , U_c) потребителя, тока I_N и напряжения U_N нейтрали при условиях, перечисленных в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения токов и напряжений потребителя и нейтрали сети (экспериментальные данные)

Условия проведения эксперимента	Измерено							
	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_N , А	U_a , В	U_b , В	U_c , В	U_N , В
3.1. Нагрузка симметричная								
3.1.1. Цепь 4-проводная								—
3.1.2. Цепь 3-проводная				—				
3.2. Нагрузка симметричная в 2-х фазах								
3.2.1. Цепь 4-проводная								—
3.2.2. Цепь 3-проводная				—				
3.3. Нагрузка несимметричная во всех фазах потребителя								
3.3.1. Цепь 4-проводная								—
3.3.2. Цепь 3-проводная								
3.4. Нагрузка симметричная во всех фазах потребителя. Отключен линейный провод _____								
3.4.1. Цепь 4-проводная								—
3.4.2. Цепь 3-проводная				—				

Условия проведения эксперимента	Измерено							
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	U_a, B	U_b, B	U_c, B	U_N, B
3.5. Нагрузка симметричная во всех фазах потребителя. Обрыв фазы								
3.5.1. Цепь 4-проводная								—
3.5.2. Цепь 3-проводная				—				
3.6. Нагрузка симметричная во всех фазах потребителя. Короткое замыкание фазы потребителя								
3.6.1. Цепь 3-проводная				—				

Измеренные значения токов и напряжений записать в табл. 3.2.

4. Построить в масштабе для каждого эксперимента диаграммы напряжений и токов сети и потребителя.

Рекомендации: При построении векторных диаграмм фазных напряжений потребителя для 4-проводной цепи необходимо учитывать, что векторы этих напряжений равны соответствующим векторам фазных напряжений сети.

5. Сделать краткие выводы по результатам выполненных экспериментов, в которых указать отличительные особенности соединения 3- и 4-проводной звездой.

6. Нарисовать для отчета по лабораторной работе схему эксперимента (рис. 3.22).

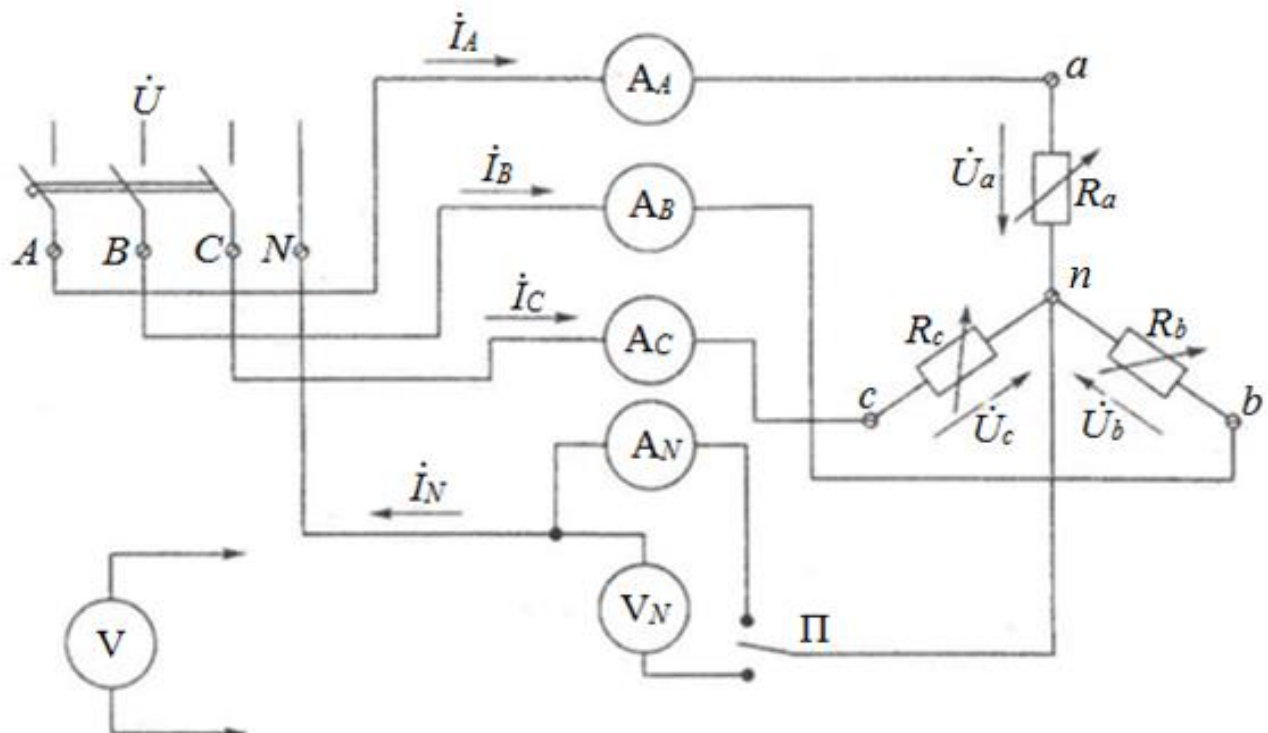


Рис. 3.22. Схема опыта по исследованию 3- и 4- проводных цепей с активной нагрузкой

Опыт 2. Исследование 3- и 4-проводных цепей с разнородной нагрузкой

Последовательность выполнения работ:

1. Собрать схему опыта, приведенную на рис. 3.23.
2. Повторить п. 2 опыта 1.
3. Установить регулировочными устройствами резистора R_c и катушки индуктивности Z_k по указанию преподавателя несимметричные фазные токи и измерить значения фазных напряжений (U_a , U_b , U_c), мощности P_a потребителя, тока I_N и напряжения U_N нейтрали:
 - а) в четырехпроводной цепи;
 - б) в трехпроводной цепи.Измеренные значения токов и напряжений записать в табл. 3.3.

