



Энергетический факультет

Кафедра электротехники и электроснабжения

Теоретические основы  
электротехники

**МОДУЛЬ 7.  
ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ЦЕПИ**

Индивидуальные задания и методические указания  
к лабораторно-практическим занятиям

Профессор Ф.Д. Косоухов,  
Доцент В.Ф. Петров,  
Ассистент А.О. Горбунов

Санкт-Петербург, 2009

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией энергетического факультета (протокол №19 от 16.06.2009г.)

Для студентов энергетического факультета по специальностям:

110302 – электрификация и автоматизация сельского хозяйства;

140106 – энергообеспечение предприятий.

Рецензент – доцент кафедры электрических машин и электропривода Н.Н. Ионова.

## Вопросы теоретической части модуля.

6. *Трёхфазные цепи.*
  - 6.1. Понятия о многофазных источниках питания и о многофазных цепях.
  - 6.2. Основные схемы соединения трёхфазных цепей.
  - 6.3. Уравновешенные и неуравновешенные многофазные системы.
  - 6.4. Симметричный режим трёхфазной цепи при соединении приёмника звездой.
  - 6.5. Несимметричный режим трёхфазной цепи при соединении приёмника звездой.
    - 6.5.1. Общие сведения о режимах цепи.
    - 6.5.2. Трёхфазная цепь с нулевым проводом, сопротивление которого  $Z_N=0$ ;
    - 6.5.3. Трёхфазная цепь с нулевым проводом, сопротивление которого  $Z_N \neq 0$ ;
    - 6.5.4. Трёхфазная цепь без нулевого провода.
    - 6.5.5. Трёхфазная цепь без нулевого провода при обрыве фазы приёмника.
    - 6.5.6. Трёхфазная цепь без нулевого провода при коротком замыкании фазы приёмника.
  - 6.6. Электрическая цепь при соединении трёхфазного приёмника треугольником.
    - 6.6.1. Симметричный режим.
    - 6.6.2. Несимметричный режим.
  - 6.7. Измерение активной мощности в трёхфазных цепях.
    - 6.7.1. Измерение активной мощности в трёхпроводных цепях.
    - 6.7.2. Измерение активной мощности в четырёхпроводных цепях.
  - 6.8. Пульсирующие и вращающиеся магнитные поля.
    - 6.8.1. Пульсирующее магнитное поле.
    - 6.8.2. Вращающееся магнитное поле.

- 6.9. Принцип работы трёхфазного асинхронного двигателя.
- 6.10. Примеры решения задач по трёхфазным цепям.
- 7. *Метод симметричных составляющих.*
  - 7.6. Обобщение понятия о симметричных системах.
  - 7.7. Эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трёхфазного трёхстержневого трансформатора.
  - 7.8. Эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трёхфазного асинхронного электродвигателя.
  - 7.9. Эквивалентные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трёхфазной симметричной цепи с нулевым проводом.
  - 7.10. Разложение трёхфазной несимметричной системы напряжений на симметричные составляющие.
  - 7.11. Расчёт трёхфазных цепей методом симметричных составляющих.

## 1. Типовые задачи и примеры их решения.

**З а д а ч а 1.** Трехфазный симметричный приемник, соединенный в звезду  $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = 22\lambda^{-j60^\circ} = (11 - j19,05)$ , Ом подключен к трехфазному симметричному генератору, фазное напряжение которого  $U_\phi = 220$  В. Определить токи и мощности приемника.

**Р е ш е н и е :** Из комплекса сопротивления приемника имеем:  $Z_\phi = 22$  Ом,  $R_\phi = 11$  Ом,  $X_\phi = -19,05$  Ом,  $\varphi = -60^\circ$ .

Так как генератор и приемник симметричные, режим работы трехфазной цепи будет симметричным.

Система фазных напряжений генератора в комплексной форме:

$$\underline{U}_A = U_\phi = 220 \text{ В};$$

$$\underline{U}_B = U_\phi \lambda^{-j120^\circ} = 220\lambda^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5), \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = U_\phi \lambda^{j120^\circ} = 220\lambda^{j120^\circ} = (-110 + j190,5), \text{ В}.$$

В симметричном режиме работы цепи узловое напряжение  $U_N = 0$ , поэтому фазные напряжения приемника равны фазным напряжениям генератора:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = 220 \text{ В};$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B = 220\lambda^{-j120^\circ}, \text{ В};$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C = 220\lambda^{j120^\circ}, \text{ В}.$$

Линейные напряжения приемника также равны линейным напряжениям генератора:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 220 + 110 + j190,5 =$$

$$= 330 + j190,5 = 381\lambda^{j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = -110 - j190,5 + 110 - j190,5 =$$

$$= -j381 = 381\lambda^{-j90^\circ}, \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = -110 + j190,5 - 220 =$$

$$= -330 + j190,5 = 381\lambda^{j150^\circ}, \text{ В.}$$

Фазные (линейные) токи приемника:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{22\lambda^{-j60^\circ}} = 10\lambda^{j60^\circ} = (5 + j8,66), \text{ А;}$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220\lambda^{-j120^\circ}}{22\lambda^{-j60^\circ}} = 10\lambda^{-j60^\circ} = (5 - j8,66), \text{ А;}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220\lambda^{j120^\circ}}{22\lambda^{-j60^\circ}} = 10\lambda^{j80^\circ} = -10 \text{ А,}$$

т.е.  $\underline{I}_a = \underline{I}_b = \underline{I}_c = \underline{I}_\phi = 10 \text{ А; } \underline{I}_l = \underline{I}_\phi = 10 \text{ А.}$

Сумма комплексных токов при симметричном режиме

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

Активная мощность приемника

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 0,5 = 3300 \text{ Вт,}$$

где  $\cos\varphi = \cos(-60^\circ) = 0,5$ .

Реактивная мощность приемника

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 10 \cdot (-0,866) = -5716 \text{ ввар,}$$

где  $\sin\varphi = \sin(-60^\circ) = -0,866$ .

Знак «минус» у реактивной мощности показывает, что трехфазный приемник имеет емкостный характер.

Полная мощность приемника

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3300^2 + 5716^2} = 6600 \text{ ВА.}$$

Определим мощности приемника комплексным методом:

$$\underline{S} = \underline{U}_a^* \underline{I}_a + \underline{U}_b^* \underline{I}_b + \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 220 \cdot 10\lambda^{-j60^\circ} + 220\lambda^{-j120^\circ} \cdot 10\lambda^{j60^\circ} +$$

$$+ 220\lambda^{j120^\circ} \cdot 10\lambda^{-j180^\circ} = 2200\lambda^{-j60^\circ} + 2200\lambda^{-j60^\circ} + 2200\lambda^{-j60^\circ} =$$

$$= 6600\lambda^{-j60^\circ} = 3300 - j5716.$$

Из комплекса мощности получаем:  $S = 6600\text{ВА}$ ,  $P = 3300\text{Вт}$ ,  $Q = -5716\text{вар}$ . Векторная диаграмма в координатах комплексной плоскости изображена на рис. 1. Из векторной диаграммы видно, что токи в фазах приемника опережают соответствующие фазные напряжения на угол  $\varphi = -60^\circ$ , что соответствует емкостному характеру нагрузки.

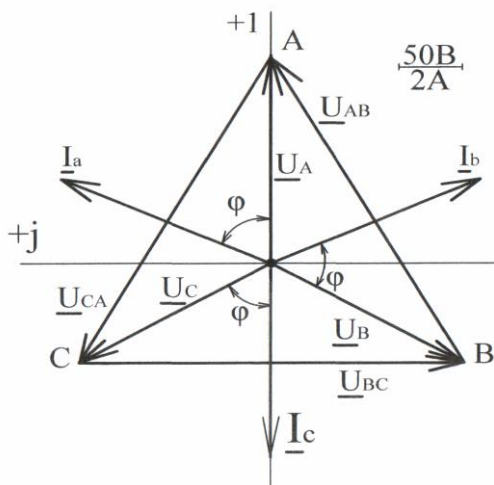


Рис. 1

**З а д а ч а 2.** Трехфазный генератор с симметричной системой напряжений,  $U_n = 380\text{ В}$  подключен к приемнику, соединенному в звезду, комплексное сопротивление отдельных фаз которого заданы:  $\underline{Z}_a = 40\text{ Ом}$ ;  $\underline{Z}_b = 40\lambda^{j30^\circ} = (34,64 + j20),\text{ Ом}$ ;  $\underline{Z}_c = 40\lambda^{-j30^\circ} = (34,64 - j20),\text{ Ом}$ .

Определить фазные и линейные напряжения и токи приемника, его активную, реактивную и полную мощности, построить топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов для следующих режимов:

- 1) при наличии нулевого провода, сопротивление которого равно нулю;
- 2) без нулевого провода;
- 3) при разгрузке одной фазы без нулевого провода;
- 4) при коротком замыкании одной фазы без нулевого провода.

**Решение:** Судя по исходным данным, трехфазный приемник несимметричный, хотя полные сопротивления отдельных фаз одинаковы и равны 40 Ом, но характер нагрузки фаз различный: в фазе  $a$  – активная нагрузка ( $\varphi_a = 0$ ), в фазе  $b$  – индуктивный характер нагрузки ( $\varphi_b = 30^\circ$ ), в фазе  $c$  – емкостный характер нагрузки ( $\varphi_c = -30^\circ$ ). В связи с этим режимы работы трехфазной цепи будут несимметричными.

