



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Энергетика, автоматика и системы коммуникаций»

# **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям  
по дисциплине

## **«Электроэнергетические системы и сети»**

Автор

Хлебников В.К.

Ростов-на-Дону, 2016



## Аннотация

Настоящие указания содержат индивидуальные задания и рекомендации по решению задач расчёта режимов электрических сетей, предусмотренных программой дисциплины «Электроэнергетические системы и сети». Приведены примеры решения типовых задач.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

## Автор

к.т.н., доцент, профессор кафедры  
Хлебников В.К.



## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Варианты исходных данных .....</b>	<b>5</b>
<b>Содержание заданий.....</b>	<b>15</b>
<b>Указания к выполнению заданий .....</b>	<b>16</b>
Задание А. Схемы замещения элементов электрической сети и их параметры .....	16
Задание Б. Расчёты параметров режимов простейших электрических сетей .....	24
Задание В. Расчёт параметров установившихся режимов в сложных электрических сетях .....	40
<b>Литература.....</b>	<b>58</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Каждый студент выполняет на практических занятиях индивидуальные задания в соответствии с вариантом, указанным преподавателем. Содержание задания определяется данными табл. 1 - 3 и одной из схем (рис. 1-9).

Схема сети является сквозной для всех тем практических занятий. На её базе в соответствии с темой занятия формируется конкретное задание.

Выполняя задание «А» по темам 2.1 и 2.2 рабочей программы дисциплины «Электроэнергетические системы и сети» (далее «рабочей программы»), из заданной схемы выделяются одна линия и одна подстанция, для которых необходимо составить схемы замещения и определить их параметры.

При выполнении задания «Б» по темам 3.1, 3.2, 4 «рабочей программы» для исходной сети необходимо составить схему замещения всей сети (расчётную схему) и определить её параметры. Далее из расчётной схемы сети выделяется разомкнутая, а затем простейшая замкнутая часть схемы и рассчитываются режимы разомкнутой и замкнутой сети.

При выполнении задания «В» по темам 3.3, 5.2, 5.3 «рабочей программы», пользуясь полной схемой сети, необходимо определить параметры режима посредством различных методов расчёта сложных электрических сетей.

## ВАРИАНТЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Вариант задания состоит из 7 цифр (например, номера вашего телефона):

первая — номер схемы электрической сети (рис. 1-9);

вторая — длины линий (табл. 1);

третья — номера марок проводов для соответствующих линий (табл. 1), их погонные параметры приведены в табл. 2;

четвертая — номера типов трансформаторов, установленных на подстанциях (табл. 1), их паспортные данные находятся в табл. 3;

пятая — модуль базисного напряжения на шинах балансирующей электростанции ЭС1, Уэ1 (табл. 1);

шестая — мощность генерации станции ЭС2, Рэс2, Qэс2 (табл. 1);

седьмая — данные о нагрузках на шинах подстанций Р, cos φ (табл. 1).

Таблица 1. – Варианты задания

Позиция цифры в номере варианта	Вид данных	Значение цифр в варианте									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Первая	<b>Номер рисунка</b>										
	Рис.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
Вторая	<b>Длина линий, км</b>										
	Л 1	100	110	80	95	80	80	75	90	80	95
	Л 2	80	100	70	45	70	60	65	75	90	75
	Л 3	40	45	50	55	60	40	45	50	55	35
	Л 4	20	25	40	35	50	45	30	35	45	20
	Л 5	60	30	20	50	45	25	35	55	40	55
	Л 6	40	45	50	35	40	45	60	35	55	40
Л 7	35	20	35	25	45	60	55	25	30	35	
Третья	<b>Номер марки провода линии (данные о параметрах в табл. 2)</b>										
	Л 1	6	8	9	9	8	7	6	8	7	8
	Л 2	9	9	6	8	7	9	7	6	8	9
	Л 3, 4, 5	6	7	6	7	6	7	6	7	6	6
	Л 6	5	1	2	7	4	2	3	6	5	5
Л 7	1	6	5	4	3	7	2	3	4	1	
Четвёртая	<b>Номер типа трансформатора ПС (данные о параметрах в табл. 3)</b>										
	ПС А	22	22	23	21	20	23	22	20	23	22
	ПС Б	21	20	21	20	23	21	20	23	21	21
	ПС В	13	12	11	10	4	6	5	3	8	13
	ПС Г	14	14	15	14	16	14	15	16	17	14
ПС Д	2	4	1	3	5	3	4	6	7	2	

## Электроэнергетические системы и сети

Пятая	<b>Напряжение на шинах балансирующей станции ЭС 1</b>										
	$U_{ЭС1}$ , кВ	242	241	240	239	238	237	236	235	234	241
Шестая	<b>Генерация станции ЭС 2</b>										
	$P_{ЭС2}$ , МВт	40	35	25	20	35	25	40	15	25	40
	$Q_{ЭС2}$ , Мвар	20	15	20	25	25	10	15	5	10	15
Седьмая	<b>Максимальная нагрузка на подстанции и коэффициент мощности</b>										
	$P_A$ , МВт	70	65	90	60	55	80	75	50	85	55
	$\cos \varphi_A$	0,90	0,85	0,95	0,89	0,85	0,90	0,89	0,85	0,65	0,80
	$P_B$ , МВт	45	35	30	40	60	65	50	75	55	40
	$\cos \varphi_B$	0,89	0,85	0,75	0,95	0,95	0,75	0,75	0,89	0,75	0,85
	$P_{B1}$ , МВт	50	18	22	20	15	15	20	10	18	45
	$\cos \varphi_{B1}$	0,75	0,79	0,65	0,75	0,75	0,65	0,75	0,79	0,65	0,70
	$P_{B2}$ , МВт	30	25	15	10	20	45	25	10	6	28
	$\cos \varphi_{B2}$	0,70	0,85	0,69	0,75	0,77	0,78	0,75	0,65	0,65	0,75
	$P_G$ , МВт	20	35	40	25	70	35	45	75	90	18
	$\cos \varphi_G$	0,65	0,80	0,79	0,78	0,90	0,65	0,85	0,75	0,85	0,70
	$P_D$ , МВт	40	60	14	30	55	35	40	65	70	35
$\cos \varphi_D$	0,75	0,90	0,89	0,85	0,95	0,75	0,79	0,88	0,95	0,70	