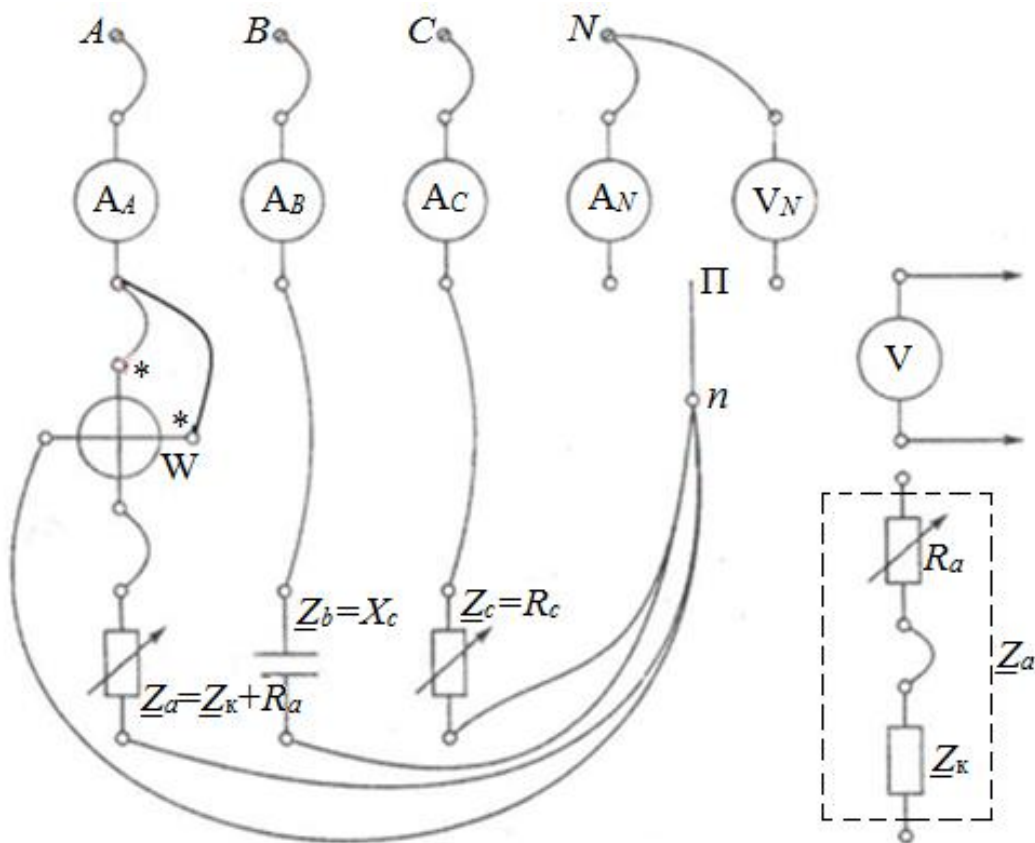


Рис. 3.23. Схема опыта по исследованию 3- и 4- проводных цепей с разнородной нагрузкой

4. Построить в масштабе для каждого эксперимента диаграммы напряжений и токов исследуемой цепи.

Значения токов и напряжений потребителя и нейтрали цепи

Условия проведения эксперимента	Измерено								
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$U_N, В$	$P_a, Вт$
Цепь 4-проводная								—	
Цепь 3-проводная				—					

Последовательность построения диаграммы:

а) построить в масштабе на комплексной плоскости топографическую диаграмму напряжений сети $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$;

б) вычислить угол сдвига фаз между векторами $\dot{U}_A$ и $\dot{I}_{AB}$ по формуле:

$$\varphi_a = \arccos \frac{P_a}{I_a \cdot U_a}; \quad (3.20)$$

в) построить вектор $\dot{U}_N$;

г) построить векторы фазных напряжений $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ потребителя;

д) построить векторы фазных токов потребителя:

– вектор $\dot{I}_a$ отстает от вектора $\dot{U}_a$ на угол φ_a ;

– вектор $\dot{I}_b$ опережает вектор $\dot{U}_b$ на угол 90° ;

– вектор $\dot{I}_c$ совпадает с вектором $\dot{U}_c$ по направлению.

5. Сделать краткие выводы по результатам исследований.

6. Нарисовать для отчета по лабораторной работе схему эксперимента (рис. 3.24).

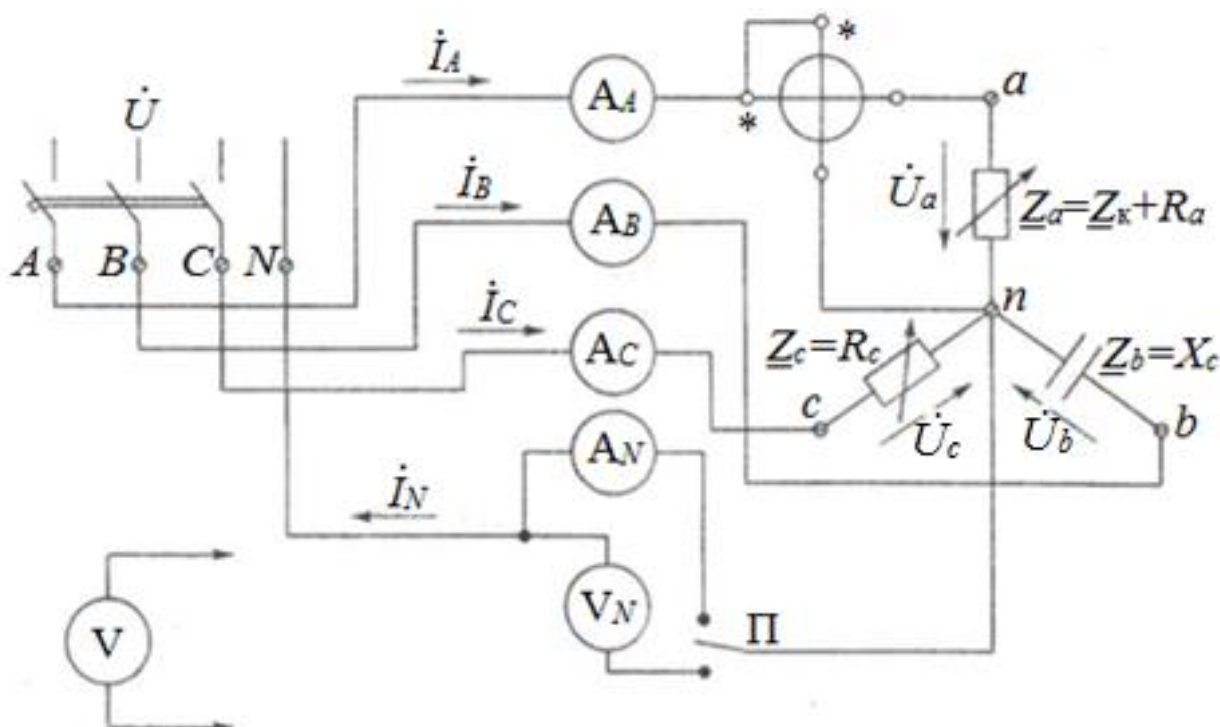


Рис. 3.24. Схема опыта по исследованию 3- и 4-проводных цепей с разнородной нагрузкой

Содержание отчета по лабораторной работе 3

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Опыт 1.
4. Схема опыта (см. рис. 3.22).
5. См. табл. 3.1 и 3.2.
6. Диаграммы напряжений и токов (в масштабе) для каждого эксперимента.
7. Краткие выводы по результатам экспериментов, в общем для 3- и 4-проводной звезды.
8. Опыт 2.
9. Схема опыта (см. рис. 3.24).
10. См. табл. 3.3.
11. Диаграммы напряжения и токов по результатам измерений (см. таб. 3.3).
12. Краткие выводы по результатам каждого эксперимента.
13. Выполненная расчетно-графическая работа 3 (вариант, выданный преподавателем).

Контрольные вопросы

1. Как формируются 3- и 4-проводные трехфазные цепи?
2. Изложите понятие линейных и фазных напряжений цепи.
3. Каково назначение нейтрального провода?
4. Как влияют несимметричные режимы нагрузки на фазные напряжения потребителя в 3-проводной цепи?
5. То же – в 4-проводной цепи?
6. Каковы напряжения на фазах потребителя в 3-проводной цепи при обрыве линейного провода?
7. То же – в 4-проводной цепи?
8. Как изменяются напряжения и токи в фазах потребителя при коротком замыкании одной из них?
9. Как влияет неоднородность нагрузки на фазные и линейные напряжения потребителя?