*Режим 1. При несимметричной нагрузке, соединенной звездой и наличии нулевого провода, сопротивление которого  $Z_N$  равно нулю, узловое напряжение которого  $\underline{U}_N = \underline{I}_N \underline{Z}_N = 0$ , поэтому фазные напряжения приемника*

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N = \underline{U}_A,$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N = \underline{U}_B,$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N = \underline{U}_C.$$

Фазное напряжение генератора

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ В.}$$

Система фазных напряжений генератора в комплексной форме:

$$\underline{U}_A = U_\phi \lambda^{j0^\circ} = 220 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_B = U_\phi \lambda^{-j120^\circ} = 220 \lambda^{-j120^\circ} = (-110 - j190,5), \text{ В;}$$

$$\underline{U}_C = U_\phi \lambda^{j120^\circ} = 220 \lambda^{j120^\circ} = (-110 + j190,5), \text{ В.}$$



Система линейных напряжений генератора и приемника:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 220 + 110 + j190,5 = 330 + j190,5 = 381\lambda^{j30^\circ}, \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = -110 - j190,5 + 110 - j190,5 = -j381 = 381\lambda^{-j90^\circ}, \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = -110 - j190,5 - 220 = -330 + j190,5 = 381\lambda^{j150^\circ}, \text{ В}.$$

Фазные (линейные) токи приемника:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ А}; \quad I_a = 5,5 \text{ А}, \quad \psi_{ia} = 0;$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220\lambda^{-j120^\circ}}{40\lambda^{j30^\circ}} = 5,5^{-j150^\circ} = (-4,763 - j2,75); \quad I_b = 5,5 \text{ А},$$

$$\psi_{ib} = -150^\circ;$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220\lambda^{j120^\circ}}{40\lambda^{-j30^\circ}} = 5,5^{j150^\circ} = (-4,763 + j2,75); \quad I_c = 5,5 \text{ А},$$

$$\psi_{ic} = 150^\circ.$$

Ток в нулевом проводе:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 5,5 - 5,5j - 4,763 + j2,75 - 4,763 + j2,75 = -4,026 + 4,026\lambda^{-j180^\circ}; \quad I_N = 4,026 \text{ А}, \quad \psi_{iN} = -180^\circ.$$

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = \underline{U}_a \overset{*}{\underline{I}}_a + \underline{U}_b \overset{*}{\underline{I}}_b + \underline{U}_c \overset{*}{\underline{I}}_c = \\ &= 220 \cdot 5,5 + 220\lambda^{-j120^\circ} \cdot 5,5\lambda^{j150^\circ} + 220\lambda^{j120^\circ} \cdot 5,5\lambda^{-j150^\circ} = \\ &= 1210 + 1210\lambda^{+j30^\circ} + 1210\lambda^{-j30^\circ} = 1210(1 + \lambda^{j30^\circ} + \lambda^{-j30^\circ}) = \\ &= 1210(1 + 0,866 + j0,5 + 0,866 - j0,5) = 1210(2,732 + j0) = 3306; \\ P &= S = 3306 \text{ Вт}, \quad Q = 0. \end{aligned}$$

Реактивная мощность трехфазной цепи в режиме 1 равна нулю, так как индуктивная мощность  $Q_L = 1210 \cdot 0,5 = 605$  вар и емкостная мощность  $Q_C = 1210 \cdot (-0,5) = -605$  вар одинаковы и взаимно компенсируются :  $Q = Q_L - Q_C = 0$ .

Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов в координатах комплексной плоскости для режима 1 построена на рис. 2.

Вектор тока в нулевом проводе  $\underline{I}_N$  на диаграмме получен в результате суммирования векторов фазных токов  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ .

*Режим 2.* В этом режиме имеем несимметричную трехфазную цепь без нулевого провода.

Для определения узлового напряжения по формуле (1), вычислим проводимости отдельных фаз приемника в комплексной форме :

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{1}{40} = 0,025 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ См};$$

$$\underline{Y}_b = \frac{1}{Z_b} = \frac{1}{40\lambda^{j30^\circ}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \lambda^{-j30^\circ} = (2,165 - j1,25) \cdot 10^{-2}, \text{ См}$$

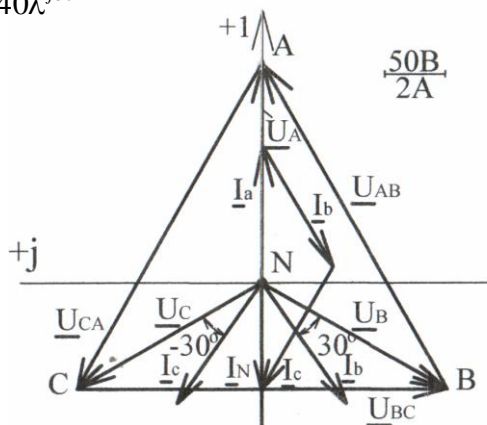


Рис. 2

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{40\lambda^{-j30^\circ}} = 2,5 \cdot 10^{-2} \lambda^{j30^\circ} = (2,165 + j1,25) \cdot 10^{-2}, \text{См.}$$

Узловое напряжение

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} \quad (1)$$

Определим отдельно числитель и знаменатель этого выражения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c &= 220 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} + 220\lambda^{-j120^\circ} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \lambda^{-j30^\circ} + \\ &+ 220\lambda^{j120^\circ} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \lambda^{j30^\circ} = 5,5(1 + \lambda^{-j150^\circ} + \lambda^{j150^\circ}) = \\ &= 5,5(1 - 0,866 - j0,5 - 0,866 + j0,5) = 5,5(-0,732) = -4,026 \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c &= (2,5 + 2,165 - j1,25 + 2,165 + j1,25) \cdot 10^{-2} = \\ &= 6,83 \cdot 10^{-2} \text{ См.} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_N = \frac{-4,026}{6,83 \cdot 10^{-2}} = -58,95 \text{ В.}$$

Фазные напряжения приемника:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N = 220 + 58,95 = 278,95 \text{ В;}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N &= -110 - j190,5 + 58,95 = -51,05 - j190,5 = \\ &= 197,2\lambda^{-j105^\circ}, \text{ В;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N &= -110 + j190,5 + 58,95 = -51,05 + j190,5 = \\ &= 197,2\lambda^{j105^\circ}, \text{ В.} \end{aligned}$$

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{278,95}{40} = 6,974 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{197,2\lambda^{-j105^\circ}}{40\lambda^{j30^\circ}} = 4,93\lambda^{-j135^\circ} = (-3,486 - j3,486), \text{ А;}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{197,2\lambda^{j105^\circ}}{40\lambda^{-j30^\circ}} = 4,93\lambda^{j135^\circ} = (-3,486 + j3,486), \text{ А.}$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

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

$$6,974 - 3,486 - j3,486 - 3,486 + j3,486 \approx 0.$$

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 278,95 \cdot 6,974 + 197,2\lambda^{-j105^\circ} \cdot 4,93\lambda^{j135^\circ} + \\ &+ 197,2\lambda^{j105^\circ} \cdot 4,93\lambda^{-j135^\circ} = 1945,4 + 972,2\lambda^{j30^\circ} + 972,2\lambda^{-j30^\circ} = \\ &= 1945,4 + 842 + j486 + 842 - j486 = 3629,4 \text{ В}\cdot\text{А}; \end{aligned}$$

$$P = 3629,4 \text{ Вт}, Q = 0.$$

Векторная диаграмма для режима 2 построена на рис. 3.

*Режим 3. Разгрузка одной фазы (например, фазы b приемника) без нулевого провода.* В этом режиме сопротивление фазы  $b$   $Z_b = \infty$ , а проводимость этой фазы  $Y_b = 0$ .

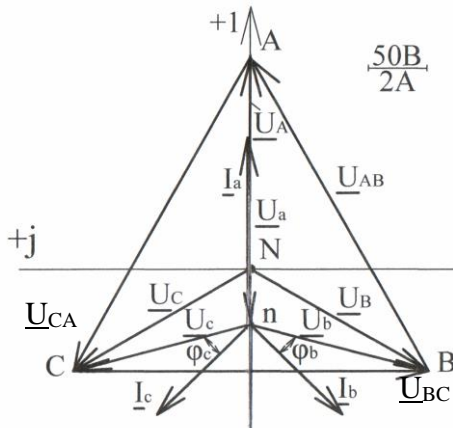


Рис. 3

Узловое напряжение

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_c};$$

Числитель и знаменатель этого выражения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_C \underline{Y}_c &= 220 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} + 220\lambda^{j120^\circ} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \lambda^{j30^\circ} = 5,5(1 + \\ &+ \lambda^{j150^\circ}) = 5,5(1 - 0,866 + j0,5) = 0,737 + j2,75 = 2,847\lambda^{j75^\circ}, \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\underline{Y}_a + \underline{Y}_c = (2,5 + 2,165 + j1,25) \cdot 10^{-2} = (4,665 + j1,25) \cdot 10^{-2} = 4,83 \cdot 10^{-2} \lambda^{j15^\circ}, \text{ См};$$

$$\underline{U}_N = \frac{2,847 \lambda^{j75^\circ}}{4,83 \cdot 10^{-2} \lambda^{j15^\circ}} = 58,94 \lambda^{j60^\circ} = (29,47 + j51,04), \text{ В}.$$

Фазные напряжения приемника:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_A - \underline{U}_N = 220 - 29,47 - j51,04 = \\ &= 190,53 - j51,04 = 197,25 \lambda^{-j150^\circ}, \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{U}_B - \underline{U}_N = -110 - j190,5 - 29,47 - j51,04 = \\ &= -139,47 - j241,54 = 278,91 \lambda^{-j120^\circ}, \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_c &= \underline{U}_C - \underline{U}_N = -110 + j190,5 - 29,47 - j51,04 = \\ &= -139,47 + j139,46 = 197,24 \lambda^{j135^\circ}, \text{ В}. \end{aligned}$$

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{197,25 \lambda^{-j15^\circ}}{40} = 4,931 \lambda^{-j15^\circ} = (4,763 - j1,276), \text{ А};$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{\underline{U}_b}{\infty} = 0;$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{197,24 \lambda^{j135^\circ}}{40 \lambda^{-j30^\circ}} = 4,931 \lambda^{j165^\circ} = (-4,763 + j1,276), \text{ А}.$$

Проверка по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c &= 0; \\ 4,763 - j1,276 - 4,763 + j1,276 &= 0. \end{aligned}$$

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U}_a^* \underline{I}_a + \underline{U}_b^* \underline{I}_b + \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 197,25 \lambda^{-j15^\circ} \cdot 4,931 \lambda^{j15^\circ} + \\ &+ 197,24 \lambda^{j135^\circ} \cdot 4,931 \lambda^{-j165^\circ} = 972,6(1 \lambda^{j0^\circ} + 1 \lambda^{-j30^\circ}) = \\ &= 972,6(1,866 - j0,5) = (1815 - j486,3) = 1879 \lambda^{-j15^\circ}, \text{ ВА}; \\ S &= 1879 \text{ ВА}, P = 1815 \text{ Вт}, Q = -486,3 \text{ вар}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма для режима 3 построена на рис. 4.