Электроэнергетические системы и сети

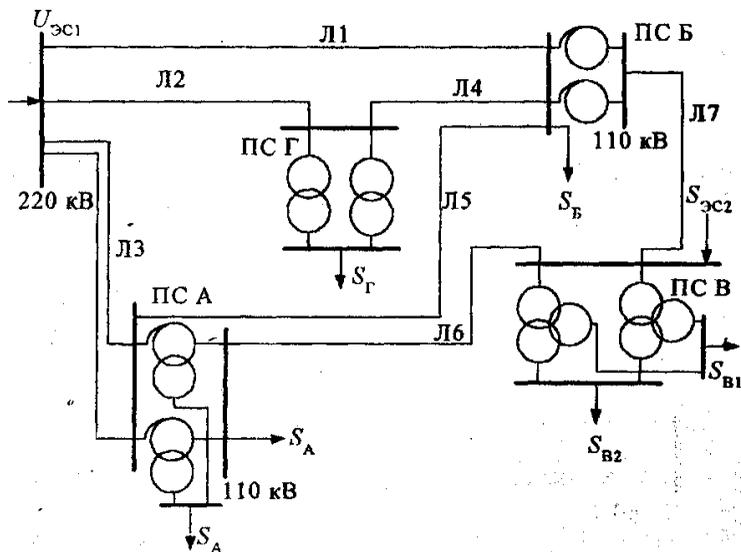


Рисунок 1

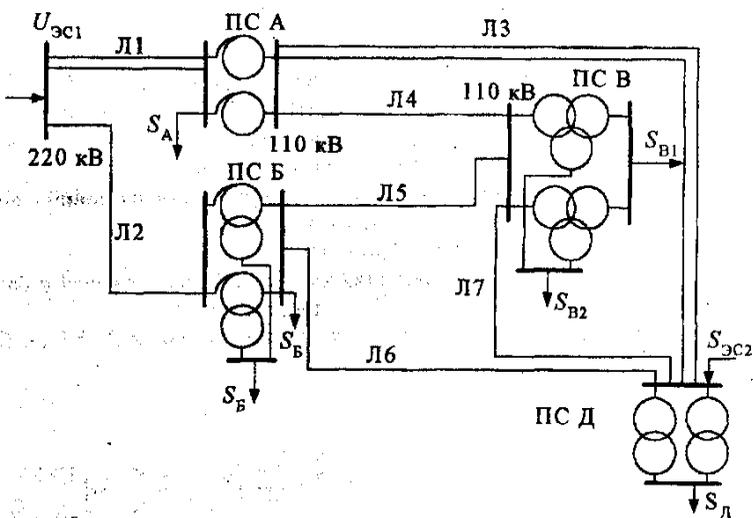


Рисунок 2

Электроэнергетические системы и сети

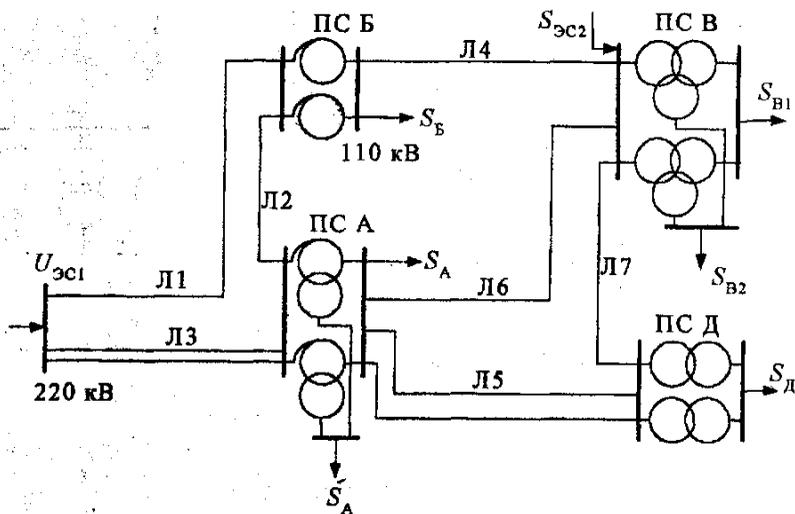


Рисунок 3

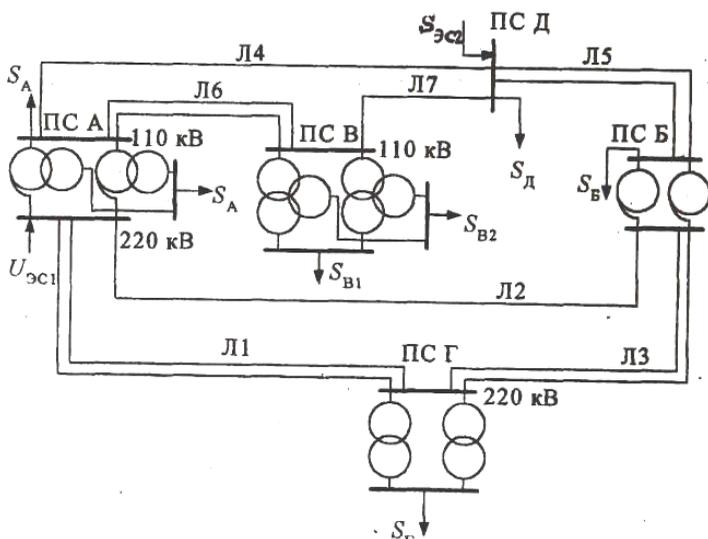


Рисунок 4

Электроэнергетические системы и сети

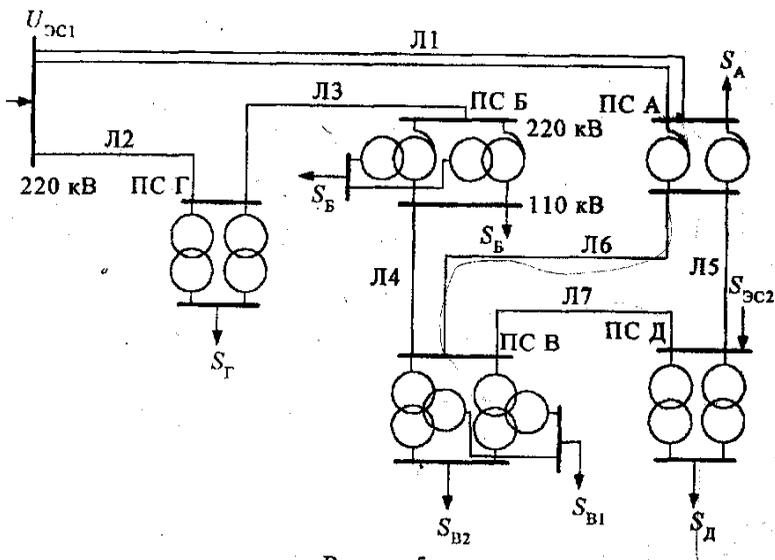


Рисунок 5

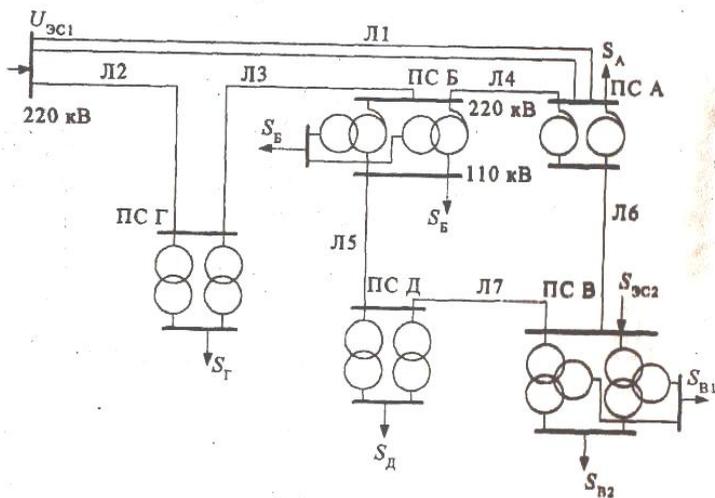


Рисунок 6

Электроэнергетические системы и сети

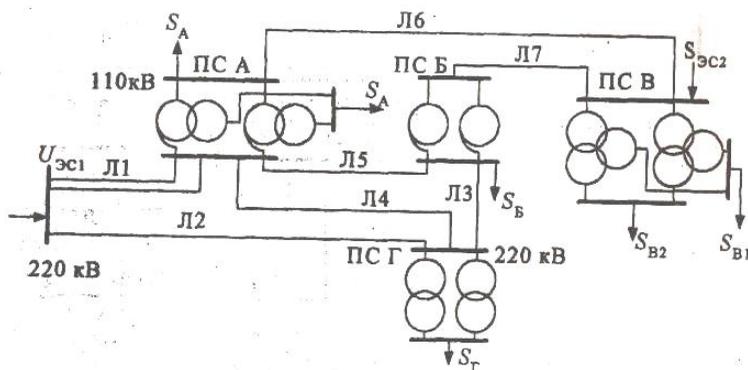


Рисунок 7

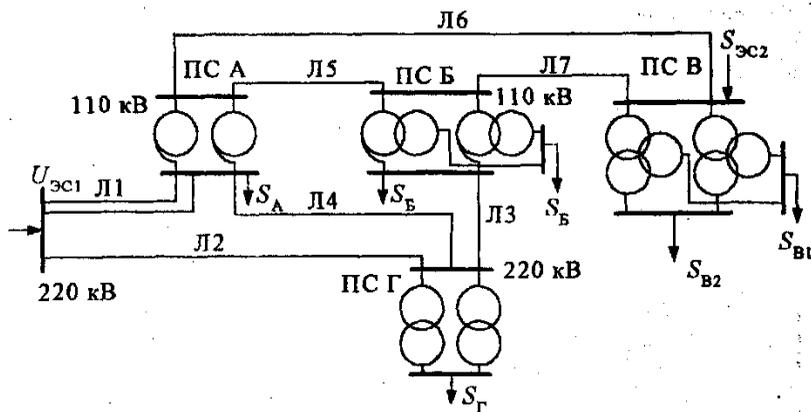


Рисунок 8

## Электроэнергетические системы и сети

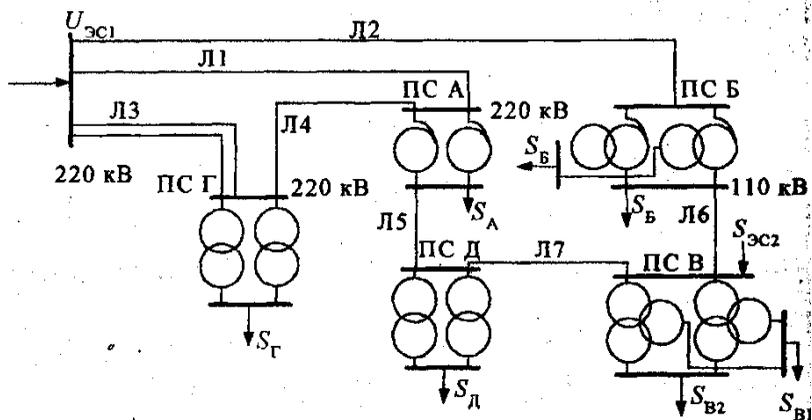


Рисунок 9

Таблица 2. – Параметры проводов линий

Номер марки провода из табл. 1	Марка провода	Погонные параметры					Дли-тельно допу-стимый ток, А
		$r_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$	110 кВ		220 кВ		
			$x_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$	$b_0, \frac{\text{мкСм}}{\text{км}}$	$x_0, \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$	$b_0, \frac{\text{мкСм}}{\text{км}}$	
1	АС-70	0,428	0,444	2,55			265
2	АС-95	0,306	0,434	2,61			330
3	АС-120	0,249	0,427	2,66			380
4	АС-150	0,198	0,420	2,70			445
5	АС-185	0,162	0,413	2,75			510
6	АС-240	0,120	0,405	2,81	0,435	2,60	610
7	АС-300	0,098	0,309	2,85	0,429	2,64	690
8	АС-400	0,075			0,420	2,70	825
9	АС-500	0,060			0,413	2,74	945

Электроэнергетические системы и сети

Таблица 3. - Паспортные данные трансформаторов

Номер типа из табл.1	Тип трансформатора	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном}$ обмоток, кВ			Пределы регулирования РПН на стороне ВН(СН)	$U_{кз}, \%$			$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x, \%$
			В	С	Н		В-С	В-Н	С-Н			
1	ТДН-10000/110	10	115	-	11	$\pm 9 \times 1,78\%$	-	10,5	-	60	14	0,7
2	ТДН-16000/110	16	115	-	6,6	$\pm 9 \times 1,78\%$	-	10,5	-	85	19	0,7
3	ТРДН-25000/110	25	115	-	10,5/10,5	$\pm 9 \times 1,78\%$	-	10,5	-	120	27	0,7
4	ТРДН-40000/110	40	115	-	6,3/6,3	$\pm 9 \times 1,78 \%$	-	10,5	-	172	36	0,65
5	ТРДЦН-63000/110	63	115	-	6,3/6,3	$\pm 9 \times 1,78 \%$	-	10,5	-	260	59	0,6
6	ТРДЦН-80000/110	80	115	-	6,3/6,3	$\pm 9 \times 1,78\%$	-	10,5	-	310	70	0,6
7	ТРДЦН-125000/110	125	115	-	10,5/10,5	$\pm 9 \times 1,78\%$	-	10,5	-	400	120	0,55
8	ТДТН-10000/110	10	115	38,5	6,6"	$\pm 9 \times 1,78\%$	10,5	17	6	76	17	1,1
9	ТДТН - 16000/110	16	115	38,5	11	$\pm 9 \times 1,78\%$	10,5	17	6	100	23	1,0
10	ТДТН-25000/110	25	115	38,5	6,6.	$\pm 9 \times 1,78 \%$	10,5	17,5	6,5	140	31	0,7



Электроэнергетические системы и сети

11	ТДТН-40000/110	40	115	38,5	6,6	$\pm 9 \times 1,78 \%$	10,5	17	6	200	43	0,6
12	ТДТН-63000/110	63	115	38,5	11	$\pm 9 \times 1,78 \%$	10,5	17	6,5	290	56	0,7
13	ТДТН - 80000/110	80	115	38,5	11	$\pm 9 \times 1,78 \%$	11	18,5	7	390	82	0,6
14	ТРДН-40000/220	40	230	-	11/11	$\pm 8 \times 1,5 \%$	-	12	---	170	50	0,9
15	ТРДЦН-63000/220	63	230	-	6,6/6,6	$\pm 8 \times 1,5 \%$	-	12	-	300	82	0,8
16	ТРДЦН-100000/220	100	230	-	11/11	$\pm 8 \times 1,5 \%$	-	12	-	360	115	0,7
17	ТРДЦН-160000/220	160	230	-	11/11	$\pm 8 \times 1,5 \%$	-	12	-	525	167	0,6
18	ТДТН-25000/220	25	230	38,5	6,6	$\pm 12 \times 1 \%$	12,5	20	6,5	135	50	1,2
19	ТДТН-40000/220	40	230	38,5	6,6	$\pm 12 \times 1 \%$	12,5	22	9,5	220	55	1,1
20	АТДЦТН-63000/220/110	63	230	121	11	$\pm 6 \times 2 \%$	11	35,7	21,9	215	45	0,5
21	АТДЦТН-125000/220/110	125	230	121	6,6	$\pm 6 \times 2 \%$	11	45	28	290	85	0,5
22	АТДЦТН-200000/220/110	200	230	121	11	$\pm 6 \times 2 \%$	11	32	20	430	125	0,5



Электроэнергетические системы и сети

23	АТДПЦН- 250000220110	250	230	121	10,5	$\pm 6 \times 2\%$	11,5	33,4	20,8	520	145	0,5
----	-------------------------	-----	-----	-----	------	--------------------	------	------	------	-----	-----	-----

ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Для автотрансформаторов соотношение мощностей обмоток ВН/СН/НН составляет 100/100/50%.
2. Регулирование напряжения для двухобмоточного трансформатора осуществляется на стороне ВН, автотрансформатора - на стороне СН, трехобмоточного - на стороне ВН (РПН) и СН (ПБВ  $\pm 2 \times 2,5\%$ ).

## СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЙ

Задание А. Параметры схем замещения элементов электрических сетей

Составить схему замещения и определить параметры линии, указанной преподавателем.

Составить схему замещения двух параллельно работающих трансформаторов (автотрансформаторов) и определить их параметры для подстанции, заданной преподавателем.

Задание Б. Расчеты параметров режимов простейших электрических сетей

1. Составить полную схему замещения электрической сети, определить её параметры.

2. Исключить из полной схемы п. Б.1 две (три) линии так, чтобы схема была разомкнутой, но оставалась связанной с балансирующей станцией ЭС 1, и определить параметры режима получившейся разомкнутой электрической сети.

3. Добавить одну линию для схемы п. Б.2 и рассчитать режим кольцевой электрической сети.

4. Определить структуру годовых потерь электроэнергии в электрической сети.

Задание В. Расчёты параметров установившихся режимов сложных электрических сетей

Определить приближенное потокораспределение в расчетной схеме исходной электрической сети методом преобразования.

Для расчетной схемы исходной электрической сети составить в развернутом виде уравнения узловых напряжений.

Определить значения напряжений в узлах расчетной схемы исходной электрической сети с помощью уравнений узловых напряжений. Определить мощности в ветвях.

Выбрать коэффициенты трансформации трансформаторов для обеспечения встречного регулирования напряжения на шинах подстанций.

Для заданной схемы электрической сети подготовить исходные данные и выполнить расчёт установившегося режима с помощью ПЭВМ по программе RasrtWin.

## Электроэнергетические системы и сети

### УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ

#### Задание А. Схемы замещения элементов электрической сети и их параметры

На рис. 10 – 17: а – условное изображение элемента электрической сети; б, в – виды схем замещения этого элемента (б – точная, в – упрощенная).

