

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

## **Трехфазные цепи**

**Методические указания  
и контрольное задание**



**Волгоград  
2017**

# 1. Общие методические указания к выполнению контрольного задания

1.1. Изучение курса должно вестись систематически и сопровождаться составлением подробного конспекта.

1.2. К выполнению контрольного задания следует приступить после изучения соответствующих разделов курса, разбора решения задач, рекомендованных в качестве примеров и самостоятельного решения ряда подобных задач.

1.3. Контрольное задание выполняется в виде пояснительной записки на листах формата А4 (297×210) в соответствии с разработанными на кафедре методическими указаниями.

1.4. Текстовая часть отчета выполняется в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД (общие требования к текстовым документам) и ГОСТ 7.32-81 (отчеты по научно-исследовательской работе) на писчей бумаге. Титульный лист желательно оформлять на плотной чертежной бумаге, а графики и диаграммы на миллиметровой.

1.5. Формулы, текст и числовые выкладки должны быть написаны чернилами четко и аккуратно.

1.6. Электрические схемы вычерчиваются карандашом при помощи чертежных принадлежностей согласно установленным правилам (ГОСТ 2.702-75; 2.705-70; 2.722-68; 2.723-74; 2.728-74; 2.730-73; 2.710-81).

1.7. Все необходимые графики и диаграммы выполняются карандашом при помощи чертежных принадлежностей. На координатных осях приводятся равномерные шкалы с применением стандартных масштабов из ряда  $(1,2 \text{ или } 5) \times 10^{\pm n}$ , где  $n$ -целое число.

1.8. Все единицы измерений должны соответствовать Международной системе единиц (СИ).

1.9. При выполнении вычислений необходимо записать расчетную формулу, подставить в нее все необходимые величины в порядке их следования в формуле, записать числовое значение результата с точностью до трех значащих цифр и указанием единицы измерения. При этом решение не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

1.10. Решение должно сопровождаться вычерчиванием всех промежуточных эквивалентных схем и сопровождаться краткими, но четкими пояснениями (указать законы, на основании которых составлены уравнения, раскрыть смысл преобразований в схемах и формулах, последовательность действий, прокомментировать полученные результаты).

1.11. При решении задачи разными методами все напряжения и токи должны сохранять свои буквенные обозначения и направления.

1.12. Студент выполняет работу строго по своему варианту, который определяется: для студентов заочного обучения по двум последним цифрам номера зачетной книжки; для студентов очного обучения, по указанию ведущего преподавателя. Сдавая оформленную работу на кафедру, студент обязательно должен на заглавном листе пояснительной записки указать вариант и данные этого варианта. При несоблюдении данного пункта работа студенту не зачитывается и назад не возвращается.

1.13. В конце работы необходимо указать использованную литературу, примерные затраты времени на выполнение задания, поставить подпись и дату.

1.14. На рецензию работа должна быть представлена студентами заочного обучения не позднее дня начала экзаменационной сессии, а очного обучения, в срок, установленный ведущим преподавателем.

Студенты, работы которых отвечают данным требованиям и не содержат принципиальных ошибок, допускаются к собеседованию, которое проводится на кафедре в индивидуальном порядке во время экзаменационной сессии. Зачтенной считается работа, прошедшая собеседование. Если студент не допущен к собеседованию и работа не зачтена, то он выполняет работу над ошибками в той же пояснительной записке после подписи рецензента, добавляя нужное число листов. Какие-либо исправления в тексте уже проверенном рецензентом не допускаются.

## **2. Методические советы.**

По отношению к однофазным цепям переменного тока, трехфазные цепи, получили подавляющее распространение во всем мире, в виду целого ряда преимуществ, к основным из которых относят.

1. Возможность получения двух различных систем напряжений и токов (линейных и фазных).

2. Возможность получения вращающегося магнитного поля, которое лежит в основе работы трехфазных электродвигателей.

3. Дешевизна, простота и надежность в эксплуатации трехфазных потребителей (трансформаторов, электродвигателей и т.д.).

4. Экономичность при передаче энергии на большие расстояния.

5. Неизменность величины мгновенной мощности за период синусоидального тока.

Отсюда понятна важность ознакомления с особенностями трехфазных цепей и освоения методик их расчетов. Это и является задачей данного раздела.

К выполнению контрольного задания следует приступать после изучения следующих вопросов.

Многофазные системы электрических систем и понятие фазы в них. Трехфазная система э.д.с. и ее получение. Требования к симметричной трехфазной э.д.с. Основные схемы соединения трехфазных цепей. Понятие фазы трехфазного источника электрической энергии и фазы трехфазного потребителя. Линейные, фазные токи и напряжения, соотношения между ними. Выбор схемы включения потребителей в зависимости от их паспортных данных и напряжения сети. Линейные и нулевой провода. Падение и потеря напряжения в линейных проводах. Нейтраль источника и нейтраль нагрузки. Напряжение смещения нейтрали. Понятия симметрии и несимметрии трехфазных цепей. Трехфазный оператор. Методы расчета трехфазных цепей. Активная, реактивная и полная мощности в трехфазных цепях и их измерения. Круговые и линейные диаграммы в трехфазных цепях.

Пульсирующее магнитное поле. Разложение пульсирующего магнитного поля на два круговых поля, вращающихся в противоположных направлениях. Получение кругового вращающегося магнитного поля с помощью двухфазной и трехфазной систем токов. Устройство и принцип действия синхронных и асинхронных двигателей и генераторов.

Системы прямой, обратной и нулевой последовательности. Разложение несимметричных трехфазных систем токов и напряжений на симметричные составляющие аналитическим и графическим способами. Сопроотивления трехфазной цепи для токов различных последовательностей. Статическая и динамическая нагрузка. Метод симметричных составляющих. Понятия о фильтрах симметричных составляющих. Особенности работы трехфазных цепей при периодических несинусоидальных токах и напряжениях.

Трехфазные цепи могут быть разделены на две принципиально отличных друг от друга группы: цепи, в которых произвольная нагрузка питается от симметричных источников питания; цепи, в которых динамическая нагрузка (содержит в себе электрические машины с вращающимися магнитными полями или трехстержневые трансформаторы) питается от несимметричных источников питания.

## **I. Цепи с симметричным источником питания**

Расчет цепей данной группы может осуществляться в следующей последовательности.

На основании известной величины фазного  $U_{\phi}$  или линейного  $U_{\text{л}}$  напряжения источника питания, задаются системами векторов этих напряжений на комплексной плоскости.

Система фазных напряжений:

$$\dot{U}_{AN} = \dot{U}_A = \dot{U}_\phi e^{j0} \quad \text{или} \quad \dot{U}_{AN} = \dot{U}_A = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L e^{j0};$$

$$\dot{U}_{BN} = \dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_A;$$

$$\dot{U}_{CN} = \dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = a \dot{U}_A,$$

Система линейных напряжений:

$$\dot{U}_{AB} = U_L e^{j30^\circ} \quad \text{или} \quad \dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{AB} e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_{AB} \quad \text{или} \quad \dot{U}_{BC} = \sqrt{3} \dot{U}_B e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{AB} e^{j120^\circ} = a \dot{U}_{AB} \quad \text{или} \quad \dot{U}_{CA} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{j30^\circ},$$

где:  $a = e^{j120^\circ}$  - трехфазный оператор,  $a^2 = e^{-j120^\circ}$ .

Примечания. 1. Система векторов фазных напряжений и система векторов линейных напряжений в симметричных трехфазных цепях связаны соотношением

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \dot{U}_\phi e^{j30^\circ}.$$

2. Вектора напряжений в трехфазных цепях маркируются двумя буквами, причем первая буква соответствует концу вектора, а вторая - началу вектора.

3. Допускается вектора фазных напряжений источника питания маркировать одной первой буквой, т.е. опускать букву N.

4. Общепринято, что фаза А имеет нулевую начальную фазу, фаза В является отстающей, фаза С – опережающей.

Задаются условно положительными направлениями токов на всех участках цепи, обозначив их на схеме замещения стрелочками.

Примечание. 1. Принято за положительные направления токов принимать: в линейных проводах - от источника к нагрузке; в нулевом проводе - от нагрузки к источнику; в фазах нагрузки – от начала фазы к ее концу.

2. Токи в фазах «звезды» и в линейных проводах маркируются одной буквой, соответствующей маркировке фазы, токи в фазах «треугольника»- двумя буквами, первая из которых соответствует началу фазы, вторая - ее концу.

Используя эквивалентные преобразования, существующие в электротехнике, схему замещения заданной, сколь угодно сложной электрической цепи (например, рисунок 5.1), приводят к виду (рисунок 2.1) или (рисунок 2.2).

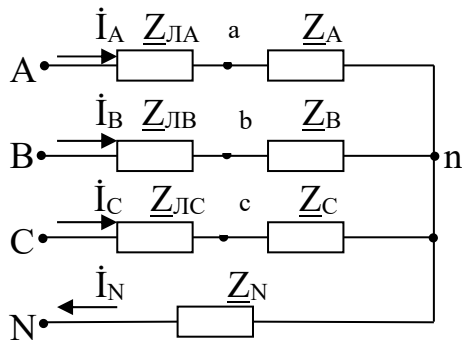


Рис.2.1

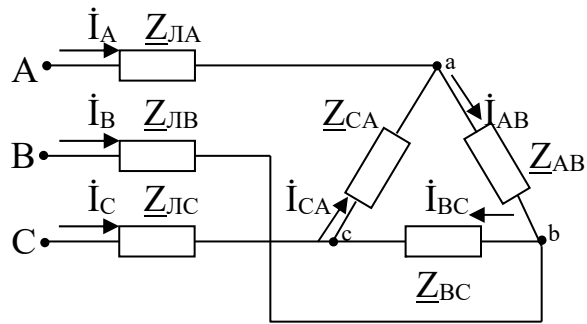


Рис.2.2

В том случае, если сопротивления линейных проводов и нейтрального провода равны нулю ( $Z_{ЛA} = Z_{ЛB} = Z_{ЛC} = Z_N = 0$ ), потенциалы малых точек (а, b, с, n) равны потенциалам соответствующих больших точек (А, В, С, N). Следовательно, фазные и линейные напряжения на нагрузке равны соответствующим напряжениям источника питания:

$$\dot{U}_{AN} = \dot{U}_{an}; \quad \dot{U}_{BN} = \dot{U}_{bn}; \quad \dot{U}_{CN} = \dot{U}_{cn};$$

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

Расчет токов в полученных схемах зависит от вида нагрузки.

1. Если, нагрузка симметрична, т.е.  $Z_a = Z_b = Z_c$  (рисунок 2.1) или  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$  (рисунок 2.2), расчет ведут для одной фазы (например, для тока фазы А в «звезде» или для тока фазы ab в «треугольнике»).

В «звезде» (рисунок 2.1):

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{Z_a};$$

В «треугольнике» (рисунок 2.2):

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}}.$$

Значения токов остальных фаз определяют на основании соотношений, существующих в симметричных трехфазных цепях.