Расчетно-графическая работа 3

Для заданной электрической схемы (рис. 3.25) с известными параметрами (табл. 3.4):

- начертить эквивалентную схему замещения приемника в соответствии с вариантом задания;
- определить токи и напряжения для четырехпроводной цепи символическим методом в показательной и алгебраической формах по формулам (3.10)-(3.13), при этом падениями напряжений в линейных (соединительных) проводах пренебречь;
- определить показания всех приборов, указанных на рис. 3.25;
- на комплексной плоскости построить в принятых масштабах фазные и линейные напряжения и токи, вектор напряжения фазы A источника совместить с положительным напряжением оси вещественных чисел для простоты построения векторной диаграммы напряжений и токов (т. е. $\dot{U}_A = U_A, B$).

Источник энергии – симметричная трехфазная система напряжений.

Примечание. При построении векторной диаграммы токов иметь в виду, что нагрузка в фазах – несимметричная (см. табл. 3.4), она отличается по модулю и по характеру, следовательно, ток в фазе с активным сопротивлением совпадает по фазе со своим напряжением, ток в фазе с индуктивностью отстает по фазе от своего напряжения на 90° , ток в фазе с емкостью опережает свое напряжение на 90° .

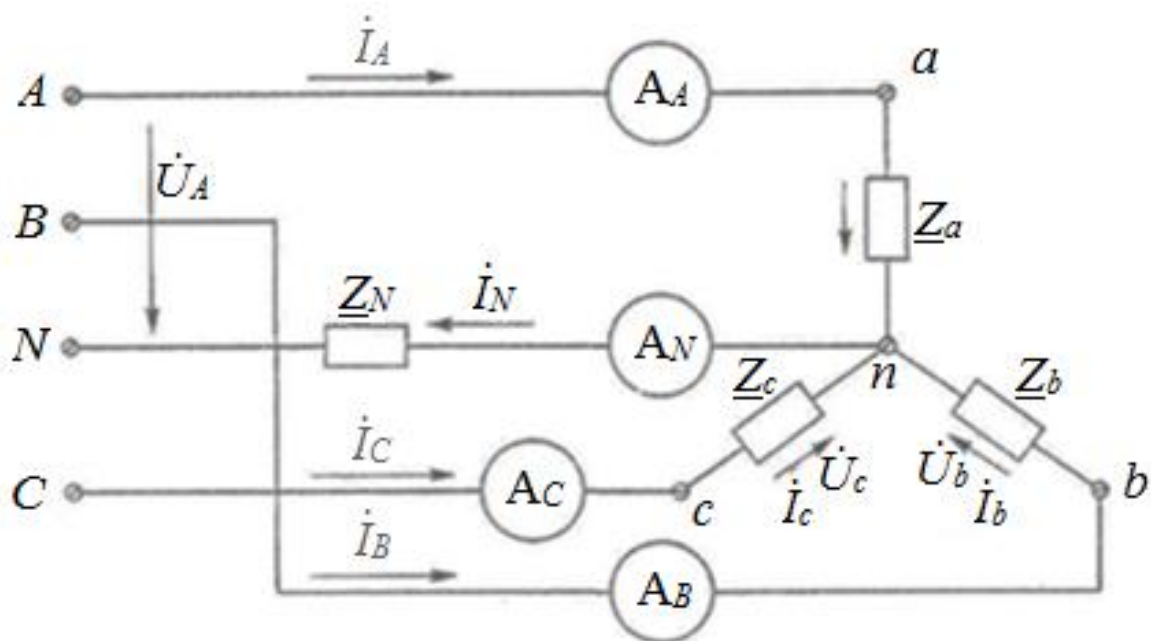


Рис. 3.25. Соединение нагрузки 4-проводной звездой

Таблица 3.4

Исходные данные к расчетно-графической работе 3

Номер варианта	$\dot{U}_{A,B}$	Сопротивление фазы a , Ом			Сопротивление фазы b , Ом			Сопротивление фазы c , Ом			$Z_N=R_N$
		R	x_L	x_C	R	x_L	x_C	R	x_L	x_C	
0	127	25				16,7				50	2
1	220			16,7	25				40		4
2	380		50		40					16,7	5
3	127		20		16,7					40	2
4	220	25				50				50	4
5	380			40		25		40			5
6	127		50				50	25			2
7	220	12,5					16,7		25		4
8	380			40		50		25			5
9	660	25					20		16,7		2
10	127	40				25				20	4
11	220		16,7				25	16,7			5
12	380			20	25				40		2

Окончание таблицы 3.4

Номер варианта	$\dot{U}_A, \text{В}$	Сопротивление фазы a , Ом			Сопротивление фазы b , Ом			Сопротивление фазы c , Ом			$\underline{Z}_N = R_N$
13	660		50				16,7	40			4
14	127		25		25					20	5
15	220	50				16,7				40	2
16	380		16,7				50	16,7			4
17	660	20					40		25		5
18	127			12,5		20		12,5			2
19	220	16,7					25		20		4
20	380		25		12,5					25	5
21	660			25		12,5			12,5		2
22	127	50				40				25	4
23	220		40				50	25			5
24	380			25	40				50		2
25	660	12,5				16,7				20	4

Лабораторная работа 4

Исследование трехфазных цепей при соединении фаз потребителя треугольником

Цель работы

Экспериментально установить влияние характера, несимметрии нагрузки и неполнофазного режима работы на токи и напряжения исследуемой цепи.

Определить соотношения между фазными, линейными токами и напряжениями при различных режимах работы потребителя.

Общие сведения

Соединить фазы потребителя треугольником – это последовательно соединить все его фазы, образовав треугольник $a-b-c$, к началам фаз потребителя a, b, c подается напряжение от источника питания (рис. 4.1).

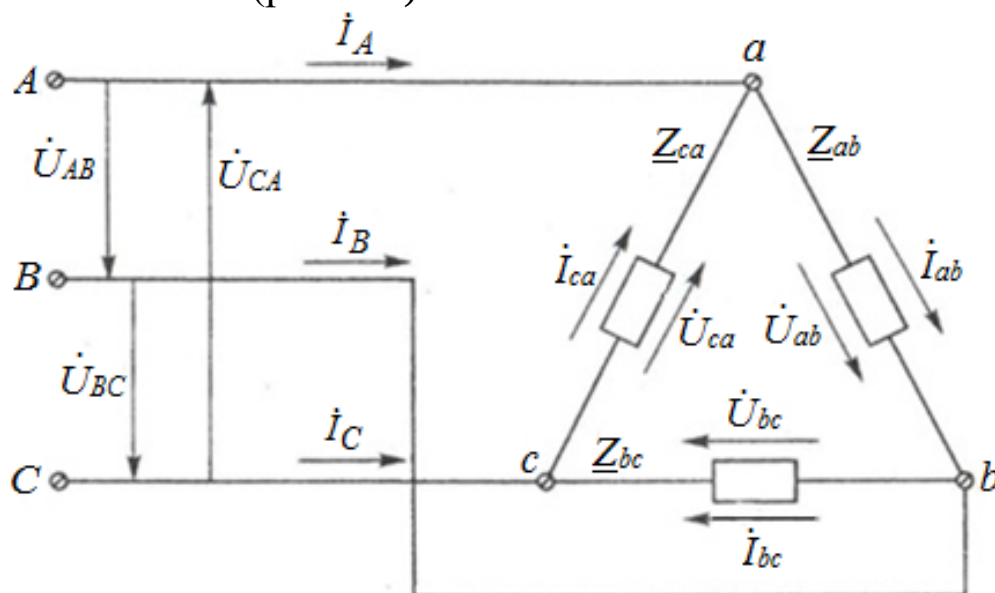


Рис. 4.1. Схема соединения фаз потребителя треугольником

На рис. 4.1:

$\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$ – линейное напряжение источника (U_L);

$\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_{bc}$, $\dot{U}_{ca}$ – фазные напряжения нагрузки (U_F);

$\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ – линейные токи (I_L);

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ – фазные токи нагрузки (I_{Φ});

$\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ – полные сопротивления фаз нагрузки.