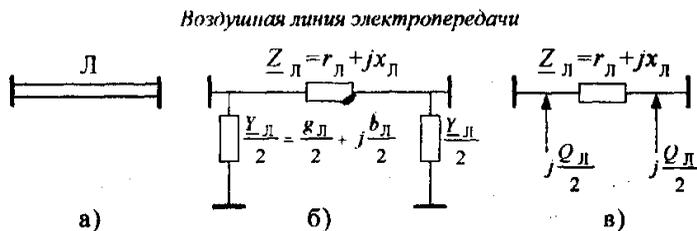


Рисунок 10

Параметры линии  $r_L$ ,  $x_L$ , Ом,  $g_L$ ,  $b_L$ , мкСм,  $Q_L$ , Мвар, состоящей из  $n$  цепей, определяются по формулам:

$$r_L = r_0 \frac{L}{n}; \quad x_L = x_0 \frac{L}{n};$$

$$\underline{Z}_L = r_L + jx_L;$$

$$b_L = b_0 Ln;$$

$$g_L = g_0 Ln = \frac{\Delta P_K 10^3}{U_{НОМ}^2} Ln;$$

$$\underline{Y}_L = g_L + jb_L;$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$Q_{\text{л}} = b_{\text{л}} U_{\text{ном}}^2 10^{-6},$$

где  $L$  – длина линии, км;

$r_0, x_0$  – погонные активное и реактивное сопротивления линии (табл.2), Ом/км;

$b_0$  – погонная ёмкостная проводимость линии (табл. 2), мкСм/км;

$\Delta P_{\text{к}}$  – удельные потери мощности на корону, кВт/км [3];

$U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение линии, кВ.

Для линий напряжением 220 кВ и ниже активная проводимость линии  $g_{\text{л}}$  не учитывается.

Двухобмоточные трансформаторы

Для подстанции, на которой установлены  $n$  двухобмоточных трансформаторов, применяется схема замещения, приведенная на рисунках 11, б, в.

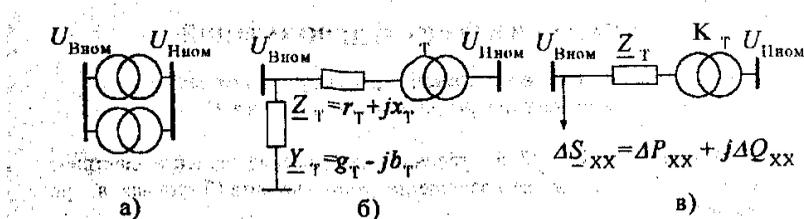


Рисунок 11

Параметры  $r_T, x_T, \text{Ом}, Q_{XX}, \text{Мвар}, g_T, b_T, \text{мкСм}$  определяются по формулам:

## Электроэнергетические системы и сети

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_{B\text{НОМ}}^2}{n S_{\text{НОМ}}^2} 10^{-3}; \quad Z_T = |Z_T| = \frac{u_K U_{B\text{НОМ}}^2}{n S_{\text{НОМ}}} 10^{-2}; \quad x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2};$$

$$g_T = \frac{\Delta P_X n}{U_{B\text{НОМ}}^2} 10^3; \quad Y_T = |Y_T| = \frac{I_X n S_{\text{НОМ}}}{U_{B\text{НОМ}}^2} 10^4; \quad b_T = \sqrt{Y_T^2 - g_T^2};$$

$$\underline{Y}_T = g_T - j b_T; \quad \underline{Z}_T = r_T + j x_T;$$

$$\Delta P_{XX} = n \Delta P_X 10^{-3}; \quad \Delta S_{XX} = I_X n S_{\text{НОМ}} 10^{-2}; \quad \Delta Q_{XX} = \sqrt{\Delta S_{XX}^2 - \Delta P_{XX}^2}; \quad k_T = \frac{U_{H\text{НОМ}}}{U_{B\text{НОМ}}}$$

где  $S_{\text{НОМ}}$ ,  $U_{B\text{НОМ}}$  – номинальные мощность (МВ·А) и напряжение стороны ВН (кВ) трансформатора (табл. 3);

$n$  – число параллельно включённых трансформаторов;

$\Delta P_K$  – потери мощности короткого замыкания (КЗ), кВт (табл. 3);

$u_K$  – напряжение КЗ трансформатора (табл. 3), %;

$\Delta P_X$  – потери мощности холостого хода (ХХ), кВт (табл. 3);

$I_X$  – ток ХХ, % (табл. 3).

## Трёхобмоточные трансформаторы

Схемы замещения подстанции, на которой установлены  $n$  трёхобмоточных трансформаторов, приведены на рис. 12, б, в.

Мощность обмотки В  $S_{BН} = S_{\text{НОМ}}$ . Существуют трёхобмоточные трансформаторы с различными соотношениями номинальных мощностей обмоток  $S_{BН} / S_{СН} / S_{HН}$ : 100/100/100 %, 100/100/66,7 %, 100/66,7/66,7 %.

## Электроэнергетические системы и сети

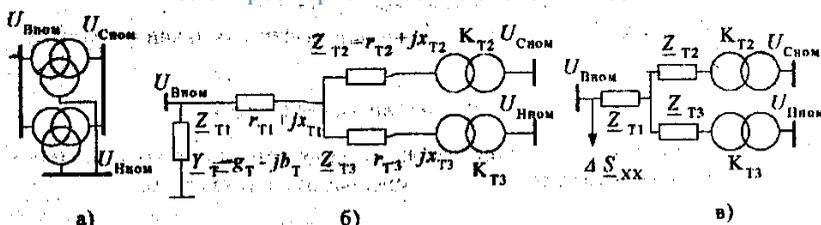


Рисунок 12

Активные сопротивления обмоток определяются по формулам:

$$r_{T1} = R_B = \frac{R_{B-C}}{1 + \alpha + (1 - \alpha)^2 / \beta}; \quad r_{T2} = R_C = \frac{R_B}{\alpha}; \quad r_{T3} = R_H = \frac{R_B}{\beta}$$

где

$$R_{B-C} = \frac{\Delta P_K U_{B\text{НОМ}}^2}{n S_{\text{НОМ}}^2} 10^{-3}; \quad \alpha = \frac{S_{CH}}{S_{\text{НОМ}}}; \quad \beta = \frac{S_{HH}}{S_{\text{НОМ}}}$$

Реактивные сопротивления обмоток определяются из равенств:

$$Z_{T1} = \frac{(u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H}) U_{B\text{НОМ}}^2}{2 n S_{\text{НОМ}}^2} 10^{-2}; \quad x_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - r_{T1}^2};$$

$$Z_{T2} = \frac{(u_{KB-C} + u_{KC-H} - u_{KB-H}) U_{B\text{НОМ}}^2}{2 n S_{\text{НОМ}}^2} 10^{-2}; \quad x_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - r_{T2}^2};$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$Z_{Т3} = \frac{(u_{к\ С-Н} + u_{к\ В-Н} - u_{к\ В-С})}{2} \frac{U_{В\ НОМ}^2}{nS_{НОМ}} 10^{-2}; \quad x_{Т3} = \sqrt{Z_{Т3}^2 - r_{Т3}^2}.$$

Если расчётное значение  $Z_{Т2}$  или  $Z_{Т3}$  окажется отрицательным, то  $x_{Т2}$  ( $x_{Т3}$ ) следует приравнять к нулю. Коэффициент трансформации в ветви обмотки СН

$$k_{Т2} = \frac{U_{С\ НОМ}}{U_{В\ НОМ}}$$

в ветви обмотки НН

$$k_{Т3} = \frac{U_{Н\ НОМ}}{U_{В\ НОМ}}.$$

Потери мощности в стали и проводимости трёхобмоточных трансформаторов определяется так же, как для двухобмоточных трансформаторов.

### Автотрансформаторы

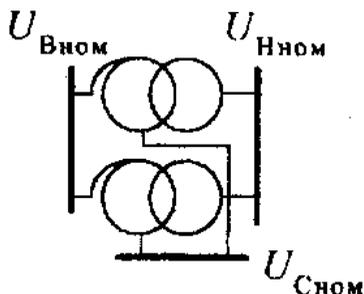


Рисунок 13

Схемы замещения (рис. 12, б, в) и формулы для расчета параметров трёхобмоточных трансформаторов справедливы и для автотрансформаторов. Соотношение мощностей обмоток низшего и высшего напряжения равно 0,5.

Схемы замещения автотрансформаторов, у которых обмотка низшего напряжения не используется, такие же, как у двухобмоточных трансформаторов (рис. 11,б, в). При расчёте сопротивлений обмоток автотрансформаторов в этом случае в формулах, приведённых для двухобмоточных трансформаторов, принимается  $\Delta P_k = \Delta P_{к\text{-В-С}}$ ;  $u_k = u_{к\text{-В-С}}$ .

#### Трансформаторы с расщеплённой обмоткой

Такие трансформаторы имеют, как правило, две одинаковых обмотки низшего напряжения и могут работать в 2 режимах:

- обе обмотки работают на одну нагрузку;
- каждая обмотка работает на свою нагрузку.

В первом случае трансформаторы с расщеплёнными обмотками имеют схемы замещения, как у двухобмоточных трансформаторов, и расчет их параметров выполняется по формулам, приведенным для двухобмоточных трансформаторов.

Для второго случая схемы замещения трансформатора с

Электроэнергетические системы и сети

расщеплённой обмоткой изображены на рисунках 14, б, в.

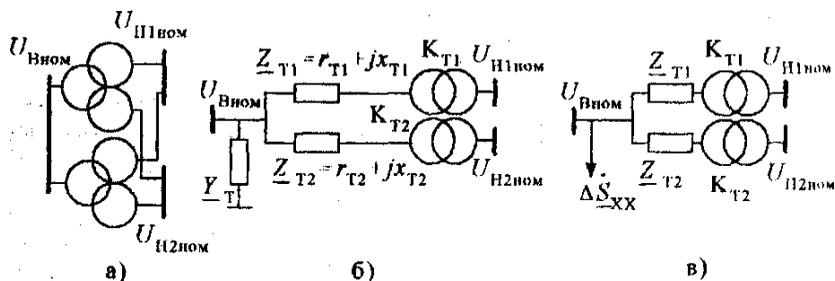


Рисунок 14

Сопротивления обмоток, Ом

$$r_{T1} = r_{T2} = 2 \frac{\Delta P_K U_{B\text{ном}}^2}{n S_{\text{ном}}^2} 10^{-3}; \quad Z_{T1} = Z_{T2} = 2 \frac{u_K U_{B\text{ном}}^2}{n S_{\text{ном}}} 10^{-2}; \quad x_{T1} = x_{T2} = \sqrt{Z_{T1}^2 - r_{T1}^2}.$$

Коэффициенты трансформации по основным выводам обмоток

$$k_{T1} = \frac{U_{H1\text{ном}}}{U_{B\text{ном}}}; \quad k_{T2} = \frac{U_{H2\text{ном}}}{U_{B\text{ном}}}.$$

Потери холостого хода и проводимости определяются, как для двухобмоточного трансформатора.

## Электроэнергетические системы и сети

### Синхронный компенсатор

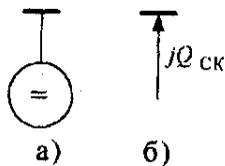


Рисунок 15

На рисунке 15  $Q_{СК}$  – вырабатываемая реактивная мощность СК.

### Батарея статических конденсаторов

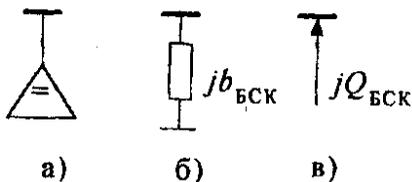


Рисунок 16

На рис.16  $b_{БСК} = Q_{БСК} / U_{НОМ}^2$ .

Потери активной мощности в СК и БСК при расчетах не учитываются.

Электроэнергетические системы и сети

Нагрузка

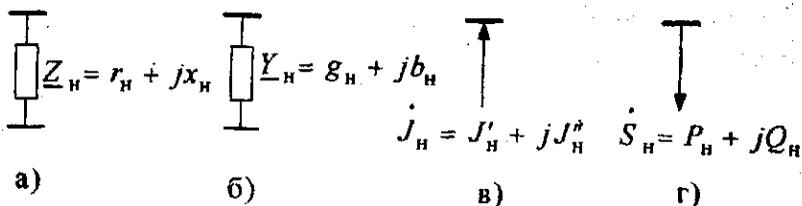


Рисунок 17

**Задание Б. Расчёты параметров режимов простейших электрических сетей**

**Составление полной схемы замещения электрической сети и определение её параметров**

В качестве примера рассматривается схема электрической сети (рис. 18), полная схема замещения которой приведена на рис. 19.

