

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ:
РАСЧЕТ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое
оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 04 «Оборудование и
технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»

ВИТЕБСК
2016

УДК 621.3(07)

Электротехника, электрические машины и аппараты: расчет цепи трехфазного синусоидального тока, методические указания к выполнению расчетно-графических работ для студентов специальности 1-36 01 01 "Технология машиностроения", 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов»

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО «ВГТУ», 2016

Составители: к.т.н., доц. Новиков Ю.В.,
доц. Ильющенко А.В.,
асс. Шаркова М.Ф.

В методических указаниях приведен теоретический материал, необходимый для изучения трехфазного синусоидального тока, а также указания к выполнению расчетно-графических работ с заданиями и примерами выполнения. Предложенные для изучения материалы соответствуют всем разделам дисциплины. Методические указания составлены в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО «ВГТУ» 11.10.2015 г., протокол № 4.

Рецензент: к.т.н., доц. Надежная Н.Л.
Редактор: ст. преп. Куксевич В.Ф.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ» 30.11.2015 г., протокол № 9

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати 30.06.16. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. лист. 1.3.
Печать ризографическая. Тираж 70 экз. Заказ № 207.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий N 1 / 172 от 12 февраля 2014 г.

210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Содержание

Введение.....	4
1 Трехфазный переменный ток.....	4
1.1 Трехфазный переменный ток.....	4
1.2 Соединение треугольником.....	8
2 Задание к расчетно-графической работе №3	
Расчет трехфазной электрической цепи.....	12
3 Значение параметров пассивных элементов цепи.....	12
4 Пример решения задачи.....	17
Литература.....	20

Витебский государственный технологический университет

Введение

В результате изучения данной темы студенты должны:

— знать основные элементы трехфазных цепей, способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы э.д.с.;

— понимать роль нейтрального провода; принципы построения векторных диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном проводе;

— уметь анализировать различные режимы симметричных и несимметричных цепей; читать схемы соединения трехфазных однофазных приемников.

При изучении этой темы особое внимание необходимо обратить на преимущества, которые дает трехфазная система по сравнению с однофазной. Рассматривая схемы соединения, нужно уяснить связь между фазными и линейными напряжениями в схеме соединения звездой, а также связь между фазными и линейными токами в схеме соединения треугольником.

Необходимо четко представлять, что в трехфазной цепи могут быть два режима: симметричный и несимметричный. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету для одной фазы (так как действующие значения токов во всех фазах будут равны) и производится аналогично расчету однофазной цепи с одним источником. Трехфазная цепь является частным случаем сложной цепи синусоидального тока. Поэтому в несимметричном режиме при отсутствии нулевого провода, когда не обеспечивается независимая работа фаз, для расчета трехфазной цепи можно применить метод узлового напряжения в комплексной форме. Примеры расчета трехфазных цепей приведены в разделе 3 (контрольные работы).

1 Трехфазный переменный ток

1.1 Трехфазный переменный ток

Объединение в одной линии электропередачи нескольких цепей переменного тока с независимыми источниками электроэнергии называется многофазной системой. Наибольшее распространение получила трехфазная система, которая была изобретена и разработана во всех деталях, включая генератор трехфазного переменного тока, трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель, выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889—1891 гг.

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых друг относительно друга по фазе на $1/3$ периода (120°).

Трехфазный генератор состоит из трех одинаковых изолированных друг от друга обмоток, расположенных на статоре и разнесенных в пространстве на 120° . В центре статора вращается электромагнит (рис. 1.1).

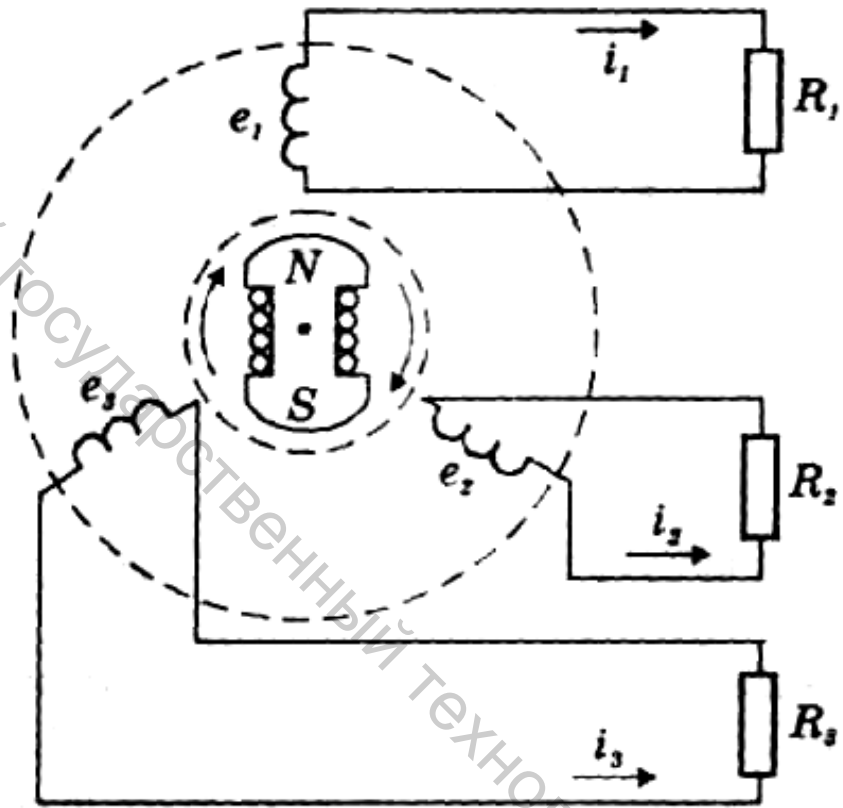


Рисунок 1.1 — Трехфазный генератор

При этом форма магнита такова, что магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, изменяется по косинусоидальному закону. Тогда по закону электромагнитной индукции в катушках будут индуцироваться ЭДС равной амплитуды и частоты, отличающиеся друг от друга по фазе на 120° :

$$e_A = E_0 \sin \omega \cdot t; \quad (1.1)$$

$$e_B = E_0 \sin(\omega \cdot t - 120^\circ);$$

$$e_C = E_0 \sin(\omega \cdot t - 240^\circ).$$

Эти три ЭДС можно изобразить на временной (рис. 1.2, а) и векторной (рис. 1.2, б) диаграммах.