Из расчетов и векторной диаграммы (рис.4) следует, что напряжение на разгружаемой фазе приемника возрастает ( $U_b = 279 \text{ В}$ ) по сравнению с фазным напряжением генератора ( $U_B = 220 \text{ В}$ ); система фазных напряжений приемника несимметрична, так как возникло узловое напряжение ( $U_N=59 \text{ В}$ ); ток в разгружаемой фазе  $I_b$  равен нулю, а токи в двух других фазах одинаковы по величине ( $I_a = I_c = 4,9 \text{ А}$ ) и находятся в противофазе (сдвинуты на угол, равный  $180^\circ$ ).

*Режим 4. Короткое замыкание одной фазы без нулевого провода.* Предположим, что фаза  $b$  приемника замкнута накоротко, тогда  $Z_b = 0$ , а  $Y_b = \infty$ .

Узловое напряжение

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{\infty}{\infty}$$

Раскроем неопределенность, разделив числитель и знаменатель на  $\underline{Y}_b$ :

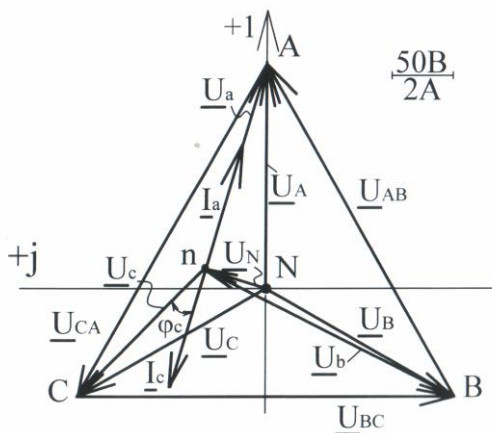


Рис. 4

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \frac{Y_a}{Y_b} + \underline{U}_B + \underline{U}_C \frac{Y_c}{Y_b}}{\frac{Y_a}{Y_b} + 1 + \frac{Y_c}{Y_b}} = \underline{U}_B = 220\lambda^{-j120^\circ} =$$

$$= (-110 - j190,5), \text{ В.}$$

Фазные напряжения приемника:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N = 220 + 110 + j190,5 = 330 + j190,5 = 381\lambda^{j30^\circ} =$$

$$= \underline{U}_{AB};$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N = \underline{U}_B - \underline{U}_B = 0;$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N = -110 + j190,5 + 110 + j190,5 = j381 = 381\lambda^{j90^\circ} =$$

$$= \underline{U}_{CB} = -\underline{U}_{BC}.$$

Таким образом, напряжение на короткозамкнутой фазе равно нулю, а на двух других фазах оно возрастает до линейного напряжения.

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{381\lambda^{j30^\circ}}{40} = 9,525\lambda^{j30^\circ} = (8,249 + j4,763), \text{ А;}$$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{0}{0}, \text{ неопределенность!}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{381\lambda^{j90^\circ}}{40\lambda^{-j30^\circ}} = 9,525\lambda^{j120^\circ} = (-4,763 + j8,249), \text{ А}$$

Раскроем неопределенность для тока  $\underline{I}_b$  по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0, \text{ откуда}$$

$$\underline{I}_b = -(\underline{I}_a + \underline{I}_c) = -(8,249 + j4,763 - 4,763 + j8,249) =$$

$$= -(3,486 + j13,012) = -3,486 - j13,012 = 13,471\lambda^{-j105^\circ}, \text{ А.}$$

Из расчета видно, что при коротком замыкании одной фазы токи во всех фазах существенно возрастают, особенно в короткозамкнутой фазе.

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 381 \lambda^{j30^\circ} \cdot 9,525 \lambda^{-j30^\circ} + \\ & 381 \lambda^{j90^\circ} \cdot 9,525 \lambda^{-j120^\circ} = 3629 (\lambda^{j0^\circ} + \lambda^{-j30^\circ}) = 3629 (1 + 0,866 - j0,5) = \\ & = 6772 - j1815 = 7011 \lambda^{-j15^\circ}, \text{ ВА}; \end{aligned}$$

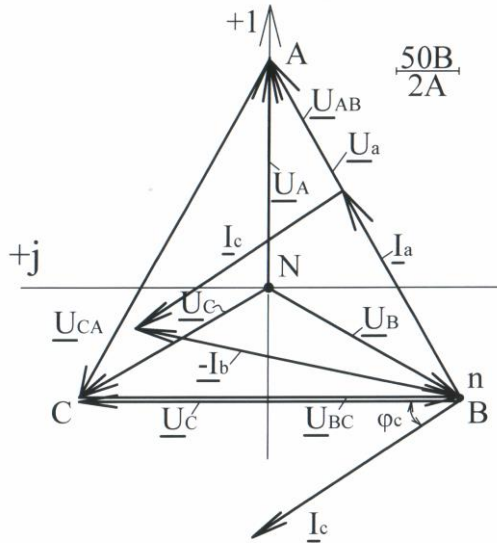


Рис. 5

$$S = 7011 \text{ ВА}, P = 6772 \text{ Вт}, Q = -1815 \text{ вар.}$$

Векторная диаграмма для режима 4 построена на рис. 5.

**З а д а ч а 3.** Трехфазный симметричный электроприёмник, соединенный в треугольник, комплексные сопротивления отдельных фаз которого заданы:  $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = 38 \lambda^{j60^\circ}$ , Ом, подключен к симметричному генератору с линейным напряжением  $\underline{U}_{\text{Л}} = 380 \text{ В}$  (рис. 6). Определить фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощность приемника, показания ваттметров и активную мощность приемника по



показаниям этих приборов. Построить векторную диаграмму напряжений и токов.

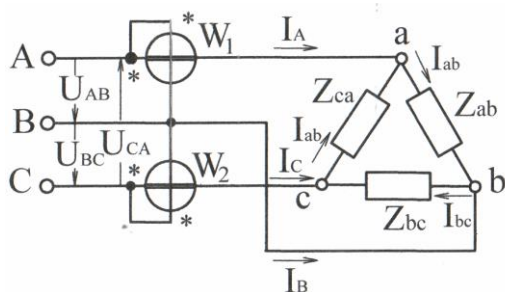


Рис. 6

**Решение:** При соединении отдельных фаз приемника треугольником линейные и фазные напряжения равны:

$$\underline{U}_\phi = \underline{U}_l = 380 \text{ В.}$$

Запишем фазные напряжения в комплексной форме:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_\phi = 380 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_\phi \lambda^{-j120^\circ} = 380 \lambda^{-j120^\circ} = (-190 - j329), \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_\phi \lambda^{j120^\circ} = 380 \lambda^{j120^\circ} = (-190 + j329), \text{ В.}$$

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{380}{38 \lambda^{j60^\circ}} = 10 \lambda^{-j60^\circ} = (5 - j8,66), \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380 \lambda^{-j120^\circ}}{38 \lambda^{j60^\circ}} = 10 \lambda^{-j180^\circ} = -10 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{380 \lambda^{j120^\circ}}{38 \lambda^{j60^\circ}} = 10 \lambda^{j60^\circ} = (5 + j8,66), \text{ А.}$$

Следовательно,  $\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = \underline{I}_\phi = 10 \text{ А.}$

Линейные токи:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 5 - j8,66 - 5 - j8,66 = -j17,32 = 17,32\lambda^{-j90^\circ}, \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -10 - 5 + j8,66 = -15 + j8,66 = 17,32\lambda^{j150^\circ}, \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 5 + j8,66 + 10 = 15 + j8,66 = 17,32\lambda^{j30^\circ}.$$

*Проверка:* так как линейные токи образуют замкнутый треугольник, то геометрическая сумма их всегда равна нулю:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C &= 0; \\ -j17,32 - 15 + j8,66 + 15 + j8,66 &= 0. \end{aligned}$$

Линейные токи при симметричном режиме одинаковы

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C = \underline{I}_L = 17,32 \text{ A},$$

а соотношение линейного и фазного токов составляет

$$\frac{I_L}{I_\phi} = \frac{17,32}{10} = 1,732 = \sqrt{3}.$$

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U}_{ab}^* \underline{I}_{ab} + \underline{U}_{bc}^* \underline{I}_{bc} + \underline{U}_{ca}^* \underline{I}_{ca} = \\ &= 380 \cdot 10\lambda^{j60^\circ} + 380\lambda^{-j120^\circ} \cdot 10\lambda^{j180^\circ} + 380\lambda^{j120^\circ} \cdot 10\lambda^{-j60^\circ} = \\ &= 3 \cdot 3800\lambda^{j60^\circ} = 11400\lambda^{j60^\circ} = (5700 + j9873) \text{ ВА}, \end{aligned}$$

откуда  $S = 11400 \text{ ВА}$ ,  $P = 5700 \text{ Вт}$ ,  $Q = 9873 \text{ вар}$ .

Показания ваттметров:

а) По токовой обмотке первого ваттметра  $W_1$  протекает ток  $I_A$ , а к обмотке напряжения его приложено напряжение  $\underline{U}_{AB}$ . Поэтому для определения показания этого ваттметра комплексным методом надо перемножить комплексы

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab}^* \text{ и } \underline{I}_A, \text{ т.е.}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_{ab}^* \underline{I}_A = 380 \cdot 17,32\lambda^{j90^\circ} = 6581,6\lambda^{j90^\circ} = j6581,6, \text{ ВА}.$$

Так как вещественная часть комплекса  $\underline{S}_1$  равна нулю, то показание первого ваттметра  $P_{w1} = 0$ .