Если пренебречь потерями напряжения в соединительных проводах, то фазные напряжения нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям сети, т. е.

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}; \quad \dot{U}_L = \dot{U}_{\Phi}. \quad (4.1)$$

Расчеты в 3-фазной электрической цепи при соединении нагрузки треугольником осуществляются по следующим формулам:

– напряжения нагрузки на комплексной плоскости:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}; \\ \dot{U}_{bc} &= \dot{U} \cdot e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_{ca} &= \dot{U} \cdot e^{-j120^\circ}; \end{aligned} \quad (4.2)$$

– комплексы фазных действующих токов потребителя вычисляются согласно закону Ома по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \dot{U}_{ab} \cdot \underline{Y}_{ab}; \\ \dot{I}_{bc} &= \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \dot{U}_{bc} \cdot \underline{Y}_{bc}; \\ \dot{I}_{ca} &= \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \dot{U}_{ca} \cdot \underline{Y}_{ca}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $\underline{Y}_{ab} = \frac{1}{\underline{Z}_{ab}}$; $\underline{Y}_{bc} = \frac{1}{\underline{Z}_{bc}}$; $\underline{Y}_{ca} = \frac{1}{\underline{Z}_{ca}}$ – комплексы проводимостей фазных нагрузок;

– линейные токи сети вычисляются на основании первого закона Кирхгофа для узлов a, b и c цепи потребителя:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}; \end{aligned} \quad (4.4)$$

– комплексная полная мощность для каждой фазы потребителя:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{ab} &= \dot{U}_{ab} \cdot \dot{I}_{ab}^*; \\ \underline{S}_{bc} &= \dot{U}_{bc} \cdot \dot{I}_{bc}^*; \\ \underline{S}_{ca} &= \dot{U}_{ca} \cdot \dot{I}_{ca}^*.\end{aligned}\tag{4.5}$$

– полная мощность 3-х фазной цепи:

$$S = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca}.$$

При симметричной нагрузке в фазах потребителя $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$; фазные токи $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\Phi}$; линейные токи $I_{\text{Л}} = \sqrt{3}I_{\Phi}$; полная мощность трехфазной цепи $\underline{S} = 3\dot{U}_{\Phi}\dot{I}_{\Phi}$.

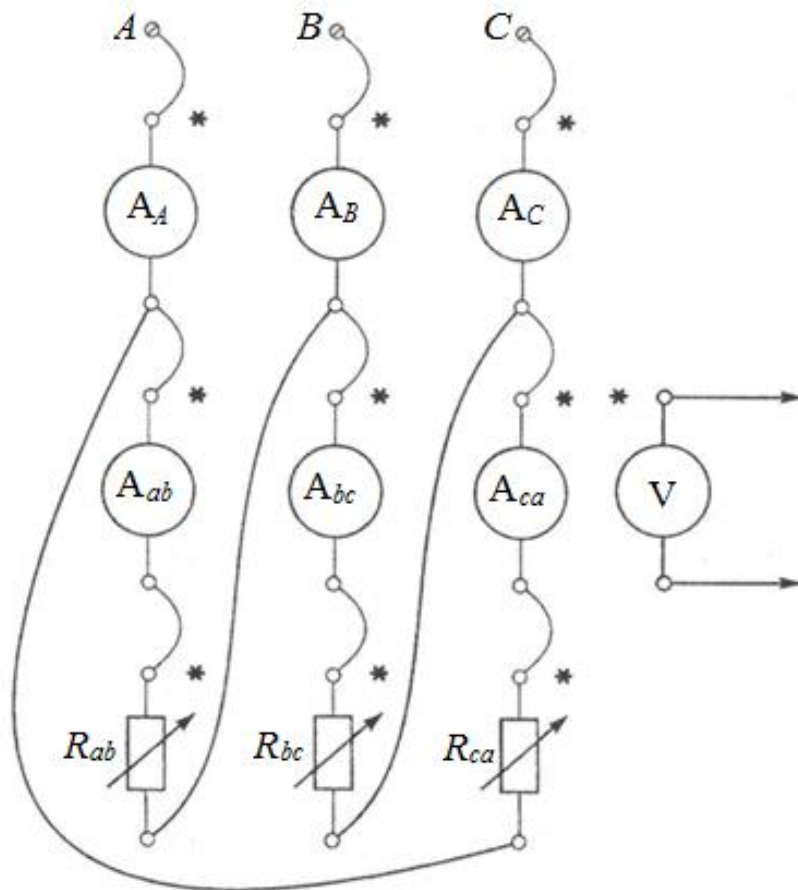


Рис. 4.2. Монтажная схема для соединения фаз нагрузки треугольником

Программа исследований

Последовательность выполнения работы:

1. Собрать монтажную схему опыта, приведенную на рис. 4.2 (схема опыта по исследованию трехфазной цепи при соединении фаз потребителя треугольником).
2. Провести эксперименты в соответствии с перечнем (табл. 4.1).

3. Установить регулировочными устройствами резисторов R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} заданные преподавателем значения сопротивлений и измерить напряжение потребителя, линейные и фазные токи потребителя для режимов, приведенных в табл. 4.1.

4. Записать в табл. 4.1 измеренные значения токов и напряжений исследуемой цепи.

Таблица 4.1

Значение токов и напряжений исследуемой цепи

Режим нагрузки в опытах	Измерено								
	Напряжения потребителя, В			Линейные токи потребителя, А			Фазные токи потребителя, А		
	$U_{ab}, \text{В}$	$U_{bc}, \text{В}$	$U_{ca}, \text{В}$	$I_A, \text{А}$	$I_B, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$I_{ab}, \text{А}$	$I_{bc}, \text{А}$	$I_{ca}, \text{А}$
2.1. Нагрузка, симметричная во всех фазах									
2.2. Нагрузка, симметричная в двух фазах									
2.3. Нагрузка, несимметричная во всех фазах									
2.4. Нагрузка, симметричная во всех фазах. Обрыв фазы _____ потребителя									
2.5. Нагрузка, симметричная во всех фазах. Обрыв линейного провода _____									

Примечание. При выполнении экспериментов 2.4 и 2.5 необходимо предварительно установить заданные преподавателем значения токов во всех фазах потребителя, а затем отсоединить фазу или линейный провод исследуемой цепи и измерить фазные и линейные напряжения потребителя.