В «звезде» (рисунок 2.1):

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{I}_A; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ} = a \dot{I}_A.$$

В «треугольнике» (рисунок 2.2):

$$\dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ab} e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{ab} e^{j120^\circ} = a \dot{I}_{ab};$$

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} \dot{I}_{ab} e^{-j30^\circ}; \quad \dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{I}_{bc} e^{-j30^\circ}; \quad \dot{I}_C = \sqrt{3} \dot{I}_{ca} e^{-j30^\circ},$$

или

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{I}_A; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_A e^{j120^\circ} = a \dot{I}_A.$$

Примечание. В симметричных трехфазных цепях система линейных токов и система фазных токов связаны соотношениями: в «звезде» -  $\dot{I}_L = \dot{I}_\phi$ ; в «треугольнике» -  $\dot{I}_L = \sqrt{3} \dot{I}_\phi e^{-j30^\circ}$

2. В общем случае, если нагрузка несимметрична, т.е.  $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$  (рис.2.1) или  $Z_{AB} \neq Z_{BC} \neq Z_{CA}$  (рис.2.2), линейные (они же и фазные) токи в «звезде» (рис.2.1) и фазные токи в «треугольнике» (рис.2.2) определяются на основании закона Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{cn}}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{bn}}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{Z_C};$$

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

Линейные токи в «треугольнике» определяются на основании первого закона Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{ab}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc}.$$

Ток в нейтральном проводе определяется по одному из вышеперечисленных законов:

$$\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{Z_N} \quad \text{или} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

В том случае, если сопротивления линейных проводов и нейтрального провода отличны от нуля ( $Z_{ЛA} \neq Z_{ЛB} \neq Z_{ЛC} \neq Z_N \neq 0$ ), и нагрузка не симметрична ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$  или  $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ ), дальнейший расчет ведется в следующей последовательности.

1. Расчетная схема (рисунок 2.2) преобразуется в расчетную схему (рисунок 2.1). Для этого «треугольник» сопротивлений  $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$ ,  $Z_{ca}$  преобразуется в эквивалентную «звезду», сопротивления  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$ .

2. Используя метод двух узлов, определяется напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ :

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_{A\Sigma} + \dot{U}_B Y_{B\Sigma} + \dot{U}_C Y_{C\Sigma}}{Y_{A\Sigma} + Y_{B\Sigma} + Y_{C\Sigma} + Y_N};$$

где:  $Y_{A\Sigma}$ ;  $Y_{B\Sigma}$ ;  $Y_{C\Sigma}$  - соответственно суммарные комплексные проводимости фаз и нейтрального провода.

$$\underline{Y}_{A\Sigma} = \frac{1}{\underline{Z}_{JA} + \underline{Z}_A}; \underline{Y}_{B\Sigma} = \frac{1}{\underline{Z}_{JB} + \underline{Z}_B}; \underline{Y}_{C\Sigma} = \frac{1}{\underline{Z}_{JC} + \underline{Z}_C}; \underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}.$$

Из курса математики известно, что дробь может быть равна нулю в двух случаях.

а) Если числитель дроби равен нулю:

$$\dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} + \dot{U}_B \underline{Y}_{B\Sigma} + \dot{U}_C \underline{Y}_{C\Sigma} = 0.$$

Это возможно в том случае, если напряжения источника питания симметричны ( $\dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120^\circ} = a \dot{U}_A$ ) и проводимости фаз равны ( $\underline{Y}_{A\Sigma} = \underline{Y}_{B\Sigma} = \underline{Y}_{C\Sigma}$ ) т.е. **если цепь симметрична**

$$\begin{aligned} & \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} + \dot{U}_B \underline{Y}_{B\Sigma} + \dot{U}_C \underline{Y}_{C\Sigma} = \\ & = \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} + a^2 \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} + a \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} = \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} (1 + a^2 + a) = \dot{U}_A \underline{Y}_{A\Sigma} 0 = 0. \end{aligned}$$

б) Если знаменатель дроби равен  $\infty$

$$\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N = \infty.$$

Только одно из всех слагаемых полученного выражения может быть равно  $\infty$ :  $\underline{Y}_N = \infty$ , ( $\underline{Y}_A \neq \underline{Y}_B \neq \underline{Y}_C \neq \infty$ , так как это аварийный режим работы цепи), т.е. **если  $\underline{Z}_N = 0$** . Следовательно, расчет  $U_{nN}$  необходимо проводить только в случаях, если **цепь несимметрична или  $\underline{Z}_N \neq 0$** .

3. Определив  $U_{nN}$ , переходят к определению напряжений фаз потребителей. При этом используют второй закон Кирхгофа:

$$\dot{U}_{An} = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_{Bn} = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \dot{U}_{Cn} = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.$$

В случае если были заданы линейные напряжения источника питания (фазы источника питания соединены в «треугольнике»), для определения напряжений фаз потребителей можно воспользоваться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{\dot{U}_{AB} \underline{Y}_{B\Sigma} - \dot{U}_{CA} \underline{Y}_{C\Sigma}}{\underline{Y}_{A\Sigma} + \underline{Y}_{B\Sigma} + \underline{Y}_{C\Sigma} + \underline{Y}_N}; \\ \dot{U}_{Bn} &= \frac{\dot{U}_{BC} \underline{Y}_{C\Sigma} - \dot{U}_{AB} \underline{Y}_{A\Sigma}}{\underline{Y}_{A\Sigma} + \underline{Y}_{B\Sigma} + \underline{Y}_{C\Sigma} + \underline{Y}_N}; \\ \dot{U}_{Cn} &= \frac{\dot{U}_{CA} \underline{Y}_{A\Sigma} - \dot{U}_{BC} \underline{Y}_{B\Sigma}}{\underline{Y}_{A\Sigma} + \underline{Y}_{B\Sigma} + \underline{Y}_{C\Sigma} + \underline{Y}_N}. \end{aligned}$$

4. Токи в фазах потребителя (они же токи в линейных проводах) (рисунок 2.1) определяют на основании закона Ома:



$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{An}}{\underline{Z}_{A\Sigma}} = \dot{U}_{An} \underline{Y}_{A\Sigma}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{Bn}}{\underline{Z}_{B\Sigma}} = \dot{U}_{Bn} \underline{Y}_{B\Sigma}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{Cn}}{\underline{Z}_{C\Sigma}} = \dot{U}_{Cn} \underline{Y}_{C\Sigma}.$$

Ток в нейтральном проводе определяют на основании закона Ома или первого закона Кирхгофа:

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

5. Дальнейший расчет токов и напряжений в исходной схеме выполняют на основании законов Ома и Кирхгофа, перенося уже известные значения токов и напряжений из более простой эквивалентной схемы в более сложную. Так, например, в схеме (рисунок 2.1) падения напряжения в линейных проводах будут равны:

$$\dot{U}_{Aa} = \dot{I}_A \underline{Z}_{ЛA}; \quad \dot{U}_{Bb} = \dot{I}_B \underline{Z}_{ЛB}; \quad \dot{U}_{Cc} = \dot{I}_C \underline{Z}_{ЛC}.$$

Фазные напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_{an} = \dot{I}_A \underline{Z}_A; \quad \dot{U}_{bn} = \dot{I}_B \underline{Z}_B; \quad \dot{U}_{cn} = \dot{I}_C \underline{Z}_C.$$

Линейные напряжения на нагрузке:

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

Потенциалы точек (а, b, с) в схеме (рисунок 2.2) равны потенциалам тех же точек в схеме (рисунок 2.1), а значит, на основании закона Ома могут быть найдены фазные токи «треугольника»  $\dot{I}_{ab}$ ,  $\dot{I}_{bc}$ ,  $\dot{I}_{ca}$  (рисунок 2.2) и т.д. (смотри пример решения задачи 1).

## II. Цепи с несимметричным источником питания

Расчет цепей данной группы выполняется методом симметричных составляющих в следующей последовательности.

1. Заданную несимметричную систему напряжений источника питания  $(\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C)$  раскладывают на три симметричных системы напряжений:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A(1)} + \dot{U}_{A(2)} + \dot{U}_{A(0)};$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B(1)} + \dot{U}_{B(2)} + \dot{U}_{B(0)};$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C(1)} + \dot{U}_{C(2)} + \dot{U}_{C(0)}.$$

где:  $\dot{U}_{A(1)}$ ,  $\dot{U}_{B(1)}$ ,  $\dot{U}_{C(1)}$  - фазные напряжения системы напряжений прямой последовательности;

$\dot{U}_{A(2)}$ ,  $\dot{U}_{B(2)}$ ,  $\dot{U}_{C(2)}$  - фазные напряжения системы напряжений обратной последовательности;

$\dot{U}_{A(0)}, \dot{U}_{B(0)}, \dot{U}_{C(0)}$  - фазные напряжения системы напряжений нулевой последовательности.

Систему напряжений прямой последовательности определяют по выражениям:

$$\dot{U}_{A(1)} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C); \dot{U}_{B(1)} = a^2\dot{U}_{A(1)}; \dot{U}_{C(1)} = a\dot{U}_{A(1)}.$$

Систему напряжений обратной последовательности определяют по выражениям:

$$\dot{U}_{A(2)} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C); \dot{U}_{B(2)} = a\dot{U}_{A(2)}; \dot{U}_{C(2)} = a^2\dot{U}_{A(2)}.$$

Систему напряжений нулевой последовательности определяют по выражениям:

$$\dot{U}_{A(0)} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C); \dot{U}_{B(0)} = \dot{U}_{C(0)} = \dot{U}_{A(0)}.$$

2. Рассчитывают токи фазы А, вызванные действием каждой из симметричных составляющих напряжений:

$$\dot{I}_{A(1)} = \frac{\dot{U}_{A(1)}}{\underline{Z}_{ЛA} + \underline{Z}_{a(1)}}; \dot{I}_{A(2)} = \frac{\dot{U}_{A(2)}}{\underline{Z}_{ЛA} + \underline{Z}_{a(2)}}; \dot{I}_{A(0)} = \frac{\dot{U}_{A(0)}}{\underline{Z}_{a(0)}},$$

где:  $\underline{Z}_{ЛA}$  - комплексное сопротивление линейных проводов фазы А;  $\underline{Z}_{a(1)}$  - комплексное сопротивление трехфазной нагрузки для токов прямой последовательности фазы А;  $\underline{Z}_{a(2)}$  - комплексное сопротивление трехфазной нагрузки для токов обратной последовательности фазы А;  $\underline{Z}_{a(0)}$  - комплексное сопротивление трехфазной нагрузки для токов нулевой последовательности фазы А.

Сопротивления для токов прямой и обратной последовательностей для различного вида нагрузок задаются в справочной литературе. Сопротивление для токов нулевой последовательности определяют по выражению:

$$\underline{Z}_{A(0)} = \underline{Z}_a + 3\underline{Z}_N,$$

где:  $\underline{Z}_a$  - комплексное сопротивление фазы А трехфазной нагрузки;

$\underline{Z}_N$  - комплексное сопротивление нейтрального провода.

Примечание. Ток нулевой последовательности для трехпроводной линии равен нулю ( $\dot{I}_{(0)} = 0$ ), так как  $\underline{Z}_N = \infty$ , а значит,  $\underline{Z}_{(0)} = \infty$ .

