

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры направления подготовки 13.04.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры
направления подготовки 13.04.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Т.Е. Минакова., С.И. Шшикин.,* СПб, 2020. 60 с.

В методических указаниях к лабораторным работам приведены краткие теоретические сведения по разделам дисциплины, в соответствии с темой лабораторной работы, варианты задания и исходные данные, необходимые для выполнения лабораторных работ, а также приведен контрольный пример выполненных лабораторной работы.

Методические указания к лабораторным работам предназначены для студентов магистратуры направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленность (профиль) программы «Системы электроснабжения».

Табл. 15 Ил. 31 Библиогр.: 10 назв.

Научный редактор д.т.н., проф. *Шпенст В.А.*

© Санкт-Петербургский Горный университет, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Программирование для решения задач электроэнергетики» предназначены для оказания помощи студентам в процессе выполнения лабораторных работ в соответствии с Рабочей программой дисциплины..

Методические указания содержат общие указания, варианты задания и методические материалы для выполнения лабораторных работ расчету установившихся режимов электроэнергетической системы, послеаварийных и ремонтных режимов, а также расчету аварийных режимов (режимов КЗ) и устойчивости системы.

Задачи, рассмотренные в настоящих указаниях, базируются на материалах, излагаемых в учебных дисциплинах «Переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электроэнергетические системы и сети», изучаемых в период обучения в бакалавриате направления «Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электроснабжение» и дисциплинах «Интеллектуальные сети систем электроснабжения» и «Математическое моделирование элементов систем электроснабжения», изучаемых на первом курсе обучения в магистратуре направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» направленность (профиль) программы «Системы электроснабжения».

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью лабораторного практикума является облегчение усвоения необходимо теоретического материала по дисциплине «Программное обеспечение для решения задач электроэнергетики», получение практических навыков работы со специализированным программным обеспечением и критической оценки полученных результатов.

В результате изучения дисциплины студент должен изучить математические модели представления основных элементов систем электроснабжения, ознакомиться с основными принципами расчета переходных и установившихся режимов в электрических сетях, получить навыки расчета аварийных режимов КЗ и устойчивости работы электроэнергетической системы, освоить основные пакеты программ для расчета режимов работы энергосистем.

Лабораторные работы связаны друг с другом, так что результаты выполнения Лабораторной работы 1 являются исходными данными для выполнения заданий Лабораторных работ 2, 3 и 4.

Лабораторные работы выполняются студентами в соответствии с выданным преподавателем вариантом исходных данных.

Лабораторная работа 1

Расчет установившихся режимов электроэнергетических систем

Цель работы – ознакомление со способом представления исходных данных для расчетов и расчет установившегося режима в программной среде RASTRWIN.

Порядок выполнения работы

1. Составить схему замещения заданной электроэнергетической системы в соответствии с принципиальной схемой сети согласно варианту задания (рис.1.1).

2. Определить параметры элементов схемы замещения и записать их в таблицы исходных данных (Таблица узлов и Таблица ветвей) для расчета в программной среде **RASTRWIN**.

3. Построить графическое изображение расчетной сети.

4. Рассчитать установившийся режим работы спроектированной электроэнергетической системы.

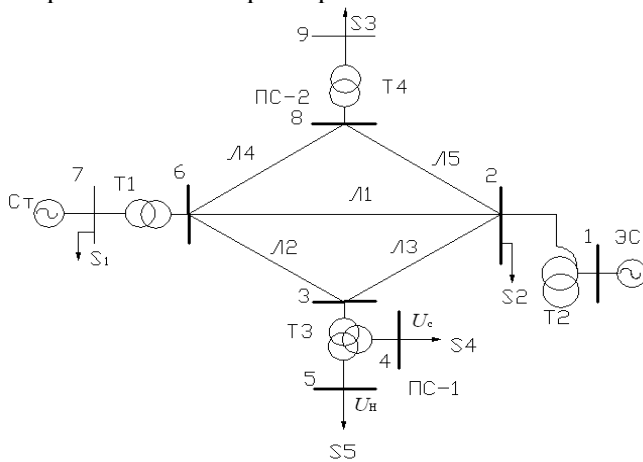


Рис.1.1. Принципиальная схема сети

5. Провести анализ рассчитанного установившегося режима.

Исходные данные для выполнения работы

Таблица 1.1

Варианты исходных данных

	Номера вариантов по таблицам 2 –8 и 10							
	табл. 2	табл.3	табл. 4	табл. 5	табл.6	табл.7	табл.8	табл.9
1	1	5	1	3	1	2	1	5
2	2	1	2	4	2	1	2	6
3	3	2	1	3	1	1	3	4
4	4	3	4	2	2	2	4	3
5	5	5	3	1	1	2	5	2
6	1	3	2	2	2	2	1	6
7	2	2	1	3	1	2	2	5
8	3	3	2	4	1	2	3	4
9	4	4	3	3	1	1	4	3
10	5	1	4	2	2	1	5	2
11	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 1.2

Параметры генераторов электростанции

	$P_{НОМГ},$ МВт	$\cos \varphi_{НОМГ}$	$U_{НОМГ},$ кВ	$X_d,$ %	$X'_d,$ %	$X''_d,$ %	$X_2,$ %	$X_0,$ %	$T_j,$ с	$T_{d0},$ с	$n,$ шт
1	63	0,8	6,3	353	29,3	13,9	17	9,62	8,68	7,9	4
2	110	0,8	10,5	180	27,5	19,5	22,1	9,51	8,0	6,8	3
3	160	0,85	20	240	33,7	21,5	25,8	12,5	6,8	5,7	2
4	200	0,85	20	200	32,0	19,8	26,0	12,9	7,6	7,0	2
5	320	0,85	20	180	26,2	22,0	20,2	9,0	6,3	5,2	3

Таблица 1.3

Параметры ЭС

	$P_{НОМГ},$ МВт	$\cos \varphi_{НОМГ}$	$U_G,$ кВ	$X'_d,$ %
1	5000	0,85	110	29
2	6000	0,8	110	28
3	7000	0,9	110	31
4	8000	0,8	110	27
5	9000	0,85	110	33

Таблица 1.4

Параметры двухобмоточного трансформатора Т1

	$S_{НОМ}$, МВ·А	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	U_K , %	ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	I_x , %	n_{T1} , шт
1	180	347	равно $U_{НГ}$	11	520	200	0,45	3
2	250	347		11	580	250	0,45	3
3	400	347		11	760	400	0,4	3
4	630	347		11	1100	450	0,35	2

Таблица 1.5

Параметры двухобмоточного трансформатора Т4

	$S_{НОМ}$, МВ·А	$U_{ВН}$, кВ	$U_{НН}$, кВ	U_K , %	ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	I_x , %	n_{T1} , шт
1	40	330	равно $U_{НГ}$	11	180	80	1,4	2
2	63	330		11	265	120	0,7	2
3	125	347		11	360	145	0,5	2
4	40	330		11	180	80	1,4	3

Таблица 1.6

Параметры автотрансформатора Т2

	$S_{НОМ}$, МВ·А	$S_{Н.НОМ}$, МВ·А	$U_{НОМ}$, кВ		U_K , %			ΔP_K , кВт	ΔP_X , кВт	I_x , %	n_{T2} , шт
			ВН	СН	В-С	В-Н	С-Н				
1	180	0,4· $S_{НОМ}$	330	115	10	35	25	510	145	0,45	2
2	220	0,5· $S_{НОМ}$	330	115	11	31	22	485	130	0,45	1

Таблица 1.7

Параметры трёхобмоточного трансформатора ТЗ

	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном},$ кВ			$U_k, \%$			$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x,$ %	$n_{тз},$ шт
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н	В-С			
1	125	330	115	11	11	35	23	330	90	0,35	3
2	180	330	115	11	10,5	33	25	480	130	0,35	2

Таблица 1.8

Параметры нагрузок

	Мощность нагрузок $S_H = P_H + j \cdot Q_H,$ МВ·А				
	S1	S2	S3	S4	S5
1	$70 + j \cdot 50$	$60 + j \cdot 30$	$50 + j \cdot 10$	$12 + j \cdot 8$	$70 + j \cdot 50$
2	$65 + j \cdot 40$	$85 + j \cdot 60$	$70 + j \cdot 25$	$14 + j \cdot 10$	$90 + j \cdot 65$
3	$80 + j \cdot 40$	$90 + j \cdot 70$	$60 + j \cdot 30$	$16 + j \cdot 12$	$130 + j \cdot 80$
4	$100 + j \cdot 50$	$120 + j \cdot 100$	$40 + j \cdot 15$	$18 + j \cdot 14$	$150 + j \cdot 125$
5	$115 + j \cdot 90$	$125 + j \cdot 110$	$35 + j \cdot 18$	$20 + j \cdot 16$	$175 + j \cdot 150$

Таблица 1.9

Параметры проводов воздушных линий электропередачи

Номер провода	Сечение	$r_0,$ Ом/км	$x_0,$ Ом/км	$g_0 \cdot$ $10^{-6},$ См/км	$b_0 \cdot$ $10^{-6},$ См/км	$I_{доп},$ кА
1	2×АС-240/32	0,06	0,331	0,0345	3,38	1,21
2	2×АС-300/39	0,048	0,328	0,0271	3,41	1,42
3	2×АС-400/51	0,0375	0,323	0,0202	3,46	1,65
4	2×АС-500/64	0,03	0,32	0,0152	3,5	1,89

Таблица 1.10

Параметры линий электропередачи

	Номер линии	Номер марки провода (по табл. 9)	Длина линии, км	Место короткого замыкания (номер узла)	$U_{\text{ном}}$, кВ
1	1	1	250	1, 3, 5	330
	2	2	120		
	3	3	100		
	4	3	90		
	5	2	70		
2	1	3	200	2, 4, 6	
	2	2	100		
	3	4	150		
	4	1	90		
	5	1	80		
3	1	3	200	3, 6, 7	
	2	1	100		
	3	2	150		
	4	2	100		
	5	2	90		
4	1	4	150	3, 5, 7	
	2	3	100		
	3	1	120		
	4	2	80		
	5	2	90		
5	1	2	200	5, 7, 9	
	2	3	130		
	3	4	100		
	4	1	90		
	5	1	80		
6	1	4	200	6, 7, 8	
	2	1	100		
	3	2	150		
	4	3	80		
	5	3	80		

Краткие теоретические сведения

Подготовка исходных данных для расчета

Перед проведением расчетов в специализированных программных комплексах (*RASTRWIN*, *MUSTANG*, *TKZ3000*, АРМ СРЗА и т.д.) нужно подготовить исходные данные по схеме, основному оборудованию, нагрузкам и генераторам электрической сети в форме, требуемой программным комплексов, в данной лабораторной работе - ***RastrWin*** .

Для этого необходимо:

- нарисовать схему замещения заданной сети с указанием всех узлов и ветвей;
 - пронумеровать все узлы электрической сети, включая все промежуточные узлы. Например, электрическая станция может быть представлена двумя узлами – шины генераторного напряжения и шины за трансформатором. Узел в исходных данных программы соответствует электрическим шинам. Номер узла должен быть уникальным числом в диапазоне от 1 до 32000, сквозная нумерация необязательна. Для простоты ориентации в схеме, узлам, относящимся к одному объекту, целесообразно давать похожие номера (7, 17, 107, 1007 и т.д.). Выбранные номера узлов следует нанести на схему сети. Нумерация узлов схемы замещения, для удобства, производится начиная от базисно-балансирующего узла; для каждого узла определить его номинальное напряжение и нанести на схему:
 - для каждого узла нагрузки определить активную и реактивную мощности потребления. Если исходные данные заданы активной мощностью и $\cos \varphi$, – рассчитать реактивную мощность;
 - при наличии в узле шунтов на землю – батареи статических конденсаторов (БСК) или шунтирующих реакторов (ШР) – определить их проводимость (в мкСм) и нанести на схему;
 - для линий электропередачи (ЛЭП) определить продольное сопротивление и проводимость на землю (проводимость задается в микросименсах и емкостный характер отражается знаком минус);

- для трансформаторов определить сопротивление $R + j X$, приведенное к стороне высокого напряжения, проводимость шунта на землю $G + j B$ и коэффициент трансформации, равный отношению низшего номинального напряжения к высшему (таким образом, коэффициент трансформации будет меньше единицы);

- автотрансформаторы и трехобмоточные трансформаторы представить по схеме *звезда* с промежуточным узлом и тремя ветвями, две из которых имеют коэффициенты трансформации;

- определить номер балансирующего узла и его модуль напряжения.