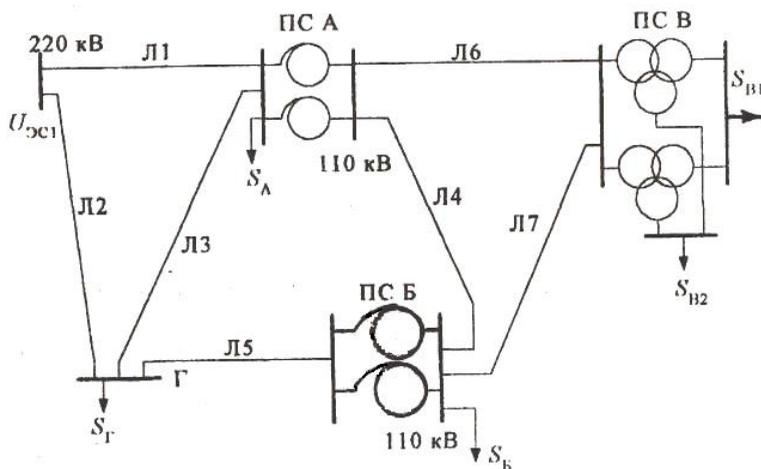


Рисунок 18

Электроэнергетические системы и сети

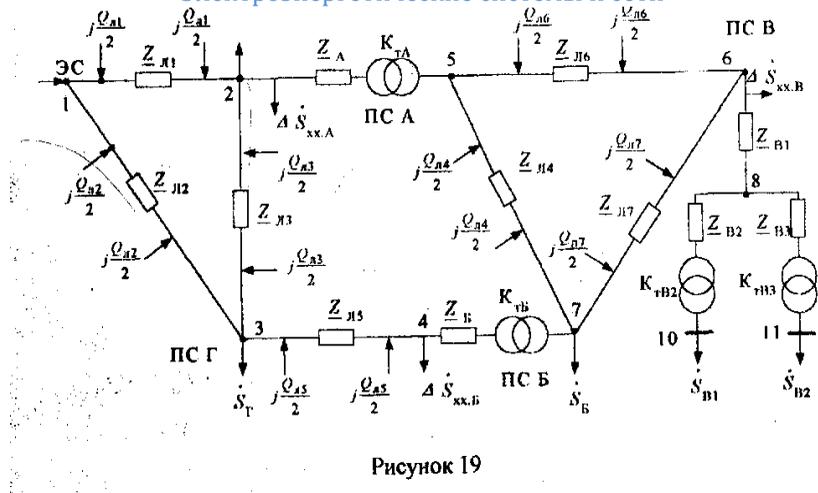


Рисунок 19

Параметры схем замещения всех элементов определяются в соответствии с указаниями к заданию А. Результаты расчетов параметров элементов электрических сетей рекомендуется свести в табл. 4 и 5.

Таблица 4. - Параметры схем замещения линий

Наименование линий	$r_{лr}$ Ом	$x_{лr}$ Ом	$b_{лr}$ мкСм	$Q_{лr}$ Мвар
Л-1				

Таблица 5. - Параметры схем замещения трансформаторов

Наименование ПС	$\Delta P_{кx} + jQ_{кx}$ МВ·А	$g_T - jb_T$ мкСм	$r_{T1} + jx_{T1}$ Ом	$k_{T1}$	$r_{T2} + jx_{T2}$ Ом	$k_{T2}$	$r_{T3} + jx_{T3}$ Ом	$k_{T3}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПС А								

### Электроэнергетические системы и сети

Примечание:

1. Для двухобмоточных трансформаторов не заполняются колонки 6, 7, 8, 9.

В колонке 4 указывается сопротивление двухобмоточного трансформатора.

Для ветви обмотки высшего напряжения трёхобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов)  $k_{T1}=1$ .

### Составление расчётной схемы электрической сети и определение её параметров

Расчётную схему электрической сети получим из схемы, приведённой на рис. 19, путем определения расчётных нагрузок и объединения последовательных элементов схемы. Расчётная схема рассматриваемой сети представлена на рис. 20.

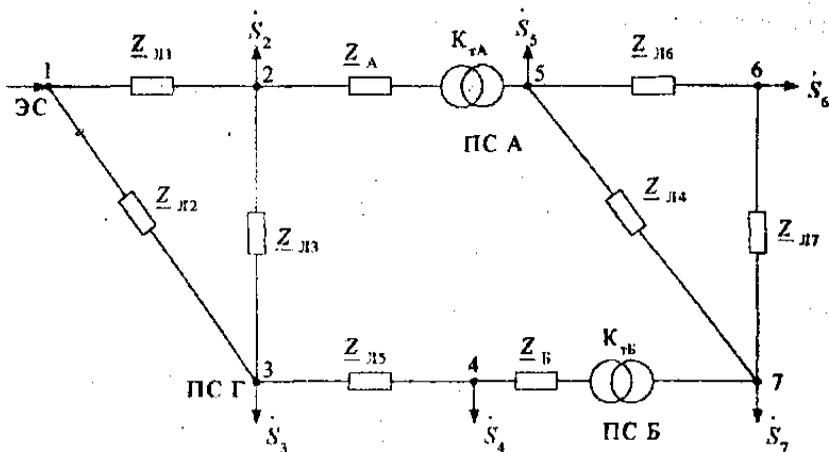


Рисунок 20

Расчётные нагрузки узлов определяются как алгебраические суммы заданных нагрузок  $S_A, S_B, S_B, S_Г$ , потерь мощности в трансформаторах ПС и зарядных мощностей линий, присоединённых к соответствующим узлам. Например, расчетная нагрузка для ПС В равна

## Электроэнергетические системы и сети

$$\underline{S}_6 = \underline{S}_{B1} + \frac{P_{B1}^2 + Q_{B1}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \underline{Z}_{B2} + \underline{S}_{B2} + \frac{P_{B2}^2 + Q_{B2}^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \underline{Z}_{B3} +$$

$$\frac{(P_{B1} + P_{B2})^2 + (Q_{B1} + Q_{B2})^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \underline{Z}_{B1} + \Delta \underline{S}_{\text{xx B}} - j \frac{Q_{\text{Л}6}}{2} - j \frac{Q_{\text{Л}7}}{2},$$

для ПС Г

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_\Gamma - j \frac{Q_{\text{Л}2}}{2} - j \frac{Q_{\text{Л}3}}{2} - j \frac{Q_{\text{Л}5}}{2}.$$

Данные о параметрах расчётной схемы электрической сети целесообразно свести в табл. 6.

Таблица 6. - Параметры расчётной схемы сети (рис. 20)

Узлы	Расчетные нагрузки $P+jQ, \text{ МВ}\cdot\text{А}$	Ветви $i-j$	Сопротивления $r+jx, \text{ Ом}$
2		1-2	
3		1-3	
7		7-6	
...		....	

### Определение параметров режима разомкнутой электрической сети

Цель расчёта состоит в определении мощностей в ветвях и напряжений в узлах схемы. Расчёт режима выполняется итерационным методом. Каждая итерация состоит из 2 этапов.

Первый этап определение мощностей в ветвях. Расчёт ведется от наиболее удалённых точек схемы к балансирующему узлу. Мощность в начале ветви

$$\underline{S}_{\text{нач}} = \underline{S}_{\text{кон}} + \Delta \underline{S}_Z,$$

## Электроэнергетические системы и сети

где  $\underline{S}_{\text{кон}} = P_{\text{кон}} + jQ_{\text{кон}}$  – мощность в конце ветви;

$\Delta \underline{S}_Z$  – потери мощности в сопротивлении ветви

$$\underline{Z} = r + jx$$

$$\Delta \underline{S}_Z = \frac{P_{\text{кон}}^2 + Q_{\text{кон}}^2}{U_{\text{кон}}^2} (r + jx)$$

Здесь  $U_{\text{кон}}$  – модуль напряжения в конце ветви, рассчитанный на предыдущем шаге (итерации); на 1-м шаге  $U_{\text{кон}} = U_{\text{ном}}$ .

Второй этап - определение напряжения в узлах. Расчёт ведётся от балансирующего узла. При этом напряжение в конце ветви

$$\dot{U}_{\text{кон}} = \dot{U}_{\text{нач}} - \dot{U}_Z,$$

где  $\dot{U}_{\text{нач}}$ , – напряжение в начале ветви;

$\dot{U}_Z$  – вектор падения напряжения на сопротивлении ветви  $\underline{Z}$  равный геометрической сумме продольной и поперечной составляющих падения напряжения.

$$\dot{U}_Z = \Delta U_Z + j\delta U_Z = \frac{P_{\text{нач}} r + Q_{\text{нач}} x}{|\dot{U}_{\text{нач}}|} + j \frac{P_{\text{нач}} x - Q_{\text{нач}} r}{|\dot{U}_{\text{нач}}|}$$

Модуль напряжения в конце ветви

$$U_{\text{кон}} = |\dot{U}_{\text{кон}}| = \sqrt{(U_{\text{нач}} - \Delta U_Z)^2 + (\delta U_Z)^2}.$$

Расчёт ведётся до тех пор, пока соответствующие мощности и напряжения на  $k$  и  $(k+1)$  шаге будут отличаться друг от дру-

## Электроэнергетические системы и сети

га на величину, меньшую заданной точности расчёта.

В качестве примера рассмотрим разомкнутую сеть, полученную исключением линии Л2, Л4 и Л7 из исходной сети (см. рис. 18). Для разомкнутой сети составим схему замещения, найдём расчётные нагрузки узлов и расставим на ней точки (рис. 21). Точки расставляем вокруг сопротивлений элементов сети  $\underline{Z}$ .

Расчёт приведен только для одного шага. Расчётные нагрузки в узлах схемы (рис. 21)  $\underline{S}_1, \dots, \underline{S}_{10}$  получены путем алгебраического сложения в общем случае нагрузок ПС, зарядных мощностей линий и потерь мощности холостого хода трансформаторов:

$$\underline{S}_1 = -j \frac{Q_{Л1}}{2} ; \quad \underline{S}_2 = \underline{S}_A + \Delta \underline{S}_{xx A} - j \frac{Q_{Л1}}{2} - j \frac{Q_{Л3}}{2} ;$$

$$\underline{S}_3 = \underline{S}_Г - j \frac{Q_{Л5}}{2} - j \frac{Q_{Л3}}{2} ; \quad \underline{S}_4 = \Delta \underline{S}_{xx B} - j \frac{Q_{Л5}}{2} ;$$

$$\underline{S}_5 = -j \frac{Q_{Л6}}{2} ; \quad \underline{S}_6 = \Delta \underline{S}_{xx B} - j \frac{Q_{Л6}}{2} ;$$

$$\underline{S}_7 = \underline{S}_B ; \quad \underline{S}_9 = \underline{S}_{B1} ; \quad \underline{S}_{10} = \underline{S}_{B2} .$$

## Электроэнергетические системы и сети

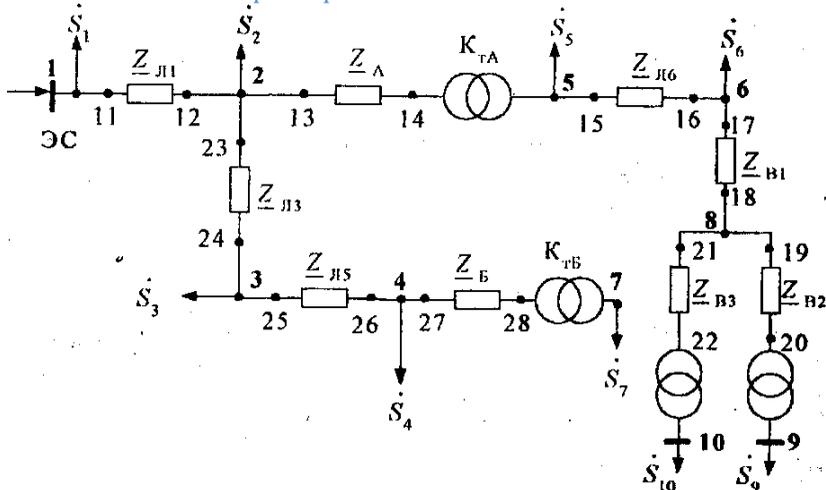


Рисунок 21

Расчёт мощностей. На первом шаге напряжения принимаются равными номинальным напряжениям соответствующей ступени - 220 кВ и 110 кВ. Расчёт мощностей начинаем вести от наиболее удалённой точки (ПС В, точка 9) к балансирующему узлу (ЭС, точка 11):

$$\underline{S}_{20} = \underline{S}_9;$$

$$\underline{S}_{19} = \underline{S}_{20} + \Delta \underline{S}_{Z_{B2}} = \underline{S}_{20} + \frac{P_{20}^2 + Q_{20}^2}{110^2} (r_{B2} + jx_{B2});$$

$$\underline{S}_{22} = \underline{S}_{10}; \quad \underline{S}_{21} = \underline{S}_{22} + \Delta \underline{S}_{Z_{B3}};$$

$$\underline{S}_{18} = \underline{S}_{19} + \underline{S}_{21}; \quad \underline{S}_{17} = \underline{S}_{18} + \Delta \underline{S}_{Z_{B1}};$$

$$\underline{S}_{16} = \underline{S}_{17} + \underline{S}_6; \quad \underline{S}_{15} = \underline{S}_{16} + \Delta \underline{S}_{Z_{Л6}};$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$\underline{S}_{14} = \underline{S}_{15} + \underline{S}_5;$$