3. Токи соответствующих последовательностей оставшихся фаз определяют либо по аналогичным выражениям, либо по соотношениям:

$$\dot{I}_{B(1)} = a^2\dot{I}_{A(1)}; \dot{I}_{B(2)} = a\dot{I}_{A(2)}; \dot{I}_{C(1)} = a\dot{I}_{A(1)}; \dot{I}_{C(2)} = a^2\dot{I}_{A(2)}; \dot{I}_{B(0)} = \dot{I}_{C(0)} = \dot{I}_{A(0)}.$$

4. Суммарные токи фаз, вызванные несимметричной системой напряжений источника питания, определяют как суммы токов всех последовательностей каждой из фаз:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A(1)} + \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{B(1)} + \dot{I}_{B(2)} + \dot{I}_{B(0)}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{C(1)} + \dot{I}_{C(2)} + \dot{I}_{C(0)}.$$

### 3. Примеры решения задач

#### 3.1. Пример решения задачи 1

Для заданной трехфазной электрической цепи (рисунок 5.1), питающейся от симметричного трехфазного источника с фазным напряжением  $U_\phi$ , согласно данным варианта (таблица 1) требуется:

1. Вычертить расчетную схему замещения цепи согласно варианта.
2. Определить действующие значения токов и напряжений на всех участках цепи.
3. По результатам расчета (пункт 2) построить совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений цепи.
4. На схеме замещения цепи показать ваттметры, включенные по схеме Арона (согласно заданного варианта) для измерения активной мощности всей цепи и определить их показания.

Выпишем данные варианта:  $U_\phi = 220 \text{ В}$ ;  $Z_{\text{ЛA}} = j10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ЛB}} = -j10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ЛC}} = 10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ab}} = -j10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{bc}} = 10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ca}} = -j10 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{a}} = j4 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{b}} = -j4 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{c}} = j4 \text{ Ом}$ ; ваттметр  $pW_1$  включен на  $U_{\text{AB}}$  и  $\dot{I}_A$ ; ваттметр  $pW_2$  включен на  $U_{\text{CB}}$  и  $\dot{I}_C$ .

Зададимся векторами фазных и линейных напряжений на комплексной плоскости:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= 220e^{j0^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} \text{ В}; \\ \dot{U}_{\text{AB}} &= 381e^{j30^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{\text{BC}} = 381e^{-j90^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{\text{CA}} = 381e^{j150^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Вычертим расчетную схему замещения заданной цепи (рисунок 3.1).

Зададимся условно положительными направлениями токов на всех участках цепи (в виде стрелочек).

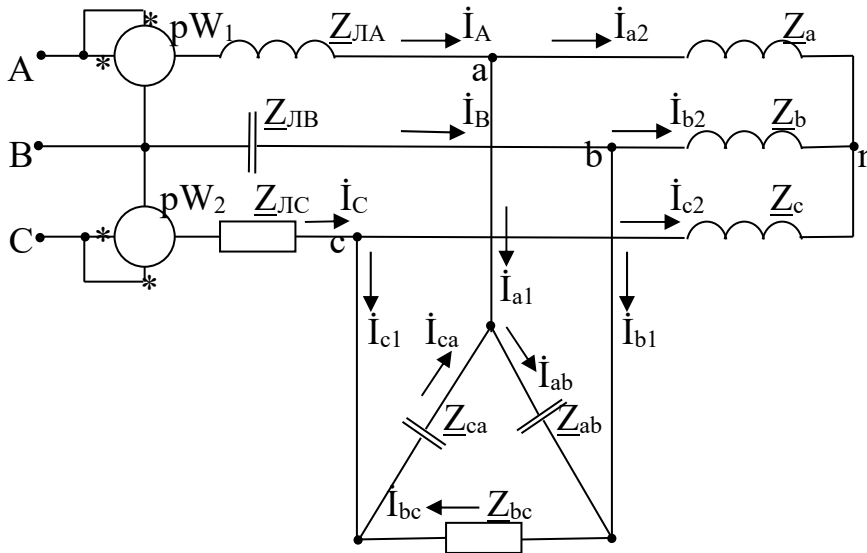


Рисунок 3.1

Преобразуем сопротивления, соединенные в «звезду» (рисунок 3.1), в эквивалентный «треугольник» (рисунок 3.2).

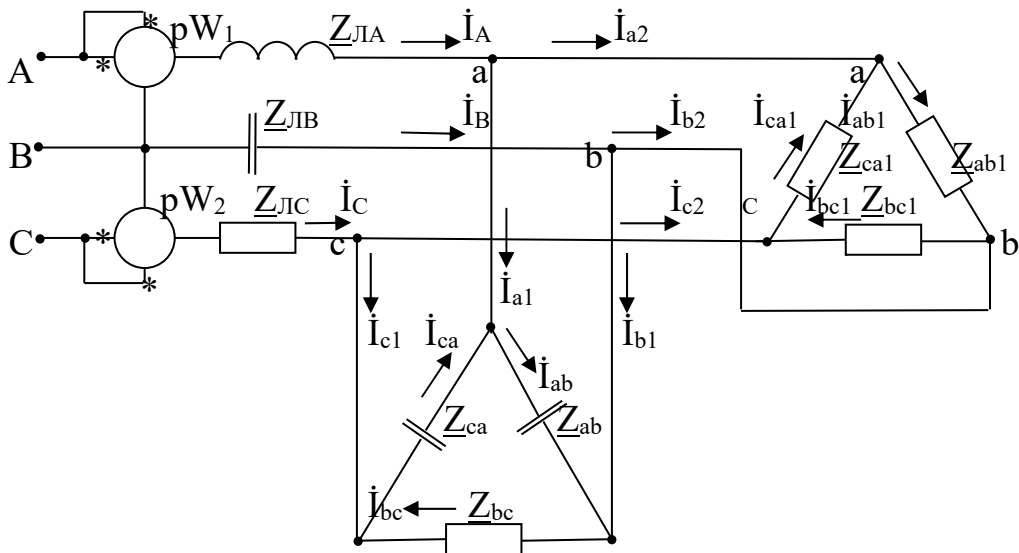


Рис.3.2

$$\underline{Z}_{ab1} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \frac{\underline{Z}_a \underline{Z}_b}{\underline{Z}_c} = j4 + j4 + \frac{j4 \times j4}{j4} = j12 = 12e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{bc1} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_c + \frac{\underline{Z}_b \underline{Z}_c}{\underline{Z}_a} = j4 + j4 + \frac{j4 \times j4}{j4} = j12 = 12e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ca1} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_a + \frac{\underline{Z}_c \underline{Z}_a}{\underline{Z}_b} = j4 + j4 + \frac{j4 \times j4}{j4} = j12 = 12e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Преобразуем два «треугольника» сопротивлений, включенных параллельно (рисунок 3.2), в один эквивалентный (рисунок 3.3).

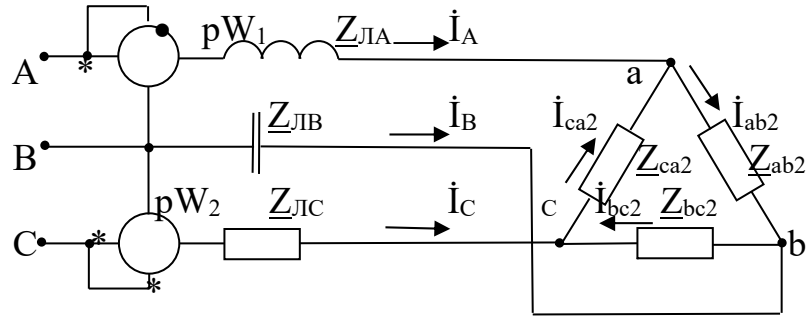


Рисунок 3.3

$$\underline{Z}_{ab2} = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ab1}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{ab1}} = \frac{10e^{-j90^\circ} \cdot 12e^{j90^\circ}}{-j10 + j12} = -j60 = 60e^{-j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{bc2} = \frac{\underline{Z}_{bc} \cdot \underline{Z}_{bc1}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{bc1}} = \frac{10 \cdot 12e^{j90^\circ}}{10 + j12} = 5,89 + j4,91 = 7,68e^{j39^\circ 50'} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ca2} = \frac{\underline{Z}_{ca} \cdot \underline{Z}_{ca1}}{\underline{Z}_{ca} + \underline{Z}_{ca1}} = \frac{10e^{-j90^\circ} \cdot 12e^{j90^\circ}}{-j10 + j12} = -j60 = 60e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Преобразуем «треугольник» сопротивлений (рисунок 3.3) в эквивалентную «звезду» (рисунок 3.4).

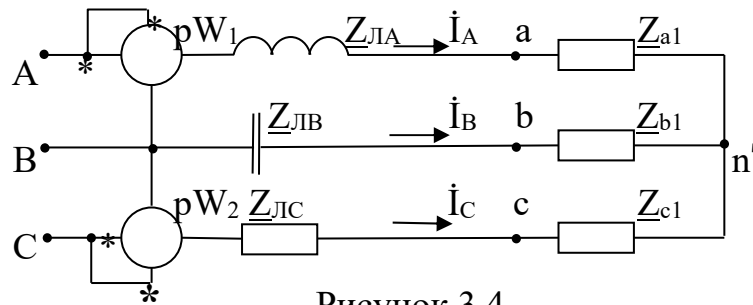


Рисунок 3.4

$$\underline{Z}_{a1} = \frac{\underline{Z}_{ab2} \cdot \underline{Z}_{ca2}}{\underline{Z}_{ab2} + \underline{Z}_{bc2} + \underline{Z}_{ca2}} = \frac{60e^{-j90^\circ} \cdot 60e^{-j90^\circ}}{j60 + j4,91 + 5,89 + j60} = 31,3e^{-j91^\circ 55'} = -1,05 + j31,2 \text{ (Ом)};$$

$$\underline{Z}_{b1} = \frac{\underline{Z}_{bc2} \cdot \underline{Z}_{ab2}}{\underline{Z}_{ab2} + \underline{Z}_{bc2} + \underline{Z}_{ca2}} = \frac{60e^{-j90^\circ} \cdot 7,68e^{j39^\circ 50'}}{-j60 + j4,91 + 5,89 - j60} = 4,00e^{j36^\circ 55'} = 3,20 + j2,40 \text{ (Ом)};$$

$$\underline{Z}_{c1} = \frac{\underline{Z}_{ca2} \cdot \underline{Z}_{bc2}}{\underline{Z}_{ab2} + \underline{Z}_{bc2} + \underline{Z}_{ca2}} = \frac{60e^{-j90^\circ} \cdot 7,68e^{j39^\circ 50'}}{-j60 + j4,91 + 5,89 - j60} = 4,00e^{j36^\circ 55'} = 3,20 + j2,40 \text{ (Ом)}.$$

На основании метода двух узлов, определим напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{n'N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

$$\text{где } \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_{ЛA} + \underline{Z}_{a1}} = \frac{1}{j10 - 1,05 - j31,2} = 0,0470e^{j92^\circ 50'} = -0,00232 + j0,0469 \text{ (См)};$$

$$\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_{JB} + \underline{Z}_{b1}} = \frac{1}{-j10 + 3,2 + j2,4} = 0,121e^{j67^\circ 20'} = 0,0466 + j0,112 \text{ (См)};$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_{JC} + \underline{Z}_{c1}} = \frac{1}{10 + 3,2 + j2,4} = 0,0745e^{-j10^\circ 20'} = 0,0733 - j0,0134 \text{ (См)}.$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{220 \cdot 0,0470e^{j92^\circ 50'} + 220e^{-j120} \cdot 0,121e^{j67^\circ 20'} + 220e^{j120} \cdot 0,0745e^{-j10^\circ 20'}}{0,00094 - j0,0259 + 0,0423 + j0,1177 + 0,0756 - j0,0145} = \\ &= 53,2 - j26,5 = 59,5e^{-j26^\circ 30'} \text{ В.} \end{aligned}$$

На основании второго закона Кирхгофа определим фазные напряжения в «звезде» (рисунок 3.4).

$$\dot{U}_{An'} = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} = 220 - 53,2 + j26,5 = 167 + j26,5 = 169e^{j9^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Bn'} = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} = -110 - j190 - 53,2 + j26,5 = -163 - j163 = 231e^{-j135^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Cn'} = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} = -110 + j190 - 53,2 + j26,5 = -163 + j217 = 271e^{j127^\circ} \text{ В}.$$

На основании закона Ома определим токи, потребляемые схемой (рисунок 3.4), т.е. токи в линейных проводах.