Контрольный пример подготовки исходных данных

В качестве примера рассматривается вариант № 11

Расчет параметров схемы замещения элементов системы

Электроэнергетическая система:

$$X'_{дЭС} = \frac{X'_{d\%} \cdot U_C^2 \cdot \cos \varphi_c}{100 \cdot P_{нс}} = \frac{29 \cdot 110^2 \cdot 0,85}{100 \cdot 5000} = 0,597 \text{ Ом}$$

Электростанция:

$$X'_Г = \frac{X'_{d\%} \cdot U_{нг}^2 \cdot \cos \varphi_{нг}}{100 \cdot P_{нг} \cdot n} = \frac{29,3 \cdot 6,3^2 \cdot 0,8}{100 \cdot 63 \cdot 4} = 0,037 \text{ Ом}$$

Трансформаторы:

трансформатор Т1:

- для одного трансформатора:

$$R_{Т1} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{ВН}^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{520 \cdot 347^2}{180^2} \cdot 10^{-3} = 1,932 \text{ Ом}$$

- с учетом установленного количества трансформаторов (трех шт.)

$$R_{Т1} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{ВН}^2}{n \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{520 \cdot 347^2}{3 \cdot 180^2} \cdot 10^{-3} = 0,644 \text{ Ом}$$

$$X_{Т1} = \frac{U_{к\%} \cdot U_{ВН}^2}{100 \cdot n \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 180} = 73,59 \text{ Ом}$$

$$X_{T1} = \frac{U_{k\%} \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot n \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 3 \cdot 180} = 24,53 \text{ Ом}$$

$$G_{T1} = \frac{\Delta P_x}{U_{BH}^2} = \frac{200}{347^2} \cdot 10^{-3} = 1,66 \text{ мкСм}$$

$$G_{T1} = \frac{n \cdot \Delta P_x}{U_{BH}^2} = \frac{3 \cdot 200}{347^2} \cdot 10^{-3} = 4,98 \text{ мкСм}$$

$$B_{T1} = \frac{I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{BH}^2} = \frac{0,45 \cdot 180}{100 \cdot 347^2} = 6,73 \text{ мкСм}$$

$$B_{T1} = \frac{n \cdot I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{BH}^2} = \frac{3 \cdot 0,45 \cdot 180}{100 \cdot 347^2} = 20,18 \text{ мкСм}$$

коэффициент трансформации

$$K_{T1} = \frac{U_{HH}}{U_{BH}} = \frac{6,3}{347} = 0,03$$

трансформатор Т4:

- для одного трансформатора:

$$R_{T4} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{BH}^2}{S_{НОМ}^2} = \frac{180 \cdot 330^2}{40^2} \cdot 10^{-3} = 12,25 \text{ Ом}$$

- с учетом установленного количества трансформаторов (двух шт.)

$$R_{T4} = \frac{\Delta P_k \cdot U_{BH}^2}{n \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{180 \cdot 330^2}{2 \cdot 40^2} \cdot 10^{-3} = 6,125 \text{ Ом}$$

$$X_{T4} = \frac{U_{k\%} \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 330^2}{100 \cdot 40} = 299,475 \text{ Ом}$$

$$X_{T4} = \frac{U_{k\%} \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot n \cdot S_{НОМ}} = \frac{11 \cdot 347^2}{100 \cdot 2 \cdot 180} = 149,74 \text{ Ом}$$

$$G_{T4} = \frac{\Delta P_x}{U_{BH}^2} = \frac{80}{330^2} \cdot 10^{-3} = 0,73 \text{ мкСм}$$

$$G_{T4} = \frac{n \cdot \Delta P_x}{U_{BH}^2} = \frac{2 \cdot 80}{330^2} \cdot 10^{-3} = 1,4 \text{ мкСм}$$

$$B_{T4} = \frac{I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{BH}^2} = \frac{1,4 \cdot 40}{100 \cdot 330^2} = 5,14 \text{ мкСм}$$

$$B_{T4} = \frac{n \cdot I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{BH}^2} = \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 40}{100 \cdot 330^2} = 10,28 \text{ мкСм}$$

коэффициент трансформации –

$$K_{T1} = \frac{U_{НН}}{U_{ВН}} = \frac{10,5}{330} = 0,0318$$

Автотрансформаторы (а так же трехобмоточные трансформаторы) задаются тремя ветвями – обмотками высшего, среднего и низшего напряжения. Конец обмотки ВН и начало обмоток СН и НН подключаются к дополнительно вводимому узлу с напряжением обмотки ВН (средняя точка трансформатора). Таким образом обмотка высшего напряжения задается трансформаторной ветвью с сопротивлением равным обмотки ВН и коэффициентом трансформации равным 1, в обмотки СН и НН – соответственно трансформаторными ветвями с сопротивлениями равным сопротивлениям обмоток СН и НН и коэффициентами трансформации с высшего на среднее и с высшего на низшее напряжение[1].

Автотрансформатор Т2:

$$R_{T2.В} = R_{T2.С} = \frac{\Delta P_{к.в-с} \cdot U_{BH}^2}{2 \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{510 \cdot 330^2}{2 \cdot 180^2} \cdot 10^{-3} = 0,858 \text{ Ом}$$

$$R_{T2.В} = R_{T2.С} = \frac{\Delta P_{к.в-с} \cdot U_{BH}^2}{2 \cdot n \cdot S_{НОМ}^2} = \frac{510 \cdot 330^2}{2 \cdot 2 \cdot 180^2} \cdot 10^{-3} = 0,429 \text{ Ом}$$

$$R_{T2.Н} = R_{T2.В} \cdot \frac{S_{НОМ}}{S_{ННОМ}} = 0,858 \cdot \frac{180}{0,4 \cdot 180} = 2,145 \text{ Ом}$$

$$R_{T2.H} = R_{T2.B} \cdot \frac{S_{\text{НОМ}}}{S_{\text{ННОМ}}} = 0,429 \cdot \frac{180}{0,4 \cdot 180} = 1,073 \text{ Ом}$$

$$U_{K.2B} = 0,5 \cdot (U_{K.B-C} + U_{K.B-H} - U_{K.C-H}) = 0,5 \cdot (10 + 35 - 25) = 10 \%$$

$$U_{K.2C} = 0,5 \cdot (U_{K.B-C} + U_{K.C-H} - U_{K.B-H}) = 0,5 \cdot (10 + 25 - 35) = 0 \%$$

$$U_{K.2H} = 0,5 \cdot (U_{K.B-H} + U_{K.C-H} - U_{K.B-C}) = 0,5 \cdot (35 + 25 - 10) = 25 \%$$

$$X_{T2.B} = \frac{U_{K.2B\%} \cdot U_{\text{BH}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 330^2}{100 \cdot 180} = 60,5 \text{ Ом}$$

$$X_{T2.B} = \frac{U_{K.2B\%} \cdot U_{\text{BH}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{10 \cdot 330^2}{100 \cdot 2 \cdot 180} = 30,25 \text{ Ом}$$

$$X_{T2.C} = \frac{U_{K.2C\%} \cdot U_{\text{BH}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{0 \cdot 330^2}{100 \cdot 2 \cdot 180} = 0 \text{ Ом}$$

В случае когда X_c в результате расчета оказывается отрицательным, то данное значение можно принять равным нулю.

$$X_{T2.H} = \frac{U_{K.2H\%} \cdot U_{\text{BH}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{25 \cdot 330^2}{100 \cdot 180} = 151,26 \text{ Ом}$$

$$X_{T2.H} = \frac{U_{K.2H\%} \cdot U_{\text{BH}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{25 \cdot 330^2}{100 \cdot 2 \cdot 180} = 75,63 \text{ Ом}$$

$$G_{T2} = \frac{\Delta P_x}{U_{\text{BH}}^2} = \frac{145}{330^2} \cdot 10^{-3} = 1,33 \text{ мкСм}$$

$$G_{T2} = \frac{n \cdot \Delta P_x}{U_{\text{BH}}^2} = \frac{2 \cdot 145}{330^2} \cdot 10^{-3} = 2,66 \text{ мкСм}$$

$$B_{T2} = \frac{I_{x\%} \cdot S_{\text{НОМ}}}{100 \cdot U_{\text{BH}}^2} = \frac{0,45 \cdot 180}{100 \cdot 330^2} = 7,435 \text{ мкСм}$$

$$B_{T2} = \frac{n \cdot I_x \% \cdot S_{\text{НОМ}}}{100 \cdot U_{\text{ВН}}^2} = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 180}{100 \cdot 330^2} = 14,87 \text{ мкСм}$$

Коэффициенты трансформации:

$$K_{T2\text{ВВ}} = 1$$

$$K_{T2\text{ВС}} = \frac{U_{\text{СН}}}{U_{\text{ВН}}} = \frac{115}{330} = 0,3485$$

$$K_{T2\text{ВН}} = \frac{U_{\text{НН}}}{U_{\text{ВН}}} = \frac{10,5}{330} = 0,032$$

Трехобмоточный трансформатор Т3:

$$R_{\text{В}} = \frac{\Delta P_{\text{К}} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2 \cdot n} = \frac{330 \cdot 330^2}{125^2 \cdot 3} \cdot 10^{-3} = 0,767 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{Б}} = \frac{\Delta P_{\text{К}} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} = \frac{330 \cdot 330^2}{125^2} \cdot 10^{-3} = 2,3 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{Т3.В}} = R_{\text{Т3.С}} = R_{\text{Т3.Н}} = 0,5 \cdot 0,767 = 0,384 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{Т3.В}} = R_{\text{Т3.С}} = R_{\text{Т3.Н}} = 0,5 \cdot 2,3 = 1,15 \text{ Ом}$$

$$U_{\text{К.3В}} = 0,5 \cdot (U_{\text{К.В-С}} + U_{\text{К.В-Н}} - U_{\text{К.С-Н}}) = 0,5 \cdot (11 + 35 - 23) = 11,5 \%$$

$$U_{\text{К.3С}} = 0,5 \cdot (U_{\text{К.В-С}} + U_{\text{К.С-Н}} - U_{\text{К.В-Н}}) = 0,5 \cdot (11 + 23 - 35) = -0,5 \%$$

$$U_{\text{К.3Н}} = 0,5 \cdot (U_{\text{К.В-Н}} + U_{\text{К.С-Н}} - U_{\text{К.В-С}}) = 0,5 \cdot (35 + 23 - 11) = 23,5 \%$$

$$X_{\text{Т3.В}} = \frac{U_{\text{К3.В}\%} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 330^2}{100 \cdot 3 \cdot 125} = 31,94 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{Т3.В}} = \frac{U_{\text{К3.В}\%} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{11 \cdot 330^2}{100 \cdot 125} = 95,84 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{Т3.С}} = \frac{U_{\text{К3.С}\%} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{-0,5 \cdot 330^2}{100 \cdot 3 \cdot 125} = -1,45 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{Т3.С}} = \frac{U_{\text{К3.С}\%} \cdot U_{\text{ВН}}^2}{100 \cdot S_{\text{НОМ}}} = \frac{-0,5 \cdot 330^2}{100 \cdot 125} = -4,36 \text{ Ом}$$

