

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
<<Российский государственный профессионально-педагогический университет>>
Инженерно-педагогический институт
Кафедра общей электротехники

4641

Теоретические основы электротехники

Методические указания к контрольным работам для студентов всех форм обучения
(ГОС-2000)

Екатеринбург
2007

Теоретические основы электротехники. Задания и методические указания к контрольным работам для студентов всех форм обучения (ГОС-2000). – Екатеринбург, рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2007. – 15 с.

Составитель: доктор, физико-математических наук, профессор О.И.Клюшников
кандидат физико-математических наук, доцент Б.М.Смоляк
старший преподаватель А.В.Степанов

Контрольные задания и методические указания по их выполнению предназначены для закрепления и проверки знаний студентов при самостоятельной работе по дисциплине «Теоретические основы электротехники», включают четыре задачи по разделу «Трёхфазные цепи».

Контрольные задания предназначены для специализаций (специальностей):

030501.19 – Электроэнергетика

030502.19 – Компьютеры и информационные технологии обучения в энергетике

030503.19 – Электротехника, электротехнологии и технологический менеджмент

030504.19 – Электроэнергетика, энергоаудит, энергосбережение

140610.65(180400) – Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов

140610.65(181300) – Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Одобрены на заседании кафедры общей электротехники

Протокол от 14.01.07 № 6

Рекомендована к печати методической комиссией электроэнергетического факультета ИПИ РГПУ. Протокол от 22.01.0 № 5.

Председатель методической
комиссии ЭЭФ ИПИ РГПУ

В.Ф. Журавлев

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2007

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

При изучении курса ТОЭ студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, происходящих в электрических цепях и электромагнитных полях.

Одним из основных видов занятий является выполнение контрольных заданий.

К представленным на проверку контрольным заданиям предъявляются следующие требования:

1. Основные положения решения должны быть достаточно подробно пояснены.
2. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе.
3. В тетради следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний преподавателя.
4. Вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры.
5. Контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом.
6. Незачтенное контрольное задание должно быть выполнено заново и представлено на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в ранее проверенном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена не вся работа, а только часть ее, то переработанный и исправленный текст следует записать в тетради после первоначального текста под заголовком «Исправление ошибок».

Контрольные задания зачитываются, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

Работа над контрольным заданием помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.
2. Тщательно продумать, какие буквенные или цифровые обозначения предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого обозначения.
3. В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием.
4. Расчет каждой определяемой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.
5. Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по ТОЭ.
6. Каждому этапу решения задачи нужно давать пояснения.
7. При выполнении задания на титульном листе, указать фамилию, имя, отчество, номер группы, вариант. Вариант выбирается студентом по двум последним цифрам зачетной книжки. Если две последние цифры более 50 (например 62), то Ваш номер варианта определяется по правилу: две последние цифры -50 , т.е. $(62-50)=12$ (вариант 12).

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Трехфазные цепи применяются в электроэнергетике вследствие наибольшей экономичности и технического совершенства. Источниками электрической энергии в таких цепях являются трехфазные электромеханические генераторы, состоящие как бы из трех самостоятельных генераторов, размещенных в одном корпусе. Они генерируют синусоидальные напряжения одинаковой амплитуды, сдвинутые по отношению к друг к другу по фазе на 120 электрических градусов. Исходя из этого, генераторы называются фазами, обмотки – фазными обмотками.

“Начала” обмоток обычно обозначаются первыми буквами латинского алфавита *A*, *B*, и *C*, а “концы” — последними буквами *X*, *Y* и *Z*. Порядок, в котором ЭДС фазных обмоток проходят через одинаковые значения, например, через положительные максимумы, называют порядком чередования фаз. Генератор называется симметричным, если все ЭДС равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на один и тот же угол. Обычно одну из этих ЭДС обозначают как ЭДС фазы *A*, тогда отстающую ЭДС-ЭДС фазы *B*, а опережающую на 120°-ЭДС-фазы *C*.

На рис.1.1. приведена векторная и волновая диаграммы ЭДС трехфазного генератора.

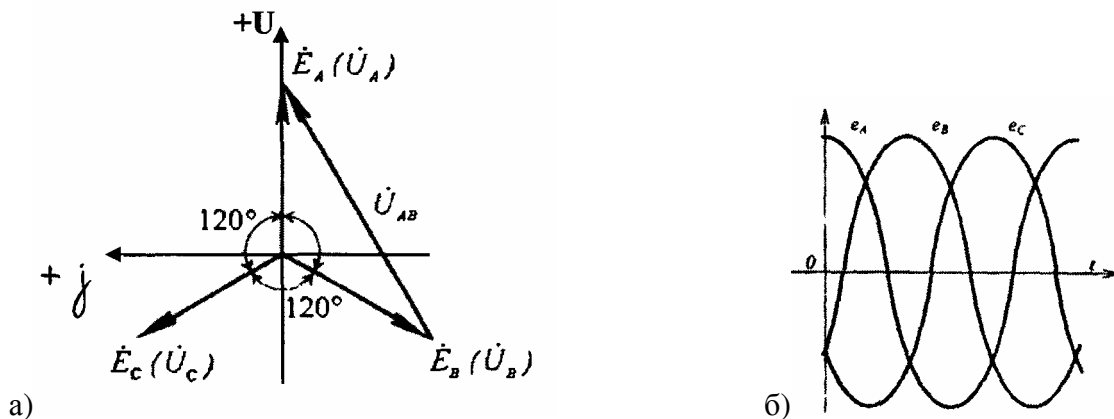


Рис.1.1. Диаграммы ЭДС трехфазного генератора: а – векторная, б – волновая

Под трехфазной цепью понимают совокупность трехфазной ЭДС, трехфазной нагрузки и соединительных проводов. Отдельная часть многофазной системы получила название фазы (иногда под фазой понимают участок трехфазной цепи с одинаковым током, но это не является обобщенным понятием). Наибольшее применение получили соединение в звезду с нулевым проводом, без нулевого провода и треугольник. Рассмотрим подробнее схему соединением звезда (рис.1.2., рис.1.3..).