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_{14} + \Delta \underline{S}_{Z_A} = \underline{S}_{14} + \frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{220^2} (r_A + jx_A)$$

Аналогично вычисляются мощности в остальных точках  $\underline{S}_{23}, \dots, \underline{S}_{28}$  и т.д.:

$$\underline{S}_{12} = \underline{S}_{13} + \underline{S}_{23} + \underline{S}_2;$$

$$\underline{S}_{11} = \underline{S}_{12} + \Delta \underline{S}_{Z_{11}}.$$

Расчёт напряжений. Расчёт ведём от балансирующего узла (ЭС, точка 11) к удалённому потребителю (ПС В, точки 20, 22). Модуль напряжения в центре питания ( $U_1 = 220$  кВ). Напряжения в остальных точках:

$$\dot{U}_{12} = U_1 - \Delta U_{Z_{11}} - j\delta U_{Z_{11}} = U_1 - \frac{P_{11}r_{11} + Q_{11}x_{11}}{U_1} - j \frac{P_{11}x_{11} - Q_{11}r_{11}}{U_1};$$

$$\dot{U}_{13} = \dot{U}_2 = \dot{U}_{12};$$

$$\dot{U}_{14} = \dot{U}_{13} - \Delta U_{Z_A} - j\delta U_{Z_A} = \dot{U}_{13} - \frac{P_{13}r_A + Q_{13}x_A}{|\dot{U}_{13}|} - j \frac{P_{13}x_A - Q_{13}r_A}{|\dot{U}_{13}|}.$$

При расчёте напряжения в точке 5 необходимо учесть коэффициент трансформации ПС А.

$$\dot{U}_{15} = \dot{U}_5 = \dot{U}_{14} k_{ТА},$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$k_{\text{Т А}} = \frac{U_{\text{С номА}}}{U_{\text{В номА}}}$$

где

Расчёт сетей напряжением до 110 кВ включительно ведётся без учета поперечной составляющей падения напряжения:

$$U_{17} = U_6 = U_{16} = U_{15} - \Delta U_{Z_{Л6}} = U_{15} - \frac{P_{15}r_{Л6} + Q_{15}x_{Л6}}{U_{15}} ;$$

$$U_8 = U_{18} = U_{17} - \Delta U_{Z_{B1}} = U_{17} - \frac{P_{17}r_{B1} + Q_{17}x_{B1}}{U_{17}} ;$$

$$U_{20} = U_8 - \Delta U_{Z_{B2}} = U_8 - \frac{P_{19}r_{B2} + Q_{19}x_{B2}}{U_8} ;$$

$$U_{22} = U_8 - \Delta U_{Z_{B3}} = U_8 - \frac{P_{21}r_{B3} + Q_{21}x_{B3}}{U_8} ;$$

$$U_9 = U_{20}k_{\text{Т В2}} ; \quad U_{10} = U_{22}k_{\text{Т В3}} .$$

Напряжения в узлах 3, 4, 7 рассчитываются аналогично.

**Определение параметров режима кольцевой электрической сети**

После исключения линий Л3, Л6, схема электрической сети приобретёт вид, приведённый на рис. 22.

## Электроэнергетические системы и сети

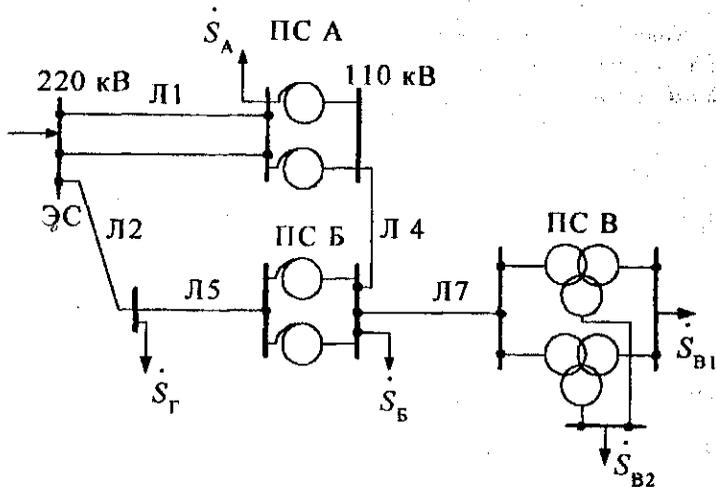


Рисунок 22

23. Схема замещения кольцевой сети представлена на рис.

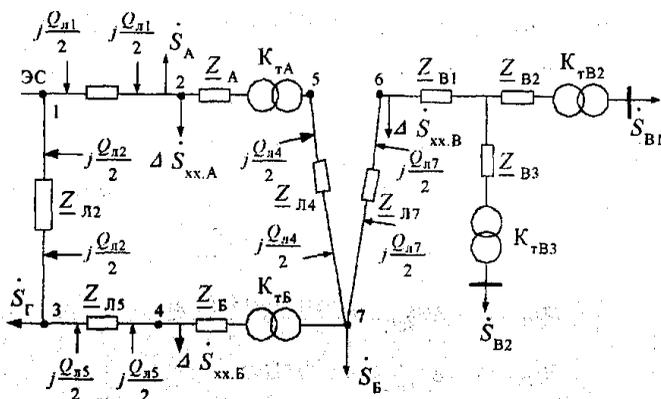


Рисунок 23

Для приведения параметров этой схемы к одной ступени напряжения 220 кВ необходимо сопротивления линий и трансформаторов 110 кВ, а также напряжения узлов сети 110 кВ пере-

## Электроэнергетические системы и сети

считать по формулам:

$$\underline{Z}' = \underline{Z}_{110} \left( \frac{220}{110} \right)^2; \quad U' = U_{110} \left( \frac{220}{110} \right).$$

После приведения параметров к высшему напряжению, определения расчётных нагрузок и эквивалентной нагрузки в узле 7 получают расчётную схему кольцевой сети (рис. 24).

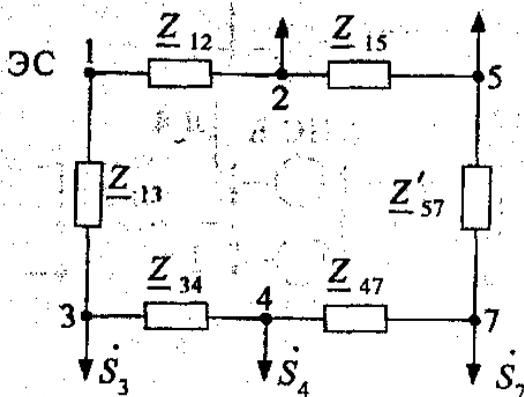


Рисунок 24

$$\begin{aligned} \text{На рис. 24} \quad \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_{Л1}; & \underline{Z}_{13} &= \underline{Z}_{Л2}; \\ \underline{Z}_{34} &= \underline{Z}_{Л5}; & \underline{Z}_{47} &= \underline{Z}_{Б}; & \underline{Z}_{15(25)} &= \underline{Z}_{А}; \\ \underline{Z}'_{57} &= \underline{Z}_{Л4} \left( \frac{220}{110} \right)^2. \end{aligned}$$

Расчёт потокораспределения кольцевой сети выполняют в два этапа.

На первом этапе определяют приближённое потокораспределение. Для этого кольцевую сеть разрезают в точке питания

## Электроэнергетические системы и сети

и получают сеть с двусторонним питанием (рис.25).

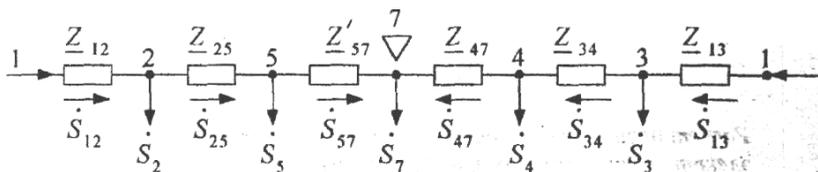


Рисунок 25

Рассчитывают потоки мощностей без учёта потерь мощности в данной сети:

$$\underline{S}_{12} = [\underline{S}_{12} (\hat{Z}_{25} + \hat{Z}'_{57} + \hat{Z}_{47} + \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{13}) + \underline{S}_5 (\hat{Z}'_{57} + \hat{Z}_{47} + \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{13}) + \underline{S}_7 (\hat{Z}_{47} + \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{13}) + \underline{S}_4 (\hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{13}) + \underline{S}_3 \hat{Z}_{13}] / \hat{Z}_{II},$$

где  $\hat{Z}_{II} = \hat{Z}_{12} + \hat{Z}_{25} + \hat{Z}'_{57} + \hat{Z}_{47} + \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{13};$

$$\hat{Z} = r - jx \text{ – сопряжённое сопротивление ветви.}$$

Потоки мощностей на остальных участках определяются по балансу мощности в узлах. В результате расчёта определяют точку потоко раздела (точка 7) и переходят ко второму этапу расчёта.

На втором этапе разрезают кольцевую сеть в точке потоко раздела, в результате получают разомкнутую сеть (рис. 26) и выполняют расчёт режима, как для разомкнутой сети (см. п. 2.2.3). Сначала определяют потокораспределение с учётом потерь мощности, а затем рассчитывают уровни напряжений. Для расчёта напряжений необходимо перейти к схеме с действительными сопротивлениями участков и коэффициентами трансформации трансформаторов.

## Электроэнергетические системы и сети

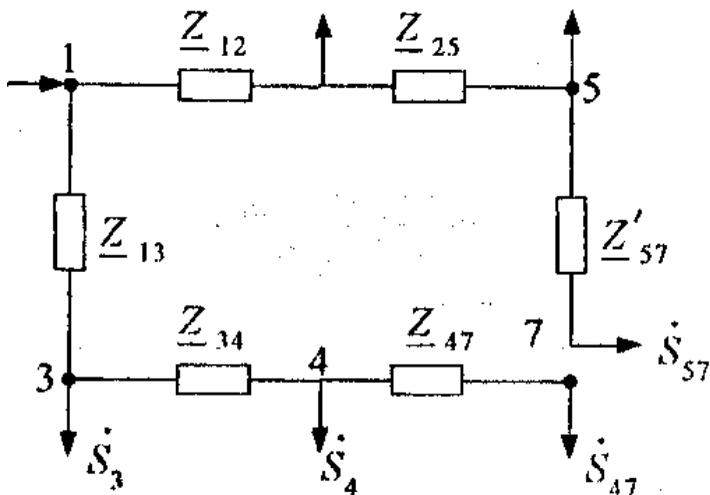


Рисунок 26

**Определение потерь электроэнергии**

Потери электроэнергии в электрической сети  $\Delta W$  состоят из нагрузочных и условно-постоянных потерь.

$$\Delta W = \Delta W_{y-\Pi} + \Delta W_{\text{н}}.$$

Основной частью условно-постоянных потерь являются потери холостого хода трансформаторов. Потери электроэнергии холостого хода в  $j$ -м трансформаторе (автотрансформаторе) определяются по паспортному значению потерь мощности холостого хода (см. табл. 3) и показателям режима сети.

$$\Delta W_{y-\Pi} = \Delta P_{\text{хх}j} \sum_{i=1}^n T_{pji} \left( \frac{U_{ji}}{U_{\text{В ном}j}} \right)^2,$$

где  $T_{pji}$  – число часов работы  $j$ -го transforma-

## Электроэнергетические системы и сети

тора в  $i$ -м режиме;

$U_{ji}$  – расчётное напряжение на высшей стороне трансформатора  $j$  в  $i$ -м режиме;

$U_{\text{НОМ}j}$  – номинальное напряжение обмотки высшего напряжения трансформатора  $j$ .