Так как полученное численное значение сопротивления

отрицательно принимаем $X_{ТЗ.с} = 0$

$$X_{ТЗ.н} = \frac{U_{к3.н\%} \cdot U_{ВН}^2}{100 \cdot n \cdot S_{НОМ}} = \frac{23 \cdot 330^2}{100 \cdot 3 \cdot 125} = 66,79 \text{ Ом}$$

$$X_{ТЗ.н} = \frac{U_{к3.н\%} \cdot U_{ВН}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} = \frac{23 \cdot 330^2}{100 \cdot 125} = 200,37 \text{ Ом}$$

$$G_{ТЗ} = \frac{n \cdot \Delta P_x}{U_{ВН}^2} = \frac{3 \cdot 90}{330^2} \cdot 10^{-3} = 2,48 \text{ мкСм}$$

$$G_{ТЗ} = \frac{\Delta P_x}{U_{ВН}^2} = \frac{90}{330^2} \cdot 10^{-3} = 0,826 \text{ мкСм}$$

$$B_{ТЗ} = \frac{n \cdot I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{ВН}^2} = \frac{3 \cdot 0,45 \cdot 125}{100 \cdot 330^2} = 15,5 \text{ мкСм}$$

$$B_{ТЗ} = \frac{I_{x\%} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{ВН}^2} = \frac{0,45 \cdot 125}{100 \cdot 330^2} = 5,16 \text{ мкСм}$$

Коэффициенты трансформации:

$$K_{ТЗВС} = \frac{U_{СН}}{U_{ВН}} = \frac{115}{330} = 0,3485$$

$$K_{ТЗВН} = \frac{U_{НН}}{U_{ВН}} = \frac{11}{330} = 0,03$$

$$K_{ТЗВВ} = 1$$

Линии электропередач:

Линия электропередачи Л1:

$$R_{Л1} = r_0 \cdot l = 0,06 \cdot 250 = 15 \text{ Ом}$$

$$X_{Л1} = x_0 \cdot l = 0,331 \cdot 250 = 82,75 \text{ Ом}$$

$$G_{Л1} = g_0 \cdot l = 0,0345 \cdot 250 = 8,625 \text{ мкСм}$$

$$B_{Л1} = b_0 \cdot l = 3,38 \cdot 250 = 845 \text{ мкСм}$$

Линия электропередачи Л2:

$$R_{Л2} = r_0 \cdot l = 0,048 \cdot 120 = 5,76 \text{ Ом}$$

$$X_{Л2} = x_0 \cdot l = 0,328 \cdot 120 = 39,36 \text{ Ом}$$

$$G_{Л2} = g_0 \cdot l = 0,0271 \cdot 120 = 3,252 \text{ мкСм}$$

$$B_{Л2} = b_0 \cdot l = 3,41 \cdot 120 = 409,2 \text{ мкСм}$$

Линия электропередачи Л3:

$$R_{л3} = r_0 \cdot l = 0,0375 \cdot 100 = 3,75 \text{ Ом}$$

$$X_{л3} = x_0 \cdot l = 0,323 \cdot 110 = 35,53 \text{ Ом}$$

$$G_{л3} = g_0 \cdot l = 0,0202 \cdot 110 = 2,222 \text{ мкСм}$$

$$B_{л3} = b_0 \cdot l = 3,46 \cdot 110 = 380,6 \text{ мкСм}$$

Линия электропередачи Л4:

$$R_{л4} = r_0 \cdot l = 0,0375 \cdot 90 = 3,375 \text{ Ом}$$

$$X_{л4} = x_0 \cdot l = 0,323 \cdot 90 = 29,07 \text{ Ом}$$

$$G_{л4} = g_0 \cdot l = 0,0202 \cdot 90 = 1,818 \text{ мкСм}$$

$$B_{л4} = b_0 \cdot l = 3,46 \cdot 90 = 311,4 \text{ мкСм}$$

Линия электропередачи Л5:

$$R_{л2} = r_0 \cdot l = 0,048 \cdot 70 = 3,36 \text{ Ом}$$

$$X_{л2} = x_0 \cdot l = 0,328 \cdot 70 = 22,96 \text{ Ом}$$

$$G_{л2} = g_0 \cdot l = 0,0271 \cdot 70 = 1,897 \text{ мкСм}$$

$$B_{л2} = b_0 \cdot l = 3,41 \cdot 70 = 238,4 \text{ мкСм}$$

Ввод параметров схемы и расчет установившегося режима в программе RastrWin3

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	B_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		База	1	энергосистема	121					31,3	64,8					121,00		
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2	Нагрузка 2	330			60,0	30,0							335,42	-0,87	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	21	Средняя точка тран...	330											346,63	0,03	
4	<input type="checkbox"/>		Нагр	8	ПС-2	330											335,36	-0,69	
5	<input type="checkbox"/>		Нагр	9	Нагрузка 3	10			50,0	10,0							9,97	-4,55	
6	<input type="checkbox"/>		Нагр	6	Станция Ст	330											337,02	0,25	
7	<input type="checkbox"/>		Ген	71	Нагрузка 1+Г1,2	6			45,0	25,0	126,0	57,7	6,3	-100,0	100,0		6,30	5,98	
8	<input type="checkbox"/>		Ген	72	Нагрузка 1+ Г3,4	6			45,0	25,0	126,0	57,7	6,3	-100,0	100,0		6,30	5,98	
9	<input type="checkbox"/>		Нагр	3	ПС-1	330											332,17	-1,05	
10	<input type="checkbox"/>		Нагр	345	Средняя точка Т3	330											330,23	-1,49	
11	<input type="checkbox"/>		Нагр	4	Нагрузка 4	110			70,0	50,0							115,23	-1,49	
12	<input type="checkbox"/>		Нагр	5	Нагрузка 5	10			12,0	8,0							9,89	-1,63	

Рис. 1.2 Исходные данные и результаты расчета по узлам схемы

	O	S	Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	B	Kт/р	N_анц	БД...	P_нач	Q_нач	Na	I max	I загр.
1	<input type="checkbox"/>		Тр-р	2	21			Нагрузка 2 - Средняя то...	0,86	60,50		1,000			31	61		119	
2	<input type="checkbox"/>		Тр-р	21	1			Средняя точка трансфо...	0,86	0,01	7,4	0,349			31	64		119	
3	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	2	8			Нагрузка 2 - ПС-2	3,36	22,96	1,9				15	-3		26	
4	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	2	6			Нагрузка 2 - Станция Ст	15,00	82,75	8,6				27	1		46	
5	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	2	3			Нагрузка 2 - ПС-1	3,75	35,53	2,2				-13	-29		55	
6	<input type="checkbox"/>		Тр-р	8	9			ПС-2 - Нагрузка 3	6,12	149,75	1,4	0,030			-50	-14		90	
7	<input type="checkbox"/>		Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58	
8	<input type="checkbox"/>		Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58	
9	<input type="checkbox"/>		Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58	
10	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50	
11	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50	
12	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50	
13	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9	
14	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9	
15	<input type="checkbox"/>		Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9	
16	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	3	6			ПС-1 - Станция Ст	5,76	39,36	3,3				69	30		131	
17	<input type="checkbox"/>		ЛЭП	6	8			Станция Ст - ПС-2	3,38	29,07	1,8				-65	-12		114	
18	<input type="checkbox"/>		Тр-р	6	71			Станция Ст - Нагрузка 1...	3,86	147,18	0,8	0,018			81	23		144	
19	<input type="checkbox"/>		Тр-р	6	72			Станция Ст - Нагрузка 1...	3,86	147,18	0,8	0,018			81	23		144	
20	<input type="checkbox"/>		Выкл	71	72			Нагрузка 1+Г1,2 - Нагру...											

Рис. 1.3 Исходные данные и результаты расчета по ветвям схемы

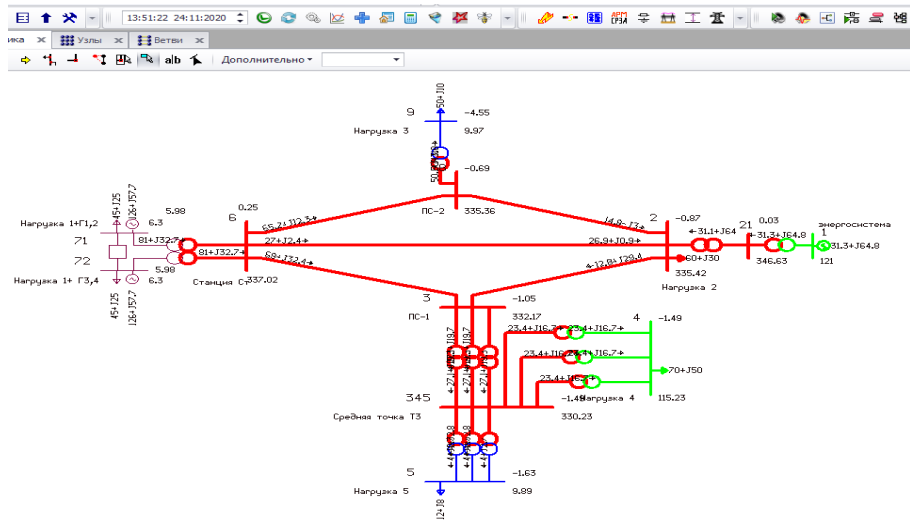


Рис. 1.4 Вкладка Графика (примерный вид)

Тип	N_нач	N_кон	N_п	I...	Название	R	X	B	Кт/р	N_анц	БД_...	P_нач	Q_нач	Na	I max
Тр-р	2	21			Нагрузка 2 - Средняя то...	0,86	60,50		1,000			31	61		119
Тр-р	21	1			Средняя точка трансфо...	0,86	0,01	7,4	0,349			31	64		119
ЛЭП	2	8			Нагрузка 2 - ПС-2	3,36	22,96	1,9				15	-3		26
ЛЭП	2	6			Нагрузка 2 - Станция Ст	15,00	82,75	8,6				27	1		46
ЛЭП	2	3			Нагрузка 2 - ПС-1	3,75	35,53	2,2				-13	-29		55
Тр-р	8	9			ПС-2 - Нагрузка 3	6,12	149,75	1,4	0,030			-50	-14		90
Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58
Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58
Тр-р	3	345			ПС-1 - Средняя точка ТЗ	0,77	31,94		1,000			-27	-20		58
Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50
Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50
Тр-р	345	4			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	0,01		0,349			-23	-17		50
Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9
Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9
Тр-р	345	5			Средняя точка ТЗ - Нагр...	0,77	66,79	0,8	0,030			-4	-3		9
ЛЭП	3	6			ПС-1 - Станция Ст	5,76	39,36	3,3				69	30		131
ЛЭП	6	8			Станция Ст - ПС-2	3,38	29,07	1,8				-65	-12		114
Тр-р	6	71			Станция Ст - Нагрузка 1...	3,86	147,18	0,8	0,018			81	23		144
Тр-р	6	72			Станция Ст - Нагрузка 1...	3,86	147,18	0,8	0,018			81	23		144
Выкл	71	72			Нагрузка 1+Г1,2 - Нагру...										

Рис. 1.5 Результат расчета по ветвям

Лабораторная работа 2

Расчет токов КЗ

Цель работы – расчет токов КЗ в заданных точках спроектированной электроэнергетической системы.

Порядок выполнения работы

1. Открыть режим и графику системы, полученные в *Лабораторной работе 1*. Выполнить расчет установившегося режима.
2. Задать обратные и нулевые сопротивления для элементов системы. При недостатке исходных данных воспользоваться макросом генерации примерных значений параметров *MakeNonSim*
3. Выполнить расчеты 1 ф, 2ф и 3ф КЗ для заданных узлов схемы (табл. 1.10 Лабораторная работа 1).
4. Результаты расчетов оформить в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты расчетов тока КЗ

№ узла	Вид КЗ	Ток прямой послед I_1 , кА	Ток обратной послед I_2 , кА	Ток нулевой послед I_0 , кА	Ток КЗ $I^{(n)}$, кА

Краткие теоретические сведения

При вводе исходных для расчета токов короткого замыкания воспользуемся схемой из *Лабораторной работы 1*. Для расчета токов короткого замыкания сохраним файл режима **.rg2** в формате **.rst** через меню **Файлы/Сохранить как**. После этого преобразование закончено, нужно открыть преобразованный файл, нажав «**Файлы → Загрузить → файл .rst**».