5. По результатам замеров построить векторные диаграммы напряжений и токов.

6. Для опыта 2.1. – «Нагрузка, симметричная во всех фазах» сделать следующий расчет:

– напряжения источника (потребителя):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = U_{ab};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = U_{bc} \cdot e^{-j120^\circ};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = U_{ca} \cdot e^{-j240^\circ};$$

– фазные токи потребителя:

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} \cdot \underline{Y}_{ab} = I_{ab};$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} \cdot \underline{Y}_{bc} = I_{bc} \cdot e^{-j120^\circ};$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} \cdot \underline{Y}_{ca} = I_{ca} \cdot e^{-j240^\circ};$$

– линейные токи потребителя:

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

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

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

Найти соотношение линейных и фазных токов:

$$\frac{I_{\text{Л}}}{I_{\text{Ф}}}.$$

Сумма фазных токов:

$$\dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{ca}.$$

Сумма линейных токов:

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

По результатам расчета для опыта 2.1 построить векторные диаграммы напряжений и токов в одной системе координат.

Для опытов 2.2 и 2.3 расчет не производится, диаграммы строятся аналогично опыту 2.1.

Порядок построения векторной диаграммы напряжений и токов с активной нагрузкой

1. Строятся векторы напряжений в выбранном масштабе напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}.$$

2. Строятся векторы токов $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$, так как нагрузка в фазах активная, ток и напряжение совпадают по фазе, начало вектора тока и напряжения находится в одной точке.

3. Строятся векторы линейных токов путем векторного сложения (масштаб тот же, что и для фазных токов), (рис. 4.3, 4.4):

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

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

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

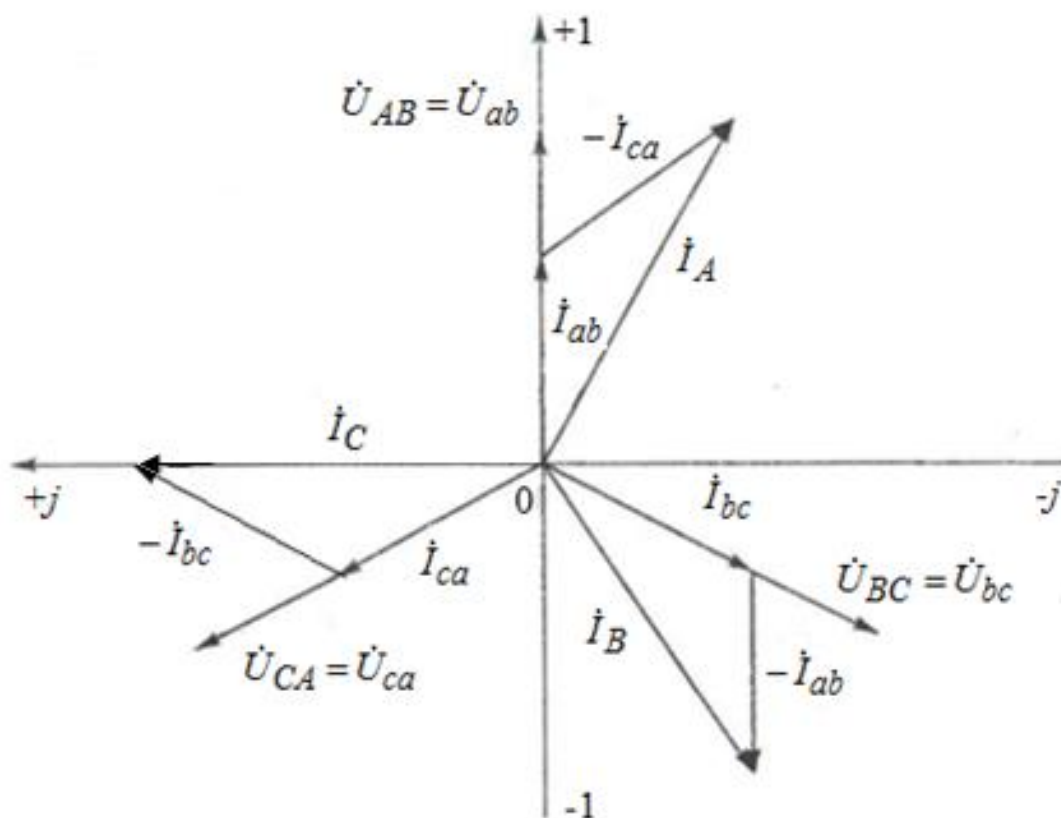


Рис. 4.3. Векторная диаграмма напряжений и токов с симметричной активной нагрузкой в фазах потребителя

4. По результатам измерения опыта 2.4. – «Обрыв фазы потребителя» – осуществляется построение диаграммы напряжений и токов в следующей последовательности:

1) строятся векторы напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca};$$

2) строятся векторы токов: $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$;

3) путем векторного сложения согласно системе уравнений:

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

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

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

4) строим линейные токи $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$;

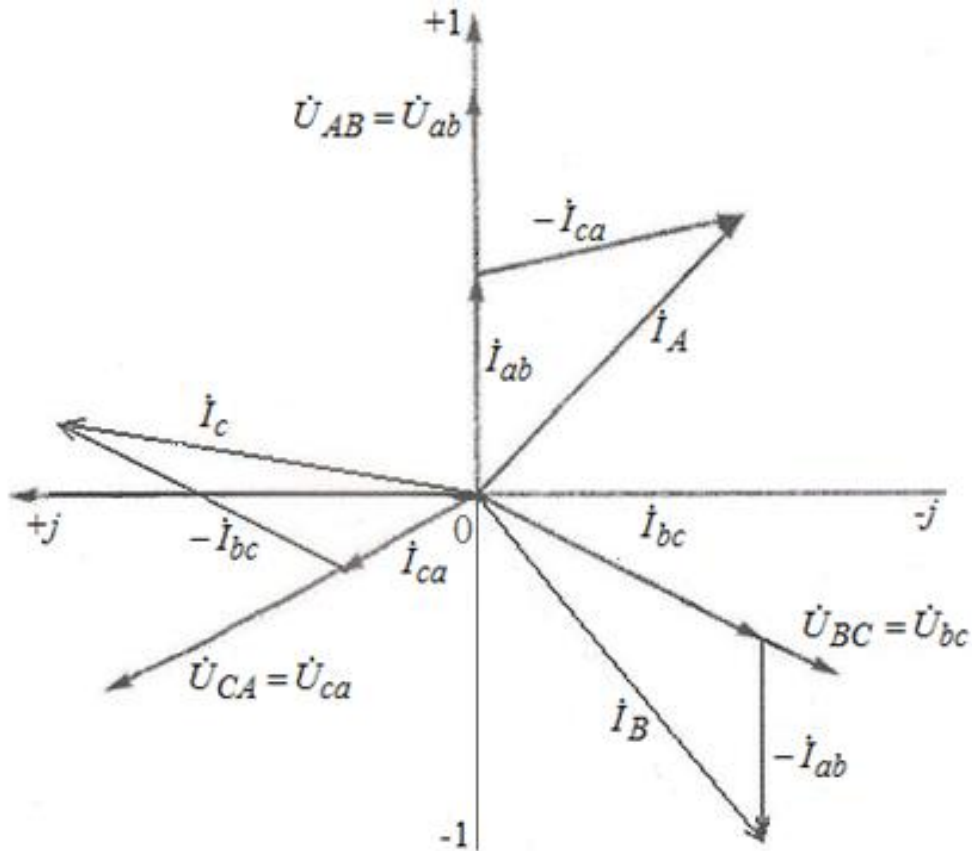


Рис. 4.4. Векторная диаграмма напряжения и токов при несимметричной нагрузке в фазах потребителя

