

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

#### ЗАДАНИЕ 3

#### РАСЧЁТ ТРЁХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

2.3.1. *Трёхфазная электрическая цепь (рис. 2.3.1.) содержит трёхфазный источник электрической энергии и два приемника: 1 – несимметричный статический; 2 – симметричный динамический (трехфазный электродвигатель). Действующее значение фазной эдс трехфазного симметричного источника  $E_{\phi}$ .*

*Сопротивления фаз приемника 1:  $Z_{A1}, Z_{B1}, Z_{C1}$ . Сопротивления фаз двигателя в нормальном режиме работы:  $R_{\phi 2}, X_{\phi 2}$ . Сопротивление нейтрального провода:  $Z_N$ .*

*Вследствие неисправности источника (аварийный режим), эдс его фаз оказались несимметричными:  $E_A, E_B, E_C$ .*

*Сопротивления фаз двигателя в рассматриваемом аварийном режиме: для токов прямой последовательности -  $Z_{2(1)}$ , для токов обратной последовательности -  $Z_{2(2)}$ .*

*Необходимо выполнить следующие расчеты для двух режимов:*

- а) нормального (с симметричным трехфазным источником);*
- б) аварийного (с несимметричным трехфазным источником):*

2.3.1.1. Определить действующие значения токов в линейных проводах приемников и источника и их начальные фазы; напряжение сдвига нейтрали приемника 1 и ток в нейтральном проводе (при его наличии).

2.3.1.2. Записать в общем виде уравнения баланса активных и реактивных мощностей источника и приемников и, вычислив их значения, убедиться в правильности расчетов в п.2.3.1.1.

2.3.1.3. Построить в масштабе векторную диаграмму токов линейных проводов источника и приемников и нейтрального провода (при его наличии) и совмещенную с ней топографическую диаграмму напряжений.

#### 2.3.2. Методические указания

2.3.2.1. Задание является многовариантным (1000 вариантов), что обеспечивается расположением исходных данных в трех отдельных таблицах по столбцам. Выбор данных из таблиц осуществляется по комбинации трех цифр от 000 до 999 (шифр студента). По первой, второй и третьей цифрах шифра выбираются данные из соответствующих столбцов первой (2.3.1), второй (2.3.2) и третьей (2.3.3) таблиц.

2.3.2.2. Комплексы эдс фаз источника и комплексные сопротивления приемников 1 и 2 и нейтрального провода заданы в таблицах 2.3.1, 2.3.2 и 2.3.3 в

полярной (показательной) форме записи в виде соответствующих модулей и аргументов:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E_A \angle \psi_A, & \underline{E}_B &= E_B \angle \psi_B, & \underline{E}_C &= E_C \angle \psi_C, \\ \underline{Z}_{A1} &= Z_{A1} \angle \varphi_{A1}, & \underline{Z}_{B1} &= Z_{B1} \angle \varphi_{B1}, & \underline{Z}_{C1} &= Z_{C1} \angle \varphi_{C1}, \\ \underline{Z}_{2(1)} &= Z_{2(1)} \angle \varphi_{2(1)}, & \underline{Z}_{2(2)} &= Z_{2(2)} \angle \varphi_{2(2)}, & \underline{Z}_N &= Z_N \angle \varphi_N. \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

2.3.2.3. В таблице 2.3.3  $Z_N = \infty$  означает отсутствие нейтрального провода,  $Z_N = 0$  – наличие нейтрального провода с нулевым сопротивлением.

2.3.2.4. Расчет токов приемника 2 для аварийного режима выполнить методом симметричных составляющих.

2.3.2.5 Сопротивления фаз генератора и линейных проводов по сравнению с сопротивлениями приемников считать равными нулю.