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{An'} \underline{Y}_A = 169e^{j9^\circ} \cdot 0,0470e^{j92^\circ 50'} = 7,94e^{j101^\circ 50'} = -1,60 + j7,77 \text{ (А)};$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}_{Bn'} \underline{Y}_B = 231e^{-j135^\circ} \cdot 0,121e^{j67^\circ 20'} = 28,0e^{-j67^\circ 40'} = 10,6 - j25,9 \text{ (А)};$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}_{Cn'} \underline{Y}_C = 271e^{j127^\circ} \cdot 0,0745e^{-j10^\circ 20'} = 20,2e^{j116^\circ 40'} = -9,00 + j18,13 \text{ (А)}.$$

Проверка:  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = -1,60 + j7,77 + 10,6 - j25,9 - 9,00 + j18,13 = 0$ .

На основании закона Ома определим падения напряжения в линейных проводах и фазные напряжения на эквивалентной нагрузке (рисунок 3.4).

$$\dot{U}_{Aa} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{JA} = 7,94e^{j101^\circ 50'} \cdot 10e^{j90^\circ} = 79,4e^{j191^\circ 50'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Bb} = \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_{JB} = 28,0e^{-j67^\circ 40'} \cdot 10e^{-j90^\circ} = 280e^{-j157^\circ 40'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Cc} = \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_{JC} = 20,2e^{j116^\circ 40'} \cdot 10 = 202e^{j116^\circ 40'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{an'} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{a1} = 7,94e^{j101^\circ 50'} \cdot 31,3e^{-j91^\circ 55'} = 249e^{j9^\circ 55'} = 245 + j43,0 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{bn'} = \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_{b1} = 28,0e^{-j67^\circ 40'} \cdot 4,0e^{j36^\circ 55'} = 112e^{-j30^\circ 45'} = 96,3 - j57,3 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{cn'} = \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_{c1} = 20,2e^{j116^\circ 40'} \cdot 4,0e^{j36^\circ 55'} = 80,8e^{j153^\circ 35'} = -72,4 + j36,0 \text{ (В)}.$$

На основании второго закона Кирхгофа определим линейные напряжения на эквивалентной нагрузке (рисунок 3.4).

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{an'} - \dot{U}_{bn'} = 245 + j43,0 - 96,3 + j57,3 = 149 + j100 = 179e^{j33^\circ 50'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{bn'} - \dot{U}_{cn'} = 96,3 - j57,3 + 72,4 - j36,0 = 169 - j93,3 = 193e^{-j29^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{cn'} - \dot{U}_{an'} = -72,4 + j36,0 - 245 - j43,0 = -317 - j6,8 = 317e^{-j178^\circ 40'} \text{ В.}$$

На основании закона Ома определим фазные токи «треугольника» (рисунок 3.1).

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{179e^{j33^\circ 50'}}{10e^{-j90^\circ}} = 17,9e^{j123^\circ 50'} = -10,0 + j14,9 \text{ (А);}$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{193e^{-j29^\circ}}{10} = 19,3e^{-j29^\circ} = 16,9 - j9,36 \text{ (А);}$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{317e^{-j178^\circ 40'}}{10e^{-j90^\circ}} = 31,7e^{-j88^\circ 40'} = 0,74 - j31,7 \text{ (А).}$$

Линейные токи «треугольника» и фазные (они же и линейные) токи «звезды» (рисунок 3.1) определим на основании первого закона Кирхгофа.

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = -10,0 + j14,9 - 0,74 + j31,7 = -10,7 + j46,6 = 48,7e^{j102^\circ 40'} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{b1} = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 16,9 - j9,36 + 10,0 - j14,9 = 26,9 - j24,3 = 33,2e^{-j42^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{c1} = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 0,74 - j31,7 - 16,9 + j9,36 = -16,2 - j22,3 = 27,6e^{-j126^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_A - \dot{I}_{a1} = -1,6 + j7,77 + 10,7 - j46,6 = 9,1 - j38,8 = 40,2e^{-j77^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{b2} = \dot{I}_B - \dot{I}_{b1} = 10,6 - j25,9 - 26,9 + j24,3 = -16,3 - j1,6 = 16,4e^{-j173^\circ 40'} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{c2} = \dot{I}_C - \dot{I}_{c1} = -9,0 + j18,1 + 16,2 + j22,3 = 7,2 - j40,4 = 41,0e^{-j79^\circ 50'} \text{ А.}$$

На основании закона Ома определим напряжения фаз «звезды» (рисунок 3.1).

$$\dot{U}_{an} = \dot{I}_{a2} \cdot \underline{Z}_a = 40,2e^{-j77^\circ} \cdot 4,0e^{j90^\circ} = 161e^{j13^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{bn} = \dot{I}_{b2} \cdot \underline{Z}_b = 16,4e^{-j173^\circ 40'} \cdot 4,0e^{j90^\circ} = 65,6e^{-j83^\circ 40'} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{I}_{c2} \cdot \underline{Z}_c = 41,0e^{-j79^\circ 50'} \cdot 4,0e^{j90^\circ} = 164e^{j10^\circ 10'} \text{ В.}$$

Определим показания ваттметров, включенных в цепь по схеме Арона.

$$\begin{aligned} P_{W1} + P_{W2} &= \operatorname{Re} \left[ \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_A^* \right] + \operatorname{Re} \left[ \dot{U}_{CB} \cdot \dot{I}_C^* \right] = \operatorname{Re} \left[ 381e^{j30^\circ} \cdot 7,9e^{-j101^\circ 50'} \right] + \\ &+ \operatorname{Re} \left[ 381e^{j90^\circ} \cdot 20,2e^{-j116^\circ 40'} \right] = \operatorname{Re} (3010e^{-j71^\circ 50'}) + \operatorname{Re} (7696e^{-j26^\circ 40'}) = \\ &= 3010 \cos(-71^\circ 50') + 7696 \cos(-26^\circ 40') = 939 + 6877 = 7916 \text{ Вт,} \end{aligned}$$

где:  $\dot{I}_A^*$ ;  $\dot{I}_C^*$  - сопряженные значения токов  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_C$ .

Используя данные расчета, построим совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений (рисунок 3.5).

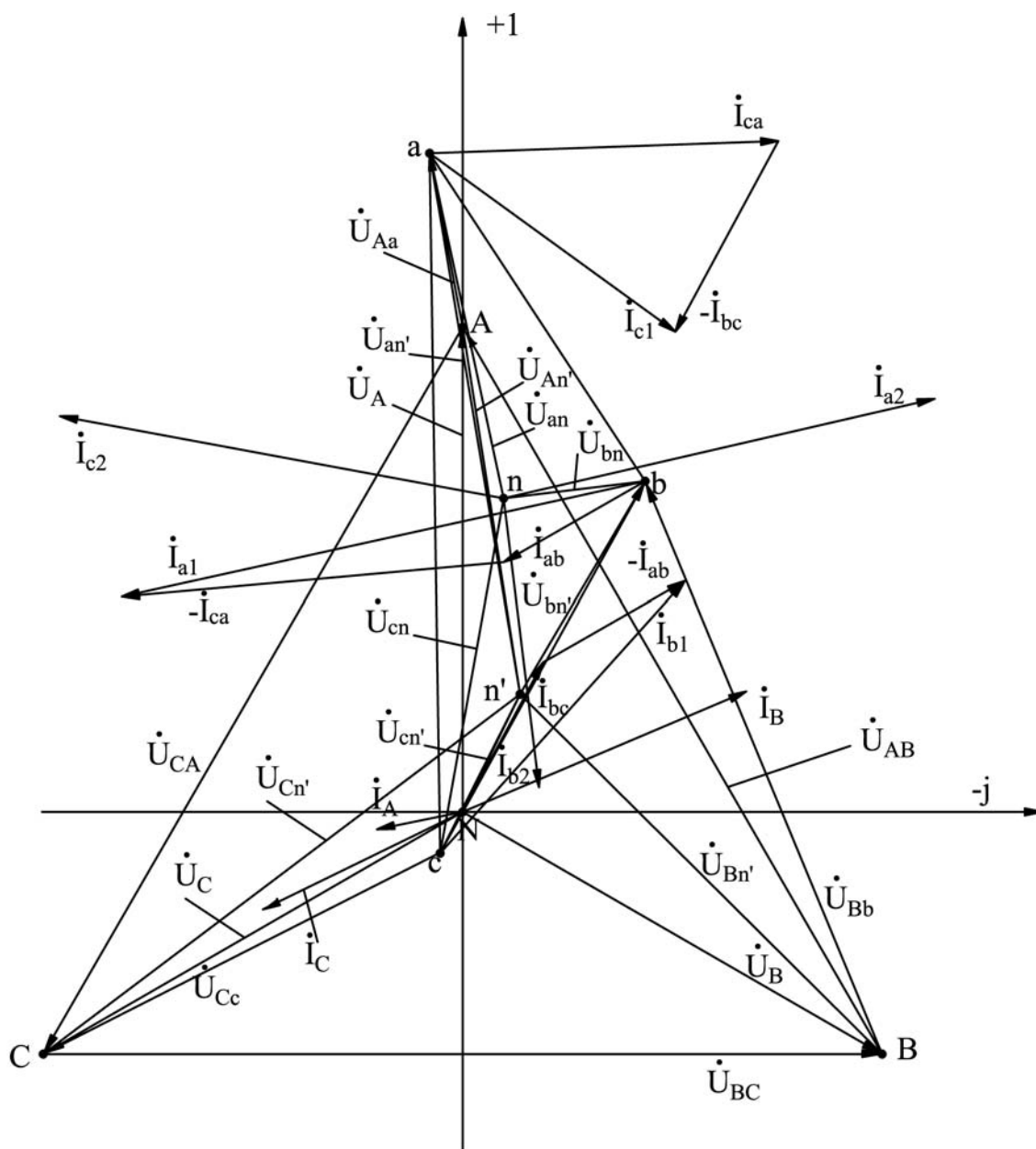


Рисунок 3.5



### 3.2. Пример решения задачи 2

Для трехфазной трехпроводной электрической цепи, состоящей из трехфазного несимметричного источника питания, заданного в виде модуля действующего значения фазного напряжения  $U_\Phi$  (таблица 1) и начальных фаз этих напряжений  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  (таблица 2), линии электропередачи, сопротивление которой равно  $\underline{Z}_Л$  (таблица 2) и трехфазного асинхронного двигателя, сопротивления которого для токов прямой и обратной последовательностей соответственно равны  $\underline{Z}_{(1)}$  и  $\underline{Z}_{(2)}$  (таблица 2) требуется:

1. Определить ток электрического двигателя и напряжения на отдельных участках цепи, при питании от симметричного источника питания с фазным напряжением  $U_\Phi$ .