Пример. Обрыв фазы ab (рис. 4.5), $\dot{I}_{ab} = 0$, система уравнений (4.4) приобретает следующий вид:

$$\dot{I}_A = \overset{0}{\cancel{\dot{I}_{ab}}} - \dot{I}_{ca} = -\dot{I}_{ca};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \overset{0}{\cancel{\dot{I}_{ab}}} = \dot{I}_{bc};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

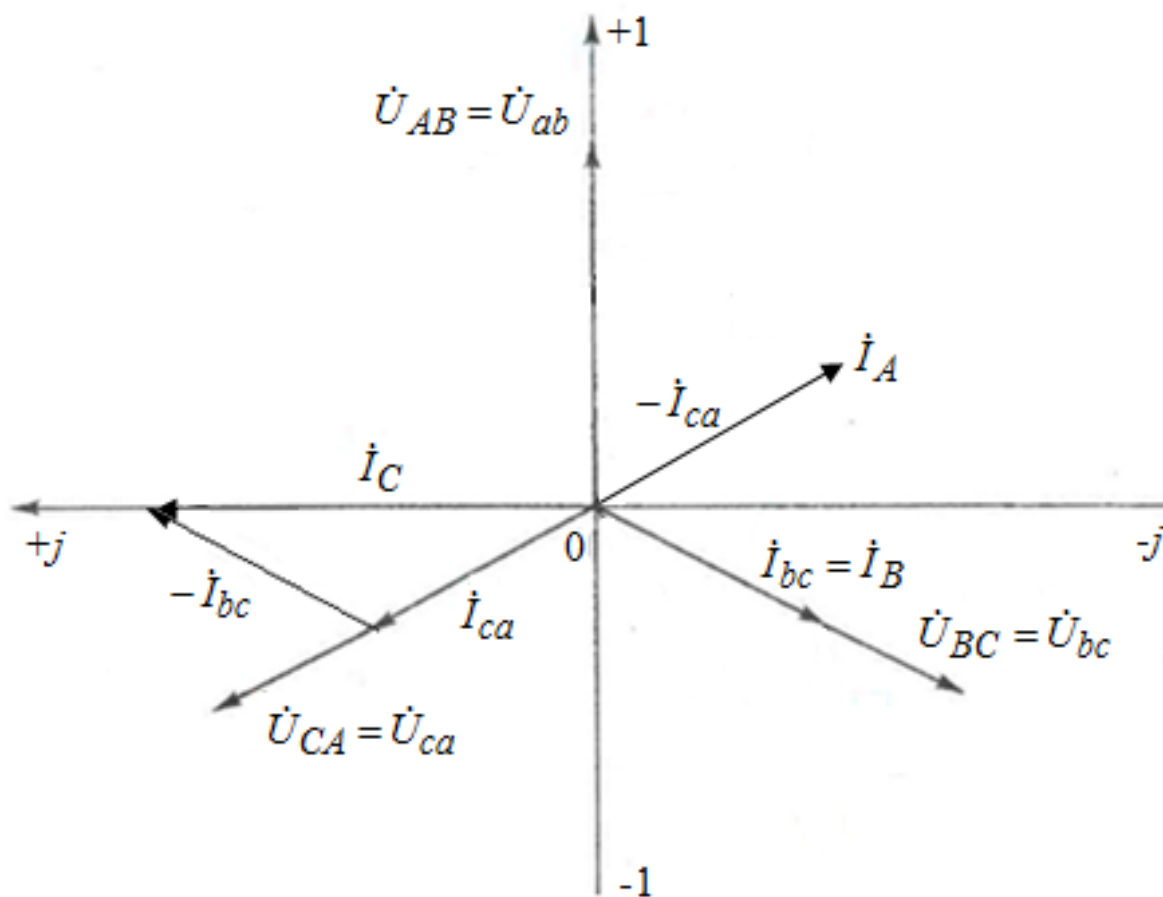


Рис. 4.5. Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве фазы ab

5. По результатам измерения опыта 2.5. – «Обрыв линейного провода» – строится диаграмма напряжений и токов с учетом изменений, произошедших на схеме.

Схема, полученная после обрыва, должна быть представлена в отчете.

Пример. Оборван линейный провод $A-a$, первоначальная схема (рис. 4.6) $\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{ca}$, так как это один и тот же ток, протекающий через резисторы:

$$R_{ab} \text{ и } R_{ca};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{2}{3} \dot{I}_B;$$

$$\dot{I}_{ab} = \dot{I}_{ca} = \frac{1}{3} \dot{I}_B.$$

Вместо трехфазной цепи при соединении фаз потребителя в треугольник получилась разветвленная однофазная цепь с последовательно-параллельным соединением трех резисторов, причем $R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}$.