Существует два типа соединения обмоток генератора и элементов ($\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$) приемников звездой и треугольником. При соединении звездой «концы» обмоток генератора и приемника соединяют в одну. Общая точка соединения обмоток генератора получила название нулевая точка генератора (0), а для приемника - нулевая точка приемника (0'), а провод соединяющий такие точки генератора и нагрузки, называют нейтральным или нулевым проводом. Остальные провода соединяющие обмотки генератора с приемником называют линейными.

При симметричном генераторе между линейными и фазными напряжениями связь выражается следующими соотношениями:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_A \cdot \sqrt{3}e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_B \cdot \sqrt{3}e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_C \cdot \sqrt{3} e^{j30^\circ}.$$

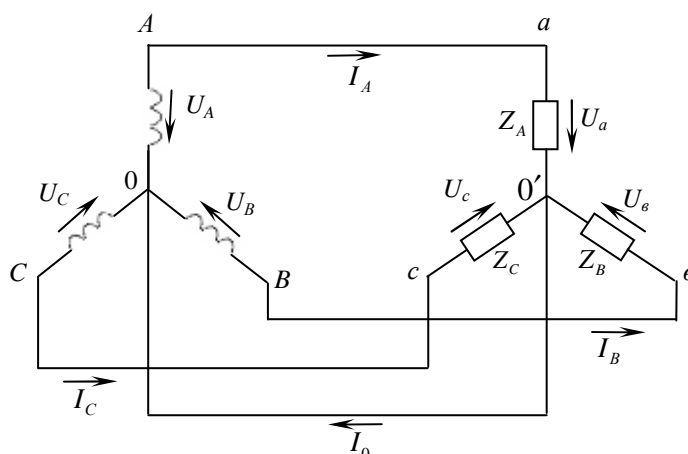


Рис.1.2. Трехфазная система «генератор-нагрузка», соединенный звездой с нулевым проводом

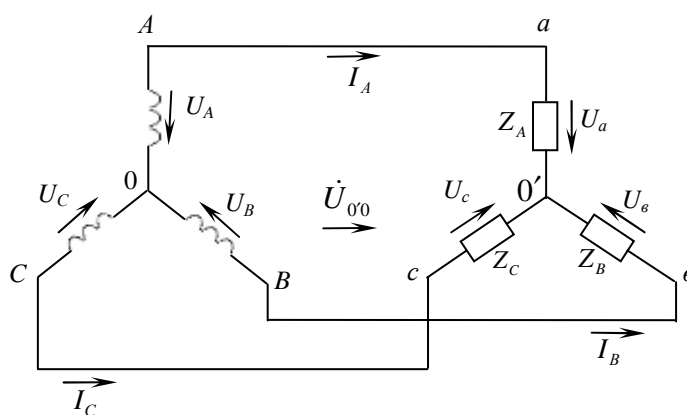


Рис.1.3. Трехфазная система «генератор-нагрузка», соединенный звездой без нулевого провода

Трехфазная цепь считается симметричной, если модули генераторных напряжений одинаковы и сдвинуты по фазе на 120° , а в качестве приемников используют одинаковые сопротивления (в комплексной форме $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$). Из рис.1.2. и рис.1.3. следует, что для схемы соединения звезда в симметричном режиме работы линейный ток должен быть равен фазному току генератора или приемника, а линейное напряжение по модулю в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения. Эти соотношения являются базовыми и широко используются в расчетах.

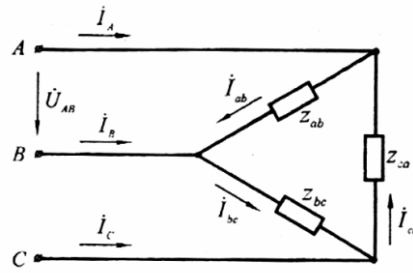


Рис.1.4. Пример соединения приемника в треугольник

Трехфазные цепи характеризуются симметричным и несимметричными режимами работы. Если симметричный генератор питает симметричную нагрузку, то трехфазная цепь работает в симметричном режиме. Асимметричный режим обусловлен неравномерной нагрузкой фаз приемника, несимметрией напряжений трехфазного генератора или сочетанием этих факторов.

I. В трехфазной цепи с нулевым проводом (рис.1.2.), если пренебречь сопротивлением нулевого и линейных проводов, напряжения на фазах генератора и приемника оказываются одинаковыми. Поэтому ток каждой фазы зависит от напряжения этой фазы генератора и сопротивления фазы, а ток в нулевом проводе является суммой фазных токов т.е. для такой цепи можно записать:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_A \cdot Y_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A};$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_B \cdot Y_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B};$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_C \cdot Y_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C};$$

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

В симметричной трехфазной системе, когда $\dot{U}_{O'O} = 0$, фазные напряжения генератора и приемника становятся одинаковыми. В любом случае геометрическая сумма фазных токов должна быть равна нулю, т.е.

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

II. В трехфазной цепи без нулевого провода (рис.1.3.) напряжения на фазах генератора и приемника в общем случае неодинаковы, так как возникает напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{O'O}$:

$$\dot{U}_{O'O} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазные напряжения генератора;

$\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ - соответствующие проводимости фаз приемника.

Тогда фазные напряжения и токи приемника определяются по формулам:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{O'O}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{O'O};$$

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a \cdot \frac{1}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b \cdot \frac{1}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_c \cdot \frac{1}{\underline{Z}_C}; \quad \dot{I}_N = \dot{U}_N \cdot \frac{1}{\underline{Z}_N}.$$

III. В трехфазной цепи соединения приемников в треугольник линейные напряжения генератора равны фазным напряжениям нагрузки.

