

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВПО КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ЭСиС

Курсовой проект
Расчет и регулирование режимов
электроэнергетических систем

Студент: Толковый О.Ч.
Группа: ЗЭСт-8-11
Проверил: Гарифуллин М.Ш.

Казань-2014

Исходные данные:

	Л1	Л2	Л3	Л4	Л5	Л6	Л7	Л8	Л9	Л10
сечение, мм ²	300	300	300	400	400	240	2*240	240	120	2*120
длина, км	12	13,5	18	27	31,5	18	19,8	17,4	12	9

Эл. мощности узлов:

Узел	P, МВт	Q, МВАр
1	-21,6	-6,48
2	-26	-7,8
3	-72,8	-21,84
4	-32,8	-9,84
5	-50	-15
6	40	12
7	-28	-8,4
8	38	11,4

Удельные сопротивления линий электропередач, Ом/км.

	110 кВ		220 кВ	
	r_0	x_0	r_0	x_0
АС-120	0,244	0,427		
АС-240	0,118	0,405	0,118	0,435
АС-300			0,096	0,429
АС-400			0,073	0,42

Узлы №6 и №8 генерирующие.

 $U_A=230$ кВ; $U_{ном}=220$ кВ;

Линии Л1-Л2-Л3-Л5 обрыв фаз «В» и «С»

Число заземленных нейтралей трансформаторов:

Узел №1 =2;

Узел №2 =2;

Узел №3 =2;

I. РАСЧЕТ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА

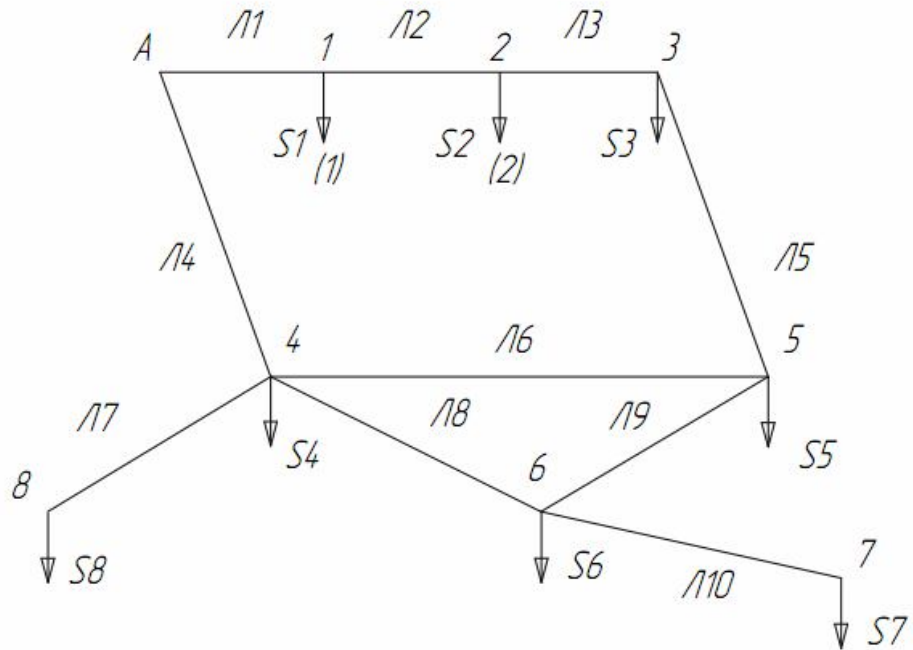


Рис.1. Схема электрической сети

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Таблица 1 Нормальный режим

Напряжение в узле (нормальный режим)										
Узел №	1	2	3	4	5	6	7	8		
U _a , кВ	228,593	227,301	226,058	228,98	226,24	228,151	227,311	230,539		
U _p , кВ	-2,305	-4,39	-6,355	-2,013	-5,809	-3,738	-4,506	-0,402		
U, кВ	228,604	227,344	226,147	228,989	226,315	228,182	227,355	230,539		
U ₁₁₀ , кВ						114,091	113,678	115,27		
Ток в ветви (нормальный режим)										
Ветвь №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _a , А	279,762	225,378	159,744	108,235	-24,473	83,844	95,215	-37,128	67,159	70,667
I _p , А	-95,228	-78,313	-57,233	-33,124	3,725	-29,811	-28,383	6,161	-15,441	-22,736
I, А	295,525	238,596	169,688	113,19	24,755	88,986	99,355	37,636	68,911	74,234
I ₁₁₀ , А						177,972	198,71	75,272	137,822	148,468
Потеря активной мощности										
P, кВт	1366,99									

Расчет аварийного режима(обрыв Л-1)