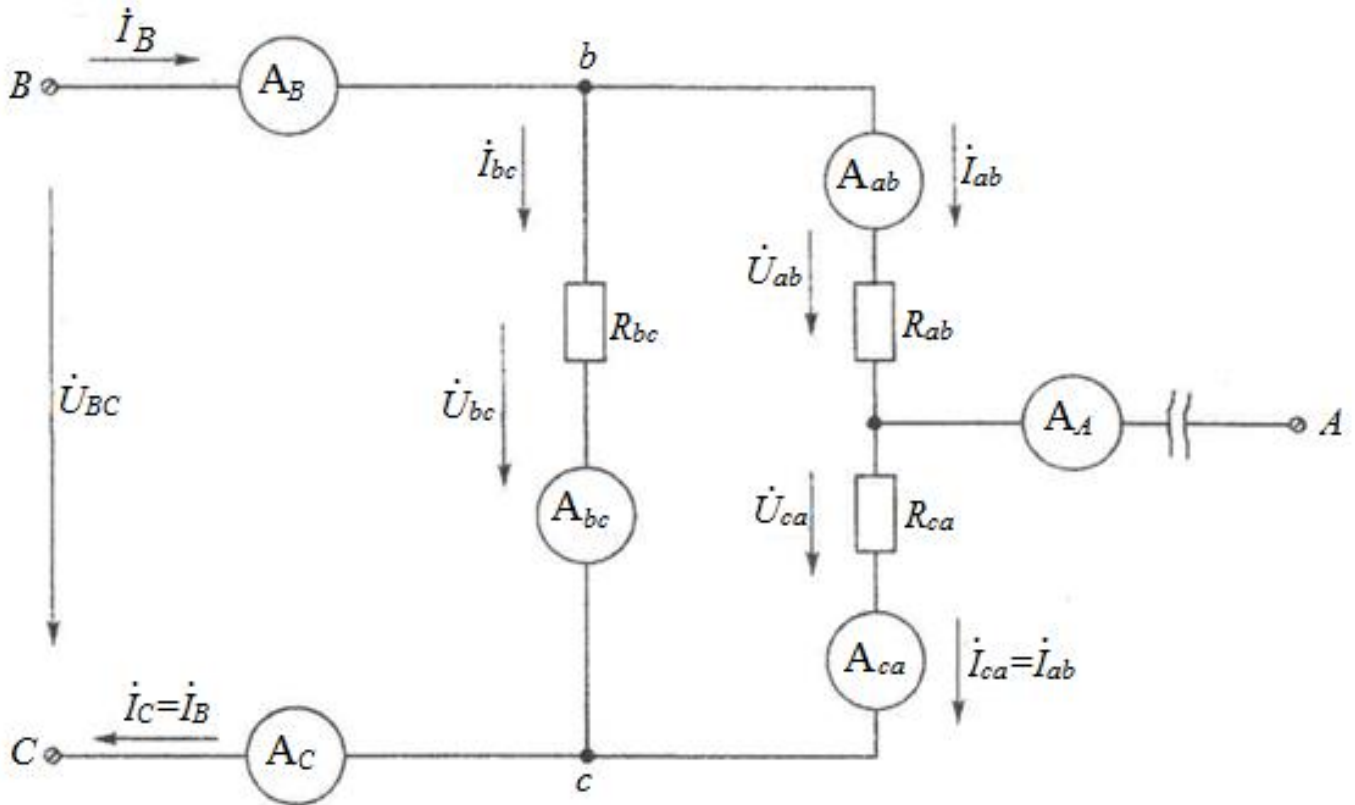


Рис. 4.6. Разветвленная цепь нагрузки при обрыве линейного провода $A-a$

Строится напряжение $\dot{U}_{BC}$ (напряжение источника):

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC}; \quad \dot{U}_{ab} = \frac{1}{2}\dot{U}_{bc}; \quad \dot{U}_{ca} = \frac{1}{2}\dot{U}_{bc}. \quad (4.6)$$

Порядок построения диаграммы при обрыве линейного провода $A-a$:

- строится напряжение источника $\dot{U}_{BC}$;
- строятся напряжения и токи, полученные в результате измерений в опыте 2.5, так как нагрузка носит активный характер, следовательно, в однофазной цепи все напряжения и токи совпадают по фазе (все векторы накладываются друг на друга), рис. 4.7.

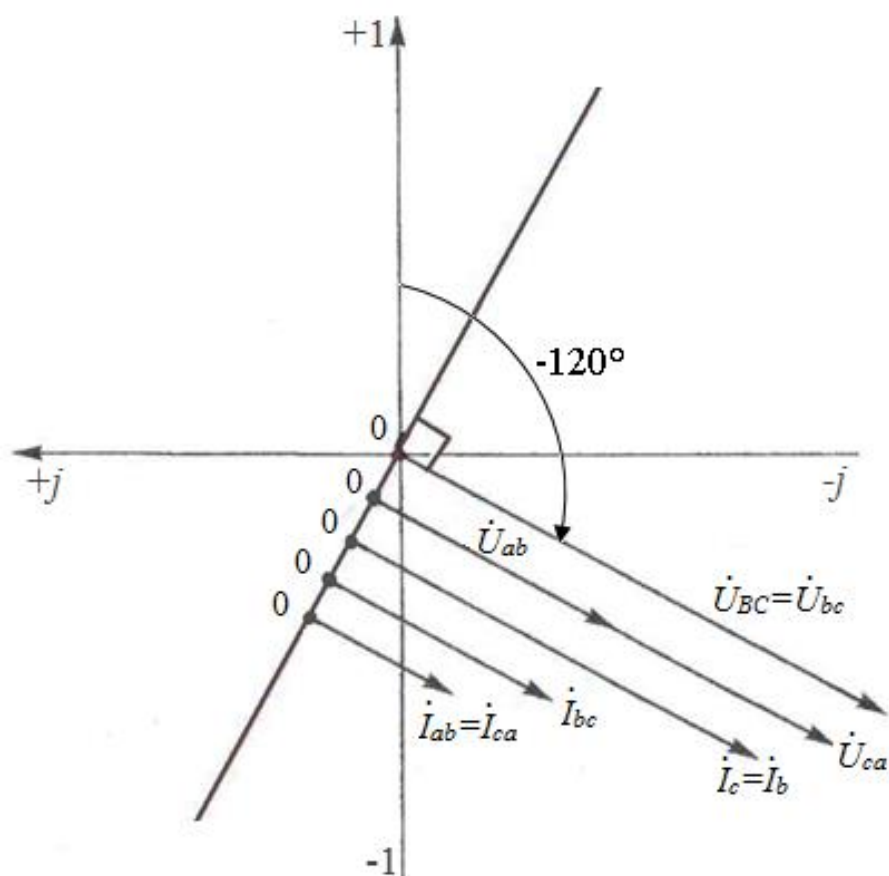


Рис. 4.7. Векторная диаграмма напряжений и токов при обрыве линейного провода $A-a$

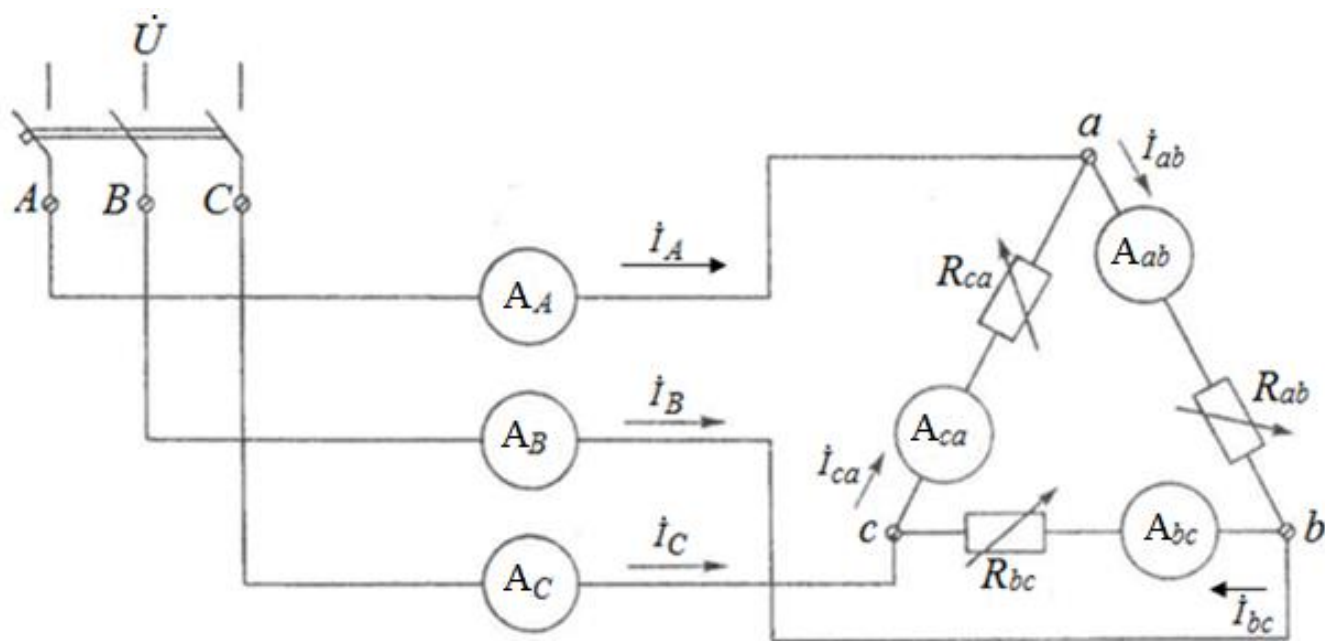


Рис. 4.8. Схема опыта по исследованию трехфазной цепи при соединении фаз потребителя треугольником

Содержание отчета по лабораторной работе 4

1. Название и номер лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема опытов 2.1; 2.2; 2.3; 2.4. (рис. 4.8) – 2.5. по аналогии с рис. 4.6.
4. См. табл.4.1, с результатами замеров
5. Векторные диаграммы напряжений и токов (в масштабе) для каждого эксперимента.
6. Краткие выводы по результатам экспериментов.
7. Контрольно-графическая работа 4, выполненная в соответствии номером своего варианта.