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

$$\dot{I}_{a\bar{b}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{a\bar{b}}}; \dot{I}_{\bar{b}c} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{\bar{b}c}}; \dot{I}_{c\bar{a}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{c\bar{a}}}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа для узлов a , \bar{b} и c , линейные токи можно определить из соотношений:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{a\bar{b}} - \dot{I}_{c\bar{a}}; \dot{I}_B = \dot{I}_{\bar{b}c} - \dot{I}_{a\bar{b}}; \dot{I}_C = \dot{I}_{c\bar{a}} - \dot{I}_{\bar{b}c}.$$

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

2. Расчет трехфазных цепей при соединении приемников четырехпроводной звездой (звездой с нейтральным проводом).

Мы будем рассматривать только приемники, подключенные к симметричному трехфазному источнику питания (генератору).

Симметричным называется такой трехфазный генератор, в котором действуют три ЭДС с одинаковыми частотами и амплитудами, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120° .

Перед расчетом необходимо к исходной схеме добавить соответствующее ЭДС трехфазного генератора.

Порядок расчета

- 2.1. Записать систему трех фазных симметричных напряжений.
- 2.2. Записать сопротивление фаз в комплексной форме.
- 2.3. По закону Ома определить токи в фазах.
- 2.4. По I закону Кирхгофа вычислить ток в нейтральном (нулевом) проводе.
- 2.5. Рассчитать мощности всей цепи и каждой фазы отдельно.
- 2.6. Построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений.

Пример1. К трехфазному источнику с линейным напряжением $U_L = 380V$ подключен несимметричный трехфазный приемник (рис.2.1.). Активные и реактивные сопротивления фаз приемника соответственно равны: $R_a = 19\Omega$, $R_b = 8\Omega$, $R_c = 24\Omega$, $X_b = 6\Omega$, $X_c = 18\Omega$. Сопротивлениями проводов можно пренебречь. Определить токи в фазах приемника, ток в нейтральном проводе, мощности каждой фазы и всей цепи. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

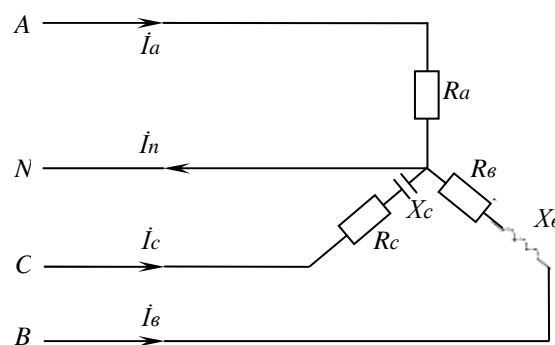


Рис.2.1.

Так потребитель соединен четырехпроводной звездой, то системы фазных и линейных напряжений источника и потребителя совпадают, $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, следовательно,

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220V.$$

Пусть вектор напряжения фазы А совпадает с положительным напряжением оси действительных чисел (рис.2.2.), тогда

$$\dot{U}_a = U_\phi \cdot e^{j0^\circ} = 220 \cdot e^{j0^\circ} = 220V = U_{AN},$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_A \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} B = U_{BN},$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot e^{-j120^\circ} = 220 \cdot e^{-j240^\circ} = 220 \cdot e^{j120^\circ} B = U_{CN}.$$

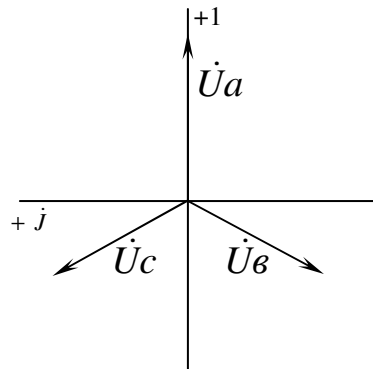


Рис.2.2.

Комплексы сопротивлений фаз:

$$\underline{Z}_a = R_a = 19 \text{ Ом} = 19 \cdot e^{j0^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = R_B + jX_B = 8 + j6 = 10 \cdot e^{j36,87^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = R_C - jX_C = 24 - j18 = 30 \cdot e^{-j36,87^\circ} \text{ Ом}.$$

Токи в фазах приемника определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220 \cdot e^{j0^\circ}}{19 \cdot e^{j0^\circ}} = 11,58 \cdot e^{j0^\circ} = 11,58 \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{10 \cdot e^{j36,87^\circ}} = 22 \cdot e^{-j156,87^\circ} = -20,23 - j8,64 \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{220 \cdot e^{j120^\circ}}{30 \cdot e^{-j36,87^\circ}} = 7,33 \cdot e^{j155,87^\circ} = -6,74 + j2,88 \text{ А}.$$

По первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 11,58 - 20,23 - j8,64 - 6,74 + j2,88 = -15,39 - j5,76 = 10,43 \cdot e^{-j159,48^\circ} \text{ А}$$

Мощность, потребляемая нагрузкой

$$S_a = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* = 220 \cdot 11,58 = 2547,6 \text{ ВА};$$

$$S_B = \dot{U}_B \cdot \dot{I}_B^* = 220 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot 20 \cdot e^{j156,87^\circ} = 4840 \cdot e^{j36,87^\circ} = 3872 + j2904 \text{ ВА};$$

$$S_C = \dot{U}_C \cdot \dot{I}_C^* = 220 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 7,33 \cdot e^{-j156,87^\circ} = 1612,6 \cdot e^{-j36,87^\circ} = 1290 + j967,6 \text{ ВА};$$

$$S = \underline{S}_a + \underline{S}_B + \underline{S}_C = 2547,6 + 3872 + j2904 + 1290 - j967,6 = 7709,6 + j1936,4.$$

Векторные диаграммы токов и напряжений приведены на рис.2.3.