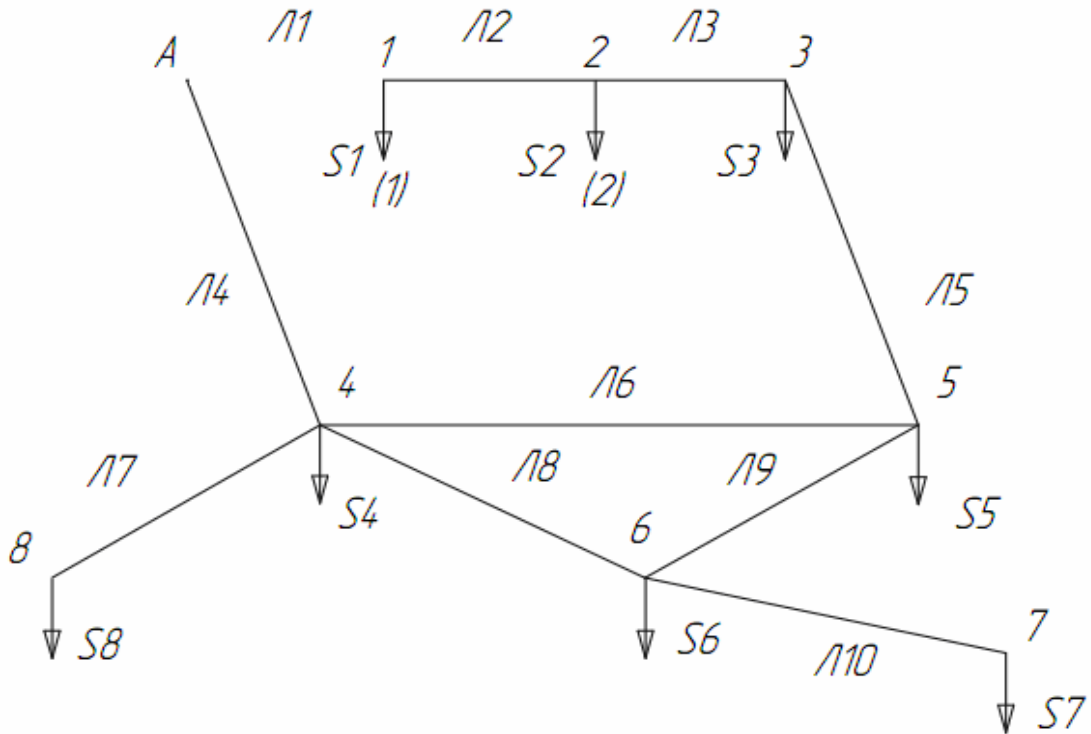


Рис.2. Схема электрической сети

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Таблица 2 Обрыв Л-1

Напряжение в узле (обрыв Л-1)										
Узел №	1	2	3	4	5	6	7	8		
U _a , кВ	208,863	209,244	210,359	225,175	214,783	220,591	219,688	226,816		
U _p , кВ	-27,453	-26,944	-25,449	-7,265	-18,806	-13,742	-14,494	-4,848		
U, кВ	210,66	210,972	211,893	225,292	215,605	221,019	220,165	226,867		
U ₁₁₀ , кВ						110,51	110,083	113,434		
Ток в ветви (обрыв Л-1)										
Ветвь №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _a , А	0	-56,379	-124,22	400,491	-314	265,869	96,063	-147,49	178,007	71,816
I _p , А	0	25,323	55,581	-176,05	138,482	-128,29	-31,072	50,917	-61,886	-26,814
I, А	0	61,805	136,09	437,477	343,181	295,203	100,963	156,028	188,458	76,659
I ₁₁₀ , А						590,406	201,926	312,056	376,916	153,318
Потеря активной мощности										
P, кВт	6344,17									

Расчет аварийного режима(обрыв Л-4)

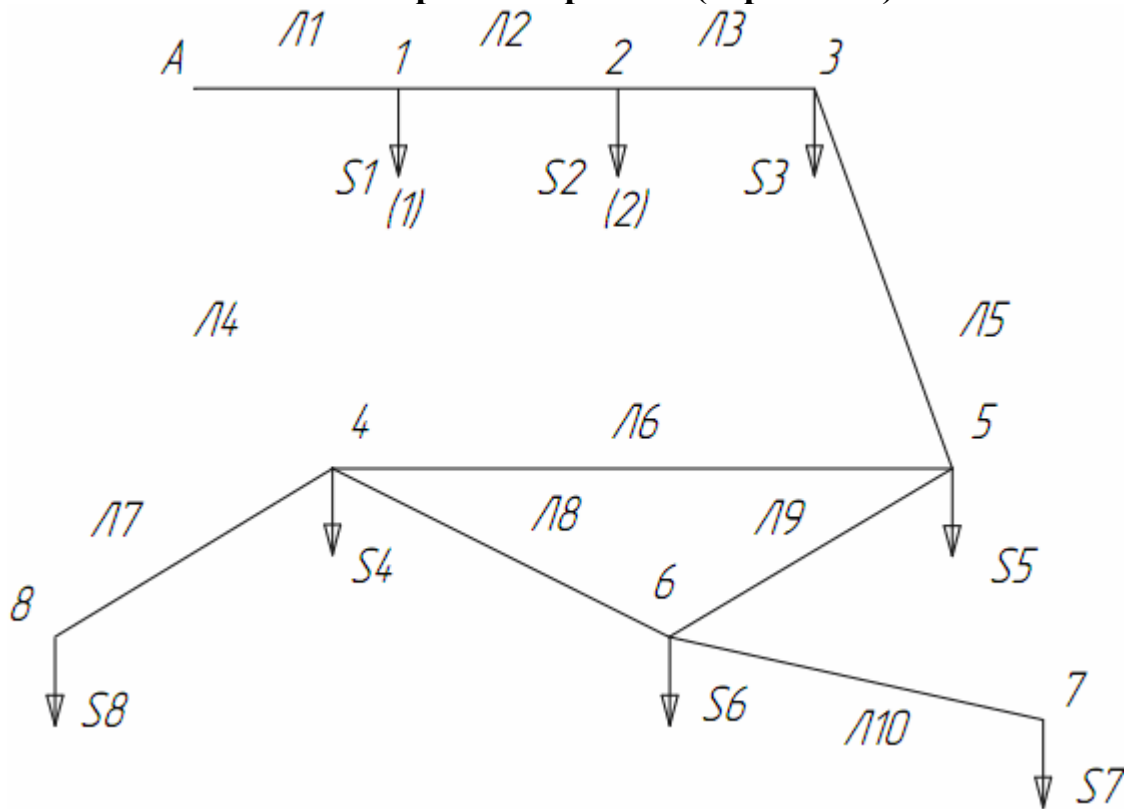


Рис.3. Схема электрической сети

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Таблица 3 Обрыв Л-4

Напряжение в узле (обрыв Л-4)										
Узел №	1	2	3	4	5	6	7	8		
U _a , кВ	228,022	226,092	224	223,528	222,947	223,742	222,862	225,216		
U _p , кВ	-3,201	-6,294	-9,603	-10,689	-11,402	-10,581	-11,337	-8,281		
U, кВ	228,045	226,179	224,211	223,783	223,238	223,992	223,15	225,369		
U ₁₁₀ , кВ						111,996	111,575	112,685		
Ток в ветви (обрыв Л-4)										
Ветвь №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _a , А	389,107	334,657	268,868	0	83,987	16,103	96,21	3,207	27,073	71,246
I _p , А	-134,74	-117,57	-95,82	0	-31,604	-6,814	-32,762	-3,451	-6,93	-25,385
I, А	411,776	354,708	285,432	0	89,736	17,485	101,635	4,711	27,946	75,633
I ₁₁₀ , А						34,97	203,27	9,422	55,892	151,266
Потеря активной мощности										
P, кВт	1809,03									

Выбор автотрансформаторов

Для ПС №4 максимальный переток мощности будет в случае обрыва линии Л-1.

$$S_{Л-4} = \sqrt{3} \cdot |U_4| \cdot |I_{Л-4}| = \sqrt{3} \cdot 225,292 \cdot 437,477 = 170706 \text{ МВА},$$

На ПС №4 выбираем АТ марки АТДЦТН 200000/220/110.