Контрольные вопросы

1. Как соединить фазы потребителя треугольником?
2. Каковы соотношения между фазными напряжениями и линейными напряжениями сети?
3. Каковы соотношения между фазными токами потребителя и линейными токами сети при симметричной нагрузке?
4. То же – при несимметричной нагрузке?
5. Как влияет обрыв фазы потребителя на режим работы других его фаз?
6. Как влияет обрыв линейного провода на режим работы трехфазного потребителя?
7. В какой последовательности строят векторные диаграммы напряжений и токов исследуемой цепи при соединении фаз потребителя треугольником, если все векторы начинают строить из начала координат?
8. В какой последовательности строят векторы фазных и линейных токов на базе топографической диаграммы напряжений сети?
9. В какой последовательности производится расчет исследуемой цепи при обрыве линейного провода?
10. В какой последовательности строят векторные диаграммы напряжений и токов исследуемой цепи при обрыве линейного провода?

Расчетно-графическая работа 4

Для заданной электрической схемы (рис. 4.9) с известными параметрами нагрузки в фазах (табл. 4.2):

- начертить эквивалентную электрическую схему замещения нагрузки в соответствии с вариантом задания;
- вычислить фазные и линейные токи символическим методом в показательной и алгебраической формах;
- определить показания всех амперметров, обозначенных на схеме (см. рис. 4.9);
- построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений и токов, вектор напряжения $\dot{U}_{ab} = U_{ab}$ рекомендуется совместить с положительным направлением оси вещественных чисел, напряжение всех фаз равны по модулю и сдвинуты друг относительно друга по фазе на 120° (рис. 4.4).

Примечание: при построении векторной диаграммы токов иметь в виду что нагрузка в фазах – несимметричная (см. табл. 4.2), она отличается по модулю и по характеру, следовательно, ток в фазе с активным сопротивлением совпадает по фазе со своим напряжением, ток в фазе с индуктивностью отстает по фазе от своего напряжения на 90° , ток по фазе с емкостью опережает свое напряжение на 90° .

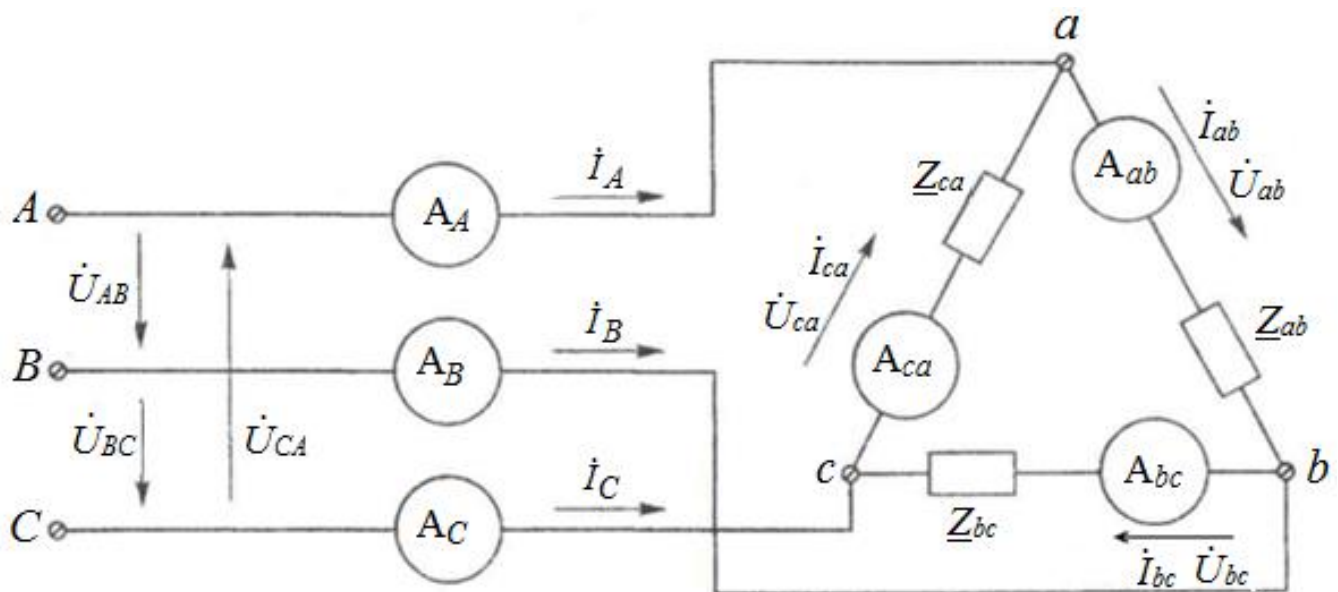


Рис. 4.9. Соединение нагрузки треугольником

Таблица 4.2

Исходные данные к расчетно-графической работе № 4

Номер варианта	$\dot{U}_{AB}, \text{В}$	Сопротивление фазы av , Ом			Сопротивление фазы bc , Ом			Сопротивление фазы ca , Ом		
		R	x_L	x_C	R	x_L	x_C	R	x_L	x_C
0	127	25				40				16,7
1	127		25		50					40
2	127			16,7		20		25		
3	220		40				25	50		
4	220			25		16,7		20		
5	220	40					40		50	
6	380			20		25		16,7		
7	380	12,5					16,7		20	
8	380		12,5		16,7					25
9	660	50				40				20
10	660		25				50	25		
11	660			16,7	12,5				16,7	
12	127		40				16,7	50		
13	127			20	25				12,5	
14	127	12,5				20				12,5
15	220			50		16,7		25		
16	220	16,7					12,5		20	
17	220		50		40					50
18	380			25		50		20		
19	380	40					25		16,7	
20	380		25		50					20
21	660			12,5		16,7		12,5		
22	660	20				25				12,5
23	660		40				25		40	
24	127		12,5		12,5					16,7
25	220	25					16,7		25	

Список литературы

1. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи. 8-е изд., стер. М.: Горная книга, 2010. 592 с.
2. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996. 638 с.
3. *ГОСТ 2.702-2011.* Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем.
4. *Касаткин А. С., Немцов М. В.* Электротехника: учеб. для вузов. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 544 с.