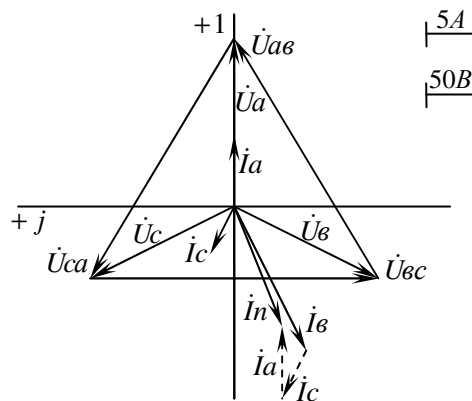


Рис.2.3.

3. Расчет трехфазных потребителей при соединении приемника трехпроводной звездой без нейтрального провода

Системы фазных и линейных напряжений источника (генератора) и нагрузки в этом случае не совпадают. Между нейтральными точками источника и потребителя возникает напряжение, которое называется напряжением смещения нейтрали.

Перед расчетом необходимо к исходной схеме добавить соответствующее ЭДС трехфазного генератора.

- 3.1. Записать систему фазных напряжений источника.
- 3.2. Сопротивления фаз представить в комплексной форме и вычислить проводимости фаз.
- 3.3. Рассчитать напряжение смещения нейтрали.
- 3.4. Определить напряжения фаз потребителя.
- 3.5. По закону Ома найти фазные токи нагрузки.
- 3.6. Построить секторные диаграммы токов и напряжений.

Пример 2. К трехпроводной трехфазной сети с линейным напряжением $U_L = 220\text{В}$ подключен приемник, фазы которого соединены звездой (рис. 3.1). Сопротивления фаз: $\underline{Z}_a = 10\Omega$, $\underline{Z}_c = -j10\Omega$, $\underline{Z}_b = 5 + j8,66\Omega$. Определить токи в ветвях. Построить совмещенные векторные диаграммы токов и напряжений.

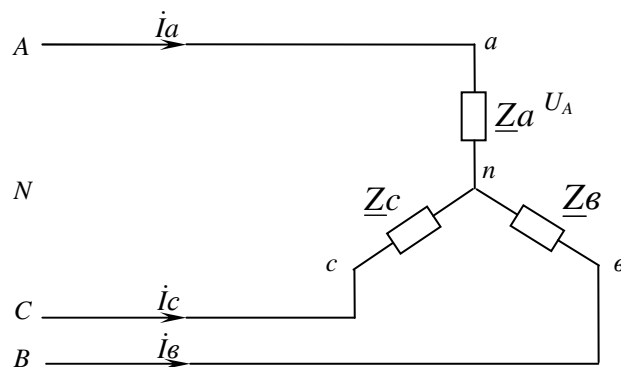


Рис. 3.1.

Фазные напряжения источника образуют симметричную систему с

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\text{В};$$

$$U_a = U_\phi \cdot e^{j0^\circ} = 127 \cdot e^{j0^\circ} = 127\text{В};$$

$$U_b = U_\phi \cdot e^{-j120^\circ} = 127 \cdot e^{-j120^\circ} = -63,5 - j110\text{В};$$

$$U_c = U_\phi \cdot e^{j120^\circ} = 127 \cdot e^{j120^\circ} = -63,5 + j110\text{В}.$$

Комплексные проводимости фаз нагрузки:

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{10} = 0,1\text{См};$$

$$\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{5 + j8,66} = \frac{1}{10 \cdot e^{j60^\circ}} 0,1 \cdot e^{-j60^\circ} = 0,05 - j0,0866\text{См};$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{-j10} = j0,1 \cdot e^{j90^\circ}\text{См}.$$

Напряжение смещения нейтрали:

$$U_n = \frac{\dot{U}_a \underline{Y}_a + \dot{U}_b \underline{Y}_b + \dot{U}_c \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{127 \cdot e^{j0^\circ} \cdot 0,1 \cdot e^{j0^\circ} + 127 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot 0,1 \cdot e^{-j60^\circ} + 127 \cdot e^{j120^\circ} \cdot 0,1 \cdot e^{j90^\circ}}{0,1 + 0,05 - j0,0866 + j0,1} =$$

$$= 84,33 \cdot e^{-j155,1} = -76,49 - j35,51 B$$

Фазные напряжения приемника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_N = 127 - (-76,49 - j35,51) = 203,49 + j35,51 = 206,56 \cdot e^{j9,9^\circ} B;$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_N = (-63,5 - j110) - (-76,49 - j35,51) = 12,99 - j74,49 = 75,61 \cdot e^{-j80,1^\circ} B;$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_N = (-63,5 + j110) - (-76,49 - j35,51) = 12,99 + j145,51 = 146,09 \cdot e^{j84,9^\circ} B.$$

Фазные токи и токи в линиях определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{206,56 \cdot e^{j99^\circ}}{10} = 20,66 \cdot e^{j9,9^\circ} = 20,35 + j3,55 A;$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{75,61 \cdot e^{-j80,1^\circ}}{10 \cdot e^{j60^\circ}} = 7,56 \cdot e^{-j140,1^\circ} = -5,8 - j4,85 A;$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{146,09 \cdot e^{j84,9^\circ}}{10 \cdot e^{-j90^\circ}} = 14,61 \cdot e^{j174,9^\circ} = -14,55 + j1,3 A.$$

Правильность решения проверим по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0;$$

$$20,35 + j3,55 - 5,8 - j4,85 - 14,55 + j1,3 = 0.$$

Векторная диаграмма изображена на рис. 3.2.

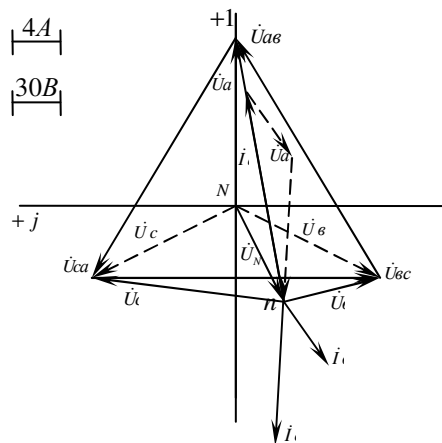


Рис.3.2.