Если все концы обмоток генератора соединить в одной точке O , а к их началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии (у которых концы также соединены в общей точке O'), то мы получим соединение звездой (рис. 1.3).

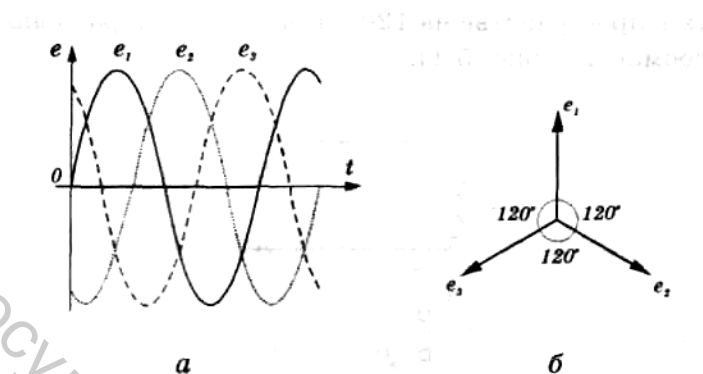


Рисунок 1.2 — Временная (а) и векторная (б) диаграммы

Видно, что контуры, по которым замыкаются фазные токи, при таком соединении не изменятся по сравнению с рис. 1.1. Следовательно, по общему обратному проводу будет протекать ток, равный сумме токов трех фаз:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (1.2)$$

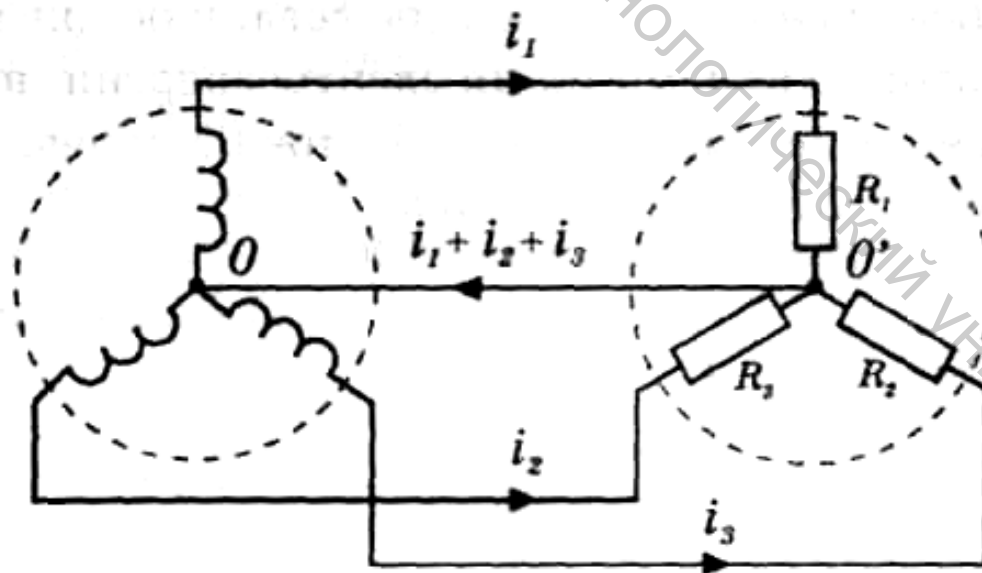


Рисунок 1.3 — Соединение звездой

Если все три фазы имеют одинаковые нагрузки, то фазные токи будут равны по модулю, отличаясь друг от друга по фазе на 120° :

$$I_A = I_0 \sin \omega \cdot t ; \quad (1.3)$$

$$I_B = I_0 \sin(\omega \cdot t - 120^\circ);$$

$$I_C = I_0 \sin(\omega \cdot t - 240^\circ).$$

Для того чтобы найти значение тока в проводе OO' , нужно сложить токи (1.3). Это можно сделать с помощью векторной диаграммы (рис. 1.4). При симметричной нагрузке ток в общем проводе равен нулю, поэтому провод OO' называется нулевым. Точка соединения концов обмоток генератора или концов нагрузок называется нулевой. Провода, соединяющие начала обмоток генератора с приемниками электроэнергии, называются линейными. Система трехфазного тока с нулевым проводом называется четырехпроводной.

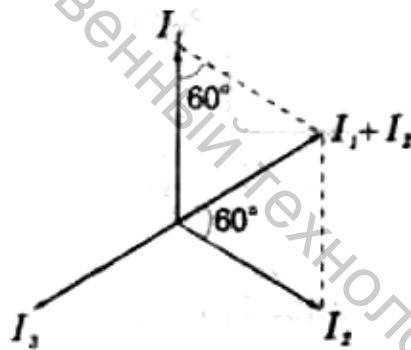


Рисунок 1.4— Векторная диаграмма

В цепях трехфазного тока вне зависимости от способа соединения различают два типа напряжений — линейные U_L и фазные U_Φ — и два типа токов — линейные I_L и фазные I_Φ . Напряжение между двумя линейными проводами называется линейным, а между линейным и нулевым проводом — фазным. Токи, протекающие в линейных проводах, называются линейными, а в нагрузках фаз — фазными.