Для выбора АТ на ПС №5 рассмотрим несколько случаев:

1. Обрыв линии Л-1:

$$\begin{aligned} S_{\text{обр. Л-1}} &= \sqrt{3} \cdot |U_5| \cdot |\overline{I_{Л-6}} + \overline{I_{Л-9}}| = \sqrt{3} \cdot 215,605 \cdot |265,869 - j \cdot 128,289 + 178,007 - j \cdot 61,886| = \\ &= \sqrt{3} \cdot 215,605 \cdot 482,9 = 180328,3 \text{ МВА}, \end{aligned}$$

2. Обрыв линии Л-4:

$$S_{\text{обр. Л-4}} = \sqrt{3} \cdot |U_5| \cdot |I_{Л-5}| = \sqrt{3} \cdot 223,238 \cdot 89,736 = 34696,26 \text{ МВА},$$

3. Нормальный режим:

$$S_{Л-5} = \sqrt{3} \cdot |U_5| \cdot |I_{Л-5}| = \sqrt{3} \cdot 226,315 \cdot 24,755 = 5602,428 \text{ МВА},$$

$$\begin{aligned} S_{Л-6-9} &= \sqrt{3} \cdot |U_5| \cdot |\overline{I_{Л-6}} + \overline{I_{Л-9}}| = \sqrt{3} \cdot 226,315 \cdot |83,844 - j \cdot 29,811 + 67,159 - j \cdot 15,441| = \\ &= \sqrt{3} \cdot 226,315 \cdot 157,6377 = 61790,45 \text{ МВА}, \end{aligned}$$

Самым тяжелым режимом является обрыв линии Л-1 $S_{\text{обр. Л-1}} = 180328,3$ МВА;

На ПС №5 выбираем АТ марки АТДЦТН 200000/220/110.

Режим поддержания напряжения 230 кВ в узлах №4 и №5

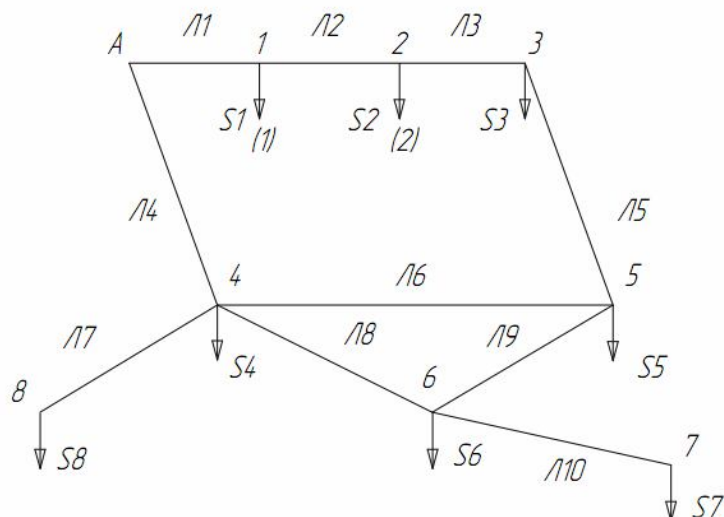


Рис.4. Схема электрической сети

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$|n| = \frac{U_{ж} - U_5}{\frac{\Delta U}{100} \cdot U_5};$$

$$\Delta E = n_{отв.} \cdot \frac{\Delta U}{100} \cdot U_5;$$

$$\cos \alpha = \frac{U_{5a}}{U_5};$$

$$\sin \alpha = \frac{U_{5p}}{U_5};$$

$$\Delta E_a = \Delta E \cdot \cos \alpha;$$

$$\Delta E_p = \Delta E \cdot \sin \alpha;$$

Таблица 4

	Узел №4	Узел №5
$ n $	0,220752962	0,814130747
$n_{отв.}$	0	1
ΔE	0	4,5263
$\cos \alpha$	0,999960697	0,999668603
$\sin \alpha$	-0,0087908	-0,02566776
ΔE_a	0	4,5248
ΔE_p	0	-0,11618

Таблица 5

Напряжение в узле (режим поддержания напряжения 230 кВ в узлах №4 и №5)										
Узел №	1	2	3	4	5	6	7	8		
U _a , кВ	228,212	226,493	224,681	229,804	228,438	229,743	228,909	231,357		
U _p , кВ	-2,304	-4,387	-6,347	-1,983	-5,931	-3,716	-4,478	0,424		
U, кВ	228,224	226,536	224,771	229,812	228,515	229,773	228,953	231,357		
U ₁₁₀ , кВ						114,8865	114,477	115,6785		
Ток в ветви (режима поддержания напряжения 230 кВ в узлах №4 и №5)										
Ветвь №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I _a , А	288,78	234,306	168,439	99,675	-16,897	79,319	94,881	-33,05	62,878	70,18
I _p , А	-135,89	-118,94	-97,783	-7,321	-36,426	-3,916	-28,275	-8,393	-0,821	22,559
I, А	319,154	262,767	194,765	99,944	40,155	79,416	99,004	34,1	62,883	73,717
I ₁₁₀ , А						158,832	198,008	68,2	125,766	147,434
Потеря активной мощности										
P, кВт	1424,65									

II. РАСЧЕТ НЕПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА

По заданию:

Линии Л1-Л2-Л3-Л5 обрыв фаз «В» и «С»

Число заземленных нейтралей трансформаторов:

Узел №1 = 2;

Узел №2 = 2;

Узел №3 = 2;