Вводим сопротивления прямой и обратной последовательности для элементов (ветвей) схемы (табл. 2.2 – 2.4). Табл. 2.2 содержит следующие обозначения столбцов:

– $s0$ –состояние узла в схеме замещения нулевой последовательности (красный крест – отключен, не входит в схему замещения «0», без креста – включен, учитывается в схеме замещения «0»).

–**тип0** – тип узла в схеме нулевой последовательности («зак» значит «закорочен», соединён с землёй; «у» —обычный узел в схеме замещения «0», не соединённый с землёй).

Чтобы открыть таблицу, нажмите кнопку «Открыть → Несимметрия → Узлы/Несим/ИД».

Таблица заполняется так:

– в первую очередь графически на бумаге составляется схема замещения нулевой последовательности;

– для узлов и ветвей, которые вообще не входят в схему замещения «0», ставится красный крест в столбце $s0$;

– узлы из схемы замещения «1» прямой последовательности, которые на схеме «0» соединены с землёй, отмечаются «зак»;

– остальные узлы, которые не соединены с землёй, отмечаются «у».

В табл. 2.3 приведены исходные данные для таблицы ветвей КЗ. Таблица содержит следующие обозначения столбцов:

– $s0$ – состояние ветви в схеме замещения нулевой последовательности, аналогично ветвям;

– $r0$, Ом – активное сопротивление нулевой последовательности;

– $x0$, Ом – реактивное сопротивление нулевой последовательности.

Заполнение таблицы исходных данных для генераторов приведено на рис. 2.4. Например, если генератор подключен к обмотке силового трансформатора, соединенным «треугольником», то токи нулевой последовательности не будут протекать по обмоткам этих генераторов[2]. Поэтому для них в столбце $s0$ указывается значение «1», т. е. «отключено» (в программе отмечено красным крестом). Чтобы открыть таблицу, нажмите кнопку «Открыть → Несимметрия → Генератор/Несим».

При этом учитывается, что сопротивление обратной последовательности для ЛЭП может быть принято равным сопротивлению прямой последовательности, так как взаимоиנדукция между фазами не зависит от порядка их чередования. Соотношения для определения параметров нулевой последовательности для ЛЭП рассмотрены в табл. 2.2., для остальных элементов сети определяются в соответствии [3]. При проектировании части ЭС должны уточняться у соответствующих региональных диспетчерских управлений.

При проектировании, проверке оборудования и в других случаях возможно использовать приближенные значения сопротивлений обратной и нулевой последовательности, так как данные по оборудованию не всегда доступны. После сохранения системы, при отсутствии исходных данных о параметрах схемы замещения для схем обратной и нулевой последовательности, возможно воспользоваться макросом генерации примерных значений этих параметров *MakeNonSim* из меню **Расчеты/Выполнить/ТКЗ/**. Полученные таблицы исходных данных по узлам, ветвям и генераторам представлены на рисунках 2.1-2.3.

Таблица 2.2

**Средние значения отношения X_0/X_1 для воздушных
линий электропередачи**

Характеристика линии	X_0/X_1
Одноцепная линия без заземленных тросов	3,5
То же, со стальными заземленными тросами	3,0
То же, с заземленными тросами из хорошопроводящих материалов	2,0
Двухцепная линия без заземленных тросов	5,5
То же, со стальными заземленными тросами	4,7
То же, с заземленными тросами из хорошопроводящих материалов	3

	O	S	s0	Тип0	Номер	Название	U_ном	G_ш	B_ш	g0	b0
1	<input type="checkbox"/>			зак	1	Энергосистема	121				
2	<input type="checkbox"/>			у	2		330				
3	<input type="checkbox"/>			у	3		330				
4	<input type="checkbox"/>			у	60		330				
5	<input type="checkbox"/>			у	70		330				
6	<input type="checkbox"/>			у	80		330				
7	<input type="checkbox"/>			у	4		115				
8	<input type="checkbox"/>			зак	5		11				
9	<input type="checkbox"/>			у	6		330				
10	<input type="checkbox"/>			зак	7		6				
	<input type="checkbox"/>										

Рис.2.1. Исходные данные по узлам

O	S	Тип	s0	tr0	N_нач	N_кон	N_п	Название	R	X	G	B	БД_...	N_анц	Кт/r	r0	x0	g0	b0
1	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	6	7	1	-	1,93	73,59	1,7	6,7			0,019	1,932	73,590	1,660	6,730
2	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	6	7	2	-	1,93	73,59	1,7	6,7			0,019	1,932	73,590	1,660	6,730
3	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	6	7	3	-	1,93	73,59	1,7	6,7			0,019	1,932	73,590	1,660	6,730
4	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	2	1	1	- Энергосистема	2,15	60,50	1,3	7,4			0,349	2,145	60,500	1,330	7,435
5	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	2	1	2	- Энергосистема	2,15	60,50	1,3	7,4			0,349	2,145	60,500	1,330	7,435
6	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	3	70		-	1,15	95,84	0,8	5,2			1,000	1,150	95,840	0,826	5,160
7	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	3	80		-	1,15	95,84	0,8	5,2			1,000	1,150	95,840	0,826	5,160
8	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	3	60		-	1,15	95,84	0,8	5,2			1,000	1,150	95,840	0,826	5,160
9	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	80	4	3	-	1,15						0,348	1,150			
10	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	60	4	1	-	1,15						0,348	1,150			
11	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	70	4	2	-	1,15						0,348	1,150			
12	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	80	5	3	-	1,15	200,37					0,032	1,150	200,370		
13	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	60	5	1	-	1,15	200,37					0,032	1,150	200,370		
14	<input type="checkbox"/>	Тр-р		Тр-р	70	5	2	-	1,15	200,37					0,032	1,150	200,370		
15	<input type="checkbox"/>	ЛЭП		ЛЭП	2	6		-	15,00	82,75	8,6	-845,0				45,000	248,250	8,625	-1 470,...
16	<input type="checkbox"/>	ЛЭП		ЛЭП	3	6		-	5,76	39,36	3,3	-409,2				17,280	118,080	3,252	-712,008
17	<input type="checkbox"/>	ЛЭП		ЛЭП	2	3		-	3,75	35,53	2,2	-380,6				11,250	106,590	2,222	-662,244

Рис.2.2. Исходные данные по ветвям

Исходные данные по генераторам приведены на рис.2.3.

S	s0	N	Название	N узла	r	x	r2	X2	r0	X0	E	Угол	ур.Е	ур.Угол	I1	dI1	I2	dI2
1		1	Энергосистема	1		0,597		0,597		0,306	121,000				5,141	-87,825	5,959	-88,047
2		2	Генератор 1	7		0,070		0,070		0,306	6,990				8,043	-85,440	8,722	-86,546
3		3	Генератор 2	7		0,070		0,070		0,306	6,990				8,043	-85,440	8,722	-86,546
4		4	Генератор 3	7		0,070		0,070		0,306	6,990				8,043	-85,440	8,722	-86,546
5		5	Генератор 4	7		0,070		0,070		0,306	6,990				8,043	-85,440	8,722	-86,546

Рис.2.3. Вкладка Несимметрия/Генераторы

The screenshot shows the RastrWin3 software interface. The title bar reads "RastrWin3 - D:\Школа\XII семестр\МУ\RastrWin\ЛР2.Расчет ткз\ЛР1.rst<динамика.rst>". The menu bar includes "Файлы", "Расчеты", "Открыть", "Окна", "Помощь", and "Стиль". The toolbar contains various icons, including a button labeled "запуск расчета несимметрии" which is highlighted with a black arrow. Below the toolbar, the "Узлы/Несим/МД" tab is active, showing a table with columns: S, №, № сост, Тип, П 1, П 2, П 3, П 4, L, I 1, dI 1, r1, x1. The first row of the table contains the value "1" in the S column and "1" in the № column.

S	№	№ сост	Тип	П 1	П 2	П 3	П 4	L	I 1	dI 1	r1	x1
1	1		3ф	2					7,4342	-87,90		

Рис. 2.4. Вкладка Состав/Несимметрия и запуск расчета

После этого можно провести расчёт ТКЗ. Для этого задайте точку и вид КЗ, нажав кнопку **«Открыть → Несимметрия → Состав/Несим»**. В столбец «№» ставится цифра 1, в столбце «Тип» выбирается желаемый вид КЗ — 3ф, 2ф, 1ф, 1ф1ф, в столбец «П1» ставится номер узла, в котором происходит КЗ. После выбора вида и точки КЗ нажмите кнопку **«Расчеты → Выполнить → ТКЗ → kz»**. В окне «Протокол» должны появиться надписи зеленого-цвета **«ТКЗ проверка схемы»**, **«Инициализация ТКЗ»**, **«Расчет ТКЗ»**. Если отображаются сообщения желтого или красного цвета, то нужно проверить корректность исходных данных.

Результаты расчета токов короткого замыкания выводятся во вкладке **Состав/Несимметрия** после предварительного указания рассчитываемого типа и расчетной точки короткого замыкания - рис.2.5.

Результаты расчета токов КЗ находятся в таблицах **«Открыть → Несимметрия → Ветви/Несим/РФ»** (значения токов КЗ в фазах) и **«Ветви/Несим/РС»** (значения симметричных составляющих токов КЗ). Остаточные значения фазных напряжений находятся в таблице **«Открыть → Несимметрия → Узлы/Несим/РФ»**. Результаты из таблицы **«Ветви/Несим/РС»** оформляются в виде таблицы – рис.2.6 для каждого вида КЗ в каждой точке. В таблице указаны следующие обозначения:

$-I_{1_н}, I_{2_н}, I_{0_н}$, кА – токи прямой, обратной и нулевой последовательности в начале ветви;

$-I_{1_к}, I_{2_к}, I_{0_к}$, кА – токи прямой, обратной и нулевой последовательности в конце ветви.

Результаты могут быть сверены с результатом ручного расчёта в базисных единицах по суммарному току в точке КЗ. Для этого в программе нужно открыть таблицу **«Состав/Несим»** и сложить по модулю значения столбцов I_1 ,

I_2 , I_0 . Это значение должно совпадать с суммарным током КЗ двухлучевой схемы (в кА). Допустимая погрешность расчёта составляет приблизительно 10%.

Номер ветви	I_1 н, кА	I_2 н, кА	I_0 н, кА	I_1 к, кА	I_2 к, кА	I_0 к, кА
1	-1,81	0	0	-37,77	0	0
2	-1,81	0	0	-37,78	0	0
3	-0,87	0	0	-9,53	0	0
4	-0,87	0	0	-9,53	0	0
5	24,97	0	0	24,97	0	0
6	24,97	0	0	24,97	0	0
7	2,31	0	0	2,31	0	0
8	2,31	0	0	2,31	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	-2,93	0	0	-6,36	0	0

Рис. 2.5. Результаты расчета ТКЗ

Для вывода рассчитанных значений токов короткого замыкания удобно также воспользоваться возможностями встроенных в программу макросов. Для этого предварительно нужно отметить на вкладке **Графика** узлы, в которых необходимо рассчитать токи короткого замыкания, что показано на рис.2.6. Контекстное меню вызывается щелчком правой кнопки мыши (ПКМ) по соответствующему узлу.