Приблизённо потери электроэнергии холостого хода по сети в целом за год равны

$$\Delta W_{\text{y-п}} \cong 8760 \sum_{j=1} \Delta P_{\text{xx}j}.$$

Нагрузочные потери электроэнергии зависят от активного сопротивления продольной ветви схемы замещения линии или трансформатора  $r$ , и режима работы. При использовании метода числа часов наибольших потерь мощности рассматривается только один режим сети: режим максимальной нагрузки. В режиме максимальной нагрузки определяются потери активной мощности в сети  $\Delta P_{\text{max}}$  по результатам расчёта этого режима:

$$\Delta P_{\text{max}} = \sum_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} r_{ij},$$

Где  $P_j$ ,  $Q_j$  – потоки активной и реактивной мощностей в конце ветви  $i - j$  в режиме максимальной нагрузки;

$U_j$  – напряжение в конце ветви  $i - j$  при максимальных нагрузках;

$r_{ij}$  – активное сопротивление ветви  $i - j$ .

Нагрузочные потери электроэнергии за год определяются по формуле:

$$\Delta W_{\text{н}} = k_{\text{л}} k_k \Delta P_{\text{max}} \tau,$$

где  $k_{\text{л}}$  – коэффициент, учитывающий влияние потерь в арматуре воздушных линий ( $k_{\text{л}} = 1,02$  для ВЛ напряжением

## Электроэнергетические системы и сети

110 кВ и выше);

$k_k$  – коэффициент, учитывающий различие в конфигурациях графиков активной и реактивной нагрузки различных ветвей сети ( $k_k = 0,99$ );

$\tau$  – число часов наибольших потерь мощности за год.

При отсутствии графика нагрузки значение  $\tau$  определяется по формуле:

$$\tau = \frac{k_3 + 2k_3^2}{3} 8760,$$

где  $k_3$  – коэффициент заполнения годового графика.

$$k_3 = \frac{T_{\max}}{8760}.$$

Здесь  $T_{\max}$  – число часов использования максимальной нагрузки (для сетей 110 – 220 кВ  $T_{\max} = 5500 – 6000$  ч).

При формировании структуры потерь электроэнергии, т.е. определении соотношения (долей) нагрузочных и условно-постоянных потерь в сетях различных номинальных напряжений следует в первую очередь сгруппировать потери мощности по видам оборудования и номинальным напряжениям.

Для расчётной схемы разомкнутой сети (рис. 21) определяются следующие потери мощности и энергии:

потери холостого хода в сети 220 кВ

$$\Delta P_{\text{xx}220} = \Delta P_{\text{xxA}} + \Delta P_{\text{xxB}};$$

$$\Delta W_{\text{y-п}220} = 8760 \Delta P_{\text{xx}220};$$

потери холостого хода в сети 110 кВ

$$\Delta P_{\text{xx}110} = \Delta P_{\text{xxB}};$$

$$\Delta W_{\text{y-п}110} = 8760 \Delta P_{\text{xx}110};$$

нагрузочные потери в линиях 220 кВ

## Электроэнергетические системы и сети

$$\Delta P_{\text{н ВЛ220}} = \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{U_{12}^2} r_{\text{Л1}} + \frac{P_{24}^2 + Q_{24}^2}{U_{24}^2} r_{\text{Л3}} + \frac{P_{26}^2 + Q_{26}^2}{U_{26}^2} r_{\text{Л5}};$$

$$\Delta W_{\text{н ВЛ220}} = k_{\text{л}} k_k \Delta P_{\text{н ВЛ220}} \tau;$$

нагрузочные потери в автотрансформаторах 220 кВ

$$\Delta P_{\text{н тр220}} = \frac{P_{14}^2 + Q_{14}^2}{U_{14}^2} r_{\text{А}} + \frac{P_{28}^2 + Q_{28}^2}{U_{28}^2} r_{\text{Б}};$$

$$\Delta W_{\text{н тр220}} = k_k \Delta P_{\text{н тр220}} \tau;$$

нагрузочные потери в линиях 110 кВ

$$\Delta P_{\text{н ВЛ110}} = \frac{P_{16}^2 + Q_{16}^2}{U_{16}^2} r_{\text{Л6}};$$

$$\Delta W_{\text{н ВЛ110}} = k_{\text{л}} k_k \Delta P_{\text{н ВЛ110}} \tau;$$

нагрузочные потери в трансформаторах 110 кВ

$$\Delta P_{\text{н тр110}} = \frac{P_{18}^2 + Q_{18}^2}{U_{18}^2} r_{\text{Б1}} + \frac{P_{20}^2 + Q_{20}^2}{U_{20}^2} r_{\text{Б2}} + \frac{P_{22}^2 + Q_{22}^2}{U_{22}^2} r_{\text{Б3}};$$

$$\Delta W_{\text{н тр110}} = k_k \Delta P_{\text{н тр110}} \tau;$$

суммарные потери электроэнергии в сети

$$\Delta W = \Delta W_{\text{у-п220}} + \Delta W_{\text{у-п110}} + \Delta W_{\text{н ВЛ220}} + \Delta W_{\text{н ВЛ110}} + \Delta W_{\text{н тр220}} + \Delta W_{\text{н тр110}}.$$

Аналогично определяются потери электроэнергии

## Задание В. Расчёт параметров установившихся режимов в сложных электрических сетях

### Определение приближённого потокораспределения в расчётной схеме исходной электрической сети методом преобразования

Для решения задачи необходимо привести параметры исходной расчётной схемы (рис. 20) к одной ступени напряжения. В данном случае к высшему напряжению приводятся сопротивления:

$$\underline{Z}'_{56} = \underline{Z}_{56} \left( \frac{220}{110} \right)^2; \quad \underline{Z}'_{57} = \underline{Z}_{57} \left( \frac{220}{110} \right)^2;$$

$$\underline{Z}'_{76} = \underline{Z}_{76} \left( \frac{220}{110} \right)^2.$$

После приведения параметров к одной ступени напряжения расчётная схема замещения примет вид, представленный на рис. 27.

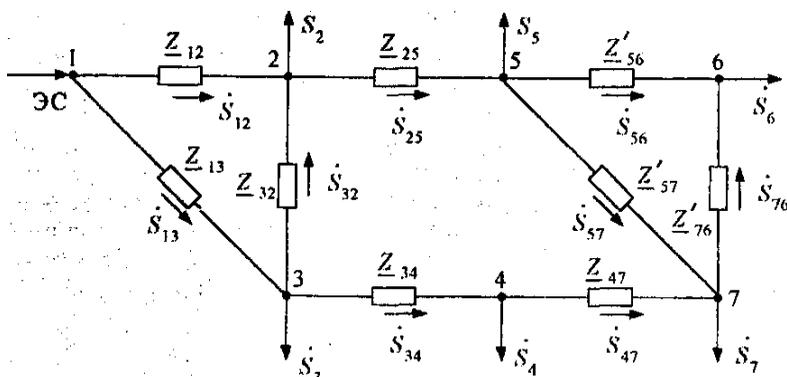


Рисунок 27

## Электроэнергетические системы и сети

Преобразование данной схемы выполняется в следующей последовательности.

Треугольник, состоящий из сопротивлений  $Z'_{56}$ ,  $Z'_{76}$ ,  $Z'_{57}$ , преобразуем в звезду и определим сопротивления ветвей звезды:

$$\underline{Z}_{58} = \frac{\underline{Z}'_{56}\underline{Z}'_{57}}{\underline{Z}'_{56} + \underline{Z}'_{57} + \underline{Z}'_{76}} ; \quad \underline{Z}_{86} = \frac{\underline{Z}'_{56}\underline{Z}'_{76}}{\underline{Z}'_{56} + \underline{Z}'_{57} + \underline{Z}'_{76}} ;$$

$$\underline{Z}_{78} = \frac{\underline{Z}'_{76}\underline{Z}'_{57}}{\underline{Z}'_{56} + \underline{Z}'_{57} + \underline{Z}'_{76}} .$$

После преобразования схема примет вид, представленный на рис. 28.

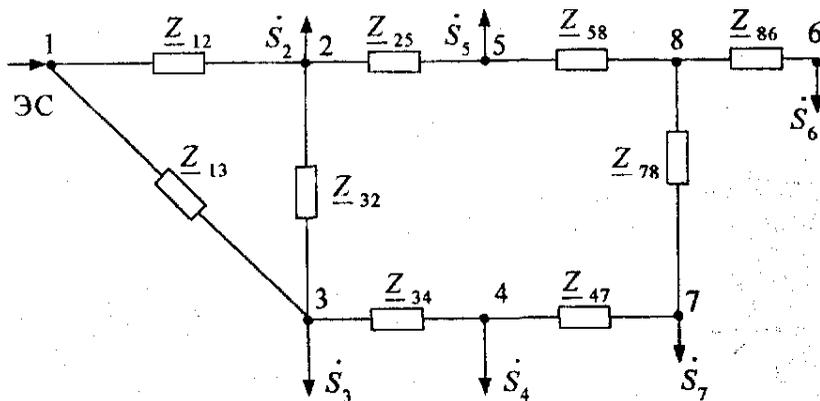


Рисунок 28

Исключим нагрузку  $S_5$ , которую разнесём в узлы 2 и 8, и нагрузку  $S_4$ , перенесём её в узлы 3 и 7, и перейдём к схеме рис. 29.

## Электроэнергетические системы и сети

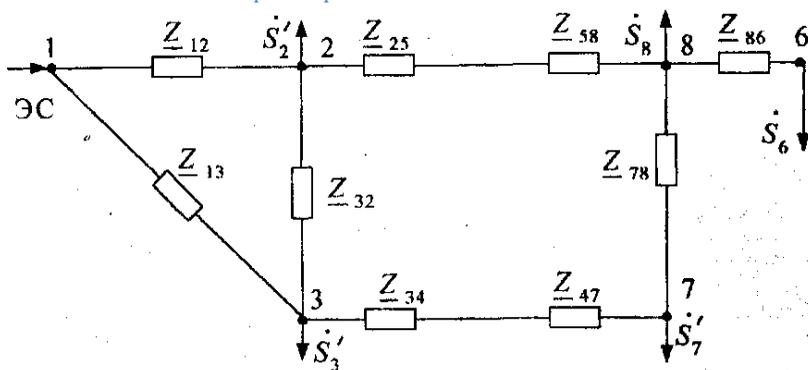


Рисунок 29

Эквивалентные нагрузки в узлах 2, 8, 3, 7 рис. 29 состоят из двух составляющих: нагрузок сети рис. 28 и добавочных перенесённых нагрузок

$$\underline{S}'_2 = \underline{S}_2 + \underline{S}_5 \frac{\hat{Z}_{58}}{\hat{Z}_{25} + \hat{Z}_{58}};$$

$$\underline{S}_8 = \underline{S}_5 \frac{\hat{Z}_{25}}{\hat{Z}_{25} + \hat{Z}_{58}};$$

$$\underline{S}'_3 = \underline{S}_3 + \underline{S}_4 \frac{\hat{Z}_{47}}{\hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{47}};$$

$$\underline{S}'_7 = \underline{S}_7 + \underline{S}_7 \frac{\hat{Z}_{34}}{\hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{47}}.$$

Нагрузку  $S'_7$  перенесём в узлы 3 и 8, определим эквивалентные нагрузки в этих узлах:

## Электроэнергетические системы и сети

$$\underline{S}_3'' = \underline{S}_3' + \underline{S}_7' \frac{\hat{Z}_{78}}{\hat{Z}_{37} + \hat{Z}_{78}};$$

$$\underline{S}_8' = \underline{S}_8 + \underline{S}_5' \frac{\hat{Z}_{37}}{\hat{Z}_{37} + \hat{Z}_{78}};$$

$$\text{где } \hat{Z}_{37} = \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{47}.$$

Схема примет вид, представленный на рис. 30.