4. Расчет трехфазных потребителей при соединении нагрузки треугольником

Порядок расчета

- 4.1. Записать систему фазных напряжений приемника.
- 4.2. Представить сопротивления фаз в комплексной форме.
- 4.3. По закону Ома определить фазные токи.
- 4.4. По первому закону Кирхгофа рассчитать линейные токи.
- 4.5. В масштабе построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Пример 3. К трехфазному источнику ЭДС с линейным напряжением $U_L = 380 B$ подключен трехфазный приемник (рис.4.1) с сопротивлениями фаз $R_{ab} = 38 \Omega$,

$X_{bc} = X_{ca} = 38 \Omega$. Рассчитать фазные и линейные токи. Правильность решения проверить, составив уравнение баланса активной мощности. Для определения активной

мощности, вырабатываемой генератором, воспользоваться методом двух ваттметров. Построить совмещенную векторную диаграмму напряжений и токов.

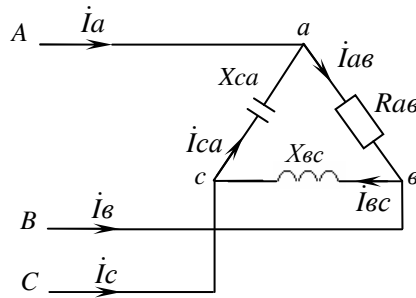


Рис. 4.1.

При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные напряжения равны между собой, то есть $U_{\phi} = U_{\text{л}} = 380\text{В}$

Запишем симметричную систему трехфазных напряжений. Для определенности предположим, что напряжение фазы ВС совпадает с отрицательным направлением оси мнимых чисел:

$$\dot{U}_{\text{вс}} = -jU_{\phi} = -j380 = 380 \cdot e^{-j90^{\circ}} \text{ В}$$

Тогда

$$\dot{U}_{\text{ав}} = \dot{U}_{\text{вс}} \cdot e^{j120^{\circ}} = 380 \cdot e^{-j90^{\circ}} \cdot e^{j120^{\circ}} = 380 \cdot e^{j30^{\circ}} = 330 + j190 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{\text{са}} = \dot{U}_{\text{вс}} \cdot e^{-j120^{\circ}} = 380 \cdot e^{-j90^{\circ}} \cdot e^{-j120^{\circ}} = 380 \cdot e^{-j210^{\circ}} = 380 \cdot e^{j150^{\circ}} = -330 + j190 \text{ В}.$$

Комплексные сопротивления фаз:

$$\underline{Z}_{\text{ав}} = R_{\text{ав}} = 19 \text{ Ом} = 38 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{\text{вс}} = jX_{\text{вс}} = j38 = 38 \cdot e^{j90^{\circ}} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{\text{са}} = -jX_{\text{са}} = -j38 = 38 \cdot e^{-j90^{\circ}} \text{ Ом}.$$

Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{\text{ав}} = \frac{\dot{U}_{\text{ав}}}{\underline{Z}_{\text{ав}}} = \frac{380 \cdot e^{j30^{\circ}}}{38} = 10 \cdot e^{j30^{\circ}} = 8,66 + j5 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{\text{вс}} = \frac{\dot{U}_{\text{вс}}}{\underline{Z}_{\text{вс}}} = \frac{380 \cdot e^{-j90^{\circ}}}{38 \cdot e^{j90^{\circ}}} = 10 \cdot e^{-j180^{\circ}} = -10 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{\text{са}} = \frac{\dot{U}_{\text{са}}}{\underline{Z}_{\text{са}}} = \frac{380 \cdot e^{j150^{\circ}}}{38 \cdot e^{-j90^{\circ}}} = 10 \cdot e^{j240^{\circ}} = 10 \cdot e^{-j120^{\circ}} = -5 - j8,66 \text{ А}.$$

Линейные токи находятся по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_{\text{А}} = \dot{I}_{\text{ав}} - \dot{I}_{\text{са}} = 8,66 + j5 - (-5 - j8,66) = 13,66 + j13,66 = 19,32 \cdot e^{j45^{\circ}} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{\text{В}} = \dot{I}_{\text{вс}} - \dot{I}_{\text{ав}} = -10 - (8,66 + j5) = -18,66 - j5 = 19,32 \cdot e^{-j165^{\circ}} \text{ А}$$

$$\dot{I}_{\text{С}} = \dot{I}_{\text{са}} - \dot{I}_{\text{вс}} = -5 - j8,66 - (-10) = 5 - j8,66 = 10 \cdot e^{-j60^{\circ}} \text{ А}$$

Активная мощность нагрузки

$$P = P_{\text{ав}} + P_{\text{вс}} + P_{\text{са}};$$

$$P_{\text{ав}} = I_{\text{ав}}^2 \cdot R_{\text{ав}} = 10^2 \cdot 38 = 3800 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{вс}} = P_{\text{са}} = 0, \text{ так как в этих фазах нет активных сопротивлений.}$$

$$P = P_{\text{ав}} = 3800 \text{ Вт}$$

Схема измерения активной мощности по методу двух ваттметров приведена на рис.4.2.

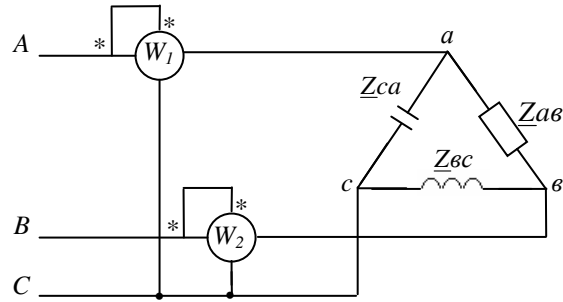


Рис.4.2.