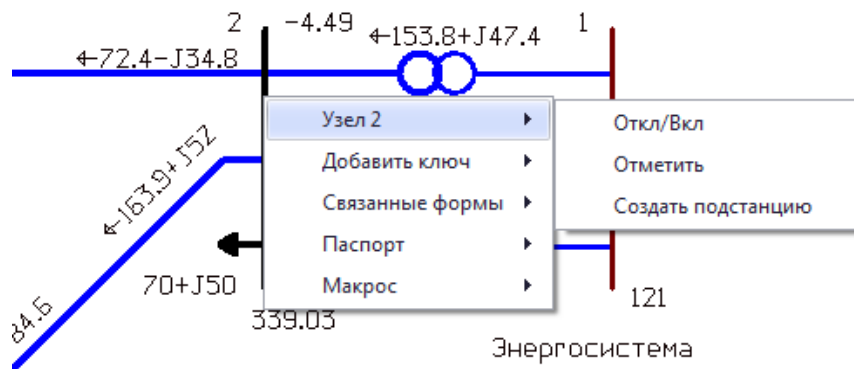


Рис. 2.6. Отметка узлов, в которых выполняется расчет ТКЗ

Для того, чтобы сделать видимыми результаты расчета открывается меню **Расчеты/Макро**, при этом необходимый встроенный макрос выбирается из меню **Расчеты/Выполнить/ТКЗ/**. Результат работы макроса **Расчеты** в отмеченных узлах 3ф 1ф КЗ представлен на рис 2.7. Таким способом удобно рассчитывать токи короткого замыкания, когда много расчетных точек и требуется пакетный расчет или нужно быстро проверить величины КЗ в системе.


```

|
[ 2 ][ ]
|----- < Шунт > -----
U = 355,475/_-0,085
Z1= 1,051+j27,587  Z2= 1,051+j27,587  Z0= 1,291+j24,291
----- < 3ф > -----
                                I_1 = 7,434/_ -87,903  I_2 = 0/_ 0  3xI_0 = 0/_ 0
[ 2 : 1 : 1 ] [ - Энергосистема ] I_a = -2,849/_ -88,253  I_1 = -2,849/_ -88,253
[ 2 : 1 : 2 ] [ - Энергосистема ] I_a = -2,849/_ -88,253  I_1 = -2,849/_ -88,253
[ 2 : 6 : 0 ] [ - ] I_a = -0,819/_ -85,117  I_1 = -0,819/_ -85,117
[ 2 : 3 : 0 ] [ - ] I_a = -0,919/_ -88,211  I_1 = -0,919/_ -88,211
----- < 1ф > -----
                                I_1 = 2,58/_ -87,639  I_2 = 2,58/_ -87,639  3xI_0 = 7,741/_ -87,639
[ 2 : 1 : 1 ] [ - Энергосистема ] I_a = -2,994/_ -88,188  I_1 = -0,944/_ -87,808
[ 2 : 1 : 2 ] [ - Энергосистема ] I_a = -2,994/_ -88,188  I_1 = -0,944/_ -87,808
[ 2 : 6 : 0 ] [ - ] I_a = -0,759/_ -83,76  I_1 = -0,332/_ -85,838
[ 2 : 3 : 0 ] [ - ] I_a = -0,996/_ -87,298  I_1 = -0,362/_ -88,415
|-----|

```

Рис.2.7. Результат расчета КЗ с помощью макроса

Лабораторная работа 3

Расчет послеаварийных режимов и ненормальных режимов электроэнергетических систем

Цель работы – определение возможных вариантов послеаварийных и ненормальных режимов работы спроектированной системы электроснабжения, расчет и анализ режимов.

Порядок выполнения работы

1. Открыть режим и графику системы, полученные в *Лабораторной работе 1*. Выполнить расчет установившегося режима.

2. Выполнить серию расчетов послеаварийных режимов поочередно отключая одну из ЛЭП схемы или одни из трансформаторов (при наличие в узле более одного трансформатора).

3. Выполнить автоматизированный расчет послеаварийных режимов с созданием «Расчетного сценария»

4. Для каждого режима определить величину потерь мощности.

5. Результаты расчетов режимов оформить в табл. 3.1. Проанализировать полученные результаты.

Таблица 3.1

Варианты послеаварийных режимов

№	Отключаемый элемент	Максимально перегруженная ветвь	Минимальное напряжение в узле №	Потери мощности в режиме
---	---------------------	---------------------------------	---------------------------------	--------------------------

По табл.3.1 определить максимально тяжелый послеаварийный режим.

6. Определить величину допустимого тока загрузки линий и трансформаторов от температуры окружающей среды. Значение температуры принять в зависимости от выполняемого варианта исходных данных по табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения температуры окружающей среды

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T, C ⁰	30	40	45	43	38	28	15	5	0	-10	35

Краткие теоретические сведения

Для расчета послеаварийного режима следует поочередно отключить каждую из ЛЭП схемы или один из трансформаторов (при наличии в узле более одного трансформатора) и сравнить полученные в результате расчета напряжения в узлах схемы и загрузку оставшихся в работе ЛЭП [4]. Режим с самыми низкими напряжениями и высокой загрузкой ЛЭП и будет наиболее тяжелым послеаварийным режимом работы системы[5].

Возможен автоматизированный расчет послеаварийных режимов созданием «расчетных сценариев» (В терминах ПК *RastrWIN* расчётный сценарий называется «вариантный расчёт»). Под расчётным сценарием в настоящей работе понимается перечень изменений параметров расчётной модели (сопротивления ветвей, мощности узлов, состояния узлов и ветвей). В практике такие сценарии применяются когда заранее известны отличия исследуемой схемно-режимной ситуации от нормального режима.

Формирование расчётных сценариев средствами ПК RastrWIN

При формировании расчетных сценариев необходимо создать файл для хранения информации о сценариях расчёта «Файл» → «Новый» → «вариант-е р-ты.vgn». После того как создан файл, можно приступить к формированию таблицы с информацией о расчётных сценариях. Для этого необходимо открыть две таблицы - в одной хранится название варианта, а в другой перечень изменений параметров схемы, относительно нормальной схемы.

– Таблица названий расчётных сценариев: «Открыть» → «Вариант. р-ты» → «Варианты_Название».

– Таблица перечня изменений параметров схемы: «Открыть»→«Вариант.р-ты» → «Варианты_Содержание». Подробное описание структуры таблиц «Варианты_Название» и «Варианты_Содержание» приведено в руководстве пользователя ПК *RastrWIN* [2] в разделе «Вариантные расчеты». Важно отметить, что при составлении расчётных сценариев специалист должен учитывать не только переключения в электрических схемах осуществляемые оперативным персоналом, но и сетевой противоаварийной автоматикой. Более того необходимо также учитывать схемы распределительных устройств подстанций. К сожалению, ПК *RastrWIN* не предоставляет возможность графического отображения разъединителей. Единственным способом учесть разъединители в расчётной модели ПК *RastrWIN* — это представить их в виде выключателей, что не всегда наглядно. Пример заполнения таблиц вариантных расчётных сценариев приведён на рисунке 3.1 и 3.2 .

S	O	Номер	Название
		1	Отключение Тр 1 на ПС 110/10 Западная
		2	Отключение ЛЭП 1 110 кВ Восточная - Западная
		3	Отключение СШ 1 110 кВ на ПС 110/10 Восточная

Рис. 3.1. Пример заполнения таблица вариантных сценариев

S	Номер	A	FOL	Тип	Ny/Nb	Ne	Np	Значение1	Значение2	Значение3
	1			Ветвь сост.	21	121		0		
	1			Ветвь сост.	121	122		1		
	2			Ветвь сост.	11	21		0		
	3			Узел сост.	11			0		
	3			Ветвь сост.	11	12		0		
	3			Ветвь сост.	111	112		1		
	3			Ветвь сост.	1	11		0		
	3			Ветвь сост.	11	21		0		

Рис 3.2. Таблица вариантных сценариев

Запуск формирования файлов **rg2** для серии УР согласно сформированным расчётным сценариям осуществляется следующим образом:

1.1. Нажать пункт меню «**Расчеты**» → «**Выполнить**» → «**Варианты**» → «**Вариантные расчеты + dxf**».

1.2. В появившемся окне необходимо указать папку куда сохранить результаты расчётов.

1.3. Во втором появившемся окне указать путь до базового файла с расчётной схемой **rg2**.

1.4. Дождаться окончания расчетов. Результаты будут помещены в папку выбранную на первом шаге.

1.5. Анализ результатов расчетов. Под базовым файлом **rg2** понимается файл в который будут вносятся изменения и в итоге будут получены различные схемно-режимные ситуации для дальнейшего анализа.

Для каждого режима посмотреть величину потерь мощности.

В свойствах ветвей необходимо поставить градиентную загрузку ЛЭП в зависимости от величины протекаемого тока. Для оценки величины токовой загрузки сетевых элементов необходимо соответствующую информацию занести в таблицу «**Ветви**». Допустимый ток для ЛЭП получаем на основе справочных данных. Допустимый ток для трансформаторов рассчитан согласно формуле (3.1)

$$I_{доп} = S_{ном} / \sqrt{3} U_{ном}, \quad (3.1)$$

где $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора; $U_{ном}$ — номинальное напряжение высшей стороны трансформатора.

Информация о величине допустимого тока для сетевого оборудования хранится в таблице «**Ветви**».

В общем случае информацию о допустимой токовой загрузке сетевых элементов в ПК *RastrWIN* можно хранить несколькими способами. Выбор того или иного способа моделирования зависит от предпочтений и навыков специалиста составляющего расчётную модель:

– информацию о допустимой токовой загрузке ЛЭП записывать в поле «**Ветви**» → «**Iдоп_25**».

– информацию о допустимой токовой загрузке двухобмоточных трансформаторов записывать в поле «**Ветви**» → «**I_доп_обор**».

– информацию о допустимой токовой загрузке трёхобмоточных трансформаторов записывать в следующем образом:

* данные по низшей и средней обмотке записывать в поле «**Ветви**» → «**I_доп_обор**».

* данные по высшей обмотке записывать в поле «**Ветви**» → «**Iдоп_25**», при этом в поле «**Ветви**» → «**Тс**» поставить значение «25°» (это необходимо для того, чтобы в дальнейшем исключить температурную коррекцию допустимого тока).

Результаты заполнения представлены на рис. 3.4 и 3.5. При выполнении эксплуатационных и проектных расчётов зачастую возникает необходимость влияния метеорологических факторов на величину допустимого тока сетевого элемента (особенно воздушной линии электропередачи). В общем случае на величину допустимого тока влияют: интенсивность солнечного излучения, скорость и направление ветра, температура окружающей среды. При этом в расчётах установившихся режимов практически возможно учесть только среднее значение температуры окружающей среды на прогнозируемом интервале времени, особенно при выполнении расчётов на перспективу нескольких лет.

Учет зависимости величины допустимого тока от температуры окружающей среды

В ПК *RastrWIN* есть возможность учесть функциональную зависимость допустимого тока сетевого элемента от температуры окружающей среды. Эта зависимость моделируется кусочно-линейной функцией, представленной на рис. 3.3.

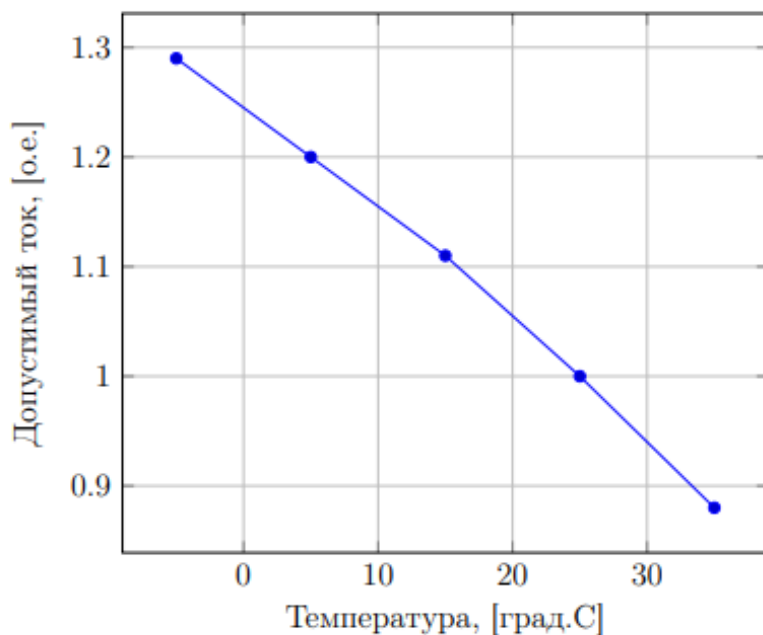


Рис. 3.3. Зависимость тока от температуры окружающей среды

Данная зависимость формируется по точкам в таблице «График_Идоп_от_Т». Доступ к данной таблице можно получить из основного меню «Открыть» → «Ветви» → «График_Идоп_от_Т». При этом у пользователя программного пакета имеется принципиальная возможность создания нескольких температурных зависимостей.