Поскольку в нулевом проводе ток равен нулю, то этот провод можно совсем убрать, оставив только три линейных провода. Однако это не всегда возможно. В случае несимметричной нагрузки отсутствие нулевого провода приведет к перераспределению фазных напряжений, в результате чего некоторые из них станут выше номинального (что недопустимо), а некоторые — ниже. Если же при несимметричной нагрузке включить нулевой провод, то все фазные напряжения

будут равны номинальному, а по нулевому проводу будет протекать некоторый ток. В цепях с симметричными нагрузками нулевой провод не нужен. Однако наличие нулевого провода обеспечивает равенство фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

В дальнейшем для обозначения линейных напряжений будем пользоваться двойными индексами, а фазных — одинарными (рис. 1.5).

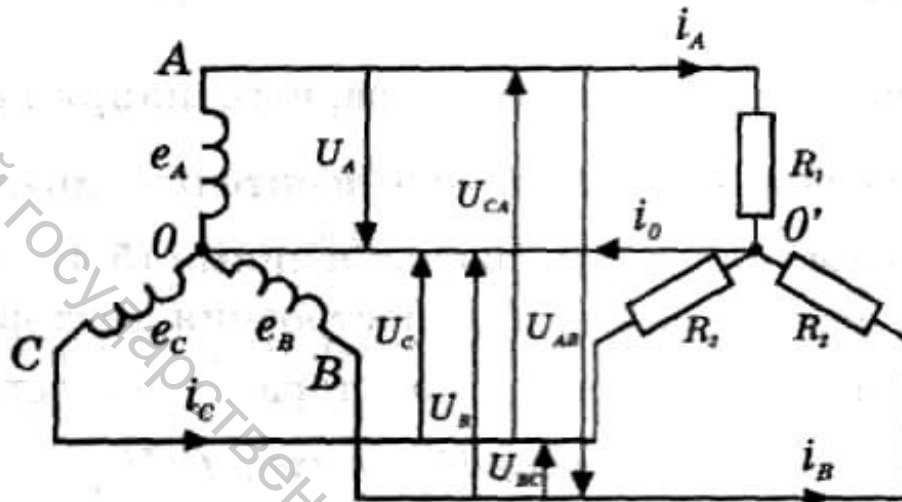


Рисунок 1.5 — Соединение звездой

При соединении звездой линейный ток совпадает с фазным. Как видно из рис. 1.5, линейные напряжения при соединении звездой являются векторными разностями соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A.\end{aligned}\tag{1.4}$$

1.2 Соединение треугольником

Если обмотки генератора трехфазного тока соединить так, что конец первой обмотки соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой, а к общим точкам подключить линейные провода, то получим соединение треугольником (рис. 1.6).

Кажущегося короткого замыкания в обмотках генератора не произойдет, так как сумма мгновенных значений ЭДС в них равна нулю:

$$\vec{e}_A + \vec{e}_B + \vec{e}_C = 0, \quad (1.5)$$

На рисунке 1.6 три приемника тока включены треугольником. В отличие от соединения звездой, где в большинстве случаев применяется четырехпроводная система.

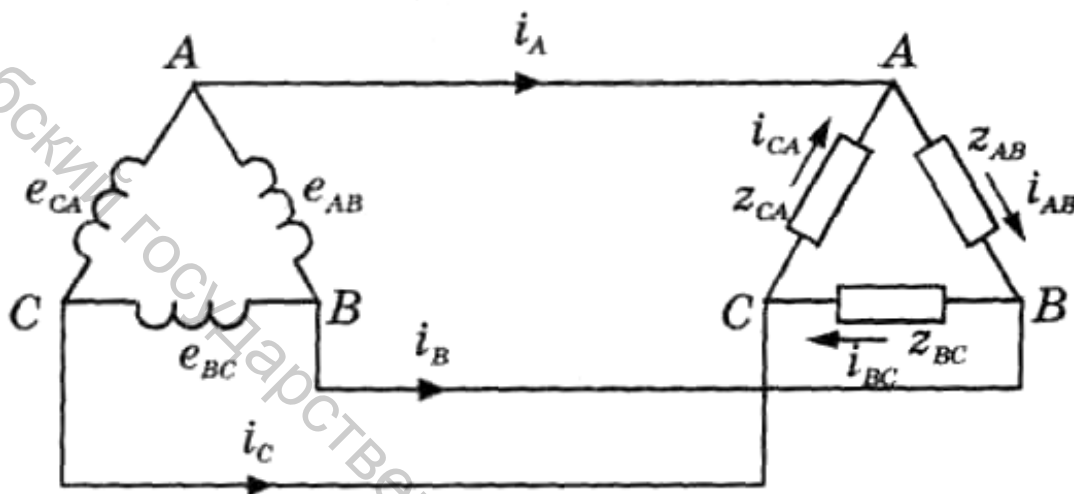


Рисунок 1.6 — Соединение треугольником

При соединении треугольником существуют только линейные напряжения (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), поскольку нулевой провод отсутствует, но появляются фазные (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}) линейные (I_A, I_B, I_C) токи. Соотношения между линейными и фазными токами могут быть получены, если для каждой узловой точки потребителя применить первое правило Кирхгофа. Любой из линейных токов равен геометрической разности двух фазных токов. Кроме того, сложение этих равенств показывает, что геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$I_A + I_B + I_C = 0. \quad (1.6)$$

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть как однофазными, так и трехфазными.

Симметричными называют приемники, комплексы сопротивлений фаз которых равны между собой: $Z_a = Z_b = Z_c = \text{const}$. Если это условие не выполняется, то приемники называют не симметричными; при этом нагрузка может быть равномерной, если $z_a = z_b = z_c$, или однородной, если равны сдвиги фаз. Фазы приемников также могут соединяться как звездой, так и треугольником. Важно отметить, что способ соединения фаз источника питания не предопределяет способа соединения фаз приемника. Так как каждая фаза реальной симметричной трехфазной цепи составляется из одинаковых элементов, то (в инженерной

практике) такие цепи часто изображают однолинейными (рис. 1.7). На такой схеме указывают величины, характеризующие только одну фазу.