Таблица 2.3.1

Данные для расчета										
Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_\phi$ , В	160	170	180	200	220	230	240	220	200	190
$E_A$ , В	50	70	90	100	120	140	160	150	130	200
$\psi_A$ , град.	0	75	-30	45	60	-60	15	-30	-15	0
$Z_{A1}$ , Ом	20	18	20	40	34	24	28	22	24	20
$\varphi_{A1}$ , град.	20	35	45	50	-30	15	-35	-20	-60	-35
$R_{\phi 2}$ , Ом	8	14	12	10	18	15	13	10	8	12
$Z_N$ , Ом	10	$\infty$	25	0	$\infty$	20	0	$\infty$	40	0
$\varphi_N$ , град.	0	-	45	-	-	60	-	-	-30	-

Таблица 2.3.2

Данные для расчета										
Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_B$ , В	60	80	90	100	120	150	120	100	80	60
$\psi_B$ , град.	-90	-105	-115	-125	-130	-140	-135	-125	-110	-100
$Z_{2(1)}$ , Ом	65	50	70	60	75	55	44	48	58	64
$\varphi_{2(1)}$ , град.	15	20	25	35	22	32	40	24	28	34
$X_{\phi 2}$ , Ом	16	9	20	12	16	13	18	15	17	30
$Z_{B1}$ , Ом	20	18	16	14	12	10	9	11	13	15
$\varphi_{B1}$ , град.	60	45	30	0	-30	-45	-60	-45	-30	0

Таблица 2.3.3

Данные для расчета										
Параметры	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E_C, \text{ В}$	90	70	50	140	130	110	90	70	50	140
$\psi_C, \text{ град.}$	95	105	115	125	130	135	125	120	110	100
$Z_{2(2)}, \text{ Ом}$	20	24	16	30	28	25	22	18	32	34
$\varphi_{2(2)}, \text{ град.}$	65	70	75	80	85	82	78	72	68	62
$Z_{C1}, \text{ Ом}$	8	12	16	20	14	18	15	10	15	12
$\varphi_{C1}, \text{ град.}$	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60	0

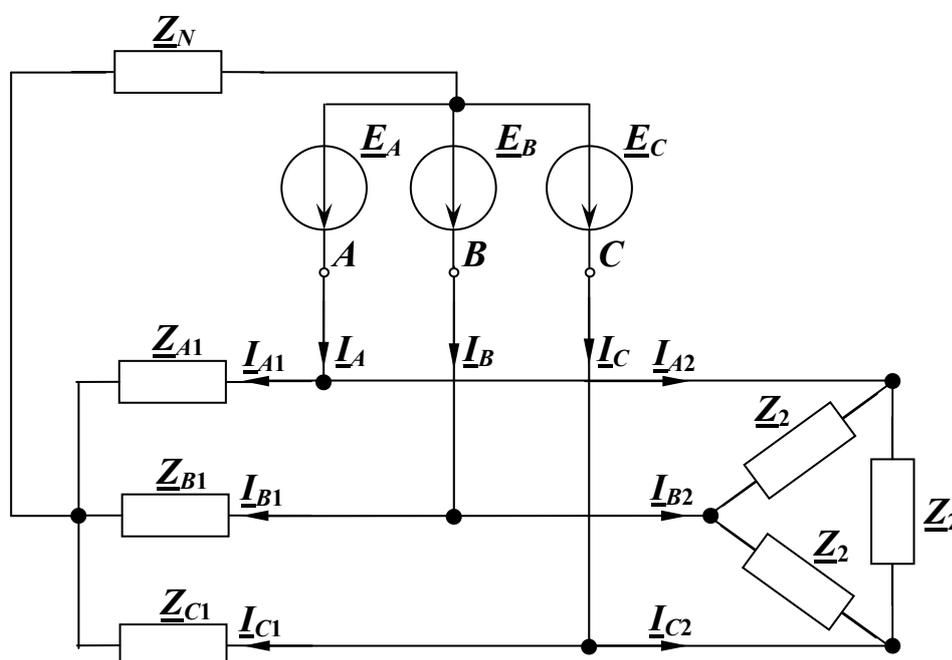


Рис. 2.3.1

### 2.3.3. Основные определения и расчетные соотношения

2.3.3.1. *Симметричный режим* трехфазного источника энергии (нормальный, номинальный режим работы).