Для того чтобы пересчитать допустимые токи в зависимости от температуры необходимо выполнить следующие действия:

- внести в таблицу «Ветви» информацию о номере температурной зависимости в поле «N_I(t)». номер зависимости по умолчанию «1».

- запустить макрос расчета допустимого тока в зависимости от температуры «**Расчеты**»→«**Доп. ток от Т. . .**» или кнопка «F9». Пример окна представлен на рисунке 3.4.

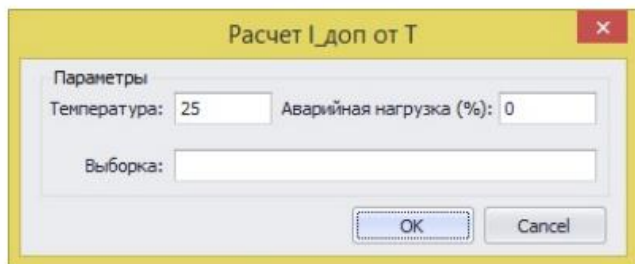


Рис. 3.4. Задание расчетной температуры

- в поле «**Температура**» внести данные по температуре окружающей среды для всей расчётной модели.

- значение полей «**Аварийная нагрузка (%)**» и «**Выборка**» можно оставить по умолчанию.

- нажать кнопку «**ОК**».

В результате работы макроса в таблице «**Ветви**» заполняется колонка «**I_доп_расч**» и при наличии расчётных значений тока вычисляется колонка «**I_загр.**», в которой хранится информация о токовой нагрузке в процентах в качестве примера выполнена температурная коррекция допустимого тока для жаркого летнего дня с температурой +35⁰ С (рис. 3.5).

RastrWin3 - C:\Users\tas\Desktop\ЛР 3 Весна Сети\ЛР 3 весна Сети.grf<графика.grf>

15:29:07 28.02.2017

Графика

	S	Тип	N_нач	N_кон	Название	R	X	G	B	KтЗ	I max	I_дон_обор	I_дон_25	I_дон_расч	Yc	I загр.	IЛ_дон	N_L00
1		Выкл	1	2	ПС Центр 110 СШ 1 - ПС Центр 110 СШ 2						201							
2		ЛЭП	1	11	ПС Центр 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 1	4,80	35,20		-112,40		204		605,0	532,4		38,7	37,8	1
3		ЛЭП	2	12	ПС Центр 110 СШ 2 - ПС Восток 110 СШ 2	4,80	35,20		-112,40		205		605,0	532,4		38,6	37,7	1
4		Выкл	11	12	ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 110 СШ 2						0							
5		ЛЭП	11	21	ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Запад 110 СШ 1	2,40	8,30		-56,20		87		605,0	532,4		16,4	16,0	1
6		ЛЭП	12	22	ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Запад 110 СШ 2	2,40	8,30		-56,20		87		605,0	532,4		16,4	16,0	1
7		Выкл	21	22	ПС Запад 110 СШ 1 - ПС Запад 110 СШ 2						0							
8		Тр-ф	11	111	ПС Восток 110 СШ 1 - ПС Восток 10 СШ 1	1,40	34,70	2,62	19,66	0,091	120	347,8		347,8		34,6	34,6	1
9		Тр-ф	12	112	ПС Восток 110 СШ 2 - ПС Восток 10 СШ 2	1,40	34,70	2,62	19,66	0,091	120	347,8		347,8		34,6	34,6	1
10		Тр-ф	21	121	ПС Запад 110 СШ 1 - ПС Запад 10 СШ 1	2,54	55,90	2,04	13,22	0,091	87	217,4		217,4		40,1	40,1	1
11		Тр-ф	22	122	ПС Запад 110 СШ 2 - ПС Запад 10 СШ 2	2,54	55,90	2,04	13,22	0,091	87	217,4		217,4		40,1	40,1	1
12		Выкл	111	112	ПС Восток 10 СШ 1 - ПС Восток 10 СШ 2						195							
13		Выкл	121	122	ПС Запад 10 СШ 1 - ПС Запад 10 СШ 2						204							

выбран 13 заявок из 13

Контроль исходных данных
Расчет установившегося режима. Сообщений - 3

Рис.3.3. Результаты расчета нагрузки ЛЭП при заданной температуре

На основе расчётов УР показать, что в заданной сети возможно поддерживать допустимые уровни напряжения, используя средства централизованного и местного регулирования. Модуль напряжения должен находиться в интервале $V_{\text{класс}} \pm 5\%$. На шинах генераторов должно быть строго $U_{\text{ном}}$.

Выполнить регулирование напряжения во всех заданных узлах нагрузки в нормальном максимальном режиме для случаев, когда отклонение напряжения превышает допустимое для послеаварийного режима средствами регулирования напряжения: изменением коэффициента трансформации трансформаторов и установкой БСК в узлах схемы. После регулирования режима посмотреть потери мощности в полученном режиме.

Лабораторная работа 4
Определение устойчивости режимов работы
электроэнергетических систем

Цель работы – определение устойчивости режимов работы спроектированной электроэнергетической системы.

Порядок выполнения работы

1. Открыть режим и графику системы, полученные в Лабораторной работе 1. Добавить в узел 9 эквивалентный генератор, с параметрами генераторов Ст и количества генераторов ($n-1$). Выполнить расчет установившегося режима.

2. Задать траекторию утяжеления в нормальном режиме работы до нарушения статической устойчивости. По полученным данным определить коэффициент статической устойчивости и сравнить его с нормативным значением.

3. Выполнить расчет наиболее тяжелого послеаварийного режима (в соответствии с данными Лабораторной работы 3).

4. Провести утяжеление послеаварийного режима. Рассчитать коэффициент устойчивости и сравнить его с нормативным значением.

5. Построить области устойчивой по активной мощности работы системы

6. Определить опасное сечение по углам расхождения векторов напряжения в начале и в конце линии. Определить значений коэффициентов запаса по мощности и допустимых потоков активной мощности по линиям электропередачи в опасном сечении по формуле (4.1)

$$K_p = (P_{пр} - P_0) / P_0 * 100 \% \quad (4.1)$$

где P_0 – мощность передаваемая в исходном режиме, $P_{пр}$ – предельно передаваемая мощность (предыдущий режим, перед режимом нарушения статической устойчивости).

Сравнить полученные значения с нормированными коэффициентами (20 % для нормального режима и 8 % для послеаварийного)

Краткие теоретические сведения

Утяжеление электроэнергетического режима представляет собой приращение мощности электростанций и нагрузок в различных частях системы [6]. Нарушение статической устойчивости режима ЭЭС может произойти в случае недопустимого напряжения в одном узле схемы или недопустимого перетока по одной из линий схемы. Для расчета значений напряжений в узлах схемы необходима информация об устройствах автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности (РПН трансформаторов, системах АРВ генераторов, устройствах компенсации реактивной мощности и т.д.). Поэтому в лабораторной работе предусмотрено определение статической устойчивости по критерию недопустимого перетока мощности через сечение (набор линий, без которых сеть разделяется на два несвязных района)[7]. Для расчета принимается сечение на котором при нарушении статической устойчивой будет располагаться ЭЦК (электрический центр качаний). Сечение данной линии (группы линий) называется опасным (ОС). Опасное сечение определяется величиной максимального разворота углов между узлом начала линии и узлом конца[8].

Опасное сечение — сечение, на ветвях которого будут находиться ЭЦК при возникшем в текущей схеме АР (асинхронного режима) вследствие нарушения устойчивости электроэнергетического режима.

В первую очередь рассчитывается исходная схема нормального установившегося режима. Для исходной схемы по различным траекториям утяжеления определяются опасные сечения. Поиск опасных сечений должен производиться путем утяжеления режима в соответствии с выбранными траекториями утяжеления электроэнергетического режима[9].

Траектория утяжеления задается в виде вектора изменений параметров электрического режима на каждом шаге утяжеления, которые приводят к изменению перетока активной мощности в рассматриваемом сечении.

При утяжелении режима производится расчет серии установившихся режимов при изменении параметров в соответствии с заданной траекторией утяжеления. Критерием нахождения предельного режима является сходимость расчета режима. Дополнительным критерием нахождения предельного режима может служить достижение экстремума (максимума или минимума) по отмеченным контролируемым величинам (мощности по сечениям, потерям, напряжениями и т.д.). Утяжеление выполняется для определения предельных перетоков мощности по сечениям (наборам линий, без которых сеть разделяется на два несвязных района)[10].

Процедура утяжеления заключается в следующем:

- задается множество узлов, в которых будет осуществляться изменение параметров режима (изменение нагрузки, генерации, модуля напряжения для регулируемых узлов, угла напряжения для балансирующих узлов), со значениями их приращений. Это множество называется траекторией утяжеления;

- проводится серия расчетов режимов при последовательном изменении утяжеляемых параметров на заданную величину;

- при аварийном окончании одного из расчетов осуществляется возврат к последнему из сбалансированных режимов, и следующее приращение выполняется на величину в два раза меньшую предыдущей (деление шага пополам);

- последняя процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут предельный режим с заданной точностью.

Задание траектории утяжеления

Необходимые для расчета области (таблицы) программного комплекса представлены на рис. 4.1.

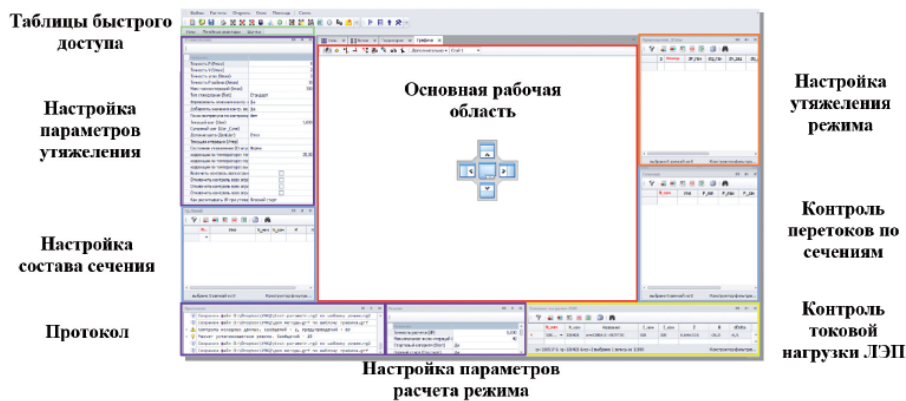


Рис. 4.1. Пример организации рабочей области

В ходе расчета предельных по статической апериодической устойчивости электроэнергетических режимов потокораспределения электрической сети потребуются контроль следующих величин:

- токовых нагрузок линий электропередачи;
- уровней напряжения в электрической сети;
- перетоков активной мощности в сечениях.

Помимо контроля технологических параметров электрической сети может понадобиться информация о ходе итерационного процесса расчета электроэнергетического режима, шагах и результате утяжеления. Для этого необходимо открыть все таблицы (рис. 4.1), а затем, удерживая левой кнопкой мыши название таблицы, осуществить ее закрепление в необходимой области рабочего пространства.

На рис. 4.2 приведена последовательность действий для сохранения настроенной рабочей области с целью ее дальнейшего использования при последующих запусках программы.