В трехпроводную цепь при соединении нагрузки звездой включают только симметричные трехфазные приемники: электрические двигатели, электрические печи и др.

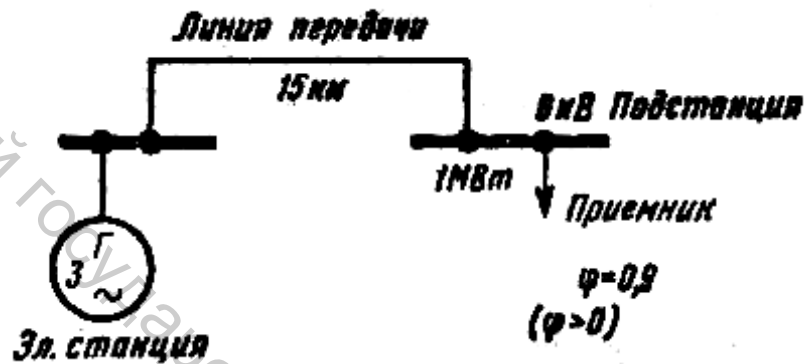


Рисунок 1.7 — Симметричная трехфазная цепь

На рис. 1.8 показана схема четырехпроводной осветительной сети жилого дома при соединении фаз нагрузки звездой.

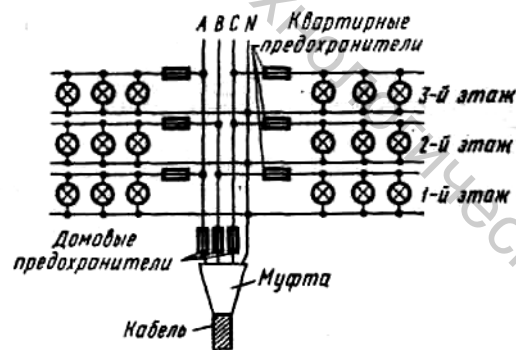


Рисунок 1.8 — Четырехпроводная осветительная сеть жилого дома

Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке. Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные приемники (например, лампы накаливания), и режим работы каждого такого приемника, находящегося под неизменным фазным напряжением источника питания, не будет зависеть от режима работы приемников, включенных в другие фазы.

Ток в нейтральном проводе зависит не только от характера сопротивлений фаз приемника, но и от схемы их включения.

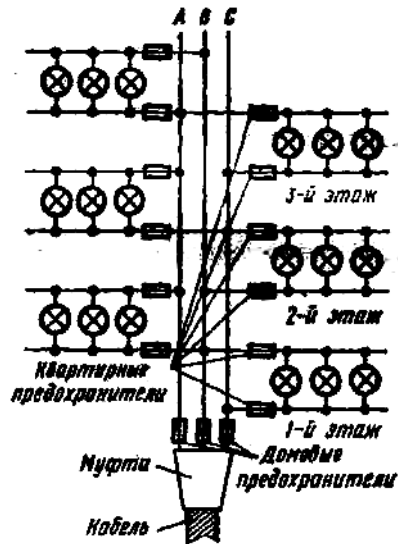


Рисунок 1.9 — Схема трехпроводной осветительной сети при соединении фаз нагрузки треугольником

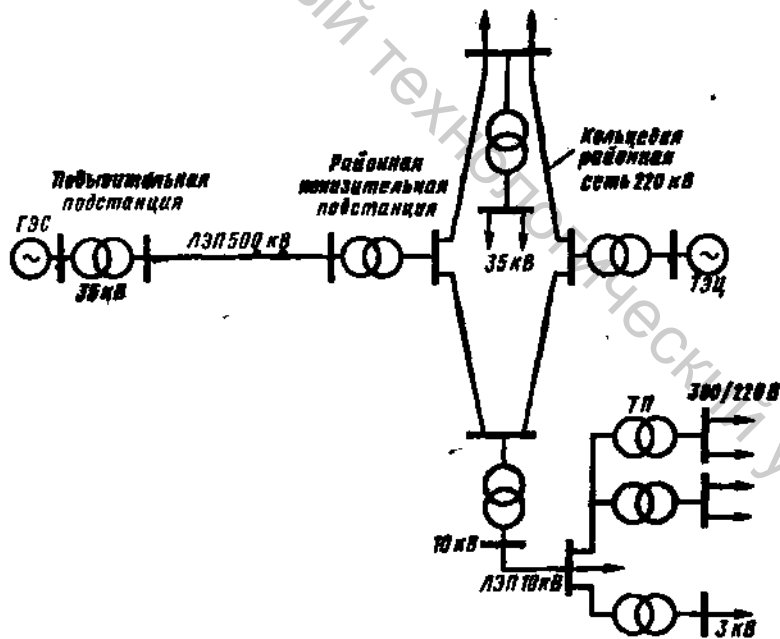


Рисунок 1.10 — Понизительные станции

Что касается симметричных трехфазных приемников, то их можно включать в трехпроводную цепь либо звездой, либо треугольником — это значительно расширяет область применения таких приемников.

На щитках многих трехфазных электродвигателей указывают два напряжения (например, 380/220) и помещают шесть выводов: если линейное напряжение сети $U_3 = 380$ В, то двигатель включают звездой. Номинальное напряжение большинства потребителей колеблется в пределах от 127 до 500 В; мощные электродвигатели работают при напряжении 3 и 6 кВ. Таким образом, возникает необходимость создания ряда понизительных станций, на которых происходит неоднократное трансформирование напряжения. Трансформаторы, используемые в сетях распределения электроэнергии, называются силовыми; они имеют номинальную мощность от нескольких единиц до нескольких сотен тысяч киловольт-ампер.

В устройствах промышленной электроники применяются силовые трансформаторы малой мощности (10 - 300 ВА) с несколькими вторичными обмотками, предназначенными для питания.