При соединении фазных обмоток трехфазного источника звездой *линейные напряжения* определяются через разности соответствующих фазных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (2.3.2)$$

Для источника с симметричными напряжениями *фазные напряжения*:

$$\underline{U}_A = U_\phi \angle 0^\circ; \quad \underline{U}_B = U_\phi \angle -120^\circ; \quad \underline{U}_C = U_\phi \angle 120^\circ, \quad (2.3.3)$$

*линейные напряжения*:

$$\underline{U}_{AB} = U_\ell \angle 30^\circ; \quad \underline{U}_{BC} = U_\ell \angle -90^\circ; \quad \underline{U}_{CA} = U_\ell \angle 150^\circ. \quad (2.3.4)$$

По модулю линейные напряжения  $U_l$  больше фазных  $U_\phi$  в  $\sqrt{3}$  раз:

$$U_l = \sqrt{3} U_\phi . \quad (2.3.5)$$

Для *симметричного приемника*, соединенного звездой (рис. 2.3.2 а):

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} . \quad (2.3.6)$$

Напряжение смещения нейтрали  $\underline{U}_{nN}$  равно нулю и токи в фазах:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}_C . \quad (2.3.7)$$

Ток в нейтральном проводе (при его наличии)  $\underline{I}_N = 0$ .

Для *симметричного приемника*, соединенного треугольником (рис.2.3.2 б):

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} . \quad (2.3.8)$$

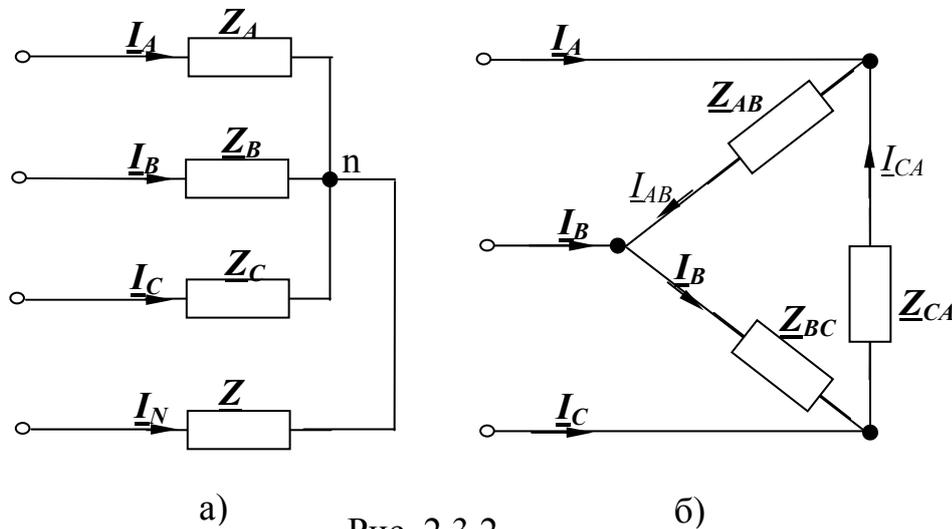


Рис. 2.3.2

Фазные токи приемника:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB}; \quad \underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} / \underline{Z}_{BC}; \quad \underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} / \underline{Z}_{CA} \quad (2.3.9)$$

Линейные токи приемника:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC} . \quad (2.3.10)$$

По модулю линейные токи больше фазных в  $\sqrt{3}$  раз:

$$I_l = \sqrt{3} I_\phi . \quad (2.3.11)$$

*Активная, реактивная и полная* мощности симметричного приемника независимо от вида соединения определяются формулами:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} UI \cos \varphi_\phi; \quad (2.3.12)$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = \sqrt{3} UI \sin \varphi_\phi; \quad (2.3.13)$$

$$S = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} UI , \quad (2.3.14)$$

где  $\varphi_\phi$  – сдвиг по фазе между фазными напряжением и током.