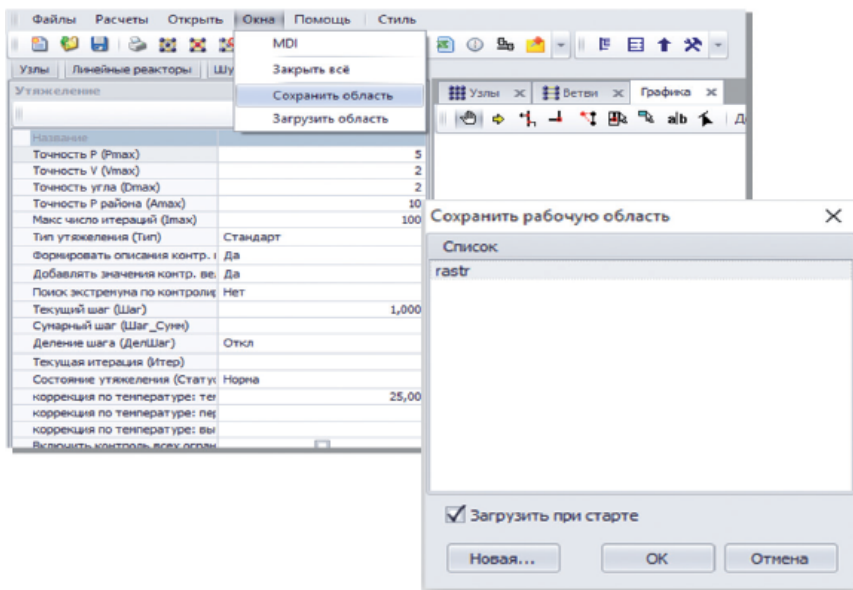


Рис. 4.2. Сохранение рабочей области в ПК *RastrWin*

Утяжеление электроэнергетического режима представляет собой приращение мощности электростанций и нагрузок в различных частях энергосистемы. В ПК *RastrWin3* существуют два разных хода утяжеления:

1) автоматическое — последовательное выполнение приращений электрических параметров расчетной модели и расчет электроэнергетического режима в соответствии с заданной траекторией утяжеления (рис. 4.3). Итогом автоматического утяжеления является предельный по статической апериодической устойчивости электроэнергетический режим.



Рис. 4.3. Задание автоматического утяжеления

2) ручное ($F7$) — выполнение заданного шага ($-\infty < \text{ШАГ} < +\infty$) приращения электрических параметров расчетной модели и расчет электроэнергетического режима в соответствии с заданной траекторией утяжеления (рис. 4.4). Итогом ручного утяжеления является утяжеленный электроэнергетический режим.

Помимо различных видов хода утяжеления существуют два разных способа задания траектории утяжеления: «Приращения_Узлы» и «Приращения_Районы» (рис. 4.5). При использовании таблицы «Приращения_Узлы» задаются параметры приращений генерации/нагрузки для конкретного узла, в ином случае задаются параметры приращений генерации/нагрузки для района — группе узлов расчетной модели.

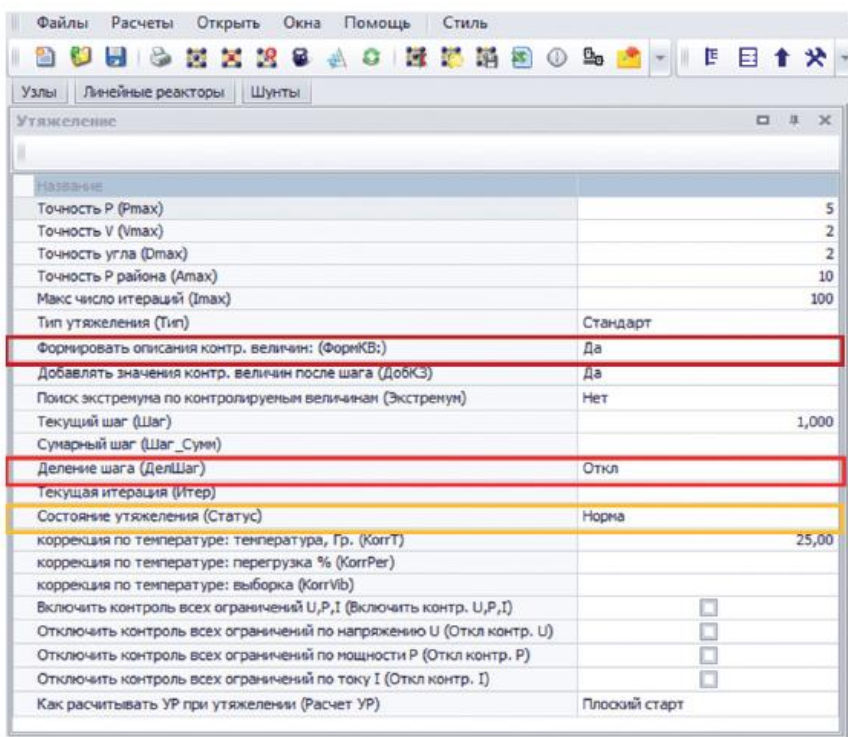


Рис. 4.4. Ручное утяжеление электроэнергетического режима

Для расчета предельных по статической аperiodической устойчивости электроэнергетических режимов достаточно применения автоматического хода утяжеления, при этом данный способ является недостаточным при определении всей области допустимых режимов работы энергосистемы. Применение ручного способа утяжеления позволяет осуществлять точный контроль допустимых токовых нагрузок ЛЭП, уровней напряжения в электрической сети.

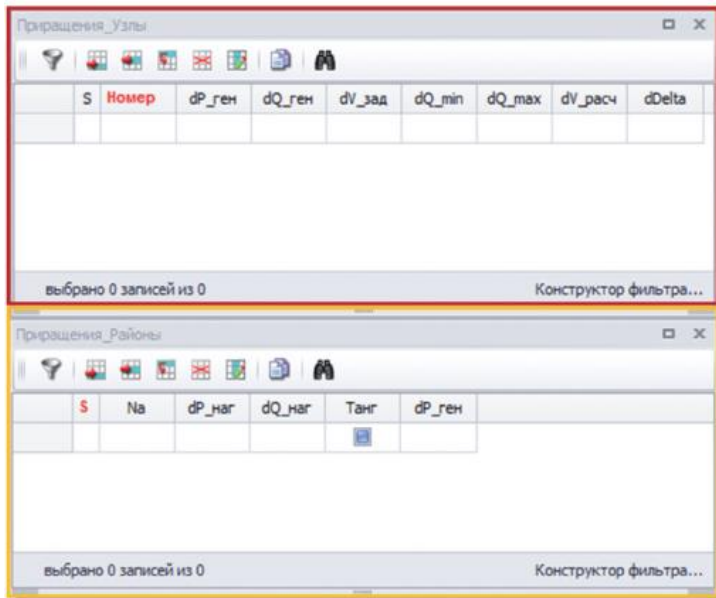


Рис. 4.6. Утяжеление электроэнергетического режима

Для визуального контроля необходимых для определения области допустимых режимов работы энергосистемы электрических параметров существует градиентная подсветка элементов схемы (рис. 4.7).

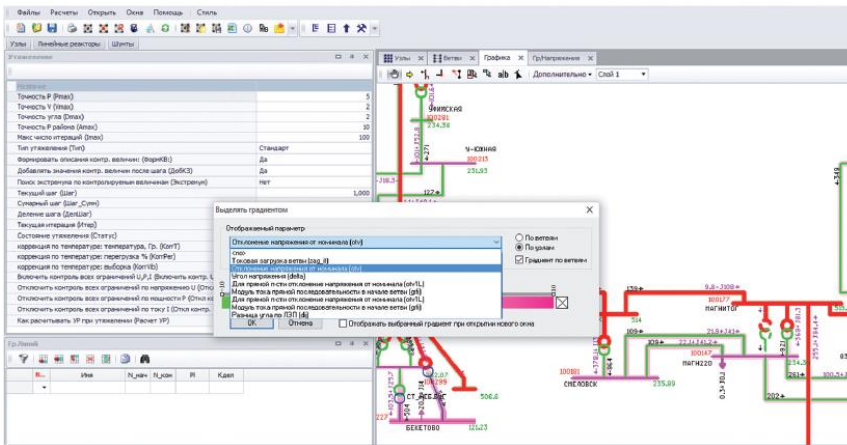


Рис. 4.7. Настройки градиентной подсветки элементов схемы

Одним из основных инструментов анализа статической аperiodической устойчивости энергосистемы является анализ перетоков мощности по линиям электропередачи в сечениях энергосистем. Существует несколько способов задания сечений в ПК *RastrWin3* (рис. 4.8):

- ввод через табличный интерфейс (требуется ввод номера сечения, номеров начала/конца ЛЭП, входящих в сечение);
- ввод с графики (требуется ввод номера сечения).

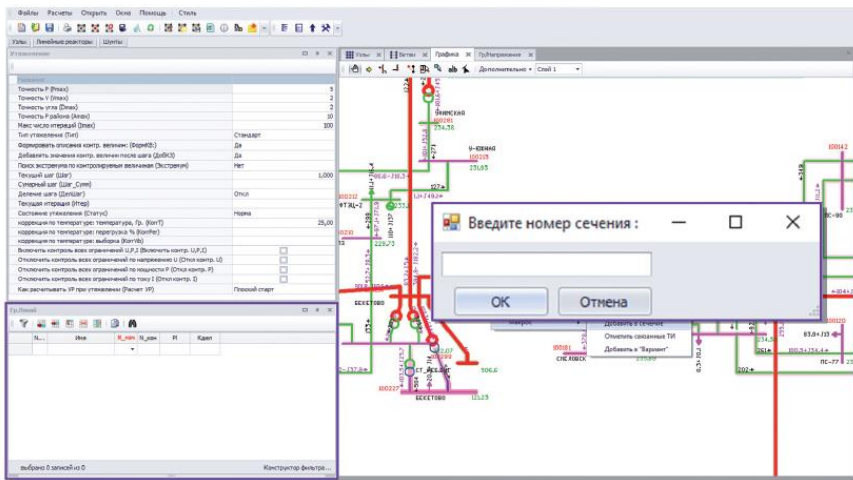


Рис 4.8. Способы задания сечений

Поиск ОС должен производиться путем утяжеления режима в соответствии с выбранными траекториями утяжеления, представляющими собой приращения мощности электростанций и нагрузок в различных частях энергосистемы.

Траектории утяжеления должны быть выбраны таким образом, чтобы *создать направленное увеличение перетоков активной мощности* в исследуемой части электрической сети в соответствии со следующим основным принципом: чем дальше станция от исследуемой части сети, тем раньше данная станция привлекается к утяжелению режима.

Для визуального анализа, полученного ОС, можно настроить градиентную подсветку ветвей по параметру « $dDelta(dij)$ » (разности углов по концам ветви) (рис. 4.9) или воспользоваться встроенной функцией «Анализ утяжеления», которая автоматически формирует ОС в таблице «Гр.Линий».

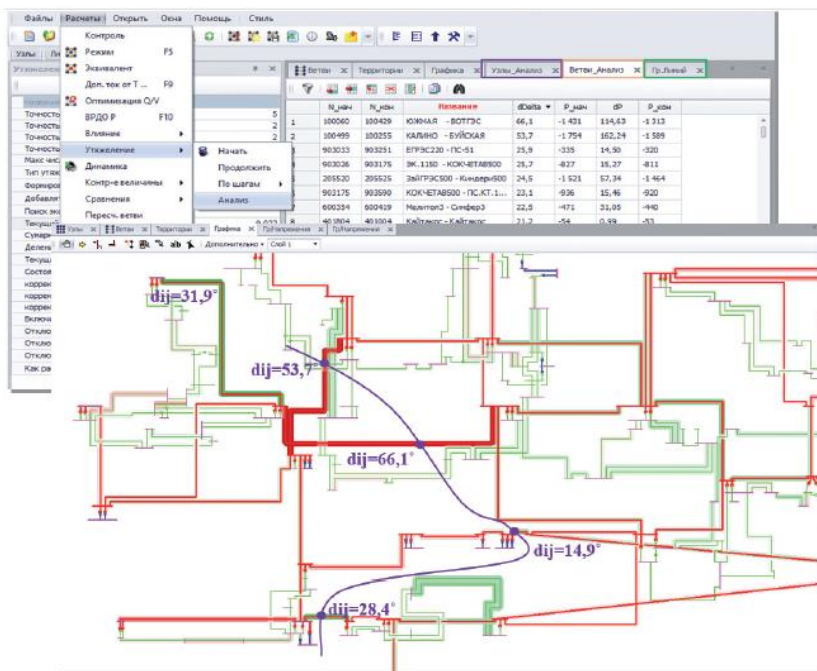


Рис. 4.9. Просмотр результатов утяжеления

После определения направления утяжеления траекторию, возможно, потребуется корректировать для получения максимальной величины предельного по статической апериодической устойчивости перетока активной мощности в ОС.