б) По токовой обмотке второго ваттметра  $W_2$  протекает ток  $I_C$ , а к обмотке напряжения этого ваттметра приложено напряжение

$$\underline{U}_{CB} = -\underline{U}_{BC}.$$

$$\text{Поэтому } \underline{S}_2 = \underline{U}_{CB} \underline{I}_C^* = -\underline{U}_{BC} \underline{I}_C^*;$$

$$-\underline{U}_{BC} = -380\lambda^{-j120^\circ} = 380\lambda^{j180^\circ}\lambda^{-j120^\circ} = 380\lambda^{j60^\circ} \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= 380\lambda^{j60^\circ} \cdot 17,32\lambda^{-j30^\circ} = 6581,6\lambda^{j30^\circ} = \\ &= (5700 + j3291) \text{ ВА}; \end{aligned}$$

Показание второго ваттметра равно вещественной части комплекса  $\underline{S}_2$ , т.е.  $P_{w2} = 5700$  Вт.

Алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров равна активной мощности трехфазной цепи:

$$P = P_{w1} + P_{w2} = 0 + 5700 = 5700 \text{ Вт.}$$

Векторная диаграмма для схемы (рис. 6.) построена на рис. 7.

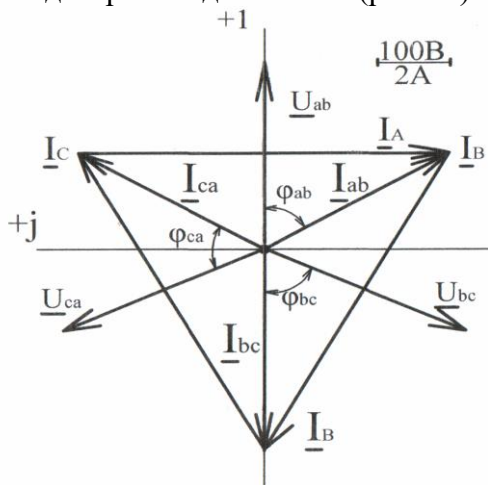


Рис. 7

**З а д а ч а 4.** Трехфазный несимметричный приемник, соединенный в треугольник (рис. 6), имеет следующие

фазные сопротивления:  $\underline{Z}_{ab} = 38\lambda^{j60^\circ}$ ,  $\underline{Z}_{bc} = 38 \text{ Ом}$ ,  
 $\underline{Z}_{ca} = 38\lambda^{-j60^\circ}$ .

Система напряжений источника питания симметрична,  $U_{\phi} = 380 \text{ В}$ . Определить фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощности приемника; по показанию ваттметров определить активную мощность приемника. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

**Р е ш е н и е :** Фазные (линейные) напряжения трехфазной цепи:

$$\underline{U}_{ab} = U_{\phi} = 380 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{bc} = U_{\phi}\lambda^{-j120^\circ} = 380\lambda^{-j120^\circ} = (-190 - j329), \text{ В};$$

$$\underline{U}_{ca} = U_{\phi}\lambda^{j120^\circ} = 380\lambda^{j120^\circ} = (-190 + j329), \text{ В}.$$

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{380}{38\lambda^{j60^\circ}} = 10\lambda^{-j60^\circ} = (5 - j8,66), \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380\lambda^{-j120^\circ}}{38} = 10\lambda^{-j120^\circ} = (-5 - j8,66), \text{ А};$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{380\lambda^{j120^\circ}}{38\lambda^{-j60^\circ}} = 10\lambda^{j180^\circ} = -10 \text{ А}.$$

Линейные токи:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 5 - j8,66 + 10 = 15 - j8,66 = 17,32\lambda^{-j30^\circ}, \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -5 - j8,66 - 5 + j8,66 = -10, \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -10 + 5 + j8,66 = -5 + j8,66 = 10\lambda^{j120^\circ}, \text{ А}.$$

Проверка:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0;$$

$$15 - j8,66 - 10 - 5 + j8,66 = 0.$$

Комплексная мощность приемника:

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = \\ &= 380 \cdot 10 \lambda^{j60^\circ} + 380 \lambda^{-j120^\circ} \cdot 10 \lambda^{j120^\circ} + 380 \lambda^{j120^\circ} \cdot 10 \lambda^{-j180^\circ} = \\ &= 3800 \lambda^{j60^\circ} + 3800 + 3800 \lambda^{-j60^\circ} = \\ &= 1900 + j3291 + 3800 + 1900 - j3291 = 7600 \text{ ВА}, \end{aligned}$$

Следовательно,  $P = S = 7600$  Вт,  $Q = 0$

Показания ваттметров:

$$\begin{aligned} \underline{S}_1 &= \underline{U}_{ab} \underline{I}_A^* = 380 \cdot 17,32 \lambda^{j30^\circ} = 6582 \lambda^{j30^\circ} = \\ &= (5700 + j3291) \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Показание первого ваттметра ( $W_1$ )  $P_{w1} = 5700$  Вт.

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= \underline{U}_{CB} \underline{I}_C^* = 380 \lambda^{j60^\circ} \cdot 10 \lambda^{-j120^\circ} = 3800 \lambda^{-j60^\circ} = \\ &= (1900 - j3291) \text{ ВА}; \end{aligned}$$

Показание второго ваттметра ( $W_2$ )  $P_{w2} = 1900$  Вт.

Активная мощность трехфазного приемника по показанию ваттметров:

$$P = P_{w1} + P_{w2} = 5700 + 1900 = 7600 \text{ Вт}.$$

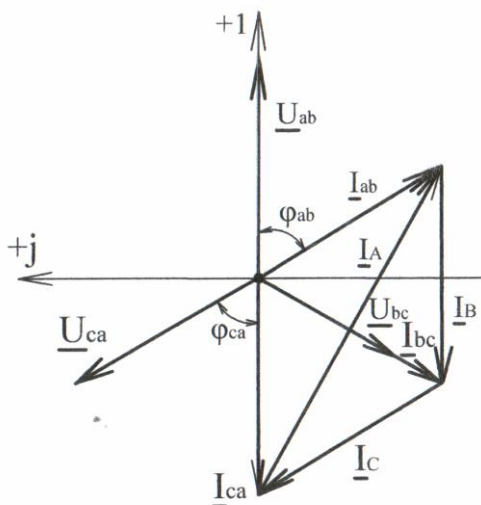


Рис. 8

Векторная диаграмма для несимметричного режима построена на рис. 8.

Из векторной диаграммы видно, что при несимметричном режиме работы цепи системы фазных и линейных токов являются несимметричными.

**З а д а ч а 5.** Дано: модули фазных и междуфазных (линейных) напряжений трехфазного приемника, соединенного звездой:  $U_a=225\text{В}$ ,  $U_b=285\text{В}$ ,  $U_c=180\text{В}$ ,  $U_{ab}=400\text{В}$ ,  $U_{bc}=416\text{В}$ ,  $U_{ca}=370\text{В}$ .

Требуется построить топографическую диаграмму напряжений.

**Р е ш е н и е :** В соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{ca} = 0; \quad (2)$$

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a. \quad (3)$$

Из выражения (2) следует, что топографическая диаграмма междуфазных напряжения представляет собой треугольник, поэтому ее построения сводится к построению треугольника по трем заданным сторонам.

Порядок построения:

1. Выбираем масштаб топографической диаграммы.
2. В выбранном масштабе строим (в произвольно выбранном направлении) один из векторов системы линейных напряжений, например,  $U_{bc}$  (рис. 9).

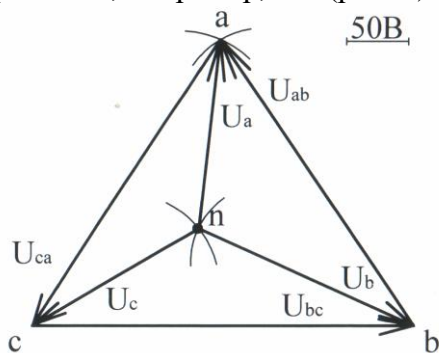


Рис. 9

3. Раствором циркуля, равным в масштабе напряжению  $U_{ab}$ , из точки " b " делаем первую засечку (1), а из точки " c " раствором, равным напряжению  $U_{ca}$ , – вторую засечку(2). Точка пересечения засечек определяет положение точки "a" на топографической диаграмме, (рис. 9). Соединяем точку "a" с точками "b" и "c" и указываем направления векторов  $U_{ab}$  и  $U_{ca}$  в соответствии с выражением (2).

4. Геометрическая интерпретация каждого из соотношений выражения (3) представляет собой также треугольники. В связи с этим из точек " b " и "c" делаем засечки (3) и (4) раствором циркуля, соответственно равным в выбранном масштабе напряжению  $U_b$  и  $U_c$ . Пересечение засечек (3) и (4) определяет на диаграмме положение нейтральной точки приемника  $n$ . Соединив точку  $n$  с точками а, b ,и c, получаем векторы фазных напряжений  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ .

**З а д а ч а 6.** Дано: электрическая цепь (рис. 10).  $L1$  и  $L2$  – лампы накаливания. Система напряжений генератора симметрична. Проводимости ламп  $Y_1=Y_2=Y$  См, проводимость конденсатора  $Y_c=j^y$  См. Фазное напряжение генератора  $U_{\phi Г}=220$  В.