2. Разложить (аналитически и графически) несимметричную систему напряжений на симметричные составляющие.

3. Определить коэффициент несимметрии заданной несимметричной системы напряжений.

4. Определить токи каждой фазы электрического двигателя при питании от заданного несимметричного источника питания.

5. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для симметричного и несимметричного режимов.

Выпишем данные варианта:  $U_\Phi = 220$  В;  $\underline{Z}_Л = 2 + j2$  (Ом);  $\varphi_A = 0^\circ$ ;  $\varphi_B = -120^\circ$ ;  $\varphi_C = \infty$ ;  $\underline{Z}_{(1)} = 2 + j4$  (Ом);  $\underline{Z}_{(2)} = 1 + j2$  (Ом).

Определим ток электрического двигателя и напряжения на отдельных участках цепи при питании от симметричного источника питания.

Вычертим расчетную схему замещения заданной цепи (рисунок 3.6).

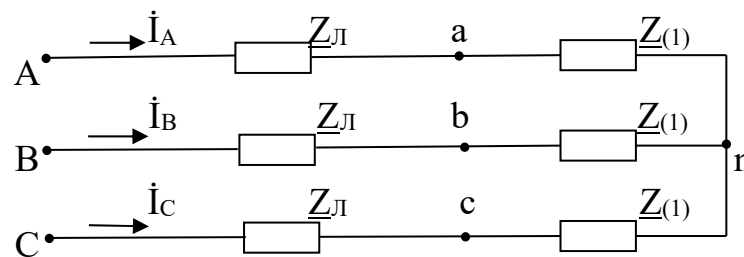


Рисунок 3.6

Зададимся векторами фазных и линейных напряжений симметричного источника питания на комплексной плоскости:

$$\dot{U}_A = 220e^{j0^\circ} \text{ В}; \dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; \dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{AB} = 381e^{j30^\circ} \text{ В}; \dot{U}_{BC} = 381e^{-j90^\circ} \text{ В}; \dot{U}_{CA} = 381e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Поскольку цепь симметрична, напряжение смещения нейтрали в заданной цепи отсутствует, а значит, фазные напряжения нагрузки равны фазным напряжениям источника питания:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{an} = 220 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_{bn} = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_{cn} = 220e^{j120^\circ} \text{ В};$$

Зададимся условно положительными направлениями токов на всех участках цепи (в виде стрелочек).

Определим комплексное сопротивление фазы.

$$\underline{Z}_\phi = \underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{(1)} = 2 + j2 + 2 + j4 = 4 + j6 = 7,21e^{j56^\circ 20'} \text{ Ом.}$$

Ток фазы А определим на основании закона Ома

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\underline{Z}_\phi} = \frac{220}{7,21e^{j56^\circ 20'}} = 30,5e^{-j56^\circ 20'} \text{ А.}$$

Токи остальных фаз определим, используя, трехфазный оператор.

$$\dot{I}_B = a^2 \cdot \dot{I}_A = e^{-j120^\circ} 30,5e^{-j56^\circ 20'} = 30,5e^{-j176^\circ 20'} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = a \dot{I}_A = e^{j120^\circ} 30,5e^{-j56^\circ 20'} = 30,5e^{j63^\circ 40'} \text{ А.}$$

Определим падения напряжения в линейных проводах:

$$\dot{U}_{Aa} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{Л} = 30,5e^{-j56^\circ 20'} \cdot 2,83e^{j45^\circ} = 86,3e^{-j11^\circ 20'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Bb} = a^2 \cdot \dot{U}_{Aa} = e^{-j120^\circ} \cdot 86,3e^{-j11^\circ 20'} = 86,3e^{-j131^\circ 20'} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Cc} = a \cdot \dot{U}_{Aa} = e^{j120^\circ} \cdot 86,3e^{-j11^\circ 20'} = 86,3e^{j108^\circ 40'} \text{ В.}$$

Определим фазные напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_{an} = \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_{(1)} = 30,5e^{-j56^\circ 20'} \cdot 4,47e^{j63^\circ 20'} = 136e^{j7^\circ} = 135 + j16,6 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{bn} = a^2 \cdot \dot{U}_{an} = e^{-j120^\circ} \cdot 136e^{j7^\circ} = 136e^{-j113^\circ} = -53,3 - j125,5 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{cn} = a \cdot \dot{U}_{an} = e^{j120^\circ} \cdot 136e^{j7^\circ} = 136e^{j127^\circ} \text{ В};$$

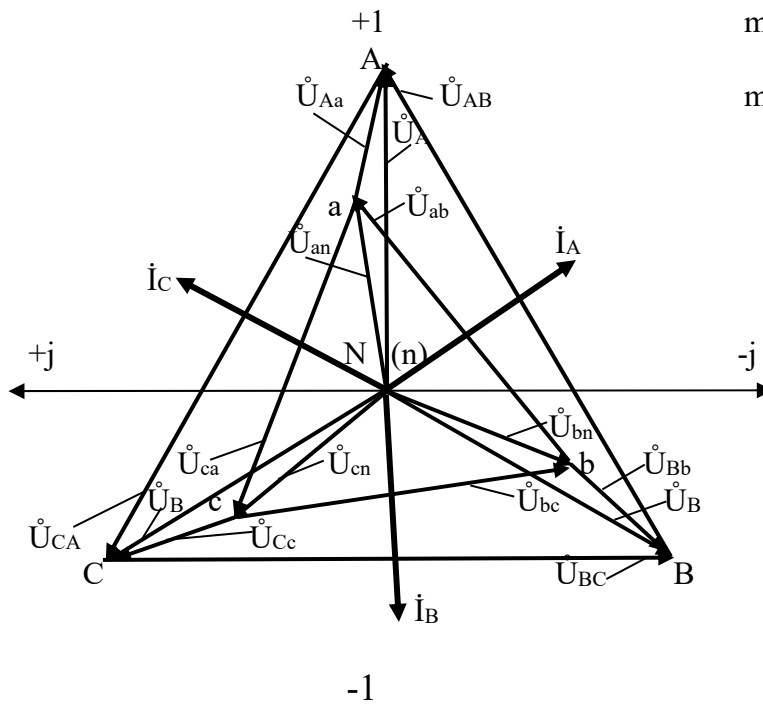
Определим линейные напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{an} - \dot{U}_{bn} = 135 + j16,6 + 53,3 + j125,5 = 188 + j142 = 236e^{j37^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = a^2 \cdot \dot{U}_{ab} = e^{-j120^\circ} \cdot 236e^{j37^\circ} = 236e^{-j83^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = a \cdot \dot{U}_{ab} = e^{j120^\circ} \cdot 236e^{j37^\circ} = 236e^{j157^\circ} \text{ В.}$$

Построим совмещенную векторную диаграмму токов и напряжений для заданной симметричной цепи (рисунок 3.7).



$m_U = 0,5 \text{ В/мм};$

$m_I = 1 \text{ А/мм}.$

Рисунок 3.7

Разложим (графически) заданную несимметричную систему напряжений источника питания (рисунок 3.8,а) на симметричные составляющие (рисунок 3.8,б).

Разложим (аналитически) заданную несимметричную систему напряжений источника питания (рисунок 3.8,а) на симметричные составляющие.

Система напряжений прямой последовательности  $U_{(1)}$ :

$$\dot{U}_{A(1)} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C \right) = \frac{1}{3} \left( 220 + e^{j120^\circ} 220 e^{-j120^\circ} + e^{-j120^\circ} 0 \right) = 147 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{B(1)} = \dot{U}_{A(1)} a^2 = 147 e^{-j120^\circ} \text{ В}; \quad \dot{U}_{C(1)} = \dot{U}_{A(1)} a = 147 e^{j120^\circ} \text{ В},$$

где:  $\dot{U}_A = U_\phi e^{j\varphi_A} = 220 e^{j0^\circ} = 220 \text{ В}; \quad \dot{U}_B = U_\phi e^{j\varphi_B} = 220 e^{-j120^\circ};$

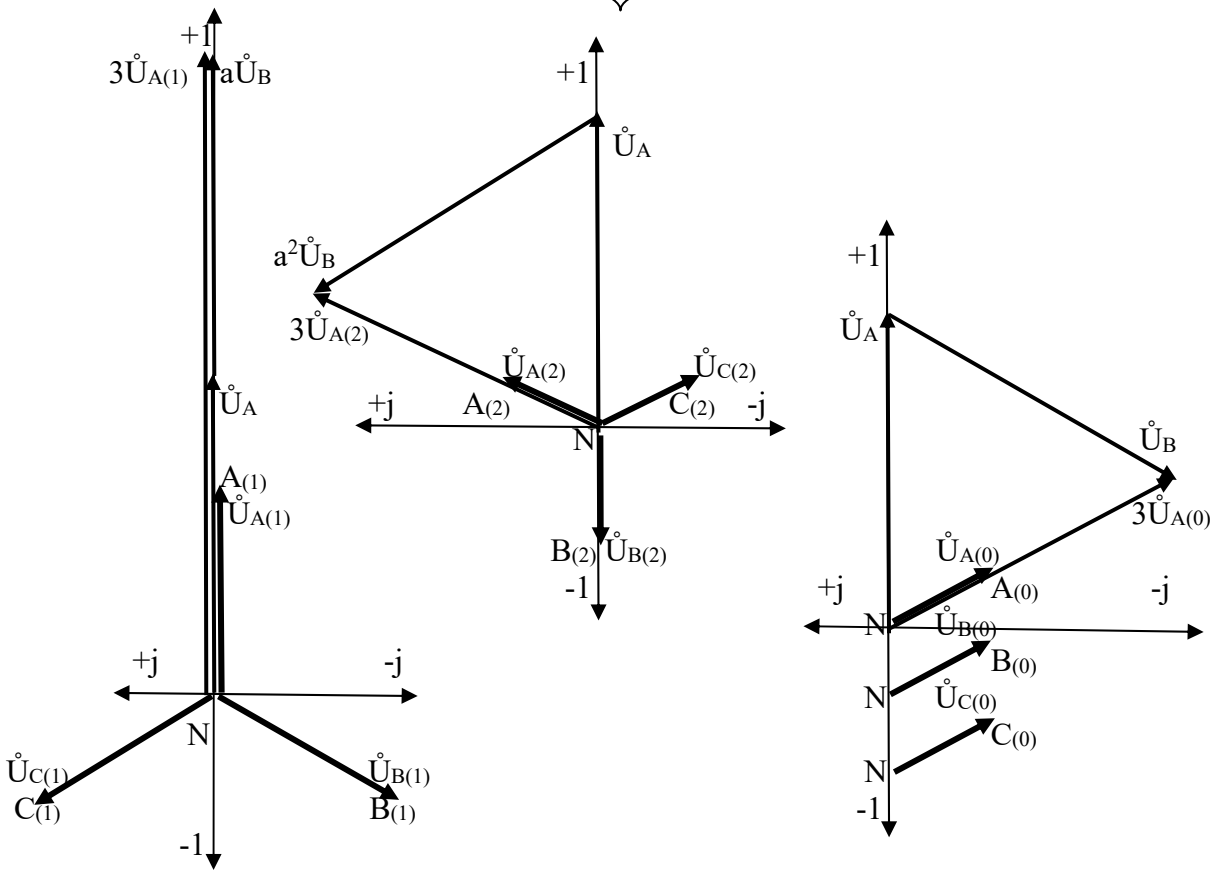
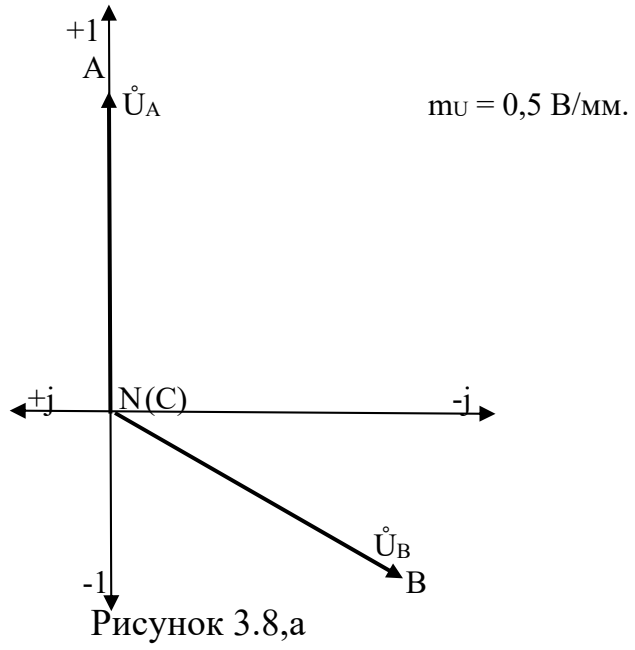
$$\dot{U}_C = U_\phi e^{j\varphi_C} = 220 e^{j0^\circ} = 220 \cdot 0 = 0.$$