Активная мощность всей цепи равна сумме показаний ваттметров:

$$P = P_1 + P_2;$$

$$P_1 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{ac} \cdot I_A^*] = \operatorname{Re}[-380 \cdot e^{j150^\circ} \cdot 19,32 \cdot e^{-j45^\circ}] = \operatorname{Re}[-7341,6 \cdot e^{j105^\circ}] = -7341,6 \cdot \cos 105^\circ = 1900 \text{ Вт};$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[\dot{U}_{bc} \cdot I_B^*] = \operatorname{Re}[380 \cdot e^{-j90^\circ} \cdot 19,32 \cdot e^{j165^\circ}] = \operatorname{Re}[7341,6 \cdot e^{j75^\circ}] = 7341,6 \cdot \cos 75^\circ = 1900 \text{ Вт};$$

$$P = P_1 + P_2 = 1900 + 1900 = 3800 \text{ Вт}.$$

Задача решена верно.

Векторные диаграммы напряжений и токов изображены на рис.4.3

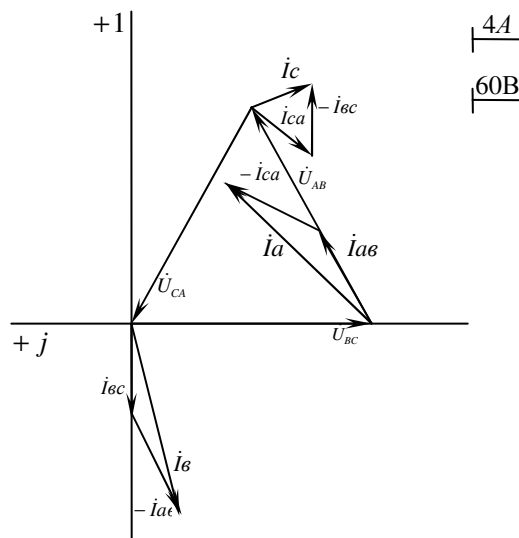


Рис.4.3.

Примечание. Треугольник напряжений можно расположить на комплексной плоскости по-другому. При этом полностью изменятся все расчеты и векторная диаграмма токов и напряжений будет иметь другой вид.

Пусть вектор напряжения фазы АВ совпадает с положительным направлением оси действительных чисел. Тогда система фазных напряжений запишется следующим образом:

$$\dot{U}_{AB} = U_\phi \cdot e^{j0^\circ} = 380 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_\phi \cdot e^{-j120^\circ} = 380 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_\phi \cdot e^{j120^\circ} \text{ В};$$

и векторная диаграмма будет соответствовать рис.4.4.

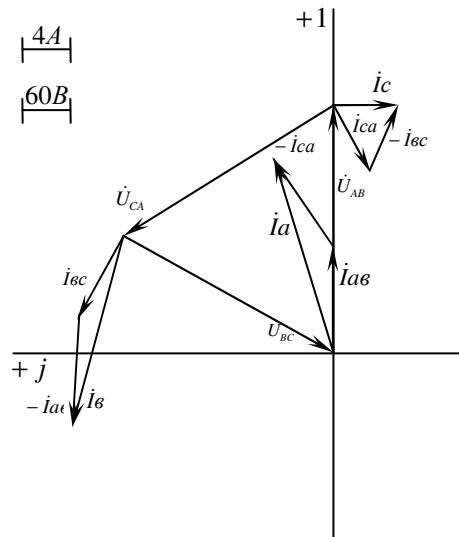


Рис.4.4.

Возможен и другой вариант решения.

Пример 4. Перед расчетом необходимо к исходной схеме добавить соответствующие ЭДС трехфазного генератора (рис.4.5.) и, путем эквивалентных преобразований, свести схему к соединению звездой (рис.4.6).

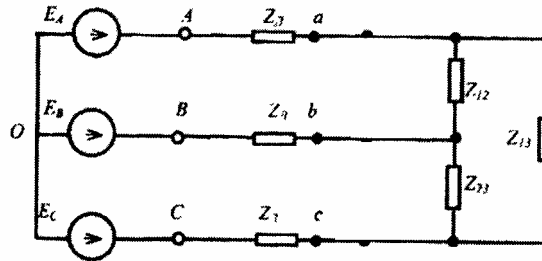


Рис. 4.5.

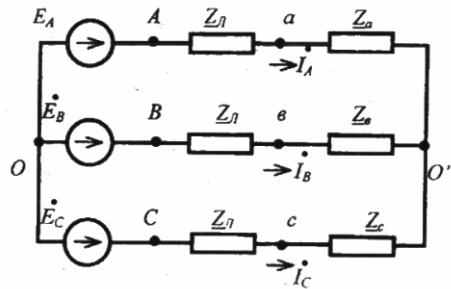


Рис. 4.6.

Преобразуем получившийся треугольник в новую звезду:

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}, \quad \underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}, \quad \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{23}\underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{23}}.$$

Сложив сопротивления звезды, с соответствующими сопротивлениями линий (рис.4.6.) получим $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$, или проводимости $\underline{Y}_A = 1/\underline{Z}_A, \underline{Y}_B = 1/\underline{Z}_B, \underline{Y}_C = 1/\underline{Z}_C$.

Методика расчета несимметричной трехфазной цепи со схемой соединения звезда может быть сведена к следующим приемам:

1) Определяют напряжение смещения нейтрали

$$U_N = U_{O'O} = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_N},$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазные напряжения генератора;

Y_a, Y_b, Y_c - проводимости фаз и нейтрального провода.