Выбор мощности генераторов и трансформаторов:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_A \cdot |I_1 + I_4|;$$

$$S = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot |288,78 - j \cdot 135,886 + 99,675 - j \cdot 7,32| = 164,93 \text{ МВА};$$

По мощности S были выбраны турбогенераторы 4xТВФ-60-2

$$x_{d \text{ ном}}' = 28 \%$$

$$x_{d \text{ ном}} = 161 \%$$

$$x_2 = 23,8 \%$$

$$U_{\text{ном}} = 10,5 \text{ кВ};$$

Трансформатор ТДЦ-80000/220

$$x_T = 80,5 \text{ Ом};$$

$$r_T = 2,9 \text{ Ом};$$

$$U_{\text{номНН}} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{номВН}} = 242 \text{ кВ};$$

ЭДС генератора:

$$E_{\Gamma\phi} = U_{A\phi} + j \cdot (x_{\Gamma} + x_T) \cdot (I_1 + I_4);$$

$$U_{A\phi} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132794,46 \text{ В};$$

$$x_{\Gamma} = \frac{x_{d \text{ ном}}}{100} \cdot \frac{U^2}{S} \cdot k_r^2 = \frac{161}{100} \cdot \frac{10,5^2}{60} \cdot \left(\frac{242}{10,5}\right)^2 = 1571,46 \text{ Ом};$$

$$x_{\Gamma}' = \frac{x_{d \text{ ном}}'}{100} \cdot \frac{U^2}{S} \cdot k_r^2 = \frac{28}{100} \cdot \frac{10,5^2}{60} \cdot \left(\frac{242}{10,5}\right)^2 = 273,29 \text{ Ом};$$

$$x_{\Gamma}^{(2)} = \frac{x_2}{100} \cdot \frac{U^2}{S} \cdot k_r^2 = \frac{23,8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{60} \cdot \left(\frac{242}{10,5}\right)^2 = 232,3 \text{ Ом};$$

$$E_{\Gamma\phi} = 132794,46 + j \cdot \frac{(273,29 + 80,5)}{4} \cdot (388,455 - j \cdot 143,206) = 145460,21 + j \cdot 34357,87 \text{ В};$$

$$E_{\Gamma} = \sqrt{3} \cdot |E_{\Gamma\phi}| = \sqrt{3} \cdot |145,46 + j \cdot 34,36| = 258,86 \text{ кВ};$$

$$\cos \varphi = \frac{145,46}{149,46} = 0,973; \quad \sin \varphi = \frac{34,36}{149,46} = 0,229;$$

$$E_{\Gamma a} = E_{\Gamma} \cdot \cos \varphi = 258,86 \cdot 0,973 = 251,92 \text{ кВ};$$

$$E_{\Gamma p} = E_{\Gamma} \cdot \sin \varphi = 258,86 \cdot 0,229 = 59,51 \text{ кВ};$$

$$E_{\Gamma} = 251,92 + j \cdot 59,51 \text{ кВ};$$

Система:

$$X_{1c} = X_{2c} = 40 \text{ Ом};$$

$$X_{0c} = 80 \text{ Ом};$$

$$E_c = \frac{U_5}{\sqrt{3}} = \frac{228515}{\sqrt{3}} = 131937 \text{ В};$$

$$\sin \varphi = \frac{U_{5p}}{U_5} = \frac{-5,93}{228,515} = -0,026;$$

$$\cos \varphi = \frac{U_{5a}}{U_5} = \frac{228,43}{228,515} = 0,99;$$

$$E_{ca} = E_c \cdot \cos \varphi = 131887,92 \text{ В};$$

$$E_{cp} = E_c \cdot \sin \varphi = -3430,36 \text{ В};$$

$$E_{c\varphi} = 131887,92 - j \cdot 3430,36 \text{ В};$$

$$E_c = U_5 = 228,429 - j \cdot 5,93 \text{ кВ};$$

Выбор трансформаторов в узлах нагрузки:

Узел №1

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$S_1 = \sqrt{21,6^2 + 6,48^2} = 22,55 \text{ МВА};$$

ТРДН-32000/220

$$x_T = 190,5 \text{ Ом};$$

$$r_T = 7,7 \text{ Ом};$$

Узел №2

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$S_2 = \sqrt{26^2 + 7,8^2} = 27,14 \text{ МВА};$$

ТРДН-32000/220

$$x_T = 190,5 \text{ Ом};$$

$$r_T = 7,7 \text{ Ом};$$

Узел №3

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

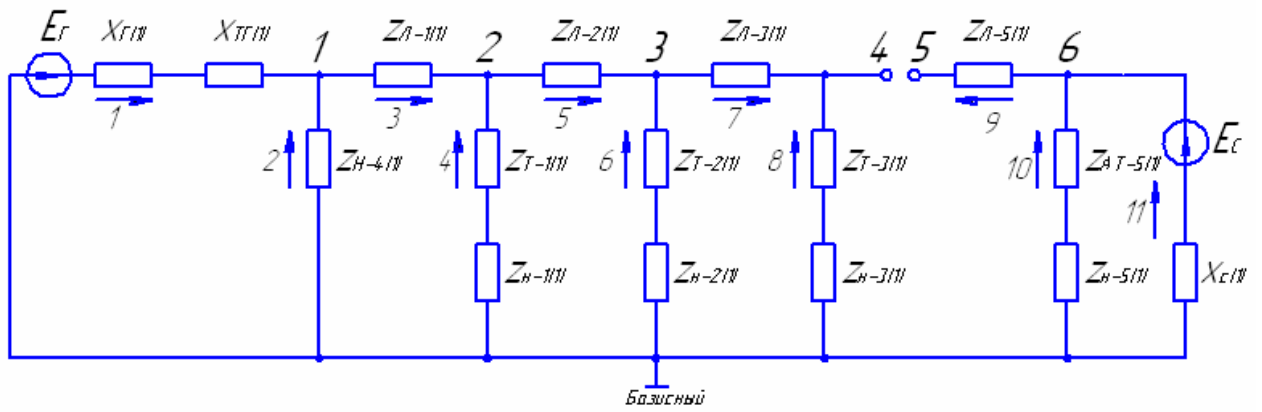
$$S_3 = \sqrt{72,8^2 + 21,84^2} = 76 \text{ МВА};$$