Определить, какая из ламп будет светить ярче:

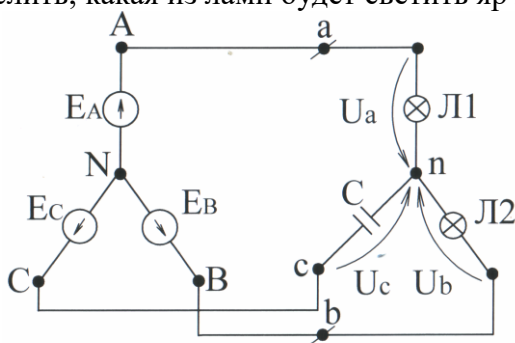


Рис. 10

- при прямом порядке следования фаз,
- при обратном порядке следования фаз.

**З а д а ч а 7.** Дано: система напряжения трехфазного генератора симметрична,  $U_{\text{л}} = 380\text{В}$ . Приемник соединён звездой без нейтрального провода, сопротивление фаз приёмника  $Z_a = (6 + j8)\ \text{Ом}$ ;  $Z_b = (6 + j8)\ \text{Ом}$ ;  $Z_c = \infty$ .

Определить:

1. Фазные напряжения приемника  $U_a, U_b, U_c$ ;
2. Активную и реактивную мощность трехфазного приемника.

**З а д а ч а 8.** Дано: трехфазный приемник соединен звездой без нейтрального провода,  $Z_c = 0$ , остальные исходные данные взять из задачи 7.

Определить:

1. Ток  $I_c$ ;
2. Активную и реактивную мощность трехфазного приемника.

**З а д а ч а 9.** Симметричный приемник питается от генератора (рис. 11) с несимметричной системой фазных напряжений (рис. 12):

$$\underline{U}_A = 120\text{В}, \underline{U}_B = 120\lambda^{-j90^\circ}\text{В}, \underline{U}_C = 120\lambda^{j90^\circ}\text{В}.$$

Сопротивления приемника прямой последовательности

$$\underline{Z}_1 = 3 + j1 = 3,16\lambda^{j18,43^\circ}\ \text{Ом},$$

обратной последовательности

$$\underline{Z}_2 = 1 + j3 = 3,16\lambda^{j71,57^\circ}\ \text{Ом},$$

нулевой последовательности

$$\underline{Z}_{0\text{II}} = j1 = 1\lambda^{j90^\circ}\ \text{Ом}.$$

Определить показания линейных амперметров и построить векторные диаграммы напряжений и токов.



**Решение:**

1. Систему фазных напряжений генератора разложим на симметричные составляющие.

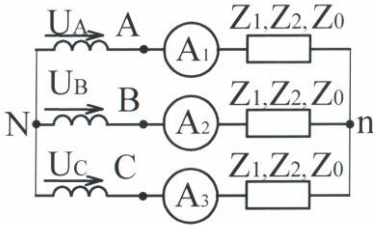


Рис. 11

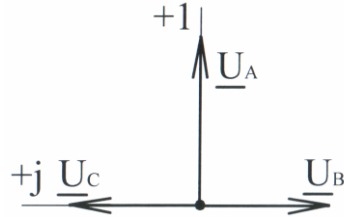


Рис. 12

Напряжение прямой последовательности:

$$\underline{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C);$$

$$\underline{U}_A = 120\text{В}, a\underline{U}_B = \lambda^{j120^\circ} \cdot 120\lambda^{-j90^\circ} = 120\lambda^{j30^\circ} = (103,9 + j60)\text{В},$$

$$a^2\underline{U}_C = \lambda^{-j120^\circ} \cdot 120\lambda^{j90^\circ} = 120\lambda^{-j30^\circ} = (103,9 - j60)\text{В},$$

$$\underline{U}_{A1} = \frac{1}{3}(120 + 103,9 + j60 + 103,9 - j60) = 109,3\text{В}.$$

Напряжение обратной последовательности:

$$\underline{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C);$$

$$\underline{U}_A = 120\text{В}, a^2\underline{U}_B = \lambda^{-j120^\circ} \cdot 120\lambda^{-j90^\circ} = 120\lambda^{j150^\circ} = (-103,9 + j60)\text{В};$$

$$a\underline{U}_C = \lambda^{j120^\circ} \cdot 120\lambda^{j90^\circ} = 120\lambda^{j210^\circ} = (-103,9 - j60)\text{В};$$

$$\underline{U}_{A2} = \frac{1}{3}(120 - 103,9 + j60 - 103,9 - j60) = -29,3 = 29,3\lambda^{-j180^\circ}\text{В}.$$

Напряжение нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A0} = \underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0} &= \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}(120 - j120 + j120) = 40 \text{ В}. \end{aligned}$$

Проверка правильности разложения несимметричной системы напряжений  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  на симметричные составляющие  $\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{A2}, \underline{U}_{A0}$ :

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = 109,3 - 29,3 + 40 = 120 \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= \underline{a}^2 \underline{U}_{A1} + \underline{a} \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = 109,3 \lambda^{-j120^\circ} + 29,3 \lambda^{-j180^\circ} \lambda^{j120^\circ} + \\ &+ 40 = -54,65 - j94,65 + 14,65 - j25,35 + 40 = -j120 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_C &= \underline{a} \underline{U}_{A1} + \underline{a}^2 \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0} = 109,3 \lambda^{j120^\circ} + 29,3 \lambda^{-j180^\circ} \lambda^{-j120^\circ} + \\ &+ 40 = -54,65 + j94,65 + 14,65 + j25,35 + 40 = j120 \text{ В}. \end{aligned}$$

Векторные диаграммы симметричных составляющих напряжений и заданной системы фазных напряжений генератора построены на рис. 13:

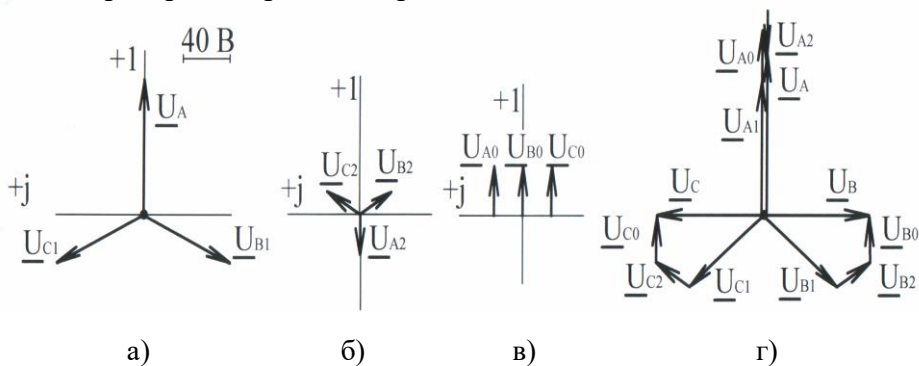


Рис. 13

рис. 13, а – симметричная составляющая прямой последовательности; рис. 13, б – обратной последовательности; рис. 13, в – нулевой последовательности; рис. 13, г – суммарная векторная диаграмма, дающая несимметричную систему фазных напряжений генератора.

2. Для прямой и обратной симметричных составляющих фазные напряжения генератора и приемника равны между собой, так как нагрузка фаз одинакова.

Узловое напряжение нулевой последовательности равно фазному напряжению нулевой последовательности, т.е.  $\underline{U}_{N0} = \underline{U}_{A0} = 40\text{В}$ . Токи нулевой последовательности при отсутствии нулевого провода (рис.11) равны нулю, так как  $Z_0 = \infty$ .

Фазные токи прямой последовательности определяем по закону Ома:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_{A1}}{\underline{Z}_1} = \frac{109,3}{3,16\lambda^{j18,43^\circ}} = 34,6\lambda^{-j18,43^\circ} = (32,83 - j10,94)\text{А}.$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{B1} &= \frac{\underline{U}_{B1}}{\underline{Z}_1} = \frac{a^2 \underline{U}_{A1}}{\underline{Z}_1} = a^2 \underline{I}_{A1} = \lambda^{-j120^\circ} \cdot 34,6\lambda^{-j18,43^\circ} = \\ &= 34,6\lambda^{-j138,43^\circ} = (-25,9 - j22,96)\text{А}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{C1} &= \frac{\underline{U}_{C1}}{\underline{Z}_1} = \frac{a \underline{U}_{A1}}{\underline{Z}_1} = a \underline{I}_{A1} = \lambda^{j120^\circ} \cdot 34,6\lambda^{-j18,43^\circ} = \\ &= 34,6\lambda^{j101,57^\circ} = (-6,94 + j34)\text{А}.\end{aligned}$$

Проверка:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1} &= 0; \quad 32,83 - j10,94 - 25,9 - j22,96 - \\ &- 6,94 + j34 = (-0,01 + j0,1) \approx 0.\end{aligned}$$

Фазные токи обратной последовательности:

$$\underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_{A2}}{\underline{Z}_2} = \frac{29,3\lambda^{-j180^\circ}}{3,16\lambda^{j71,57^\circ}} = 9,272\lambda^{j251,57^\circ} = (-2,931 - j8,796)\text{А};$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{B2} &= \frac{\underline{U}_{B2}}{\underline{Z}_2} = \frac{a \underline{U}_{A2}}{\underline{Z}_2} = a \underline{I}_{A2} = \lambda^{j120^\circ} \cdot 9,272\lambda^{j251,57^\circ} = \\ &= 9,272\lambda^{j371,57^\circ} = 9,272\lambda^{j11,57^\circ} = (9,084 + j1,86)\text{А};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{C2} &= \frac{\underline{U}_{C2}}{\underline{Z}_2} = \frac{a^2 \underline{U}_{A2}}{\underline{Z}_2} = a^2 \underline{I}_{A2} = \lambda^{-j120^\circ} \cdot 9,272\lambda^{j251,57^\circ} = \\ &= 9,272\lambda^{j131,57^\circ} = (-6,152 + j6,937) \text{ A.} \end{aligned}$$

Проверка:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2} &= 0; \quad -2,931 - j8,796 + 9,084 + j1,86 - \\ &\quad - 6,152 + j6,937 = 0,001 + j0,001 \approx 0. \end{aligned}$$

3. Результирующие фазные (линейные) токи:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = 32,83 - j10,94 - 2,931 - j8,796 = \\ &= 29,9 - j19,74 = 35,83\lambda^{-j33,43^\circ} \text{ A;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0} = -25,9 - j22,96 + 9,084 + j1,86 = \\ &= 16,82 - j21,1 = 26,98\lambda^{-j51,44^\circ} \text{ A;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0} = -6,94 + j34 - 6,152 + j6,937 = \\ &= -13,09 + j40,937 = 42,98\lambda^{j107,73^\circ} \text{ A.} \end{aligned}$$

Показания амперметров:

$$A_1 \rightarrow I_A = 35,83\text{A}; \quad A_2 \rightarrow I_B = 26,98\text{A}; \quad A_3 \rightarrow I_C = 42,98\text{A}.$$

На рис. 14 построены векторные диаграммы:

рис. 14, а – диаграмма симметричных составляющих токов прямой последовательности;

рис. 14, б – диаграмма токов обратной последовательности;

рис. 14, в – диаграмма фазных токов приемника.