Система напряжений обратной последовательности  $U_{(2)}$ :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A(2)} &= \frac{1}{3} \left( \dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C \right) = \frac{1}{3} \left( 220 + e^{-j120^\circ} 220 e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ} 0 \right) = \\ &= \frac{1}{3} (220 - 110 + j191) = 36,7 + j63,7 = 73,5 e^{j60^\circ} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{B(2)} = \dot{U}_{A(2)} a = 73,5 e^{j60^\circ} e^{j120^\circ} = 73,5 e^{j180^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C(2)} = \dot{U}_{A(2)} a^2 = 73,5 e^{j60^\circ} e^{-j120^\circ} = 73,5 e^{-j60^\circ} \text{ В},$$



Система напряжений нулевой последовательности  $U_{(0)}$ :

$$\begin{aligned}\dot{U}_{A(0)} = \dot{U}_{B(0)} = \dot{U}_{C(0)} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{3}(220 + 220e^{-j120^\circ} + 0) = \\ &= \frac{1}{3}(220 - 110 - j191) = 36,7 - j63,7 = 73,5e^{-j60^\circ} \text{ В.}\end{aligned}$$

Определим коэффициент несимметрии заданной несимметричной системы напряжений.

$$\varepsilon = \frac{U_{Л(2)}}{U_{Л(1)}} 100\% = \frac{73,5}{147} \cdot 100\% = 50\%.$$

Определим токи каждой фазы электрического двигателя при питании от заданного несимметричного источника питания. Поскольку

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A(1)} + \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)}; \dot{I}_B = \dot{I}_{B(1)} + \dot{I}_{B(2)} + \dot{I}_{B(0)}; \dot{I}_C = \dot{I}_{C(1)} + \dot{I}_{C(2)} + \dot{I}_{C(0)},$$

решим три задачи, отличающиеся друг от друга тем, что одна и та же симметричная цепь питается от разных напряжений симметричных составляющих, т.е. от  $U_{(1)}$ ,  $U_{(2)}$  и от  $U_{(0)}$ .

Рассчитаем токи в цепи, вызванные системой напряжений прямой последовательности. Расчетная схема при этом имеет вид (рисунок 3.9):

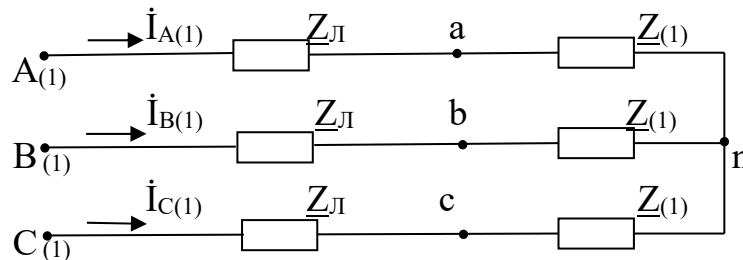


Рисунок 3.9

Определим комплексное сопротивление фазы для токов прямой последовательности

$$\underline{Z}_{\phi(1)} = \underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{(1)} = 2 + j2 + 2 + j4 = 4 + j6 = 7,21e^{j56^\circ 20'} \text{ Ом.}$$

Ток прямой последовательности фазы А определим на основании закона Ома

$$\dot{I}_{A(1)} = \frac{\dot{U}_{A(1)}}{\underline{Z}_{\phi(1)}} = \frac{147}{7,21e^{j56^\circ 20'}} = 20,4e^{-j56^\circ 20'} = 11,3 - j17,0 \text{ (А).}$$

Токи прямой последовательности остальных фаз определим, используя, трехфазный оператор

$$\dot{I}_{B(1)} = a^2 \dot{I}_{A(1)} = e^{-j120^\circ} 20,4e^{-j56^\circ 20'} = 20,4e^{-j176^\circ 20'} = -20,4 - j1,3 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_{C(1)} = a \dot{I}_{A(1)} = e^{j120^\circ} 20,4e^{-j56^\circ 20'} = 20,4e^{j63^\circ 40'} = 9,1 + j18,3 \text{ (A)}.$$

Рассчитаем токи в цепи, вызванные системой напряжений обратной последовательности. Расчетная схема при этом, имеет вид (рис.3.10).

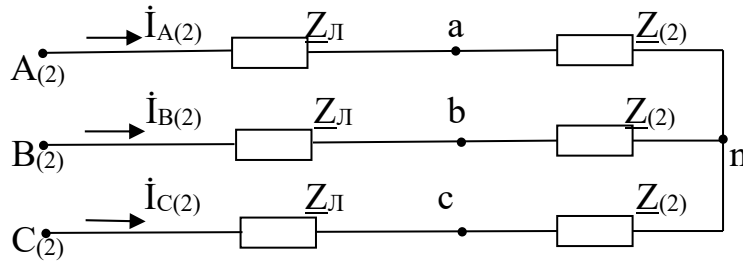


Рис.3.10

Определим комплексное сопротивление фазы для токов обратной последовательности

$$\underline{Z}_{\Phi(2)} = \underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{(2)} = 2 + j2 + 1 + j2 = 3 + j4 = 5,0e^{j53^\circ} \text{ Ом.}$$

Ток обратной последовательности фазы А определим на основании закона Ома

$$\dot{I}_{A(2)} = \frac{\dot{U}_{A(2)}}{\underline{Z}_{\Phi(2)}} = \frac{73,5e^{j60^\circ}}{5,0e^{j53^\circ}} = 14,7e^{j7^\circ} = 14,6 + j1,8 \text{ (A)}.$$

Токи прямой последовательности остальных фаз определим, используя, трехфазный оператор

$$\dot{I}_{B(2)} = a \dot{I}_{A(2)} = e^{j120^\circ} 14,7e^{j7^\circ} = 14,7e^{j127^\circ} = -8,9 + j11,7 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_{C(2)} = a^2 \dot{I}_{A(2)} = e^{-j120^\circ} 14,7e^{j7^\circ} = 14,7e^{-j113^\circ} = -5,7 - j13,5 \text{ (A)}.$$

Токи нулевой последовательности в трехпроводной цепи равны нулю:

$$\dot{I}_{A(0)} = \dot{I}_{B(0)} + \dot{I}_{C(0)} = 0,$$

поскольку, комплексное сопротивление цепи для токов нулевой последовательности

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{\Phi(0)} + 3\underline{Z}_N = \infty.$$

Просуммируем результаты решения трех задач для каждой фазы в отдельности.

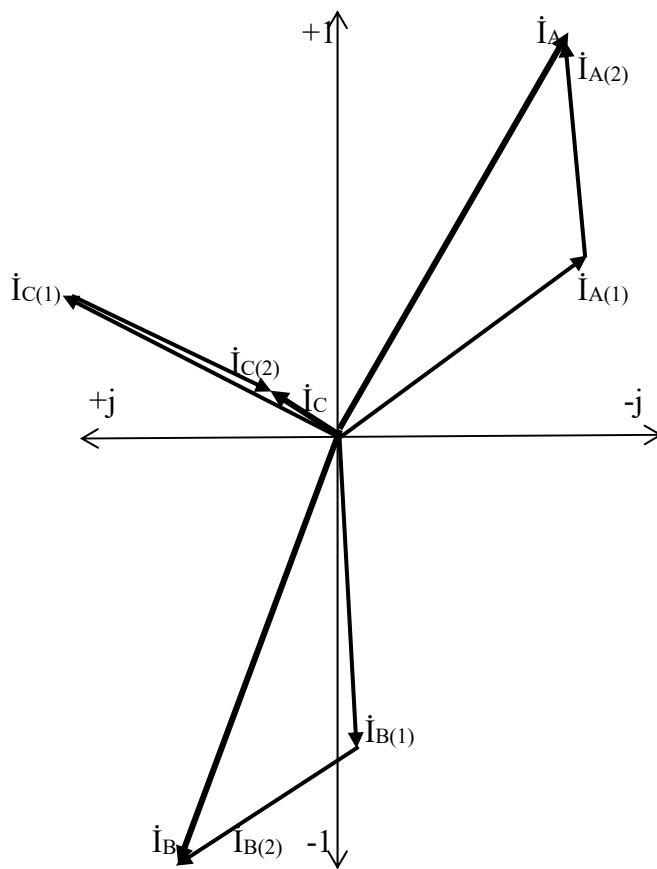
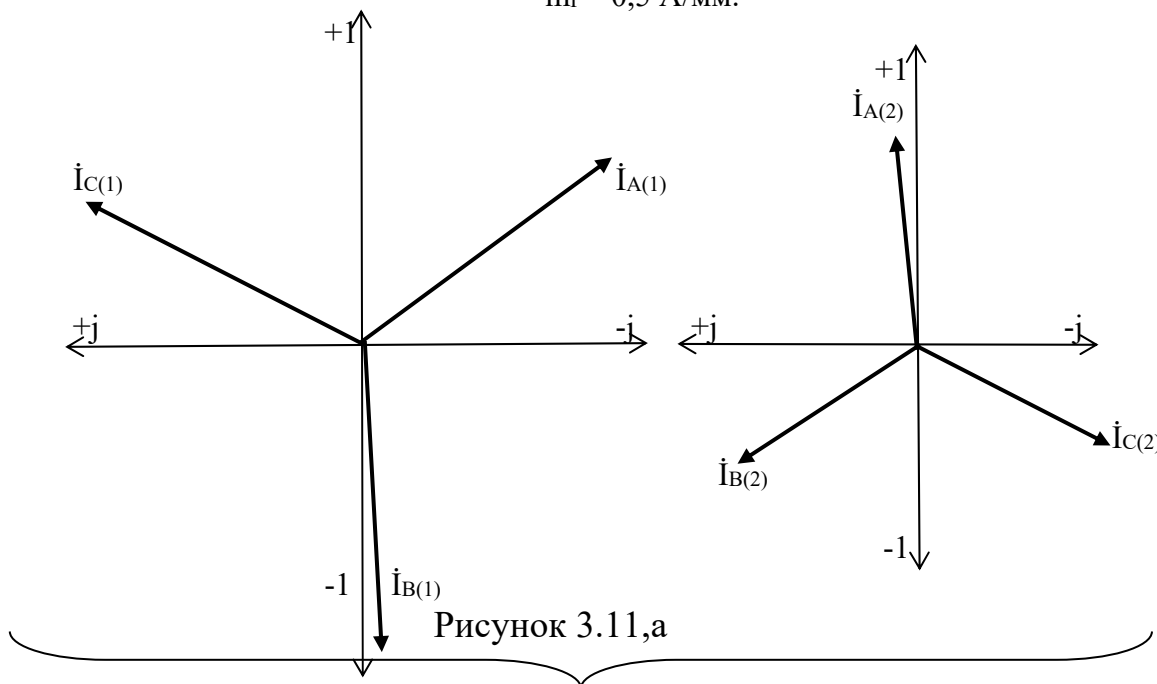
$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A(1)} + \dot{I}_{A(2)} + \dot{I}_{A(0)} = 11,3 - j17,0 + 14,6 + j1,8 + 0 = 25,9 - j15,2 = 30,1e^{-j30^\circ 10'} \text{ A}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B(1)} + \dot{I}_{B(2)} + \dot{I}_{B(0)} = -20,4 - j1,3 - 8,9 + j11,7 + 0 = -29,3 + j10,4 = 31,1e^{j160^\circ 20'} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C(1)} + \dot{I}_{C(2)} + \dot{I}_{C(0)} = 9,1 + j18,3 - 5,7 - j13,5 + 0 = 3,4 + j4,8 = 5,9e^{j54^\circ 40'} \text{ A}.$$