ТРДН-100000/220

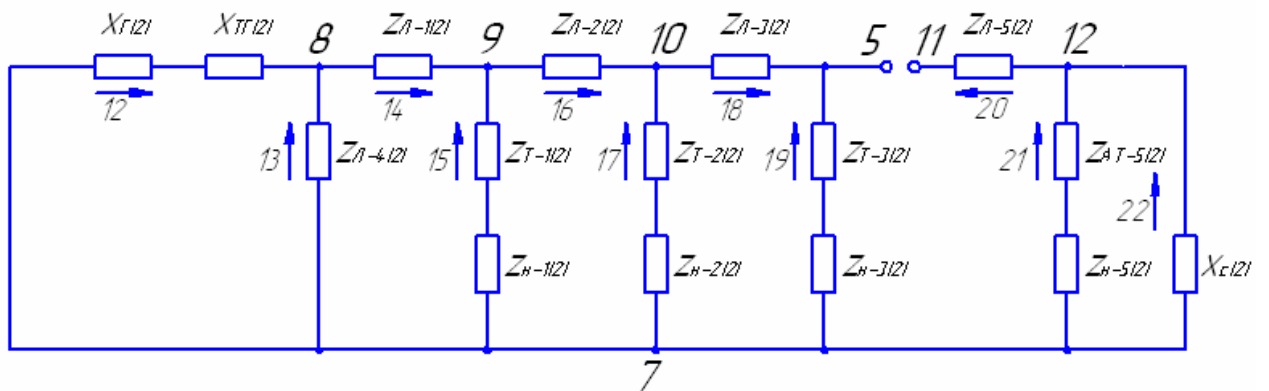
$$x_T = 63,5 \text{ Ом};$$

$$r_T = 1,9 \text{ Ом};$$

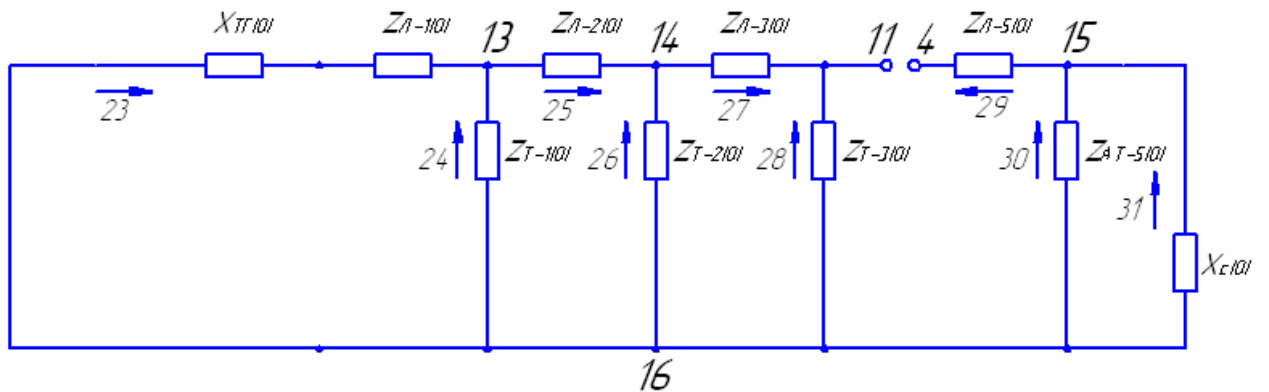
Прямая последовательность



Обратная последовательность



Нулевая последовательность



Сопротивления нагрузок узлов:

$$z_H^{(1)} = \frac{U^2}{S_H};$$

$$r_H^{(1)} = z_H^{(1)} \cdot \cos \varphi;$$

$$x_H^{(1)} = z_H^{(1)} \cdot \sin \varphi;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S};$$

$$\sin \varphi = \frac{Q}{S};$$

Узел №1:

$$z_{\text{H}}^{(1)} = \frac{220^2}{22,5} = 2151,11 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{21,6}{22,5} = 0,958;$$

$$\sin \varphi = \frac{6,48}{22,5} = 0,288;$$

$$r_{\text{H}}^{(1)} = 2151,11 \cdot 0,958 = 2060,76 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{H}}^{(1)} = 2151,11 \cdot 0,288 = 619,52 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(1)} = 2060,76 + j \cdot 619,52 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(2)} = |z_{\text{H}}^{(1)}| \cdot z_{10\text{кВ}}^* = 2151,11 \cdot (0,18 + j \cdot 0,24) = 387,2 + j \cdot 516,27 \text{ Ом};$$

Узел №2:

$$z_{\text{H}}^{(1)} = \frac{220^2}{27,14} = 1783,35 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{26}{27,14} = 0,958;$$

$$\sin \varphi = \frac{7,8}{27,14} = 0,287;$$

$$r_{\text{H}}^{(1)} = 1783,35 \cdot 0,958 = 1708,45 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{H}}^{(1)} = 1708,35 \cdot 0,287 = 511,82 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(1)} = 1708,45 + j \cdot 511,82 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(2)} = 1783,35 \cdot (0,18 + j \cdot 0,24) = 321 + j \cdot 428 \text{ Ом};$$

Узел №3:

$$z_{\text{H}}^{(1)} = \frac{220^2}{76} = 636,84 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{72,8}{76} = 0,957;$$

$$\sin \varphi = \frac{21,84}{76} = 0,287;$$

$$r_{\text{H}}^{(1)} = 636,84 \cdot 0,957 = 609,46 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{H}}^{(1)} = 636,84 \cdot 0,287 = 182,77 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(1)} = 609,46 + j \cdot 182,77 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(2)} = 636,84 \cdot (0,18 + j \cdot 0,24) = 114,63 + j \cdot 152,84 \text{ Ом};$$