2 Задание к расчетно-графической работе № 3 Расчет трехфазной электрической цепи

Задание . Для трехфазной электрической цепи, схема которой изображена на рисунках 3.51 – 3.67, по заданным в таблице 3.1 параметрам и линейному напряжению определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы), активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

3 Значения параметров пассивных элементов цепи

Таблица 3.1 — Значение параметров элементов цепи

Номера		Ул, В	$R_{a,}$ Ом	$R_{b,}$ Ом	$R_{c,}$ Ом	$X_{a,}$ Ом	$X_{b,}$ Ом	$X_{c,}$ Ом	$R_{ab,}$ Ом	$R_{bc,}$ Ом	$R_{ca,}$ Ом	$X_{ab,}$ Ом	$X_{bc,}$ Ом	$X_{ca,}$ Ом
Варианта	Рисун- КОВ													
0	3.1	127	8	8	8	6	6	6	---	---	---	---	---	---
1	3.1	220	8	8	8	6	6	6	---	---	---	---	---	---
2	3.1	380	8	8	8	6	6	6	---	---	---	---	---	---
3	3.2	127	8	4	6	4	3	8	---	---	---	---	---	---
4	3.2	220	8	4	6	4	3	8	---	---	---	---	---	---
5	3.2	380	8	4	6	4	3	8	---	---	---	---	---	---
6	3.3	127	4	8	6	3	4	8	---	---	---	---	---	---

Продолжение таблицы 3.1

7	3.3	127	4	8	6	3	4	9	---	---	---	---	---	---
8	3.3	127	4	8	6	3	4	8	---	---	---	---	---	---
9	3.4	127	16,8	8	8	14,2	6	4	---	---	---	---	---	---
10	3.4	220	16.8	8	8	14.2	6	4	---	---	---	---	---	---
11	3.4	380	16.8	8	8	8	6	4	---	---	---	---	---	---
12	3.5	127	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
13	3.5	220	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
14	3.5	380	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
15	3.6	127	---	---	---	---	---	---	8	8	8	6	6	6
16	3.6	220	---	---	---	---	---	---	8	8	8	6	6	6
17	3.6	380	---	---	---	---	---	---	8	8	8	6	6	6
18	3.7	127	---	---	---	---	---	---	8	4	6	4	3	8
19	3.7	220	---	---	---	---	---	---	8	4	6	4	3	8
20	3.7	380	---	---	---	---	---	---	8	4	6	4	3	8
21	3.8	127	---	---	---	---	---	---	4	8	6	3	4	8
22	3.8	220	---	---	---	---	---	---	4	8	6	3	4	8
23	3.8	380	---	---	---	---	---	---	4	8	6	3	4	8
24	3.9	127	---	---	---	---	---	---	16.8	8	3	14.2	6	4
25	3.9	220	---	---	---	---	---	---	16.8	8	3	14.2	6	4
26	3.9	380	---	---	---	---	---	---	16.8	8	3	14.2	6	4
27	3.10	127	---	---	---	---	---	---	10	---	---	---	10	10
28	3.10	220	---	---	---	---	---	---	10	---	---	---	10	10
29	3.10	380	---	---	---	---	---	---	10	---	---	---	10	10
30	3.11	127	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
31	3.11	220	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
32	3.11	380	10	---	---	---	10	10	---	---	---	---	---	---
33	3.12	127	15	---	---	---	5	5	---	---	---	---	---	---
34	3.12	220	15	---	---	---	5	5	---	---	---	---	---	---
35	3.12	380	15	---	---	---	5	5	---	---	---	---	---	---
36	3.13	127	---	---	---	---	---	---	---	3	8	4	6	8
37	3.13	220	---	---	---	---	---	---	---	3	8	4	6	8
38	3.13	380	---	---	---	---	---	---	---	3	8	4	6	8
39	3.14	127	---	---	---	---	---	---	8	4	8	---	6	10
40	3.14	220	---	---	---	---	---	---	8	4	8	---	6	10
41	3.14	220	---	---	---	---	---	---	8	4	8	---	6	10
42	3.15	127	---	---	---	---	---	---	---	5	6	5	8	4
43	3.15	220	---	---	---	---	---	---	---	5	6	5	8	4
44	3.15	380	---	---	---	---	---	---	---	5	6	5	8	4

Окончание таблицы 3.1

45	3.16	127	---	---	---	---	---	---	5	---	6	10	8	4
46	3.16	220	---	---	---	---	---	---	5	---	6	10	8	4
47	3.16	380	---	---	---	---	---	---	5	---	6	10	8	4
48	3.17	127	---	3	---	15	---	10	---	---	---	---	---	---
49	3.17	220	---	3	---	15	---	10	---	---	---	---	---	---
50	3.17	220	---	3	---	15	---	10	---	---	---	---	---	---