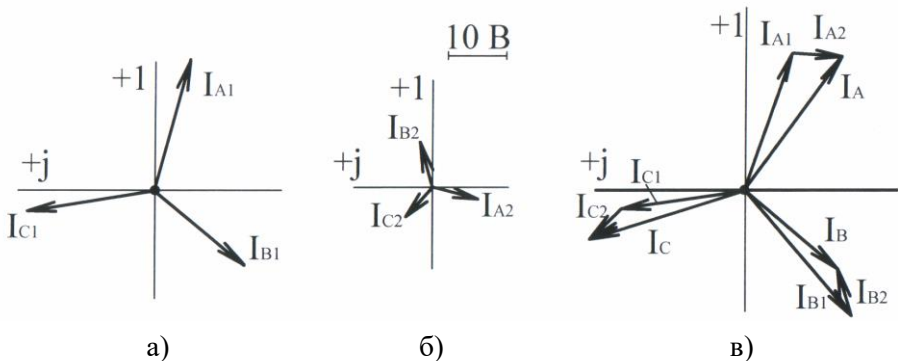


Рис. 14

## 2. Индивидуальные задания

### Индивидуальное задание 7.1

#### Расчет трехфазной электрической цепи при соединении однофазных приемников звездой.

Дано:

Схема трехфазной электрической цепи (рис.15)

Система напряжений трехфазного источника симметрична,  $U_l = 220$  В, частота  $f = 50$  Гц. Параметры однофазных приемников определить по табл. 1 в соответствии с индивидуальным шифром и занести их в табл. 2.

Требуется:

1. Определить напряжения  $U_a, U_b, U_c, U_N, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  и токи  $I_A, I_B, I_C, I_N$  в следующих режимах:

- несимметричный при  $Z_N = 0$ , ключ  $K$  замкнут;
- несимметричный при  $Z_N = \infty$ , ключ  $K$  разомкнут;
- разгрузка одной фазы трехфазного приемника при  $Z_N = 0$ , ключ  $K$  замкнут;
- разгрузка одной фазы трехфазного приемника при  $Z_N = \infty$ , ключ  $K$  разомкнут;

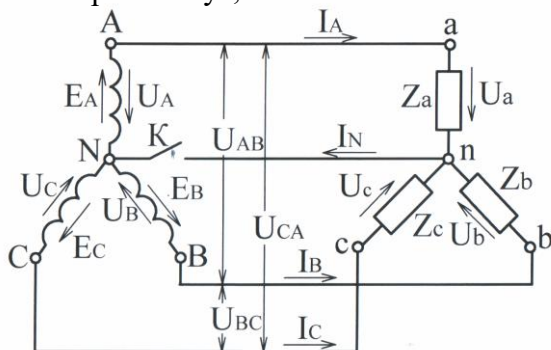


Рис. 15

д) короткое замыкание фазы приемника при  $Z_N = \infty$ , ключ  $K$

разомкнут;

Таблица 1

Первая цифра шифра	$R_2$ Ом	С мкФ	Вторая цифра шифра	В фазы приёмника включены			Раз-грузка и к.з. фазы	$R_k$ Ом	L		Третья цифра шифра	$R_l$ Ом	$R_3$ Ом
				"a"	"b"	"c"			Гн	Ом			
1	30	24	1	$R_2R_kL$	$R_3C$	$R_l$	"b"	20,5	0,286	1	150	50	
2	50	40	2	$R_2R_kL$	$R_l$	$R_3C$	"c"	14,5	0,418	2	200	100	
3	70	60	3	$R_3C$	$R_2R_kL$	$R_l$	"a"	13,5	0,277	3	100	150	
4	40	40	4	$R_3C$	$R_l$	$R_2R_kL$	"b"	14	0,315	4	100	100	
5	60	60	5	$R_l$	$R_3C$	$R_2R_kL$	"a"	13	0,264				
6	20	24	6	$R_l$	$R_2R_kL$	$R_3C$	"c"	9	0,146				
7	80	60	7	$R_3C$	$R_2R_kL$	$R_l$	"a"	12	0,258				
8	40	24	8	$R_l$	$R_3C$	$R_2R_kL$	"b"	10,5	0,208				

2. Определить напряжения  $U_a, U_b, U_c, U_N, U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  и токи  $I_A, I_B, I_C, I_N$  для симметричного приемника  $Z_a = Z_b = Z_c = 100e^{j0^\circ}, \text{ Ом}$ .
3. Построить топографические диаграммы напряжений с векторными диаграммами токов для всех режимов п.1. и п.2. задания.

Таблица 2

$R_k$	$L$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C$	В фазы приемника включено		
Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	мкФ	"a"	"b"	"c"

### Индивидуальное задание 7.2

#### Расчет трехфазной электрической цепи при соединении однофазных приемников треугольником.

#### Дано:

Схема трехфазной электрической цепи (рис. 16).

Система напряжений трехфазного источника симметрична,  $U_{\Delta} = 220 \text{ В}$ , частота  $f = 50 \text{ Гц}$ . Параметры однофазных приемников определить по табл. 3 в соответствии с индивидуальным шифром и занести их в табл. 4.

#### Требуется:

1. Определить фазные и линейные токи, активную мощность отдельных фаз и всего приемника в следующих режимах:
  - а) несимметричном полнофазном;
  - б) при обрыве одной фазы приемника.
2. Определить эти же величины для симметричного приемника  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = 200e^{j0^\circ}, \text{ Ом}$ .

3. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для всех режимов п.1 и 2 задания.

Таблица 3

Первая цифра шифра	$R_2$ Ом	$C$ мкФ	Вторая цифра шифра	В фазы приёмника включены			Раз-грузка фазы приёмника	$R_k$ Ом	$L$ Гн	Третья цифра шифра	$R_l$ Ом	$R_3$ Ом
				"ab"	"bc"	"ca"						
1	120	16	1	$R_2R_kL$	$R_l$	$R_3C$	"bc"	20,5	0,286	1	200	150
2	150	20	2	$R_l$	$R_3C$	$R_2R_kL$	"bc"	14,5	0,418	2	150	150
3	110	12	3	$R_l$	$R_2R_kL$	$R_3C$	"ca"	13,5	0,277	3	150	200
4	100	24	4	$R_2R_kL$	$R_3C$	$R_l$	"ca"	14	0,315	4	200	200
5	150	40	5	$R_3C$	$R_2R_kL$	$R_l$	"ab"	13	0,264			
6	130	20	6	$R_3C$	$R_l$	$R_2R_kL$	"bc"	9	0,146			
7	140	36	7	$R_l$	$R_2R_kL$	$R_3C$	"ab"	12	0,258			
8	100	15	8	$R_3C$	$R_2R_kL$	$R_l$	"ca"	10,5	0,208			



4. Определить показания ваттметров, п. 1 и п. 2 задания, и показать, что алгебраическая сумма показаний ваттметров равна активной мощности трехфазного приемника.

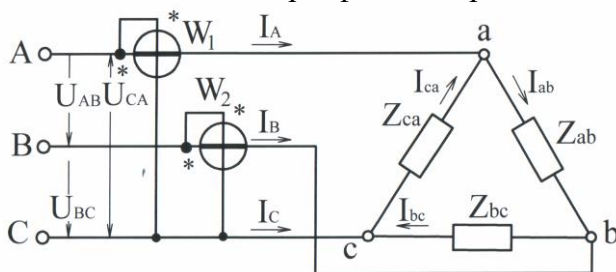


Рис. 16

Таблица 4

$R_k$	$L$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$C$	В фазы приемника включено		
Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	мкФ	"ab"	"bc"	"ca"

### Индивидуальное задание 7.3.

Расчет методом симметричных составляющих трехфазной симметричной цепи при несимметричной системе напряжений.

Дано:

Симметричный трехфазный приемник с сопротивлением прямой  $Z_1$ , обратной  $Z_2$  и нулевой  $Z_0$  последовательности, рис. 17.

Система напряжений  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  на зажимах приемника несимметрична (табл. 5).

Требуется:

1. Определить аналитически и графически симметричные составляющие фазных напряжений приемника.

2. Определить симметричные составляющие токов приемника.
3. Определить аналитически и графически фазные токи приемника.
4. Определить отношение активной мощности прямой последовательности к активной мощности трехфазного приемника.

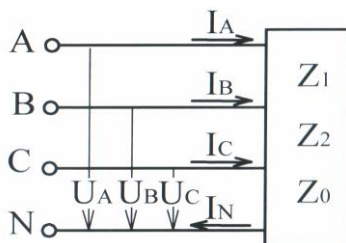


Рис.17

### 3. Лабораторные работы

#### Лабораторная работа 7.1.

#### Исследование трехфазной электрической цепи при соединении однофазных приемников звездой.

Цель работы: Физическое моделирование электромагнитных процессов в трехфазной электрической цепи при соединении однофазных приемников звездой. Выявление роли нулевого провода и экспериментальная проверка результатов расчета индивидуального задания 7.1.