Узел №5:

$$z_{\text{H}}^{(1)} = \frac{220^2}{52,2} = 927,2 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{50}{52,2} = 0,957;$$

$$\sin \varphi = \frac{15}{52,2} = 0,287;$$

$$r_{\text{H}}^{(1)} = 927,2 \cdot 0,957 = 887,33 \text{ Ом};$$

$$x_{\text{H}}^{(1)} = 927,2 \cdot 0,287 = 266,1 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{H}}^{(1)} = 887,33 + j \cdot 266,1 \text{ Ом};$$

$$z_H^{(2)} = 927,2 \cdot (0,18 + j \cdot 0,24) = 166,9 + j \cdot 222,53 \text{ Ом};$$

Нагрузка №4:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 230 \cdot (99,68 + j \cdot 7,32) = 39,7 + j \cdot 2,92 \text{ МВА};$$

$$|S| = 39,8 \text{ МВА};$$

$$z_H^{(1)} = \frac{220^2}{39,8} = 1216,08 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = \frac{39,7}{39,8} = 0,997;$$

$$\sin \varphi = \frac{2,92}{39,8} = 0,073;$$

$$r_H^{(1)} = 1216,08 \cdot 0,997 = 1212,43 \text{ Ом};$$

$$x_H^{(1)} = 1216,08 \cdot 0,073 = 88,77 \text{ Ом};$$

$$z_H^{(1)} = 1212,43 + j \cdot 88,77 \text{ Ом};$$

$$z_H^{(2)} = 1216,08 \cdot (0,19 + j \cdot 0,36) = 231,05 + j \cdot 437,79 \text{ Ом};$$

Расчет сопротивлений ветвей

Ветвь №1

$$z_1^{(1)} = x_{T1}^{(1)} + z_{T1}^{(1)};$$

$$z_1^{(1)} = \frac{2,9 + j \cdot 80,5}{4} + j \cdot \frac{273,29}{4} = 0,725 + j \cdot 88,45;$$

Ветвь №2

$$z_2^{(1)} = z_{H4}^{(1)};$$

$$z_2^{(1)} = 1212,43 + j \cdot 88,77 \text{ Ом};$$

Ветвь №3

$$z_3^{(1)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1;$$

$$z_3^{(1)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 12 = 1,152 + j \cdot 5,148 \text{ Ом};$$

Ветвь №4

$$z_4^{(1)} = z_{T-1}^{(1)} + z_{H-1}^{(1)};$$

$$z_4^{(1)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} + 2060,76 + j \cdot 619,52 = 2064,61 + j \cdot 714,77 \text{ Ом};$$

Ветвь №5

$$z_5^{(1)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1;$$

$$z_5^{(1)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 13,5 = 1,296 + j \cdot 5,791 \text{ Ом};$$

Ветвь №6

$$z_6^{(1)} = z_{T-2}^{(1)} + z_{H-2}^{(1)};$$

$$z_6^{(1)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} + 1708,45 + j \cdot 511,82 = 1712,3 + j \cdot 607,07 \text{ Ом};$$

Ветвь №7

$$z_7^{(1)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1;$$

$$z_7^{(1)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 18 = 1,728 + j \cdot 7,722 \text{ Ом};$$

Ветвь №8

$$z_8^{(1)} = z_{T-3}^{(1)} + z_{H-3}^{(1)};$$

$$z_8^{(1)} = \frac{1,9 + j \cdot 63,5}{2} + 609,46 + j \cdot 182,77 = 610,41 + j \cdot 214,52 \text{ Ом};$$

Ветвь №9

$$z_9^{(1)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1;$$

$$z_9^{(1)} = (0,073 + j \cdot 0,42) \cdot 31,5 = 2,3 + j \cdot 13,23 \text{ Ом};$$

Ветвь №10

$$z_{10}^{(1)} = z_{AT-5}^{(1)} + z_{H-5}^{(1)};$$

$$z_{10}^{(1)} = \frac{0,9 + j \cdot 84,6}{2} + 887,33 + j \cdot 266,1 = 887,78 + j \cdot 308,4 \text{ Ом};$$

Ветвь №11

$$z_{11}^{(1)} = j \cdot x_C^{(1)};$$

$$z_{11}^{(1)} = j \cdot 40 \text{ Ом};$$

Ветвь №12

$$z_{12}^{(2)} = x_{\Gamma}^{(2)} + z_{\Pi}^{(2)};$$

$$z_{12}^{(2)} = \frac{2,9 + j \cdot 80,5}{4} + j \cdot \frac{232,3}{4} = 0,725 + j \cdot 78,2 \text{ Ом};$$

Ветвь №13

$$z_{13}^{(2)} = z_{H4}^{(2)};$$

$$z_{13}^{(2)} = 231,05 + j \cdot 437,79 \text{ Ом};$$

Ветвь №14

$$z_{14}^{(2)} = (r_0^{(2)} + j \cdot x_0^{(2)}) \cdot 1;$$

$$z_{14}^{(2)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 12 = 1,152 + j \cdot 5,148 \text{ Ом};$$

Ветвь №15

$$z_{15}^{(2)} = z_{T-1}^{(2)} + z_{H-1}^{(2)};$$

$$z_{15}^{(2)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} + 387,2 + j \cdot 516,27 = 391,05 + j \cdot 611,52 \text{ Ом};$$

Ветвь №16

$$z_{16}^{(2)} = (r_0^{(2)} + j \cdot x_0^{(2)}) \cdot 1;$$

$$z_{16}^{(2)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 13,5 = 1,296 + j \cdot 5,791 \text{ Ом};$$

Ветвь №17

$$z_{17}^{(2)} = z_{T-2}^{(2)} + z_{H-2}^{(2)};$$

$$z_{17}^{(2)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} + 321 + j \cdot 428 = 324,85 + j \cdot 523,25 \text{ Ом};$$

Ветвь №18

$$z_{18}^{(2)} = (r_0^{(2)} + j \cdot x_0^{(2)}) \cdot 1;$$

$$z_{18}^{(2)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 18 = 1,728 + j \cdot 7,722 \text{ Ом};$$

Ветвь №19

$$z_{19}^{(2)} = z_{T-3}^{(2)} + z_{H-3}^{(2)};$$

$$z_{19}^{(2)} = \frac{1,9 + j \cdot 63,5}{2} + 114,63 + j \cdot 152,84 = 115,58 + j \cdot 184,59 \text{ Ом};$$