Схемы электрических цепей рисунки 3.1 – 3.17

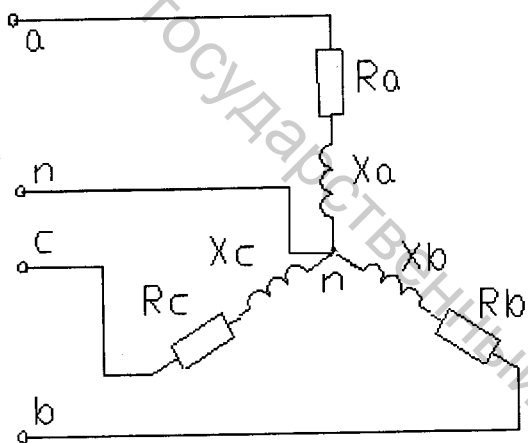


Рисунок 3.1

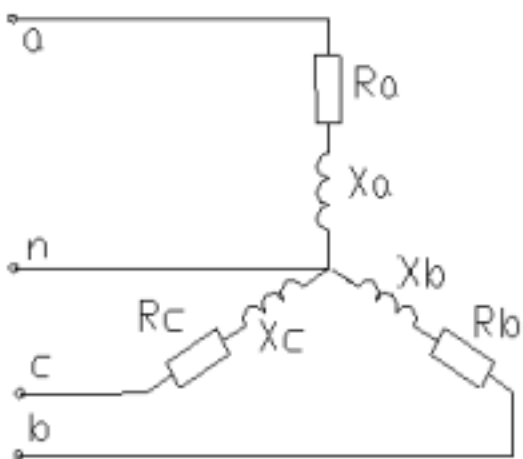


Рисунок 3.3

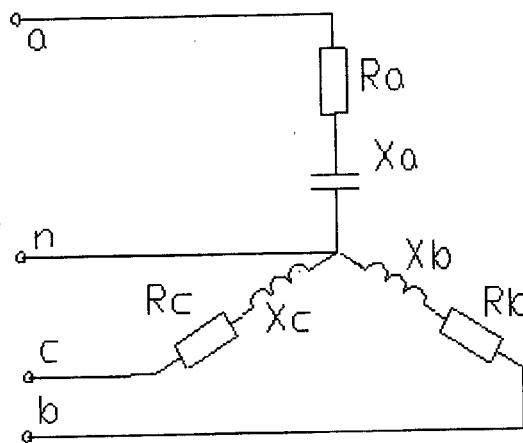


Рисунок 3.2

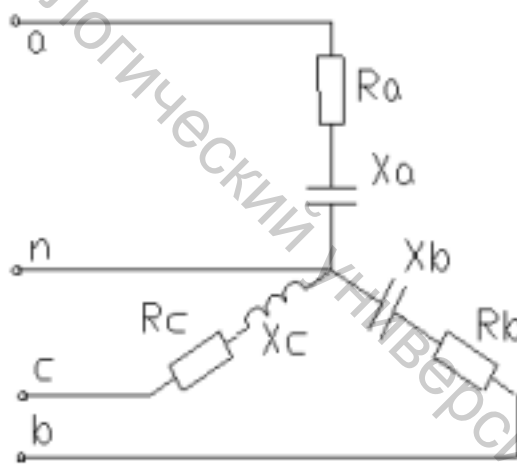


Рисунок 3.4

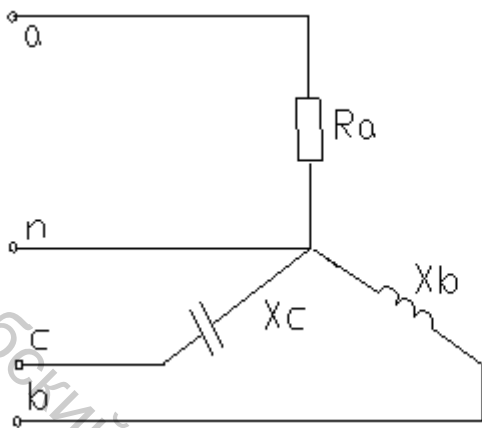


Рисунок 3.5

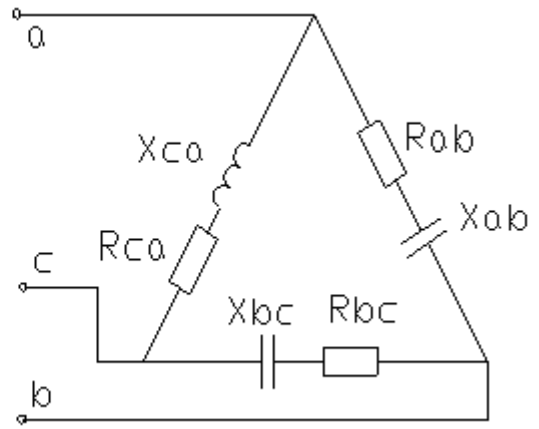


Рисунок 3.6

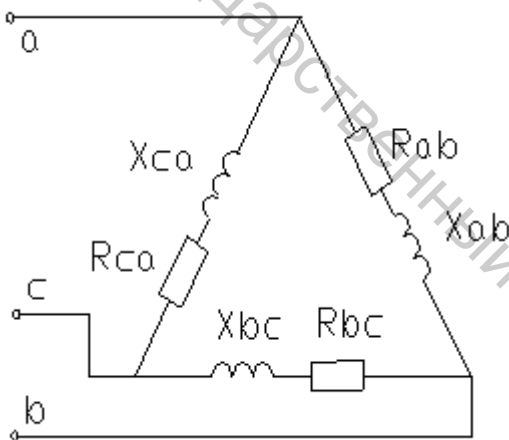


Рисунок 3.7

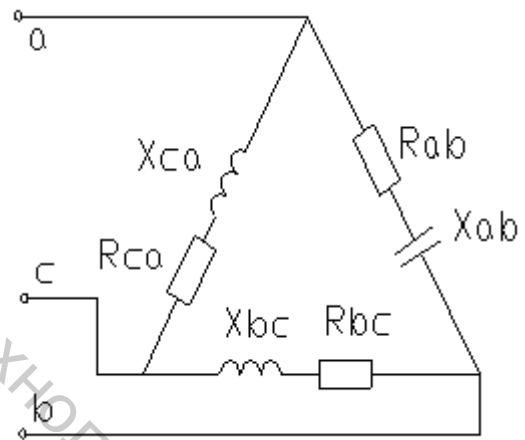


Рисунок 3.8

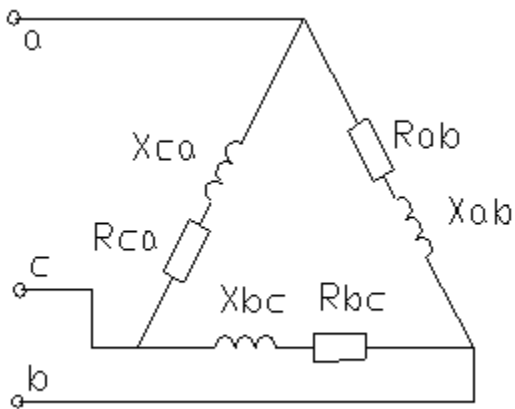


Рисунок 3.9

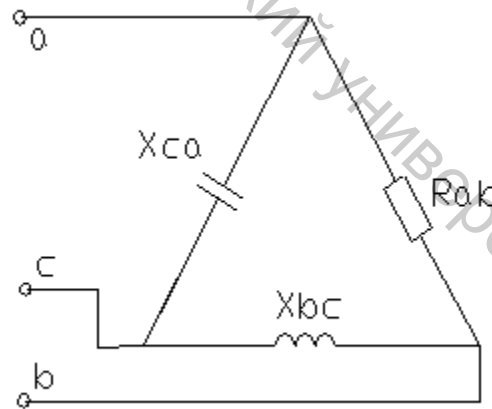


Рисунок 3.10

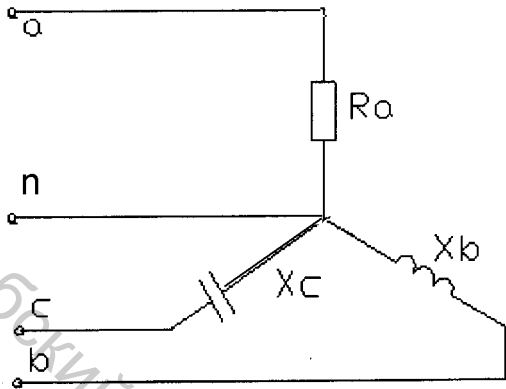


Рисунок 3.11

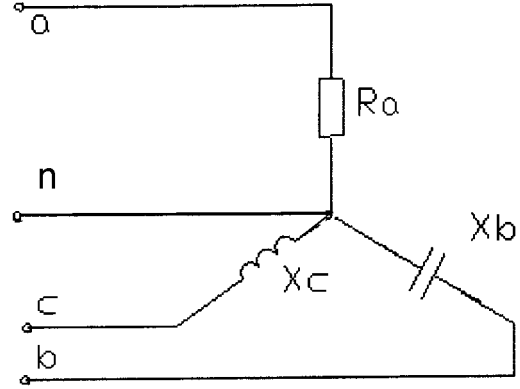