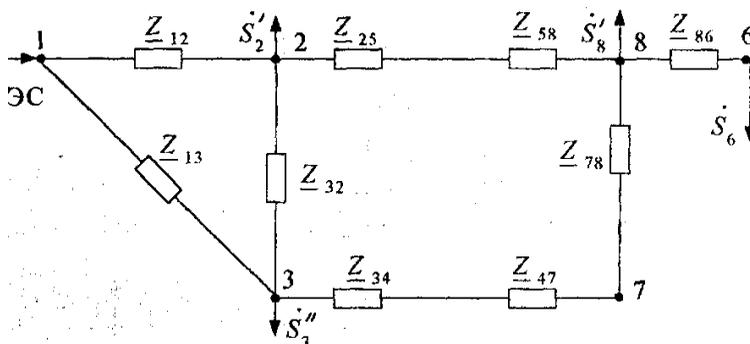


Рисунок 30

Треугольник, состоящий из сопротивлений  $Z_{12}$ ,  $Z_{32}$ ,  $Z_{13}$ , преобразуем в звезду:

$$\underline{Z}_{19} = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{32}};$$

$$\underline{Z}_{92} = \frac{\underline{Z}_{12}\underline{Z}_{32}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{32}};$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$\underline{Z}_{93} = \frac{\underline{Z}_{32}\underline{Z}_{13}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{13} + \underline{Z}_{32}}.$$

и получим схему рис. 31.

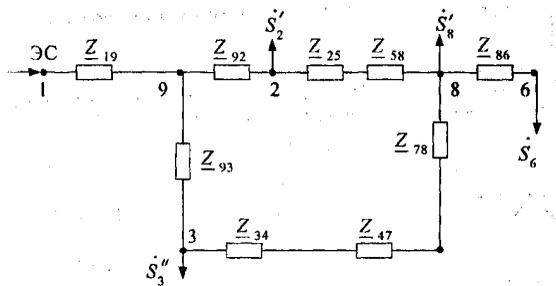


Рисунок 31

Нагрузку  $S'_2$  перенесём в узлы 8 и 9, нагрузку  $S''_3$  - в узлы 8 и 9 и перейдём к схеме рис. 32:

$$\underline{S}_9 = \underline{S}'_2 \frac{\hat{Z}_{28}}{\hat{Z}_{28} + \hat{Z}_{92}} + \underline{S}''_3 \frac{\hat{Z}_{38}}{\hat{Z}_{38} + \hat{Z}_{93}};$$

$$\underline{S}''_8 = \underline{S}'_2 + \underline{S}'_2 \frac{\hat{Z}_{92}}{\hat{Z}_{28} + \hat{Z}_{92}} + \underline{S}''_3 \frac{\hat{Z}_{93}}{\hat{Z}_{38} + \hat{Z}_{93}};$$

$$\text{где } \hat{Z}_{28} = \hat{Z}_{25} + \hat{Z}_{58}; \quad \hat{Z}_{38} = \hat{Z}_{34} + \hat{Z}_{47} + \hat{Z}_{78}.$$

## Электроэнергетические системы и сети

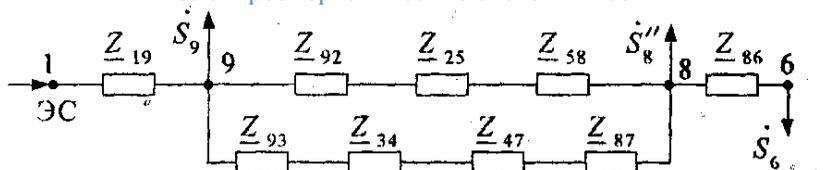


Рисунок 32

Находят в этой простой схеме потокораспределение, а затем путём обратных преобразований (по тем же этапам) определяют потокораспределение в исходной схеме (рис. 27). Направления мощностей показаны на рис. 27.

### Определение значения напряжений в узлах расчётной схемы исходной электрической сети с помощью уравнений узловых напряжений

Уравнения узловых напряжений (УУН) в форме баланса токов имеет следующий вид:

$$\underline{Y}_{ii} \dot{U}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \underline{Y}_{ik} \dot{U}_k + \underline{Y}_{iB} U_B = \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Коэффициенты при искомым переменных  $\dot{U}_i$  образуют матрицу узловых проводимостей  $\underline{Y}$ . Коэффициенты при напряжении базисного узла  $U_B$  составляют матрицу-столбец  $\underline{Y}_B$ .

Для повышения точности расчетов требуется учитывать трансформации в виде комплексных величин, характеризующих модули коэффициентов трансформации, и сдвиг фаз напряжений на шинах различных обмоток трансформатора. Диагональ-

ные элементы матрицы  $\underline{Y}$  (собственные проводимости узлов  $\underline{Y}_{ii}$ ) равны сумме проводимостей ветвей, связанных с узлом  $i$ , включая

## Электроэнергетические системы и сети

проводимости на землю. Если ветвь  $i-k$  содержит коэффициент трансформации, а узел  $i$  соответствует стороне более низкого напряжения, то проводимость этой ветви войдёт в  $\underline{Y}_{ii}$  с множителем  $1/k_T^2$ .

Взаимные проводимости  $\underline{Y}_{ik}$  и  $\underline{Y}_{iB}$  равны проводимости ветви  $i-k$  или  $i-B$ , взятой со знаком минус. Если ветвь содержит коэффициент трансформации, то проводимость ветви умножается на  $1/k_T$ . Если непосредственная связь между узлом  $i$  и  $k$  отсутствует, то проводимость  $\underline{Y}_{ik} = \underline{Y}_{ki} = 0$ .

При заданном напряжении базисного узла  $U_B = U_1$  (см. табл. 1) получим УУН для расчётной схемы (см. рис. 27):

$$\dot{U}_2 (\underline{y}_{12} + \underline{y}_{25} + \underline{y}_{23}) - \dot{U}_3 \underline{y}_{23} - \dot{U}_5 \underline{y}_{25} - U_B \underline{y}_{12} = -\hat{S}_2 / \hat{U}_2 ;$$

$$\dot{U}_3 (\underline{y}_{13} + \underline{y}_{23} + \underline{y}_{34}) - \dot{U}_2 \underline{y}_{23} - \dot{U}_4 \underline{y}_{34} - U_B \underline{y}_{13} = -\hat{S}_3 / \hat{U}_3 ;$$

$$\dot{U}_4 (\underline{y}_{34} + \underline{y}_{47}) - \dot{U}_3 \underline{y}_{34} - \dot{U}_7 \underline{y}_{47} = -\hat{S}_4 / \hat{U}_4 ;$$

$$\dot{U}_5 (\underline{y}_{56} + \underline{y}_{25} + \underline{y}_{57}) - \dot{U}_2 \underline{y}_{25} - \dot{U}_6 \underline{y}_{56} - \dot{U}_7 \underline{y}_{57} = -\hat{S}_5 / \hat{U}_5 ;$$

$$\dot{U}_6 (\underline{y}_{56} + \underline{y}_{76}) - \dot{U}_5 \underline{y}_{56} - \dot{U}_7 \underline{y}_{76} = -\hat{S}_6 / \hat{U}_6 ;$$

$$\dot{U}_7 (\underline{y}_{57} + \underline{y}_{76} + \underline{y}_{47}) - \dot{U}_5 \underline{y}_{57} - \dot{U}_4 \underline{y}_{47} - \dot{U}_6 \underline{y}_{76} = -\hat{S}_7 / \hat{U}_7 ;$$

где  $\underline{y}_{ij} = 1/\underline{Z}_{ij}$  – проводимость ветви  $i-j$  ( $i, j=1, 2, 3, 4,$

## Электроэнергетические системы и сети

 5, 6, 7;  $i \neq j$ ).

В этих уравнениях параметры режима и параметры схемы приведены к одной ступени напряжения через номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов.

Для упрощённой схемы замещения, параметры которой приведены к одному напряжению (см. рис. 27), а система УУН записана выше, матрица узловых проводимостей  $\underline{Y}$  имеет следующий вид:

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{23} & 0 & \underline{Y}_{25} & 0 & 0 \\ \underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{33} & \underline{Y}_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{43} & \underline{Y}_{44} & 0 & 0 & \underline{Y}_{47} \\ \underline{Y}_{25} & 0 & 0 & \underline{Y}_{55} & \underline{Y}_{56} & \underline{Y}_{57} \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{65} & \underline{Y}_{66} & \underline{Y}_{67} \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{74} & \underline{Y}_{75} & \underline{Y}_{76} & \underline{Y}_{77} \end{pmatrix} =$$

$\underline{y}_{12} + \underline{y}_{25} +$ $+\underline{y}_{23}$	$-\underline{y}_{23}$	0	$-\underline{y}_{25}$	0	0
$-\underline{y}_{23}$	$\underline{y}_{13} + \underline{y}_{23} +$ $+\underline{y}_{34}$	$-\underline{y}_{34}$	0	0	0
0	$-\underline{y}_{34}$	$\underline{y}_{34} + \underline{y}_{47}$	0	0	$-\underline{y}_{47}$
$-\underline{y}_{25}$	0	0	$\underline{y}_{56} + \underline{y}_{25} +$ $+\underline{y}_{57}$	$-\underline{y}_{56}$	$-\underline{y}_{57}$

номера узлов

## Электроэнергетические системы и сети

0	0	0	$-\underline{y}_{56}$	$\underline{y}_{56} + \underline{y}_{76}$	$-\underline{y}_{76}$
0	0	$-\underline{y}_{47}$	$-\underline{y}_{57}$	$-\underline{y}_{76}$	$\underline{y}_{57} + \underline{y}_{76}$ $+\underline{y}_{47}$
2	3	4	5	6	7

номера узлов

Система УУН может быть решена разными методами.

- Метод простой итерации

Каждое из уравнений системы разрешается относительно соответствующих узловых напряжений. Для решения их задаются начальными значениями (нулевыми приближениями) искомых переменных, например, номинальными напряжениями. Подставляют эти значения во все уравнения, получая первые приближения. Полученные первые приближения таким же образом используются для получения вторых приближений, вторые - для получения третьих и т.д. Расчёт повторяют до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность вычисления напряжений, контролируемая по разности искомых переменных на соседних итерациях. Итерационный процесс определения неизвестных  $\dot{U}_2^{(k+1)}, \dot{U}_3^{(k+1)}, \dot{U}_4^{(k+1)}, \dot{U}_5^{(k+1)}, \dot{U}_6^{(k+1)}, \dot{U}_7^{(k+1)}$  на  $(k+1)$ -й итерации по значениям напряжений, найденных на предыдущей  $k$ -й итерации, в общем виде описывается уравнением

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \left( \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^N \underline{Y}_{ij} \dot{U}_j^{(k)} + \underline{Y}_{iB} U_B - \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i^{(k)}} \right),$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$i = 2, 3, \dots, N,$$

где  $N$  – наибольший номер узла (в примере  $N=7$ ).

Так как в рассматриваемом примере схемы (см. рис. 27) все её параметры приведены к напряжению 220 кВ, то в качестве начального приближения ( $k=0$ ) напряжений принимается 220 кВ.

$$\dot{U}_i^{(0)} = 220 \quad i = 2, 3, \dots, N.$$

Итерационные формулы определения напряжений для рассматриваемого примера примут следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_2^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left( Y_{23} \dot{U}_3^{(k)} + Y_{25} \dot{U}_5^{(k)} + Y_{2B} U_B - \frac{\hat{S}_2}{\hat{U}_2^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_3^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{33}} \left( Y_{32} \dot{U}_2^{(k)} + Y_{34} \dot{U}_4^{(k)} + Y_{3B} U_B - \frac{\hat{S}_3}{\hat{U}_3^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_4^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{44}} \left( Y_{43} \dot{U}_3^{(k)} + Y_{47} \dot{U}_7^{(k)} - \frac{\hat{S}_3}{\hat{U}_3^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_5^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{55}} \left( Y_{52} \dot{U}_2^{(k)} + Y_{56} \dot{U}_6^{(k)} + Y_{57} \dot{U}_7 - \frac{\hat{S}_5}{\hat{U}_5^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_6^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{66}} \left( Y_{65} \dot{U}_5^{(k)} + Y_{67} \dot{U}_7^{(k)} - \frac{\hat{S}_6}{\hat{U}_6^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_7^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{77}} \left( Y_{74} \dot{U}_4^{(k)} + Y_{75} \dot{U}_5^{(k)} + Y_{76} \dot{U}_6^{(k)} - \frac{\hat{S}_7}{\hat{U}_7^{(k)}} \right). \end{array} \right.$$

## Электроэнергетические системы и сети

## • Метод Зейделя

Основная идея этого метода заключается в том, что найденное  $(k+1)$ -е приближение  $(i-1)$ -го неизвестного сразу же используется для вычисления следующего  $i$ -го неизвестного  $\dot{U}_i^{(k+1)}$ .