Ветвь №20

$$z_{20}^{(2)} = (r_0^{(2)} + j \cdot x_0^{(2)}) \cdot 1;$$

$$z_{20}^{(2)} = (0,073 + j \cdot 0,42) \cdot 31,5 = 2,3 + j \cdot 13,23 \text{ Ом};$$

Ветвь №21

$$z_{21}^{(2)} = z_{AT-5}^{(2)} + z_{H-5}^{(2)};$$

$$z_{21}^{(2)} = \frac{0,9 + j \cdot 84,6}{2} + 166,9 + j \cdot 222,53 = 167,35 + j \cdot 264,83 \text{ Ом};$$

Ветвь №22

$$z_{22}^{(2)} = j \cdot x_C^{(2)};$$

$$z_{22}^{(2)} = j \cdot 40 \text{ Ом};$$

Ветвь №23

$$z_{23}^{(0)} = z_{\Gamma\Gamma}^{(0)} + (r_0^{(0)} + j \cdot x_0^{(0)}) \cdot 1;$$

$$r_0^{(0)} = 3 \cdot r_0^{(1)}; x_0^{(0)} = 3 \cdot x_0^{(1)}$$

$$z_{23}^{(0)} = \frac{2,9 + j \cdot 80,5}{4} + (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 12 \cdot 3 = 4,181 + j \cdot 35,569 \text{ Ом};$$

Ветвь №24

$$z_{24}^{(0)} = z_{T-1}^{(0)};$$

$$z_{24}^{(0)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} = 3,85 + j \cdot 95,25 \text{ Ом};$$

Ветвь №25

$$z_{25}^{(0)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1 \cdot 3;$$

$$z_{25}^{(0)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 13,5 \cdot 3 = 3,89 + j \cdot 17,37 \text{ Ом};$$

Ветвь №26

$$z_{26}^{(0)} = z_{T-2}^{(0)};$$

$$z_{26}^{(0)} = \frac{7,7 + j \cdot 190,5}{2} = 3,85 + j \cdot 95,25 \text{ Ом};$$

Ветвь №27

$$z_{27}^{(0)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1 \cdot 3;$$

$$z_{27}^{(0)} = (0,096 + j \cdot 0,429) \cdot 18 \cdot 3 = 5,184 + j \cdot 23,17 \text{ Ом};$$

Ветвь №28

$$z_{28}^{(0)} = z_{T-3}^{(0)};$$

$$z_{28}^{(0)} = \frac{1,9 + j \cdot 63,5}{2} = 0,95 + j \cdot 31,75 \text{ Ом};$$

Ветвь №29

$$z_{29}^{(0)} = (r_0^{(1)} + j \cdot x_0^{(1)}) \cdot 1 \cdot 3;$$

$$z_{29}^{(0)} = (0,073 + j \cdot 0,42) \cdot 31,5 \cdot 3 = 6,9 + j \cdot 39,69 \text{ Ом};$$

Ветвь №30

$$z_{30}^{(0)} = z_{AT-5}^{(0)};$$

$$z_{30}^{(0)} = \frac{0,9 + j \cdot 84,6}{2} = 0,45 + j \cdot 42,3 \text{ Ом};$$

Ветвь №31

$$z_{31}^{(0)} = j \cdot x_C^{(0)};$$

$$z_{31}^{(0)} = j \cdot 80 \text{ Ом};$$

Результаты расчетов в программе Optima:

Узел №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ua, кВ	230.365	228.606	226.971	225.354	224.81	224.769	225.033	224.871	224.855	224.836	225.147	225.106	225.182	225.171	225.232	225.19
Up, кВ	-5.243	-7.798	-10.154	-12.482	-14.26	-14.384	-13.768	-14.147	-14.175	-14.209	-13.304	-13.427	-13.179	-13.222	-12.852	-13.116
U, кВ	230.425	228.739	227.198	225.7	225.262	225.229	225.454	225.316	225.301	225.284	225.539	225.506	225.567	225.559	225.598	225.572

Ветвь №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ia, A	423.797	108.939	314.858	-56.411	258.447	-66.906	191.541	186.024	-5,516	127.535	122.018	2.816	0.48	3.296	0.349	3.646
Ip, A	-137.29	10.428	126.863	21.71	105.151	27.144	-78.007	77.182	0.824	53.657	-52.839	-1.17	0.04	-1.131	0.055	-1.073
I, A	445.48	109.437	339.455	60.445	279.019	72.203	206.816	201.4	5.577	138.362	132.967	3.049	0.482	3.485	0.354	3.801

Ветвь №	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Ia, A	0.449	4.095	1.422	-5.516	-0.602	-4.914	1.037	0.388	1.424	0.648	2.073	3.444	-5.516	-3.61	-1.906
Ip, A	0.061	-1.011	0.191	0.824	-0.222	1.046	-0.013	-0.035	-0.047	-0.091	-0.137	-0.686	0.824	0.526	0.299
I, A	0.453	4.218	1.435	5.577	0.642	5.025	1.037	0.389	1.425	0.654	2.077	3.511	5.577	3.648	1.929

Расчет тока в генераторе

$$I_{\Gamma} = \begin{pmatrix} I_{\Gamma A} \\ I_{\Gamma B} \\ I_{\Gamma C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{\Gamma}^{(1)} \\ I_{\Gamma}^{(2)} \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$I_{\Gamma}^{(1)} = I_1 \cdot k_T \cdot e^{j30^\circ};$$