2.3.3.2. Для **несимметричного приемника**, соединенного звездой с нейтральным проводом при  $\underline{Z}_N \neq 0$  **напряжение смещения нейтрали**

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (2.3.15)$$

где  $\underline{Y}_A = 1/\underline{Z}_A$ ,  $\underline{Y}_B = 1/\underline{Z}_B$ ,  $\underline{Y}_C = 1/\underline{Z}_C$ ,  $\underline{Y}_N = 1/\underline{Z}_N$ . (2.3.16)

Линейные токи и ток в нейтральном проводе:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_C}; \quad \underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_N}. \quad (2.3.17)$$

Если сопротивление  $\underline{Z}_N = 0$ , то  $\underline{U}_{nN} = 0$  и ток в нейтральном проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (2.3.18)$$

**Активная, реактивная и полная** мощности несимметричного приемника равны суммам соответствующих мощностей трех фаз.

2.3.3.3. **Несимметричный режим** трехфазного источника (аварийный режим).

Для приемников со статическими нагрузками фаз расчеты можно выполнить по соответствующим формулам **симметричного режима** трехфазного источника энергии (2.3.2), (2.3.9), (2.3.10), (2.3.15), (2.3.16), (2.3.17), (2.3.18).

2.3.3.4. Для приемников с динамическими и статическими нагрузками фаз расчет трехфазных цепей выполняется **методом симметричных составляющих**.

Суть **метода симметричных составляющих** состоит в следующем.

Любую несимметричную трехфазную систему синусоидальных величин (эдс, напряжений, токов и т.п.) можно представить в виде суммы трех симметричных трехфазных систем (составляющих **прямой, обратной и нулевой** последовательностей) соответствующих величин.

Например, для фазных напряжений трехфазного источника, используя оператор  $a = 1\angle 120^\circ = -1/2 + j\sqrt{3}/2$  трехфазной системы, можно записать:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}; & \underline{U}_B &= a^2 \underline{U}_{A1} + a \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}; \\ \underline{U}_C &= a \underline{U}_{A1} + a^2 \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}, \end{aligned} \quad (2.3.19)$$

где  $\underline{U}_{A1}$ ,  $\underline{U}_{A2}$ ,  $\underline{U}_{A0}$  – комплексы напряжений, соответственно, прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы  $A$ ,

$$a^2 = 1 \angle -120^\circ = -1/2 - j\sqrt{3}/2. \quad (2.3.20)$$

Комплексы напряжений  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – раскладываются на симметричные составляющие по формулам:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C); \quad (2.3.21)$$

$$\underline{U}_{A2} = \underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C); \quad (2.3.20)$$

$$\underline{U}_{A0} = \underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C). \quad (2.3.21)$$

$$\underline{U}_{B1} = \underline{U}_{A1} \angle -120^\circ; \quad \underline{U}_{C1} = \underline{U}_{A1} \angle 120^\circ; \quad (2.3.22)$$

$$\underline{U}_{B2} = \underline{U}_{A2} \angle 120^\circ; \quad \underline{U}_{C2} = \underline{U}_{A2} \angle -120^\circ; \quad (2.3.23)$$

$$\underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0} = \underline{U}_{A0}. \quad (2.3.24)$$

Расчет токов и напряжений в трехфазных системах с несимметричными источниками напряжений в общем случае проводят с помощью схем замещения, на которых все элементы трехфазной цепи должны быть представлены комплексными сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностями.

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{U}_1 / \underline{I}_1; \quad \underline{Z}_{(2)} = \underline{U}_2 / \underline{I}_2; \quad \underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_0 / \underline{I}_0, \quad (2.3.25)$$

где  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$  – напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей фазы  $A$  схемы.

Сопротивление на фазу одного и того же элемента различно для разных последовательностей, поэтому расчет следует вести для каждой из последовательностей отдельно.

На основании принципа наложения заданный несимметричный режим работы цепи представляется как результат наложения трех симметричных режимов: прямой, обратной и нулевой последовательностей.