Рисунок 3.22

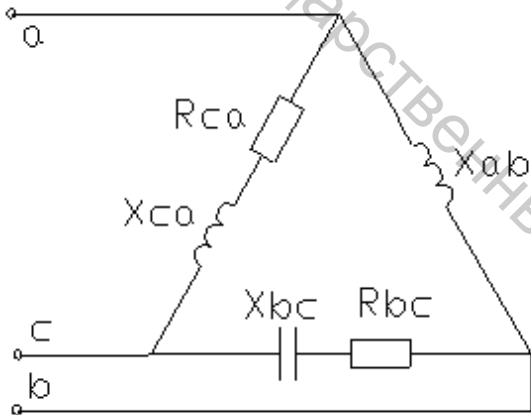


Рисунок 3.13

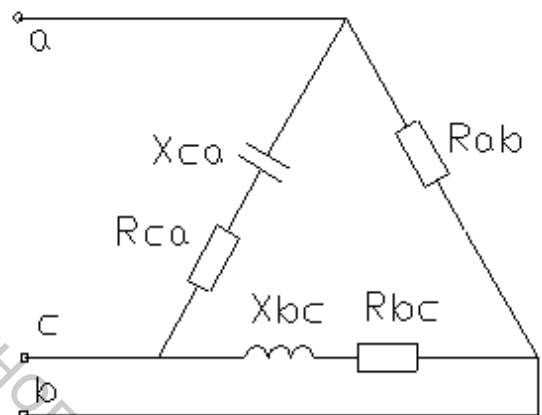


Рисунок 3.14

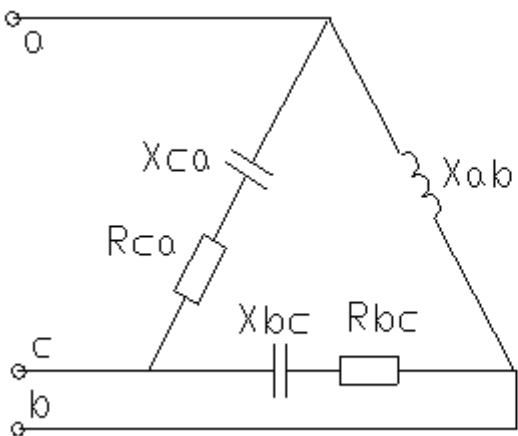


Рисунок 3.15

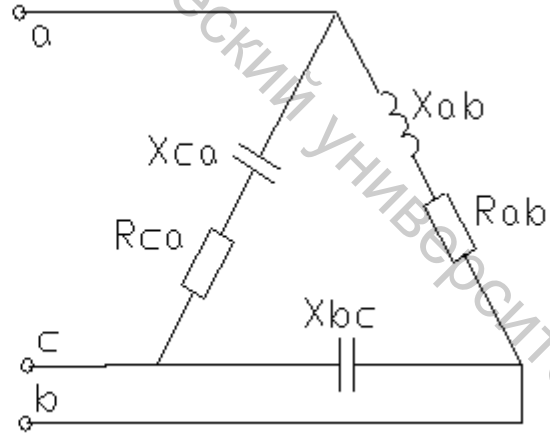


Рисунок 3.16

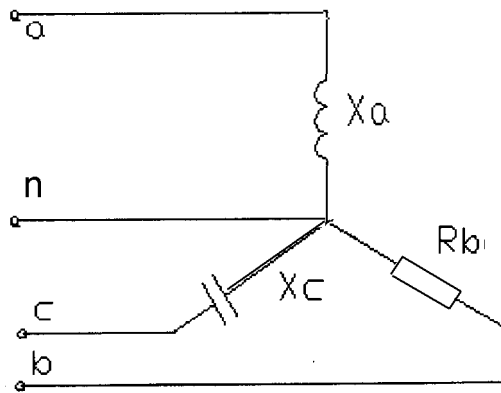


Рисунок 3.17

4 Пример решения задачи

Для трехфазной электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 3.18, по заданным параметрам и линейному напряжению необходимо определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырех проводной схемы), активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Дано: $U_{ЛГ}=220$ В, $R_a=3$ Ом, $R_b=3$ Ом, $R_c=4$ Ом, $X_a=4$ Ом, $X_b=5,2$ Ом, $X_c=3$ Ом.