#### Программа работы:

1. Экспериментально исследовать заданную в индивидуальном задании 7.1. трехфазную электрическую цепь в следующих несимметричных режимах:

а) несимметричная трехфазная цепь с нулевым проводом;

Таблица 5

Первая цифра шифра	$\underline{U}_a$		Вторая цифра шифра	$\underline{U}_b$		$Z_1$	$Z_2$		Третья цифра шифра	$\underline{U}_c$		$Z_0$
	В	Ом		В	Ом		В	Ом				
1	50e <sup>j0</sup>	10e <sup>j20</sup>	1	200e <sup>-j90</sup>	2e <sup>j40</sup>	1	200e <sup>j60</sup>	4e <sup>j45</sup>	1	200e <sup>j60</sup>	Ом	
2	100e <sup>j0</sup>	20e <sup>j40</sup>	2	250e <sup>-j150</sup>	5e <sup>j60</sup>	2	400e <sup>j90</sup>	2e <sup>j60</sup>	2	400e <sup>j90</sup>	Ом	
3	150e <sup>j0</sup>	5e <sup>j60</sup>	3	300e <sup>-j60</sup>	1e <sup>j90</sup>	3	100e <sup>j120</sup>	5e <sup>j0</sup>	3	100e <sup>j120</sup>	Ом	
4	200e <sup>j0</sup>	50e <sup>j30</sup>	4	400e <sup>-j120</sup>	10e <sup>j90</sup>	4	500e <sup>j150</sup>	10e <sup>j30</sup>	4	500e <sup>j150</sup>	Ом	
5	250e <sup>j0</sup>	25e <sup>j30</sup>	5	500e <sup>-j180</sup>	5e <sup>j45</sup>	5		5e <sup>j45</sup>			Ом	
6	300e <sup>j0</sup>	15e <sup>j0</sup>	6	100e <sup>-j30</sup>	3e <sup>j60</sup>	6		3e <sup>j60</sup>			Ом	
7	400e <sup>j0</sup>	40e <sup>j60</sup>	7	150e <sup>-j150</sup>	10e <sup>j30</sup>	7		10e <sup>j30</sup>			Ом	
8	500e <sup>j0</sup>	20e <sup>j60</sup>	8	50e <sup>j0</sup>	4e <sup>j0</sup>	8		4e <sup>j0</sup>			Ом	

Примечание: аргументы всех комплексов заданы в градусах.

б) несимметричная трехфазная цепь без нулевого провода;

в) разгрузка одной фазы трехфазного приемника с нулевым проводом;

г) разгрузка одной фазы трехфазного приемника без нулевого провода;

д) короткое замыкание одной фазы трехфазного приемника без нулевого провода.

2. Экспериментально исследовать заданную в индивидуальном задании 7.1 трехфазную электрическую цепь в симметричном режиме с нулевым и без нулевого провода.

#### Указания по подготовке к лабораторной работе

1. Выполнить индивидуальное задание 7.1.
2. Изучить содержание лабораторной работы 7.1.
3. В отчете к лабораторной работе 7.1:
  - 2.1 Начертить схему электрической цепи, аналогичную схеме, изображенной на рис. 18.
  - 2.2 Указать сопротивления фаз трехфазного приемника, соответствующие индивидуальному заданию 7.1.
  - 2.3 Подготовить таблицу расчетных и опытных данных 6, занести в нее результаты расчета цепи из индивидуального задания 7.1.
  - 2.4 Подготовить таблицу измерений 7.

#### Методические указания по выполнению работы

1. Собрать электрическую цепь, схема которой аналогична схеме рис. 18. При сборке цепи учесть, что обозначение элементов на стенде отличается от указанных обозначений в индивидуальном задании 7.1:

В задании 7.1:

катушка  $R_k, L$ ;  
резистор  $R_2$ ;  
резистор  $R_1$ ;  
резистор  $R_3$ ;

на стенде:

катушка  $L_{3к}$ ;  
реостат  $R_2$ ;  
реостат  $R_b$ ;  
реостат  $R_c$ .

На схеме электрической цепи указать номера выбранных амперметров (из  $A_1 \dots A_5$ ).

2. Для выполнения п. 1, а программы устанавливают сопротивления фаз трехфазного приемника одного из членов бригады и при замкнутом ключе К измеряют токи и напряжения трехфазной цепи в несимметричном режиме с нулевым проводом. Напряжения измеряются одним вольтметром, поочередно подключая его к соответствующим точкам электрической цепи:

линейные напряжения источника:  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ ;

линейные напряжения приемника:  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ ;

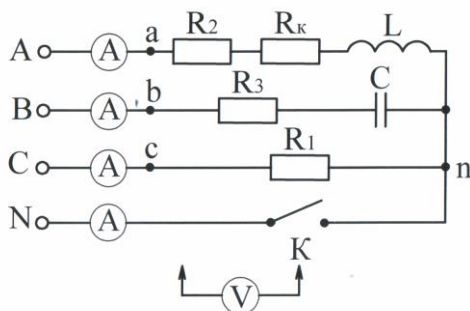
фазные напряжения источника:  $U_A, U_B, U_C$ ;

точки, к которым подключается V:  $A_N, B_N, C_N$ ;

фазные напряжения приёмника:  $U_a, U_b, U_c$ ;

точки, к которым подключается V:  $an, bn, cn$ ;

Для измерения узлового напряжения  $U_N$ , вольтметр подключается к точкам  $Nn$ .



$R_2=30 \text{ Ом};$   
 $R_k=20,5 \text{ Ом};$   
 $L=0,58 \text{ Гн};$   
 $R_1=50 \text{ Ом};$   
 $C=24 \text{ Ом};$   
 $R_1=150 \text{ Ом}.$

Рис.18

Результаты измерений записать в таблицу измерений 7.

Таблица 6

Режим работы	Способ определения	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_N$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$
		$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$											
1, а)	Расчёт	В	В	В	В	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А
	Опыт														
1, б)	Расчёт														
	Опыт														
1, в)	Расчёт														
	Опыт														
1, г)	Расчёт														
	Опыт														
1, д)	Расчёт														
	Опыт														
1, е)	Расчёт														
	Опыт														

Таблица измерений 7

Приборы в схеме, рис. 18		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$V$			
Измеряемые величины		$I_N$	$I_b$	$I_a$	$I_c$	$U_N$	$U_a$	$U_b$	$U_c$
Номи- наль- ные дан- ные прибо- ров	$\alpha_{\max}$ , дел	100	100	100	100	150	150	150	150
	$I_{ном}$ , А $U_{ном}$ , В	2А	2А	2,5А	2,5А	150 В	300 В	300 В	300 В
	$C_{пр}$	0,02 А/ дел	0,02 А/ дел	0,025 А/ дел	0,025 А/ дел	1 В/ дел	2 В/ дел	2 В/ дел	2 В/ дел
Резуль- таты изме- рений	1,а. $\alpha$ (дел.)								
	Значение измеряе- мой величи- ны (зив)								
	1,б. $\alpha$ (дел.)								
	зив								
	1,в. $\alpha$ (дел.)								
	зив								
	1,г. $\alpha$ (дел.)								
	зив								
	1,д. $\alpha$ (дел.)								
	зив								
1,е. $\alpha$ (дел.)									
зив									

Далее, размыкают ключ К и измеряют токи и напряжения трехфазной цепи в несимметричном режиме без нулевого провода (режим 1. б)

Для разгрузки одной из фаз трехфазного приемника (режим 1. в) отключают сопротивление  $R_1$  или  $R_2$  или  $R_3$  и измеряют токи и напряжения с нулевым проводом, а затем без нулевого провода (режим 1. г).

Для проведения опыта короткого замыкания (режим 1. д) необходимо отключить электрическую цепь от источника питания, разомкнуть ключ К или полностью отсоединить нулевой провод. Затем проводником соединить одну из точек “а”, “в” или “с” (в соответствии с индивидуальным заданием 7.1) с точкой “n” цепи. Включить электрическую цепь к источнику питания, измерить токи и напряжения при коротком замыкании фазы трехфазного приемника.

Учитывая, что при коротком замыкании фазы приемника, фазные напряжения приемника увеличиваются в  $\sqrt{3}$  раз, что приводит к существенному увеличению фазных (линейных) токов, измерения в этом режиме необходимо ускорить, чтобы избежать перегрева элементов электрической цепи.

Поочередно устанавливая сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  других членов бригады, проводят измерения для несимметричных режимов трехфазной цепи остальных членов бригады.

3. Для выполнения п. 2 программы необходимо в схеме рис.18 зашунтировать (замкнуть проводником накоротко) катушку  $L_3$  и конденсаторную батарею  $C$ , установить  $R_1=R_2=R_3=100$  Ом и подключить трехфазную симметричную цепь к источнику питания. Производят измерения токов и напряжений для симметричного режима с нулевым проводом и без него.

Таблицу измерений 7 и таблицу с расчетными данными и опытными данными 6 представляют преподавателю для проверки.

### Содержание отчета

- 1.Цель и программа работы.
- 2.Схема экспериментальных исследований.
- 3.Таблицы с расчетными и опытными данными 6.



4. Выводы о причинах расхождения опытных и рассчитанных данных и роли нулевого провода.

Лабораторная работа 7.2.  
Исследование трехфазной электрической цепи при  
соединении однофазных приемников  
треугольником.

Цель работы: Физическое моделирование электрической цепи при соединении однофазных приемников треугольником, изучение способа измерения активной мощности трехфазной цепи методом двух приборов и экспериментальная проверка результатов расчета индивидуального задания 7.2.

Программ работы:

1. Экспериментально исследовать заданную в индивидуальном задании 7.2 трехфазную электрическую цепь в следующих несимметричных режимах:

- а) Несимметричный полнофазный режим;
- б) Разгрузка одной фазы трехфазного приемника.

2. Экспериментально исследовать заданную в индивидуальном задании 7.2 трехфазную электрическую цепь в симметричном режиме.