$$I_{\Gamma}^{(2)} = I_{12} \cdot k_T \cdot e^{-j30^\circ};$$

$$I_1 = 423,797 - j \cdot 137,29 = 445,48 \cdot e^{-j17,95^\circ} \text{ A};$$

$$I_{12} = 2,816 - j \cdot 1,17 = 3,05 \cdot e^{-j22,56^\circ} \text{ A};$$

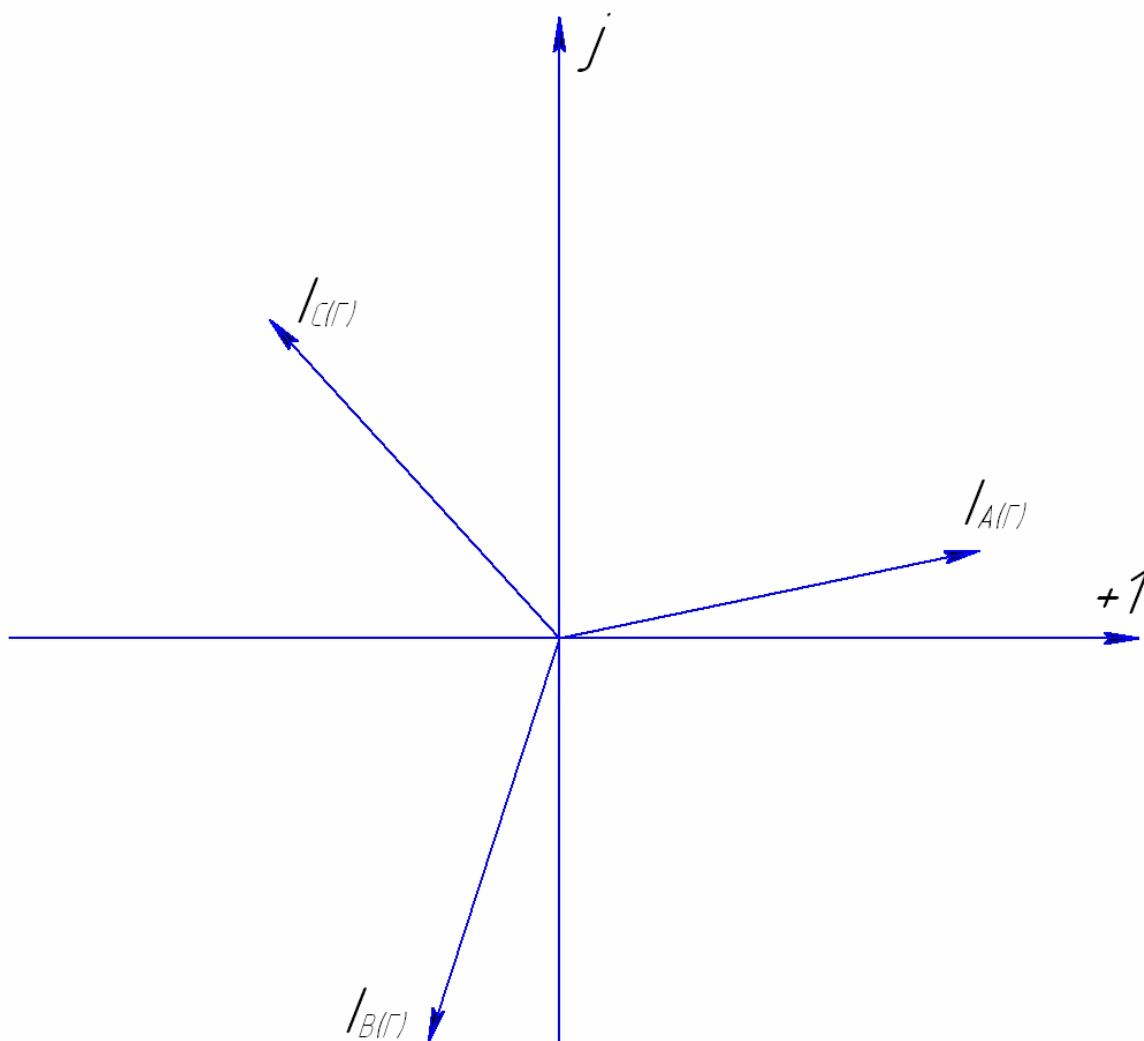
$$I_{\Gamma}^{(1)} = 445,48 \cdot e^{-j17,95^\circ} \cdot \frac{242}{10,5} \cdot e^{j30^\circ} = 10267 \cdot e^{j12,05^\circ} \text{ A};$$

$$I_{\Gamma}^{(2)} = 3,05 \cdot e^{-j22,56^\circ} \cdot \frac{242}{10,5} \cdot e^{-j30^\circ} = 70,3 \cdot e^{-j52,56^\circ} \text{ A};$$

$$I_{\Gamma A} = I_{\Gamma}^{(1)} + I_{\Gamma}^{(2)} = 10267 \cdot e^{j12,05^\circ} + 70,3 \cdot e^{-j52,56^\circ} = 10297,34 \cdot e^{j11,7^\circ} \text{ A};$$

$$\begin{aligned} I_{\Gamma B} &= I_{\Gamma}^{(1)} \cdot a^2 + I_{\Gamma}^{(2)} \cdot a = 10267 \cdot e^{j12,05^\circ} \cdot e^{j240^\circ} + 70,3 \cdot e^{-j52,56^\circ} \cdot e^{j120^\circ} = \\ &= 10267 \cdot e^{j252,05^\circ} + 70,3 \cdot e^{j67,44^\circ} = 10196,93 \cdot e^{-j107,92^\circ} \text{ A}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\Gamma C} &= 10267 \cdot e^{j12,05^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 70,3 \cdot e^{-j52,56^\circ} \cdot e^{j240^\circ} = \\ &= 10267 \cdot e^{j132,05^\circ} + 70,3 \cdot e^{j187,44^\circ} = 10307,09 \cdot e^{j132,37^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$



Расчет тока в месте обрыва фаз «В» и «С»

$$I = \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I^{(1)} \\ I^{(2)} \\ I^{(0)} \end{pmatrix};$$

$$I_A = I^{(1)} + I^{(2)} + I^{(0)} = 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} = 16,731 \cdot e^{j171,5^\circ} \text{ A};$$

$$I_B = I^{(1)} \cdot a^2 + I^{(2)} \cdot a + I^{(0)} = 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} \cdot e^{j240^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} = 0 \text{ A};$$

$$I_C = I^{(1)} \cdot a + I^{(2)} \cdot a^2 + I^{(0)} = 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} \cdot e^{j240^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} \cdot e^{j120^\circ} + 5,577 \cdot e^{j171,5^\circ} = 0 \text{ A};$$