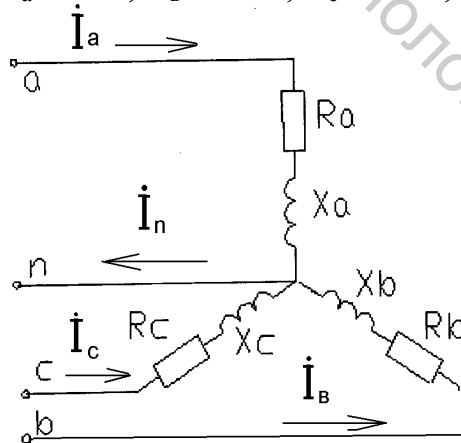


Рисунок 3.18 — Схема цепи трехфазного тока

Решение:

1. Указывают направления токов в ветвях (расчет производится с использованием комплексных значений символическим методом).

2. Выражают фазные напряжения и сопротивления ветвей в комплексной форме.

Фазные напряжения

$$\dot{U}_a = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} \cdot e^{j0^\circ} = 127 \cdot e^{j0^\circ} \text{ В}, \dot{U}_b = 127 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = 127 \cdot e^{-j240^\circ} = 127 \cdot e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Сопротивления ветвей в комплексной форме

$$\underline{Z}_a = R_a + j \cdot X_a = 3 + j \cdot 4 = 5 \cdot e^{j53^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_b = 3 + j \cdot 5,2 = 6 \cdot e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_c = 4 + j \cdot 3 = 5 \cdot e^{j37^\circ} \text{ Ом}.$$

3. Определяются комплексные и действующие значения токов в отдельных фазах (при соединении звездой $I_{\text{Л}} = I_{\text{Ф}}$).

Комплексное значение на фазе А

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127 \cdot e^{j0^\circ}}{5 \cdot e^{j53^\circ}} = 25,4 \cdot e^{-j53^\circ} \text{ А},$$

действующие значение $I_a = 25,4 \text{ А}$.

Комплексное значение на фазе В

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{127 \cdot e^{-j120^\circ}}{6 \cdot e^{j60^\circ}} = 21,2 \cdot e^{-j180^\circ} \text{ А},$$

действующие значение $I_b = 21,2 \text{ А}$.

Комплексное значение на фазе С

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127 \cdot e^{j120^\circ}}{5 \cdot e^{j37^\circ}} = 25,4 \cdot e^{j83^\circ} \text{ А,}$$

действующие значение $I_a = 25,4 \text{ А.}$

4. Комплекс тока в нейтральном проводе определяется как сумма комплексов линейных токов

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_e + \dot{I}_c,$$

$$\dot{I}_n = 25,4 \cdot e^{-j53^\circ} + 21,2 \cdot e^{-j180^\circ} + 25,4 \cdot e^{j83^\circ} = 5,9 \cdot e^{j124^\circ} \text{ А, } I_n = 5,9 \text{ А.}$$

5. Активные мощности отдельных фаз и всей цепи будут равны

Активная мощность фазы А

$$P_a = I_a^2 \cdot R_a = 25,4^2 \cdot 3 = 1935,5 \text{ Вт.}$$

Активная мощность фазы В

$$P_e = I_e^2 \cdot R_e = 21,2^2 \cdot 3 = 1348,3 \text{ Вт.}$$

Активная мощность фазы С

$$P_c = I_c^2 \cdot R_c = 25,4^2 \cdot 4 = 2580,6 \text{ Вт.}$$

Активная мощность всей цепи

$$P = P_a + P_e + P_c = 1935,5 + 1348,3 + 2580,6 = 5864,4 \text{ Вт.}$$

6. Используя комплексные значения токов и напряжений, строят векторную диаграмму (рисунок 3.19).

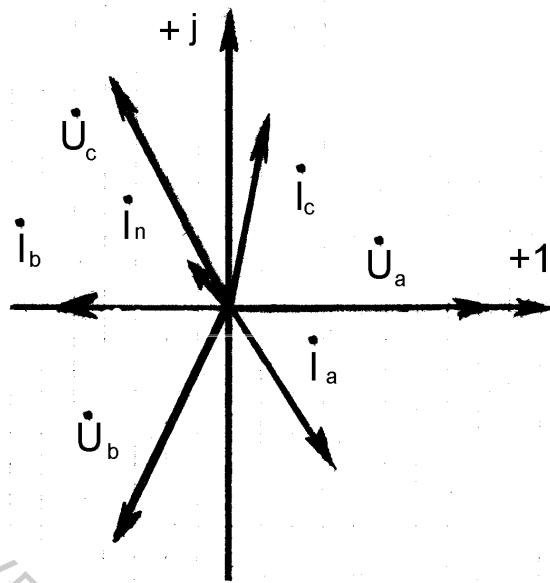


Рисунок 3.19 — Векторная диаграмма

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 542 с.
2. Электротехника / В. Г. Герасимов [и др.] ; под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1985. – 768 с.
3. Рыбаков, Н. С. Электротехника / Н. С. Рыбаков. – Москва : РИОР, 2007. – 160 с.
4. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 559 с.
5. Бутырин, П. А. Электротехника / П. А. Бутырин. – Москва : Академия, 2007. – 272 с.
6. Справочник по электрическим машинам / Том 1 / под. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.