Итерационный процесс Зейделя для рассматриваемого примера определяется выражением

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \sum_{j=2}^{i-1} Y_{ij} \dot{U}_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^N Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} + Y_{iB} U_B - \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i^{(k)}} \right),$$
$$i = 2, 3, \dots, N.$$

Итерационные формулы метода Зейделя для рассматриваемого примера примут следующий вид:

## Электроэнергетические системы и сети

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_2^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{22}} \left( \underline{Y}_{23} \dot{U}_3^{(k)} + \underline{Y}_{25} \dot{U}_5^{(k)} + \underline{Y}_{2B} U_B - \frac{\hat{S}_2}{\hat{U}_2^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_3^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{33}} \left( \underline{Y}_{32} \dot{U}_2^{(k+1)} + \underline{Y}_{34} \dot{U}_4^{(k)} + \underline{Y}_{3B} U_B - \frac{\hat{S}_3}{\hat{U}_3^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_4^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{44}} \left( \underline{Y}_{43} \dot{U}_3^{(k+1)} + \underline{Y}_{47} \dot{U}_7^{(k)} - \frac{\hat{S}_3}{\hat{U}_3^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_5^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{55}} \left( \underline{Y}_{52} \dot{U}_2^{(k+1)} + \underline{Y}_{56} \dot{U}_6^{(k)} + \underline{Y}_{57} \dot{U}_7 - \frac{\hat{S}_5}{\hat{U}_5^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_6^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{66}} \left( \underline{Y}_{65} \dot{U}_5^{(k+1)} + \underline{Y}_{67} \dot{U}_7^{(k)} - \frac{\hat{S}_6}{\hat{U}_6^{(k)}} \right), \\ \dot{U}_7^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{77}} \left( \underline{Y}_{74} \dot{U}_4^{(k+1)} + \underline{Y}_{75} \dot{U}_5^{(k+1)} + \underline{Y}_{76} \dot{U}_6^{(k+1)} - \frac{\hat{S}_7}{\hat{U}_7^{(k)}} \right). \end{array} \right.$$

Для получения действительных напряжений в узлах 5-7 необходимо вычисленные значения напряжений привести через

коэффициент трансформации  $k_T = 110/220$  к стороне 110 кВ.

Далее определяют потокораспределение в схеме. Следует отметить, что в данном случае потокораспределение будет точным (потери мощности в ветвях учитываются).

Мощность в начале ветви  $i-j$  равна

$$S_{ij}^H = \dot{U}_i (\hat{U}_i - \hat{U}_j) \hat{Y}_{ij},$$

в конце ветви

## Электроэнергетические системы и сети

$$\underline{S}_{ij}^k = \dot{U}_j (\hat{U}_i - \hat{U}_j) \hat{Y}_{ij}$$

Рассмотренные методы реализованы в программах для ЭВМ. Описания программ и инструкция по их применению приводятся в отдельных работах.

### Выбор коэффициенты трансформации трансформаторов для обеспечения встречного регулирования напряжения на шинах подстанций

Напряжение в узле 6  $\dot{U}_6$  рассматриваемого примера – это напряжение на стороне ВН трёхобмоточного трансформатора подстанции ПС В (см. рис. 18). Для определения напряжения на шинах среднего и низшего напряжений этой подстанции необходимо воспользоваться участком схемы замещения (рис. 21), заключённым между узлами 6, 9, 10, т.е. схемой замещения трёхобмоточного трансформатора. Потоки мощности по ветвям схемы

замещения трёхобмоточного трансформатора  $\underline{S}_{17} = P_{17} + jQ_{17}$ ,

$\underline{S}_{19} = P_{19} + jQ_{19}$ ,  $\underline{S}_{21} = P_{21} + jQ_{21}$  определены при выполнении п. 3.2.3. Расчёт напряжений выполняется по методике, изложенной в п. 3.2.3 при описании второго этапа – определении напряжения в узлах. Для рассматриваемого примера получим:

$$\dot{U}_8 = \dot{U}_6 - \dot{U}_{Z_{B1}} = \dot{U}_6 - \frac{P_{17}r_{B1} + Q_{17}x_{B1}}{|\dot{U}_6|} - j \frac{P_{17}x_{B1} - Q_{17}r_{B1}}{|\dot{U}_6|};$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_8 - \dot{U}_{Z_{B2}} = \dot{U}_8 - \frac{P_{19}r_{B2} + Q_{19}x_{B2}}{|\dot{U}_8|} - j \frac{P_{19}x_{B2} - Q_{19}r_{B2}}{|\dot{U}_8|};$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$\dot{U}_{22} = \dot{U}_8 - \dot{U}_{z_{B3}} = \dot{U}_8 - \frac{P_{21}r_{B3} + Q_{21}x_{B3}}{|\dot{U}_8|} - j \frac{P_{21}x_{B3} - Q_{21}r_{B3}}{|\dot{U}_8|};$$

Напряжение на шинах среднего напряжения (35 кВ) ПС В равно

$$U_{\text{раб } 9} = U_{20} k_{Т В2},$$

на шинах низшего напряжения (6 или 10 кВ)

$$U_{\text{раб } 10} = U_{22} k_{Т В3}.$$

Для обеспечения встречного регулирования напряжения в режиме максимальных нагрузок рабочее (расчётное) напряжение в узлах нагрузки должно быть не менее 1,05 номинального для данного узла и не превышать длительно допустимого напряжения  $U_{\text{доп}}$ . Условие  $U_{\text{раб}} \leq U_{\text{доп}}$  должно выполняться для всех узлов сети без исключения.

Величина  $U_{\text{доп}}$  зависит от номинального напряжения и составит для сети 10 кВ  $1,20U_{\text{ном}}$ , т.е. 12 кВ,

110, 220 кВ  $1,15U_{\text{ном}}$ , т.е. 126 и 252 кВ соответственно,

330 кВ  $1,10U_{\text{ном}}$ , т.е. 363 кВ.

Если  $U_{\text{раб}}$  не удовлетворяют этим условиям, то необходимо ввести напряжения узлов в допустимую область, изменяя коэффициенты трансформации трансформаторов.

Для регулирования напряжения используются устройство РПН двухобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов и

## Электроэнергетические системы и сети

устройства РПН и ПБВ трёхобмоточных трансформаторов. Например, РПН трансформаторов 110 кВ имеет пределы регулирования  $\pm 9 \times 1,78 \%$  (шаг равен 1,78 %), устройства ПБВ -  $\pm 2 \times 2,5 \%$  (шаг - 2,5 %).

Напряжение ответвления  $U_{\text{отв}}$ , используемое при определении коэффициента трансформации двухобмоточных трансформаторов  $k_T = U_{\text{Н ном}} / U_{\text{отв}}$ , равно

$$U_{\text{отв}} = U_{\text{В ном}} (1 \pm 0,01n\Delta k_T),$$

Где  $n$  – номер включённого ответвления относительно среднего;

$\Delta k_T$  – шаг регулирования напряжения на обмотке ВН.

Для автотрансформатора с РПН на стороне среднего напряжения

$$k_{T2} = \frac{U_{\text{отв}}}{U_{\text{В ном}}} = \frac{U_{\text{С ном}} (1 \pm 0,01n\Delta k_{\text{АТ}})}{U_{\text{В ном}}};$$

$$k_{T3} = \frac{U_{\text{Н ном}}}{U_{\text{В ном}}},$$

где  $\Delta k_{\text{АТ}}$  – шаг регулирования напряжения на обмотке СН.

При определении коэффициентов трансформации трёхобмоточных трансформаторов учитывается возможность регулирования на стороне ВН и СН:

$$k_{T2} = \frac{U_{\text{С ном}} (1 \pm 0,01n\Delta k_{\text{ПБВ}})}{U_{\text{В ном}} (1 \pm 0,01m\Delta k_{\text{РПН}})};$$

## Электроэнергетические системы и сети

$$k_{Т3} = \frac{U_{Н\text{ ном}}}{U_{В\text{ ном}} (1 \pm 0,01m\Delta k_{РПН})},$$

где  $n$  – номер включённого ответвления ПБВ на стороне СН относительно среднего;

$m$  – номер включённого ответвления РПН на стороне ВН относительно среднего;

$\Delta k_{ПБВ}$ ,  $\Delta k_{РПН}$  – шаги регулирования ПБВ и РПН соответственно.

При выборе коэффициентов трансформации трёхобмоточных трансформаторов в первую очередь вводится в допустимую область напряжение на шинах НН, варьируя  $k_{Т3}$  путём изменения параметра  $m$ . Затем выполняется регулирование на стороне СН, меняя  $k_{Т2}$  при фиксированном значении  $m$  путём изменения  $n$ .

При необходимости регулирования напряжения на стороне НН автотрансформатора используют дополнительный специальный трансформатор – линейный регулятор. Линейный регулятор включают между выводами стороны НН автотрансформатора и сборными шинами НН.

### **Подготовка исходных данных для расчёта установившегося режима электрической сети с помощью ЭВМ.**

Расчёт установившегося режима сети выполняется с помощью программы RastrWin. Для решения уравнений узловых напряжений в программе используется метод Ньютона.

Подготовка исходной информации об узлах и ветвях сети производится в следующей последовательности:

1. Составляется схема замещения сети (рис. 19).
2. Нумеруются узлы.
3. Заполняются табл. 7 и 8, куда вносится полная информация об узлах и ветвях данной сети с использованием данных табл. 4, 5.

Электроэнергетические системы и сети

Таблица 7. - Информация об узлах

<i>N</i>	Название узла	$U_{ном},$ кВ	$P_{наг},$ МВт	$Q_{наг},$ Мвар	$P_{ген},$ МВт	$Q_{ген},$ Мвар	$Q_{min},$ Мвар	$Q_{max},$ Мвар	$U_{min},$ кВ	$U_{max},$ кВ
1										
...										

Здесь *N* – номер узла;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение или модуль напряжения базисного узла;

$P_{наг}, Q_{наг}$  – мощность нагрузки;

$P_{ген}, Q_{ген}$  – мощность генерации;

$Q_{min}, Q_{max}$  – пределы генерации реактивной мощности в узле, где фиксируется модуль напряжения;

$U_{min}, U_{max}$  – диапазоны изменения напряжения.

Значения  $Q_{min}, Q_{max}, U_{min}, U_{max}$  задаются только для базисного (балансирующего) или опорного по напряжению узла и определяются по формулам:

$$Q_{min} = 0; \quad Q_{max} = P_{max} \operatorname{tg} \varphi_{ЭС}; \quad U_{min} = 0,9U_{ном}$$

$$1,05U_{ном} \leq U_{max} \leq U_{доп},$$

где

$$P_{max} \cong (1,2 \div 1,3) P_{\Sigma нагр};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{ЭС} = 0,62 \div 0,66.$$

Таблица 8. - Информация о ветвях сети

Ннач	Нкон	<i>r</i> , Ом	<i>x</i> , Ом	<i>g</i> , мкСм	<i>b</i> , мкСм	кТ
------	------	---------------	---------------	-----------------	-----------------	----

Электроэнергетические системы и сети

1	2					
...	...	...	...	...	...	..

Здесь  $M_{нач}$ ,  $M_{кон}$  – номера узлов, ограничивающих ветвь;

$r$ ,  $x$  – активное и реактивное сопротивление ветви;

$g$ ,  $b$  – проводимости ветви: для ЛЭП - ёмкостная проводимость со знаком «-»; для трансформаторов – проводимость шунта ( $b > 0$ );

$k_t$  – коэффициент трансформации, определяемый по отношению напряжения в конце ветви к напряжению в начале ветви.

Работа с программой RastrWin описана в лабораторной работе № 5 Методических указаний к лабораторным занятиям по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические системы /Под ред. В.А. Веникова. –М.: Высш. шк. Т.2. 1971. –438 с.
2. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. –М.: КНОРУС, 2012. – 648 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. -М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
4. Хлебников В.К. Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети» / Дон. гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2013. – 120 с.
5. Сенчуков А.А., Кудинов И.Д., Бураков И.Ф., Черноморченко Л.В. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электроэнергетические системы и сети» / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. – 45 с.