Построим векторные диаграммы токов для симметричных составляющих (рис.3.11.а) и для несимметричного режима (рис.3.11.б).

$m_l = 0,5 \text{ A/мм.}$



## 4. Библиографический список

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 2002, 1996, 1984, 1978, ч. I-я.
2. Демирчан К.С. Нейман Л.Р. Коровин Н.В. и др. Теоретические основы электротехники. Питер, 2003. том 1,2,3.
3. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1989, 1975.
4. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990.
5. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1979.
6. Барсов И.Н. Теоретические основы электротехники. М.: Энергоатомиздат, 1992, кн.1, кн. 2.
7. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. т. I. Л. Энергоиздат, 1981.
8. Евдокимов Ф.Е. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1981.

## 5. Контрольное задание

### Задача 1. Трехфазные цепи при питании от симметричного источника

Для заданной трехфазной электрической цепи (рисунок 5.1), питающейся от симметричного трехфазного источника с фазным напряжением  $U_{\phi}$ , согласно данным варианта (таблица 1), требуется:

1. Вычертить расчетную схему замещения цепи по варианту.
2. Определить действующие значения токов и напряжений на всех участках цепи.
3. По результатам расчета (пункт 2), построить совмещенную векторную, топографическую диаграмму токов и напряжений цепи.
4. На схеме замещения цепи, показать ваттметры, включенные по схеме Арона (согласно таблицы 2) для измерения активной мощности всей цепи и определить их показания.

### Задача 2. Трехфазные цепи при питании от несимметричного источника

Для трехфазной трехпроводной электрической цепи, состоящей из трехфазного несимметричного источника питания, заданного в виде модуля действующего значения фазного напряжения  $U_{\phi}$  (таблица 1) и



начальных фаз этих напряжений  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  (таблица 2), линии электропередачи, сопротивление которой равно  $\underline{Z}_{\text{Л}}$  (таблица 2) и трехфазного асинхронного двигателя, сопротивления которого для токов прямой и обратной последовательностей соответственно равны  $\underline{Z}_{(1)}$  и  $\underline{Z}_{(2)}$  (таблица 2) требуется:

1. Определить ток электрического двигателя и напряжения на отдельных участках цепи, при питании от симметричного источника питания с фазным напряжением  $U_{\text{Ф}}$ .

2. Разложить (аналитически и графически) несимметричную систему напряжений на симметричные составляющие.

3. Определить коэффициент несимметрии заданной несимметричной системы напряжений.

4. Определить токи каждой фазы электрического двигателя при питании от заданного несимметричного источника питания.

5. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для симметричного и несимметричного режимов.

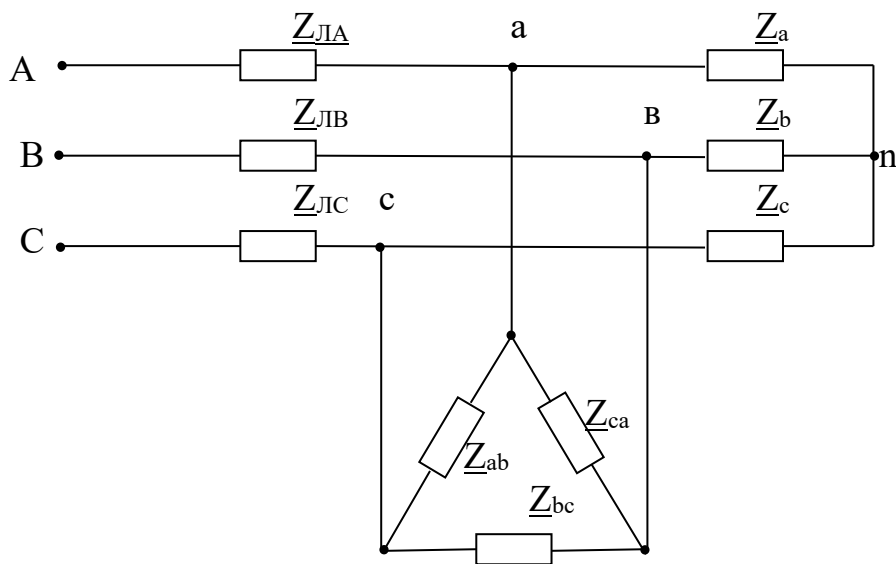


Рисунок 5.1

Таблица 1

№ вар.	U <sub>Ф</sub>	Z <sub>ЛA</sub>	Z <sub>ЛB</sub>	Z <sub>ЛC</sub>	Z <sub>a</sub>	Z <sub>b</sub>	Z <sub>c</sub>	Z <sub>ab</sub>	Z <sub>bc</sub>	Z <sub>ca</sub>
	B	Ом								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
01	127	4	4	-j4	-j10	-j10	-j10	20	20	j20
02	220	j5	j5	5	j10	j10	j10	20	j20	-j20
03	380	-j4	-j4	-j4	-j15	j15	15	30	j30	-j30
04	660	-j10	j10	10	j60	-j60	j60	-j80	-j80	-j80
05	1000	15	-j15	-j15	j40	j40	j40	-j80	j80	80
06	1500	j20	j20	j20	60	-j60	j60	j100	-j100	-j100
07	3000	25	25	-j25	100	j100	j100	150	150	150
08	5000	-j30	j30	30	-j80	-j80	-j80	180	-j180	j180
09	127	6	-j6	j6	12	12	j12	-j25	-j25	-j25
10	220	j8	j8	j8	-j20	20	-j20	j40	j40	40
11	380	12	-j12	j12	-j50	-j50	-j50	100	-j100	j100
12	660	j10	j10	j10	60	60	j60	-j160	-j160	160
13	1000	12	j12	-j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
14	1500	j25	j25	-j25	100	j100	j100	-j250	-j250	250
15	3000	-j30	-j30	j30	-j90	-j90	-j90	280	-j280	280
16	5000	20	-j20	-j20	-j80	-j80	80	j200	j200	j200
17	127	-j6	-j6	-j6	30	-j30	j30	120	j120	-j120
18	220	-j7	j7	j7	-j115	j115	115	-j130	-j130	-j130
19	380	j5	j5	j5	-j20	20	j20	70	70	-j70
20	660	j15	-j15	-j15	j60	j60	j60	-j150	j150	150
21	1000	-j8	-j8	-j8	j25	25	-j25	90	90	-j90
22	1500	j4	-j4	j4	-j15	-j15	-j15	30	30	-j30
23	3000	9	-j9	j9	-j20	20	-j20	j60	j60	j60
24	5000	12	j12	j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
25	127	j5	j5	5	j10	j10	j10	20	j20	-j20
26	220	-j4	-j4	-j4	-j15	j15	15	30	j30	-j30
27	380	-j10	j10	10	j60	-j60	j60	-j80	-j80	-j80
28	660	15	-j15	-j15	j40	j40	j40	-j80	j80	80
29	1000	j20	j20	j20	60	-j60	j60	j100	-j100	-j100
30	1500	25	25	-j25	100	j100	j100	150	150	150
31	3000	-j30	j30	30	-j80	-j80	-j80	180	-j180	j180
32	5000	6	-j6	j6	12	12	j12	-j25	-j25	-j25
33	127	j8	j8	j8	-j20	20	-j20	j40	j40	40
34	220	12	-j12	j12	-j50	-j50	-j50	100	-j100	j100
35	380	j10	j10	j10	60	60	j60	-j160	-j160	160
36	660	12	j12	-j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
37	1000	j25	j25	j25	100	j100	j100	-j250	-j250	250