2) Вычисляют напряжения на фазах приемника

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

3) Определяют токи в фазах и нейтральном проводе по закону Ома

$$\dot{I}_A = \dot{U}_a \cdot Y_a; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_b \cdot Y_b; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_c \cdot Y_c;$$

$$\dot{I}_N = \dot{U}_N \cdot Y_N; \quad \text{или} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Если приемник соединен, по схеме звезда без нулевого провода и известны только линейные напряжения генератора $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$, то расчет фазных напряжений приемника удобнее определять по формулам

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot Y_b - \dot{U}_{CA} \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c} \\ \dot{U}_b = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot Y_c - \dot{U}_{AB} \cdot Y_a}{Y_a + Y_b + Y_c} \\ \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{CA} \cdot Y_c - \dot{U}_{BC} \cdot Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c} \end{cases}$$

В этом случае геометрическая сумма фазных токов

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

Таблица 1.

Вар	Рис	Ул, в	ra, ОМ	rb, ОМ	rc, ОМ	Xa ОМ	Xb ОМ	Xc ОМ	rab ОМ	rbc ОМ	rca ОМ	Xla ОМ	Xca ОМ	XLb ОМ	XCb ОМ	XLc ОМ	XCc ОМ
0	3-1	127	8	6	2	8	6	3	2	8	4	5	4	1	8	4	3
1	3-1	220	6	8	4	2	5	4	4	4	3	8	3	10	2	3	8
2	3-1	380	2	2	8	6	10	6	3	6	6	10	6	2	6	2	4
3	3-2	127	3	4	6	3	3	8	6	10	2	6	2	4	3	6	2
4	3-2	220	10	1	3	4	2	2	5	2	10	2	5	6	4	5	10
5	3-2	380	1	5	1	10	4	3	1	3	3	1	8	8	10	8	6
7	3-2	220	6	4	10	4	8	9	8	4	2	4	8	3	4	10	2
8	3-2	380	8	3	4	8	3	6	10	3	4	10	2	6	8	3	10
9	3-1	127	16,8	6	8	14,2	6	4	3	6	8	6	3	2	3	6	2
10	3-1	220	10	2	3	6	10	2	6	5	6	2	5	8	6	4	6
11	3-1	380	8	10	2	2	2	3	4	4	10	5	3	5	2	8	4
12	3-1	127	10	4	1	8	10	2	8	6	4	5	1	8	3	10	2
13	3-2	220	5	3	10	4	4	10	4	8	3	8	10	4	6	2	10
14	3-1	380	8	6	5	2	2	3	10	10	6	10	2	2	8	4	3
15	3-2	127	6	2	8	10	8	6	6	3	2	6	4	10	2	8	6
16	3-1	220	2	5	6	3	6	4	2	5	5	2	6	3	10	3	4
17	3-2	380	1	8	3	6	3	8	3	4	4	1	8	6	4	6	8
18	3-2	127	8	10	2	4	3	6	4	4	8	2	3	2	4	6	10
19	3-2	220	4	5	10	3	8	4	6	6	4	6	6	8	6	4	5
20	3-1	380	10	8	3	6	2	10	3	5	6	4	8	6	3	10	8
21	3-2	127	6	6	6	2	10	8	10	2	2	3	4	8	10	8	6
22	3-1	220	2	2	4	5	6	8	2	1	3	8	10	10	2	5	2
23	3-1	380	5	1	8	8	4	2	5	8	10	10	2	4	5	2	1
24	3-2	127	6	8	2	8	3	4	16,8	8	3	14,2	6	4	8	3	4
25	3-1	220	8	6	4	2	8	3	8	6	2	3	10	8	2	8	3
26	3-2	380	2	2	8	6	4	8	2	3	6	6	4	6	6	4	2
27	3-1	127	4	3	6	3	2	2	10	4	10	8	3	10	3	2	10
28	3-1	220	1	10	3	10	6	10	4	10	4	10	2	3	5	10	6
29	3-1	380	5	1	10	4	10	3	6	2	8	4	1	10	4	6	8
30	3-1	127	10	2	8	6	10	8	6	2	3	4	6	3	1	5	8
31	3-2	220	8	4	3	8	4	4	8	4	2	8	8	6	10	8	4
32	3-2	380	2	6	6	4	3	10	10	3	4	3	3	8	2	10	6
33	3-1	127	3	8	10	2	5	3	3	6	8	6	10	4	4	6	10
34	3-1	220	5	3	2	10	2	6	5	5	6	10	4	10	6	2	3
35	3-2	380	6	10	4	3	8	5	4	1	10	2	2	5	8	1	2
36	3-2	127	5	10	6	2	3	6	10	3	8	4	6	8	5	2	6
37	3-2	220	8	4	8	4	2	4	4	6	4	10	2	10	4	8	10
38	3-2	380	2	3	10	3	4	8	3	8	6	3	10	4	8	10	3
39	3-1	127	1	5	3	6	8	3	8	4	10	8	3	3	6	3	2
40	3-1	220	6	2	5	1	10	2	5	10	3	6	4	6	10	6	4
41	3-1	380	10	8	4	5	6	10	2	5	2	2	8	5	2	4	8
42	3-1	127	4	3	1	8	10	2	6	5	2	8	8	4	6	2	1
43	3-1	220	8	4	10	2	4	10	3	6	10	2	10	5	10	8	4
44	3-1	380	10	6	5	4	2	3	8	10	6	5	6	10	2	6	10
45	3-2	127	6	2	8	10	8	6	5	3	4	10	2	8	8	10	6
46	3-2	220	2	5	6	3	6	4	10	2	1	6	3	6	4	2	8
47	3-2	380	5	8	2	6	3	8	2	4	5	1	5	4	3	4	2
48	3-2	127	6	6	8	15	4	10	6	4	5	3	10	8	1	6	4
49	3-1	220	2	2	2	10	3	2	3	10	8	6	2	6	3	3	2
50	3-2	380	3	3	1	2	10	6	10	1	6	10	4	3	8	1	1