Указания по подготовке к лабораторной работе

1. Выполнить индивидуальное задание 7.2.
2. Изучить содержание лабораторной работы 7.2.
3. В отчете к лабораторной работе 7.2:
  - 3.1 Начертить схему электрической цепи, аналогичную схеме, изображенной на рис. 19.
  - 3.2 Указать сопротивления фаз трехфазного приемника, соответствующие инд. заданию 7.2.

3.3 Подготовить таблицу расчетных и опытных данных 9, занести в нее результаты расчета цепи из индивидуального задания 7.2.

3.4 Подготовить таблицу измерений 8.

### Методические указания по выполнению работы

1. Собрать электрическую цепь, схема которой аналогична схеме рис. 19.

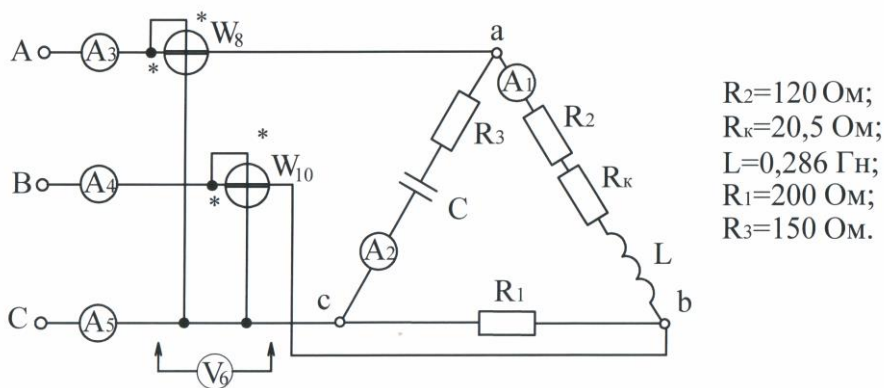


Рис. 19

При сборке цепи учесть, что обозначения элементов на стенде отличаются от указанных обозначений в индивидуальном задании 7.2:

В задании 7.2:

катушка  $R_k, L$ ;

резистор  $R_2$ ;

резистор  $R_1$ ;

резистор  $R_3$ ;

на стенде:

катушка  $L_{3к}$ ;

реостаты  $R_1$  и  $R_2$ ;

включенные последовательно;

реостат  $R_b$ ;

реостат  $R_c$ .

В виду отсутствия на стенде шестого амперметра, ток фазы приемника, в которую включен резистор  $R_1$ , можно не измерять.

На стенде имеются ваттметр  $W_{10}$  с номинальным током 2 А и ваттметр  $W_8$  с номинальным током 5 А. Поэтому в одну из линий (А или В) с наименьшим у всех членов бригады током включить ваттметр  $W_{10}$ , а в другую –  $W_8$ .

При измерении активной мощности трехфазной цепи методом двух приборов (двух однофазных ваттметров) показание одного из ваттметров может быть отрицательным. Это зависит от коэффициента мощности цепи и несимметрии токов. Поэтому для измерения величины отрицательного показания ваттметра надо переключить концы обмотки напряжения (у некоторых типов ваттметров имеется специальная кнопка) и записать показания ваттметра со знаком “минус”. Активная мощность трехфазной цепи будет равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров:

$$P = P_{W1} + P_{W2}.$$

2. Для выполнения п. 1, а программы устанавливают сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  одного из членов бригады и подключают цепь к трехфазному источнику питания. Результаты измерений заносят в таблицу измерений 8.

3. Для выполнения п. 1, б программы отключают в трехфазной цепи соответствующее сопротивление и измеряют токи, напряжения и показания ваттметров, записывая показания приборов в таблицу измерений 8. Поочередно устанавливая сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  других членов бригады, проводят измерения для несимметричных режимов трехфазной цепи остальных членов бригады

4. Для выполнения п. 2 программы, общего для всех членов бригады, включают вместо  $R_2$  и  $L_{3к}$  реостат  $R_a$  и шунтируют конденсаторную батарею  $C$ . В каждую фазу включают по  $Z_\phi = 200$  Ом активные сопротивления ( $\varphi_\phi = 0$ ) и производят измерения всех величин в симметричном режиме.

Результаты опытов переносят из таблицы измерений в таблицу 9 с расчетными и опытными данными.

### Содержание отчета

- 1.Цель и программа работы.
- 2.Схема экспериментальных исследований.
- 3.Таблица с расчетными и опытными данными 9.
- 4.Выводы о причинах расхождения опытных и расчетных данных.

Таблица измерений 8

Приборы в схеме, рис. 19	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$V_6$			$W_1$	$W_2$
						$I_{ab}$	$I_{ca}$	$I_C$		
Измеряемые величины	$I_{ab}$	$I_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$		
	100	100	100	100	100	150	150	150		
	2А	2А	5А	5А	5А	300В	300В	300В		
Номи- нальные данные приборов	$S_{пр}$									
	0,02 А/дел	0,02 А/дел	0,05 А/дел	0,05 А/дел	0,05 А/дел	2 В/дел	2 В/дел	2 В/дел		
Резуль- таты измерений	1, а (дел.)									
	не из- меряем ой ве- личины									
	1, б. а (дел.)									
зив										
	1, в. а (дел.)									
зив										

Таблица 9

Ре- жим рабо- ты	Спо- соб опре- деле- ния	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$P_{W1}$	$P_{W2}$	$P_{W1} + P_{W2}$	$P_{ab}$	$P_{bc}$	$P_{ca}$	$\Sigma P_{\phi}$	
		В	В	В	А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт
1, а)	Расчёт																	
	Опыт																	
1, б)	Расчёт																	
	Опыт																	
2.	Расчёт																	
	Опыт																	

#### 4. ТЕМЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ (УИРС, НИРС)

1. Конденсаторные шунто-симметрирующие устройства и их применение для повышения качества напряжения в узле нагрузки.
2. Управление конденсаторным шунто-симметрирующим устройством с целью компенсации реактивной мощности.
3. Управление конденсаторным шунто-симметрирующим устройством с целью снижения потерь энергии в линии электропередачи.
4. Электромагнитные шунто-симметрирующие устройства.
5. Проектирование дросселя для конденсаторного шунто-симметрирующего устройства.
6. Сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности асинхронного электродвигателя.
7. Сопротивление прямой, обратной и нулевой последовательности узла сельскохозяйственной нагрузки.
8. Расчет несимметричной трехфазной электрической цепи методом симметричных составляющих.

#### 5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Чем можно объяснить широкое распространение трехфазных цепей?
2. Как можно получить трехфазную систему э.д.с?
3. Начертить векторы двух-, трех-, четырех- и шестифазной симметричных систем э.д.с.
4. Что такое связанные и несвязанные многофазные цепи?
5. Дать определение следующих величин  $U_B$ ,  $\underline{U}_{ab}$ ,  $I_A$ ,  $P_b$ ,  $\underline{U}_N$ .

6. Дать определение следующих величин  $\underline{U}_{BC}$ ,  $U_a$ ,  $\underline{I}_{ab}$ ,  $I_N$ ,  $S_a$ ,  $Q_B$ .

7. Что такое симметричный режим трехфазной цепи?

8. Доказать, что в симметричном режиме при соединении приемников звездой линейные напряжения больше фазных в  $\sqrt{3}$  раз.

9. Доказать, что в симметричном режиме при соединении приемников треугольником линейные токи больше фазных в  $\sqrt{3}$  раз.

10. Пояснить роль нулевого провода в трехфазной цепи при соединении приемников звездой.

11. Как изменяются напряжения и токи симметричного трехфазного приемника, соединенного звездой без нулевого провода, при обрыве одной из фаз приемника?

12. Как изменяются линейные и фазные токи симметричного трехфазного приемника, соединенного треугольником, если в одной из фаз приемника произошел обрыв?

13. Как изменятся мощности и токи отдельных фаз симметричного приемника, соединенного звездой без нулевого провода, при коротком замыкании одной из фаз приемника?

14. Как измерить активную мощность симметричной трехфазной цепи?

15. Как измерить активную мощность трехфазной трехпроводной цепи в несимметричном режиме?

16. Как измерить активную мощность трехфазной четырехпроводной цепи в несимметричном режиме?

17. Что необходимо для получения вращающегося магнитного поля?

18. Пояснить принцип действия синхронного трехфазного электродвигателя.

19. Пояснить принцип действия асинхронного трехфазного электродвигателя.



20. Доказать, что любую несимметричную систему векторов можно разложить на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей.

21. Дать определение сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей.

22. Доказать, что сопротивление нулевой последовательности симметричного трехфазного приемника определяется следующим выражением  $Z_0 = Z_\phi + 3Z_N$ .

23. Какие симметричные составляющие содержатся в линейном напряжении?

24. Доказать, что ток нейтрального провода равен утроенному значению тока нулевой последовательности.

25. Что такое принцип независимости действия симметричных, составляющих и для каких цепей он применим?

26. Разъяснить алгоритм расчета токов трехфазного симметричного приемника при несимметричной системе напряжений на зажимах приемника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К о с о у х о в Ф. Д. Конспект лекций по Теоретическим основам электротехники, часть 2. – СПб: СПбГАУ, 2008 – 145 с.
2. Г о р б у н о в А. Н., К а б а н о в И. Д., К р а в ц о в А. В., Р е д ь к о И. Я. Теоретические основы электротехники – М.: УМЦ “ТРИАДА”, 2003 – 304 с.
3. З е в е к е Г. В., И о н к и н П. А., Н е т у ш и л А. В., С т р а х о в С. В. Основы теории цепей – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 528 с.

## МОДУЛЬ 7. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Индивидуальные задания и методические указания к лабораторно-практическим занятиям

Авторы                      Ф.Д. Косоухов,  
   В.Ф. Петров,  
   А.О. Горбунов

Редактор                    А.О. Горбунов

Подписано в печать      П. л.    Уч. из.    Тираж 150 экз. Заказ

Типография Санкт-Петербургского государственного  
аграрного университета  
г. Пушкин, ул. Садовая, 14