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
38	1500	-j30	-j30	j30	-j90	-j90	-j90	280	-j280	280
39	3000	20	-j20	-j20	-j80	-j80	80	j200	j200	j200
40	5000	-j6	-j6	-j6	30	-j30	j30	120	j120	-j120
41	127	-j7	j7	j7	-j115	j115	115	-j130	-j130	-j130
41	220	j5	j5	j5	-j20	20	j20	70	70	-j70
43	380	j15	-j15	-j15	j60	j60	j60	-j150	j150	150
44	660	-j8	-j8	-j8	j25	25	-j25	90	90	-j0
45	1000	j4	-j4	j4	-j15	-j15	-j15	30	30	-j30
46	1500	9	-j9	j9	-j20	20	-j20	j60	j60	j60
47	3000	12	j12	j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
48	5000	40	40	j40	j115	-115	115	-j130	-j130	-j130
49	127	-j4	-j4	-j4	j10	-j10	j10	-j20	20	j20
50	220	j5	j5	5	j10	j10	j10	50	-j50	-j50
51	380	-j2	-j2	-j2	-j15	j15	15	30	j30	-j30
52	660	-j10	j10	10	-j60	-j60	-j60	j80	-j80	80
53	1000	15	-j15	-j15	-40	j40	j40	80	80	80
54	1500	j20	-20	j20	60	60	60	j100	-j100	-j100
55	3000	25	25	-j25	-j100	-j100	-j100	150	-j150	150
56	5000	-j30	j30	30	-j80	-j80	-j80	180	-j180	j180
57	127	6	-j6	j6	12	12	j12	-j25	-j25	-j25
58	220	j8	j8	j8	j20	20	-j20	j40	j40	40
59	380	12	-j12	j12	-j50	-j50	-j50	100	-j100	j100
60	660	j10	j10	j10	60	60	j60	-j160	-j160	160
61	1000	12	j12	-j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
62	1500	j24	j24	j24	100	j100	j100	-j250	-j250	250
63	3000	30	30	j30	-j90	-j90	-j90	280	-j280	280
64	5000	20	j20	-j20	-j80	80	80	j200	j200	j200
65	127	j5	-j5	5	10	10	10	20	j20	-j20
66	220	-j4	-j4	-j4	-j15	j15	15	30	j30	-j30
67	380	-j10	j10	10	j60	-j60	j60	-j80	-j80	-j80
68	660	15	-j15	-j15	j40	j40	j40	-j80	j80	80
69	1000	20	20	20	60	-j60	j60	j100	-j100	-j100
70	1500	25	25	-j25	100	j100	j100	150	150	150
71	3000	-j30	j30	30	-j80	-j80	-j80	180	180	j180
72	5000	6	-j6	j6	12	12	j12	-j25	-j25	-j25
73	127	j8	j8	j8	-j20	20	-j20	j40	j40	40
74	220	12	-j12	j12	-j50	-j50	-j50	100	-j100	j100
75	380	j10	j10	j10	60	60	j60	-j160	-j160	160
76	660	12	12	-j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
77	1000	j25	j25	j25	100	j00	j100	-j250	j250	250
78	220	-j10	10	j10	50	-j50	j50	150	150	150
79	380	j5	-j5	5	j20	j20	j20	70	70	-j70
80	660	j15	j15	-j15	j60	j60	j60	-j120	j120	120
81	1000	-j8	-j8	-j8	j25	25	-j25	80	80	-j80
82	1500	j6	-j6	j6	-j15	-j15	-j15	30	30	-j30
83	3000	9	j9	j9	-j30	30	-j30	j60	j60	j60
84	5000	12	j12	j12	-j50	-j50	-j50	200	-j200	j200
85	127	j5	5	5	j10	j10	j10	20	j20	-j20
86	220	-j4	-j4	-j4	-j15	15	15	30	j30	-j30
87	380	-j10	j10	10	60	-j60	j60	-j80	-j80	-j80
88	660	15	15	-j15	j40	j40	j40	-j80	j80	80
89	1000	20	20	20	60	-j60	j60	j100	-j100	-j100
90	1500	25	25	-j25	100	j100	j100	150	150	150
91	3000	-j30	30	30	-j80	-j80	-j80	180	j180	j180
92	5000	6	-j6	j6	12	12	-j12	-j25	-j25	-j25
93	127	-j8	-j8	-j8	-j20	20	-j20	j40	-j40	40
94	220	12	-j12	j12	j50	j50	j50	100	-j100	-j100
95	380	10	10	10	j60	60	j60	-j160	-j160	160
96	660	12	j12	-j12	j50	j50	j50	200	-j200	j200
97	1000	j25	j25	j25	100	j100	j100	-j300	-j300	300
98	660	15	-j15	-j15	j50	j50	j50	-j80	j80	80
99	1000	20	20	20	60	-j60	j60	j100	-j100	-j100
00	1500	15	15	-j15	100	-j100	j100	150	150	150

Таблица 2

№ вар.	φ <sub>A</sub>	φ <sub>B</sub>	φ <sub>C</sub>	$\underline{Z}_L$	$\underline{Z}_{(1)}$	$\underline{Z}_{(2)}$	Ваттметры включены	
	градусы			Ом			pU <sub>1</sub>	pU <sub>2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9
01	0	-120	90	2+j2	4+j6	2+j3	U <sub>AB</sub> ; I <sub>A</sub>	U <sub>CB</sub> ; I <sub>C</sub>
02	0	-90	120	2+j2	3+j8	1+j3	U <sub>AC</sub> ; I <sub>A</sub>	U <sub>BC</sub> ; I <sub>B</sub>
03	0	-120	∞	2-j2	4+j6	2+j3	U <sub>CA</sub> ; I <sub>C</sub>	U <sub>BC</sub> ; I <sub>B</sub>
04	0	∞	120	4-j4	3+j10	1+j5	U <sub>AB</sub> ; I <sub>A</sub>	U <sub>CB</sub> ; I <sub>C</sub>
05	∞	-120	120	5+j5	6+j16	2+j6	U <sub>AC</sub> ; I <sub>A</sub>	U <sub>BC</sub> ; I <sub>B</sub>
06	∞	-30	120	3+j6	8+j26	4+j10	U <sub>CA</sub> ; I <sub>C</sub>	U <sub>BC</sub> ; I <sub>B</sub>
07	-30	-120	∞	10+j20	14+j60	7+j30	U <sub>AB</sub> ; I <sub>A</sub>	U <sub>CB</sub> ; I <sub>C</sub>

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
08	60	-90	120	1-j2	2+j6	1+j3	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
09	30	-120	60	2+j3	4+j8	2+j5	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
10	120	$\infty$	-120	2+j4	4+j10	2+j4	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
11	90	0	$\infty$	4-j4	2+j10	1+j4	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
12	20	-40	140	5+j5	7+j25	3+j6	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
13	0	-90	90	5+j10	10+j35	4+j15	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
14	-60	60	0	8+j20	4+j40	3+j30	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
15	$\infty$	-120	-60	2+j2	4+j6	2+j3	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
16	90	0	-90	1+j2	3+j8	1+j3	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
17	0	-120	60	2+j3	4+j6	2+j3	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
18	30	-30	0	3-j4	3+j10	2+j5	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
19	30	$\infty$	-60	3+j5	6+j16	3+j6	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
20	60	0	-60	3-j6	8+j18	4+j6	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
21	90	-30	$\infty$	5+j20	14+j60	5+j30	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
22	0	120	$\infty$	1-j3	2+j8	2+j3	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
23	20	-100	80	2-j4	4+j8	2+j4	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
24	$\infty$	120	0	2+j4	4+j10	2+j5	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
25	0	-60	60	1+j1	3+j6	1+j3	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
26	0	-30	120	1-j2	2+j8	1+j3	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
27	-120	0	$\infty$	2-j2	4+j6	2+j3	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
28	50	-70	$\infty$	4+j4	5+j10	2+j5	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
29	0	-120	$\infty$	10+j10	50+j80	20+j30	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
30	0	$\infty$	120	30+j40	80+j80	40+j40	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
31	$\infty$	-120	120	100+j100	500+j600	200+j300	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
32	$\infty$	-30	120	1-j2	2+j6	2+j3	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
33	-30	-120	$\infty$	3+j3	4+j8	2+j4	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
34	60	-90	120	3+j4	8+j10	3+j4	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
35	30	-120	60	12-j12	20+j100	10+j40	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
36	120	$\infty$	-120	50+j50	70+j250	30+j60	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
37	90	0	$\infty$	20+j20	150+j250	70+j100	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
38	0	-90	90	80+j80	700+j800	300+j400	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
39	-60	60	0	2+j3	4+j9	2+j3	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
40	$\infty$	-120	-60	1-j3	3+j8	1+j4	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
41	90	0	-90	3-j3	10+j15	4+j7	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
41	0	-120	60	4+j4	25+j40	10+j25	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
43	30	-30	0	15+j20	50+j100	20+j50	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
44	30	$\infty$	-60	40+j40	180+j180	70+j70	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
45	60	0	-60	140+j180	400+j800	200+j400	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
46	90	-30	$\infty$	2-j2	6+j6	3+j3	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
47	0	120	$\infty$	4-j5	8+j18	5+j10	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
48	20	-100	80	7+j8	18+j60	10+j40	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
49	$\infty$	120	0	15-j30	120+j200	50+j90	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
50	0	-60	60	30+j50	100+j250	50+j100	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
51	0	-30	120	20+j50	150+j400	70+j200	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
52	-120	0	$\infty$	60+j80	500+j800	200+j400	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
53	50	-70	$\infty$	5+j5	10+j10	5+j5	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
54	0	-120	$\infty$	4+j4	12+j14	4+j6	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
55	0	$\infty$	120	3-j3	15+j16	6+j6	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
56	$\infty$	-120	120	4-j4	5+j10	2+j5	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
57	$\infty$	-30	120	5-j5	16+j16	5+j6	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
58	-30	-120	$\infty$	3+j6	18+j26	10+j10	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
59	60	-90	120	12+j13	56+j56	23+j23	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
60	30	-120	60	2+j5	13+j18	5+j10	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
61	120	$\infty$	-120	2-j2	24+j26	12+j13	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
62	90	0	$\infty$	4-j4	33+j60	15+j25	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
63	$\infty$	-30	120	15+j15	66+j66	25+j26	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
64	-30	-120	$\infty$	13+j16	88+j126	40+j100	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
65	60	-90	120	22+j22	140+j600	70+j300	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
66	30	-120	60	12+j20	30+j80	10+j30	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
67	120	$\infty$	-120	20-j20	40+j60	20+j30	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
68	90	0	$\infty$	40-j40	30+j100	10+j50	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
69	0	-90	90	50+j50	60+j160	20+j60	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
70	-60	60	0	3+j6	8+j26	4+j10	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
71	$\infty$	-120	-60	12+j12	44+j66	22+j33	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
72	90	0	-90	25+j25	35+j85	15+j35	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
73	0	-120	60	32-j32	43+j63	23+j33	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
74	30	-30	0	40-j40	30+j100	10+j50	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
75	30	$\infty$	-60	50+j50	66+j160	32+j60	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
76	60	0	-60	35+j65	180+j260	80+j150	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
77	90	-30	$\infty$	2+j3	4+j9	2+j3	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
78	0	120	$\infty$	1-j3	3+j8	1+j4	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
79	20	-100	80	3-j3	10+j15	4+j7	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
80	$\infty$	120	0	4+j4	25+j40	10+j25	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
81	0	-60	60	15+j20	50+j100	20+j50	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
82	0	-30	120	45+j45	190+j180	80+j70	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
83	-120	0	$\infty$	150+j200	400+j800	150+j450	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
84	-120	0	$\infty$	5+j5	10+j10	5+j5	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
85	50	-70	$\infty$	4+j4	12+j14	4+j6	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$

## Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
86	0	-120	$\infty$	5+j5	10+j10	5+j5	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
87	0	$\infty$	120	4+j4	12+j14	4+j6	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
88	$\infty$	-120	120	3-j3	15+j16	6+j6	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
89	$\infty$	-30	120	4-j4	5+j10	2+j5	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
90	-30	-120	$\infty$	5-j5	16+j16	5+j6	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
91	60	-90	120	3+j6	18+j26	10+j10	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
92	30	-120	60	12+j13	56+j56	23+j23	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
93	120	$\infty$	-120	5+j5	10+j10	5+j5	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
94	90	0	$\infty$	4+j4	12+j14	4+j6	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
95	0	-90	90	3-j3	15+j16	6+j6	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
96	-60	60	0	4-j4	5+j10	2+j5	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
97	-120	0	$\infty$	5-j5	16+j16	5+j6	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$
98	50	-70	$\infty$	3+j6	18+j26	10+j10	$U_{AC}; I_A$	$U_{BC}; I_B$
99	0	-120	$\infty$	12+j13	56+j56	23+j23	$U_{CA}; I_C$	$U_{BC}; I_B$
00	0	$\infty$	120	60+j80	500+j800	200+j400	$U_{AB}; I_A$	$U_{CB}; I_C$