Рисунок 3-1

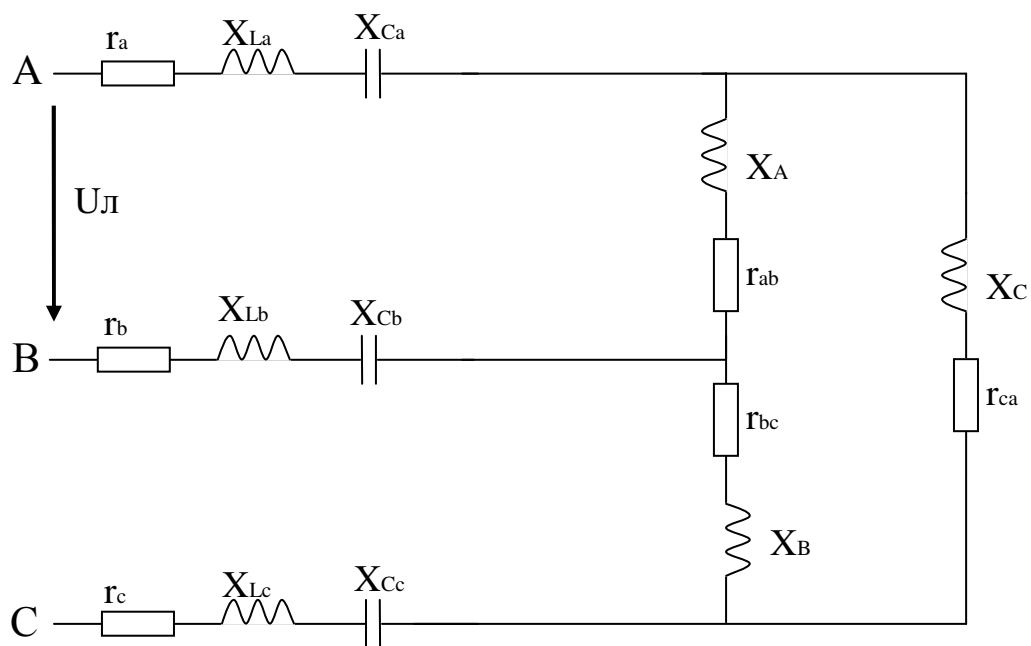
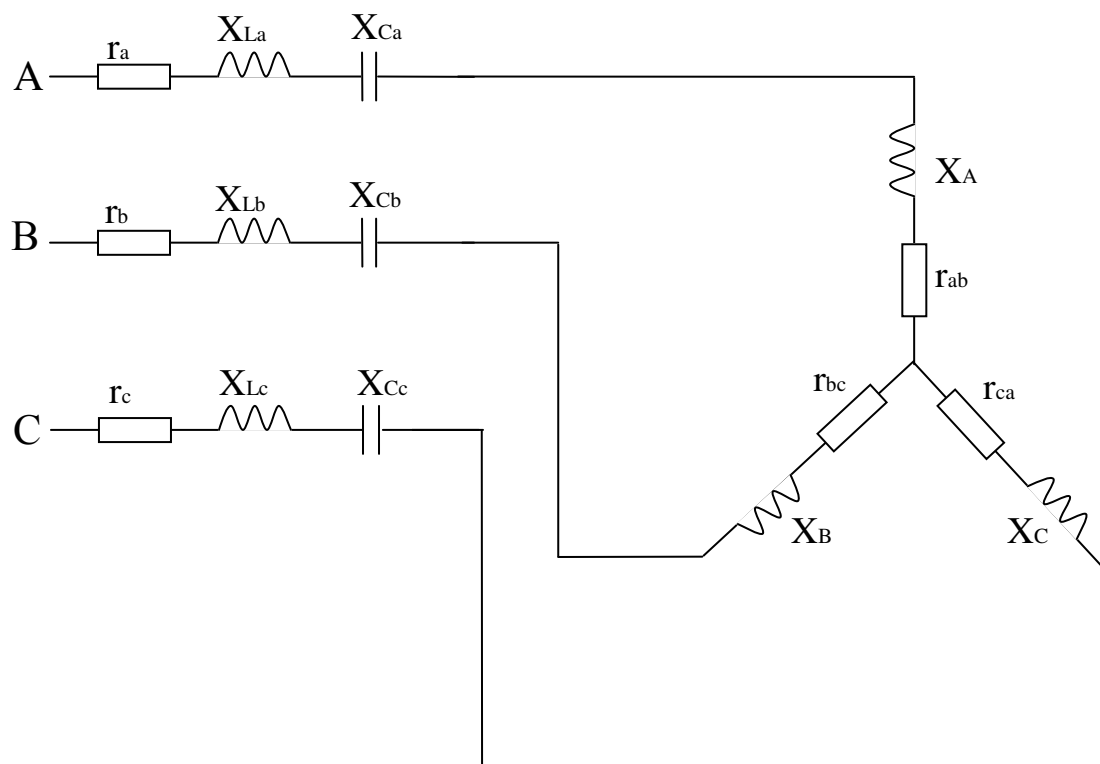


Рисунок 3-2



5. УЧЕБНО_МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для электротехн., энерг., приборостр. спец. вузов, 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 612 с.: ил.

б) дополнительная литература:

2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учеб. для электротехн., энерг., приборостр. спец. вузов, 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.: ил.
3. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов: в 2 т. Т.1. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 536 с.: ил.
4. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов: в 2 т. Т.2. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 416 с.: ил.
5. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для энерг. и приборостр. спец. вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди и др.; Под ред. Л.А. Бессонова – М.: Высш. шк., 1988. – 543 с.: ил.
6. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для вузов / Под ред. П.А. Ионкина. М.: Энергоиздат, 1982. – 786 с.: ил.

Методические указания к контрольным работам для студентов всех форм
обучения
(ГОС-2000)

Подписано в печать 04.04.2007. Бумага для множ. аппаратов.

Печать плоская. Усл. печ. л...1,0. Уч.- изд. л...1,1. Тираж 250 экз. Заказ № 242-р.

Издательство Российского государственного профессионально – педагогического
университета, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11

Ризограф РГППУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11