Пример выполнения утяжеления режима работы ЭЭС

На первом этапе утяжеление производится посредством увеличения генерации эквивалентного генератора узла 7. Для этого необходимо перейти во вкладку **“Траектория – Приращения_Узлы”** и задать для узла 7 шаг утяжеления 10 МВт (Рис. 4.10). Для генерирующего узла 9 задать активную мощность $P_T = 0$ МВт.

	S	Тип	Номер	dP_наг	dQ_наг	Tg	dP_ген
1		Обычный	30			<input type="checkbox"/>	10
						<input checked="" type="checkbox"/>	

Рис. 4.10. Задание узлов для утяжеления режима

Задание контролируемых параметров утяжеления

Контролируемым параметром утяжеления для каждого этапа является мощность эквивалентного генератора **утяжеляемого узла**. Например, для первого этапа утяжеления контролируемым параметром является P_г_7.

Перед заданием контролируемых параметров необходимо перейти во вкладку “**Расчеты – Параметры – Утяжеление**” и произвести следующие настройки утяжеления:

Название	Значение
Точность P (Pmax)	5
Точность V (Vmax)	2
Точность угла (Qmax)	2
Точность P района (Pmax)	10
Макс число итераций (Imax)	100
Тип утяжеления (Тип)	Стандарт
Формировать описания контр. величин: (ФормКВ:)	Нет
Добавлять значения контр. величин после шага (ДобКВ)	Да
Поиск экстремума по контролируемым величинам (Экстремум)	Нет
Текущий шаг (Шаг)	1,000
Суммарный шаг (Шаг_Сумм)	
Деление шага (ДелШаг)	Откл
Текущая итерация (Итер)	
Состояние утяжеления (Статус)	Норма
коррекция по температуре: температура, Гр. (КогТ)	25,00
коррекция по температуре: перегрузка % (КогPer)	
коррекция по температуре: выборка (КогVb)	
Включить контроль всех ограничений U,P,I (Включить контр. U,P,I)	<input type="checkbox"/>
Отключить контроль всех ограничений по напряжению U (Откл контр. U)	<input type="checkbox"/>
Отключить контроль всех ограничений по мощности P (Откл контр. P)	<input type="checkbox"/>
Отключить контроль всех ограничений по току I (Откл контр. I)	<input type="checkbox"/>
Как рассчитывать UP при утяжелении (Расчет UP)	Плоский старт

Рисунок 4.11. Настройка контролируемых параметров утяжеления

Далее необходимо задать контролируемые параметры утяжеления. Для этого необходимо перейти во вкладку “Узлы”, навести курсор на ячейку P_г узла 7, нажать правую клавишу мыши и выбрать “Добавить в KB” (Рис 4.12).

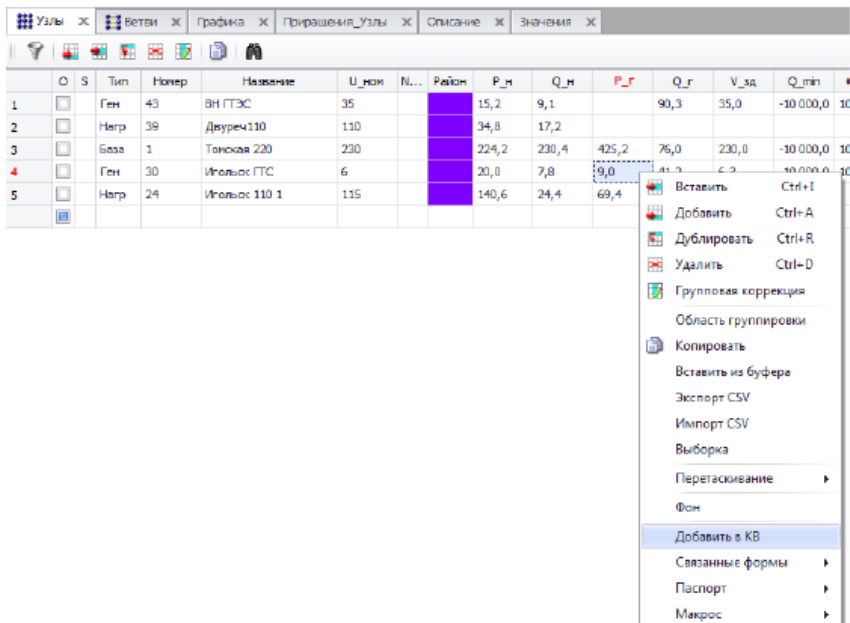


Рис. 4.12. Добавление контролируемого параметра в таблицу контролируемых величин

Далее необходимо открыть вкладку “Контролируемые величины - Описание”. В ней появится добавленный контролируемый параметр (Рис 4.13)

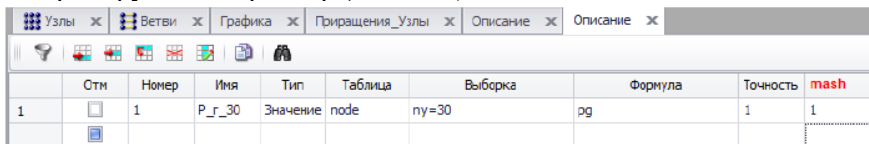


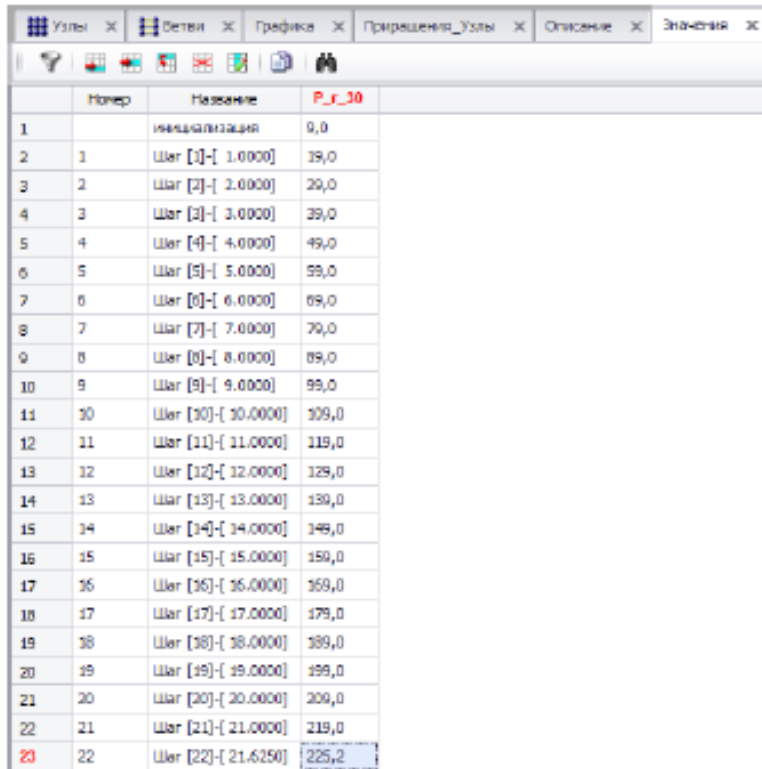
Рис. 4-13. Появление контролируемого параметра во вкладке «Описание»

После этого необходимо отметить эту контролируемую величину (поставить галочку в столбце “Отм”) и нажать клавишу

F8. Появится вкладка “Значения”, в которую добавится отмеченный контролируемый параметр.

Запись результатов утяжеления

После подготовки всех исходных данных значком «Утяжеление» производится утяжеление режима. Вновь откроется вкладка “Значения”, в которой отобразятся значения контролируемой величины в соответствии с шагом утяжеления (Рисунок 4.14).



Номер	Название	P_r_30
1	инициализация	0,0
2	Шаг [1]-[1.0000]	19,0
3	Шаг [2]-[2.0000]	29,0
4	Шаг [3]-[3.0000]	39,0
5	Шаг [4]-[4.0000]	49,0
6	Шаг [5]-[5.0000]	59,0
7	Шаг [6]-[6.0000]	69,0
8	Шаг [7]-[7.0000]	79,0
9	Шаг [8]-[8.0000]	89,0
10	Шаг [9]-[9.0000]	99,0
11	Шаг [10]-[10.0000]	109,0
12	Шаг [11]-[11.0000]	119,0
13	Шаг [12]-[12.0000]	129,0
14	Шаг [13]-[13.0000]	139,0
15	Шаг [14]-[14.0000]	149,0
16	Шаг [15]-[15.0000]	159,0
17	Шаг [16]-[16.0000]	169,0
18	Шаг [17]-[17.0000]	179,0
19	Шаг [18]-[18.0000]	189,0
20	Шаг [19]-[19.0000]	199,0
21	Шаг [20]-[20.0000]	209,0
22	Шаг [21]-[21.0000]	219,0
23	Шаг [22]-[21.6250]	225,2

Рис. 4.15. Отображение утяжеления контролируемой величины

Среди представленных значений контролируемой величины значение представляет только последнее. Для данного первого этапа

утяжеления это значение $P_{г7}=225,2$ МВт. Его необходимо записать в таблицу результатов (табл. 4.1):

Утяжеление генератора в узле 7 необходимо производить для различных значений $P_{г9}$ (0, 50, 100, 150 и 200 МВт).

Для того, чтобы вновь инициализировать утяжеление необходимо в таблице “Узлы” зафиксировать мощность генератора 9 уже на уровень 50 МВт, а мощность утяжеляемого узла 7 вернуть на уровень режима до утяжеления (Рис 4.16).

№	О	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	В_ш	У	Delta	Рай...
1			Ген	43	ВН ГТЭС	35			15,2	9,1	50,0	104,9	35,0	-10 000,0	10 000,0	-17 191,8	35,00	11,11	
2			Нагр	39	Дружеч110	110			34,8	17,2						1 515,6	102,44	15,43	
3			База	1	Томская 220	230			224,2	230,4	0,1	3,8	230,0	-10 000,0	10 000,0	-4 738,1	230,00		
4			Ген	30	Игольск ГЭС	6			20,0	7,8	9,0	150,7	6,3	-10 000,0	10 000,0	296 81...	6,30	81,65	
5			Нагр	24	Игольск 110 1	115			140,6	24,4	69,4	-36,7				-9 124,8	97,55	23,10	

Рис. 4.16. Второй этап утяжеления

Далее необходимо снова произвести утяжеление и записать предельное значение $P_{г7}$ в таблицу.

Следующая серия расчетов повторят первую, с той лишь разницей, что утяжеление будет производиться в другую сторону, то есть во вкладке “Приращения _Узлы” для узла 7 необходимо задать шаг утяжеления уже -10 МВт.

Далее узлы 7 и 9 меняются местами. Мощность генерации узла 7 будет меняться от 0 до 200 МВт с шагом 50 МВт, а эквивалентный генератор узла 9 будет утяжеляться с шагом 10 МВт для каждого значения $P_{г9}$. При этом контролируемым параметром будет $P_{г7}$. Таблица результатов будет выглядеть следующим образом:

Результаты всех четырех серий расчетов записывается в табл. 4.1:

Таблица 4.1

Результаты утяжеления всех этапов

Серия расчетов 1		Серия расчетов 2	
$P_{г\ 9}$	$P_{г\ 7}$	$P_{г\ 9}$	$P_{г\ 7}$
0		0	
50		50	
100		100	
150		150	
200		200	
252		252	
$P_{г\ 9}$	$P_{г\ 7}$	$P_{г\ 9}$	$P_{г\ 7}$
	0		0
	50		50
	100		100
	150		150
	200		200
	252		252

Построение области допустимых режимов с учетом коэффициентов запаса по активной мощности

Строится область допустимых режимов по активной мощности. По оси абсцисс откладываются значения $P_{г\ 7}$, по оси ординат значения $P_{г\ 9}$ (Рис. 4.17).

Кривые, полученные на рисунке 4.17 являются **предельными** границами работы энергосистемы. На практике, **область допустимых режимов** рассчитывают с учетом коэффициентов запаса по активной мощности.

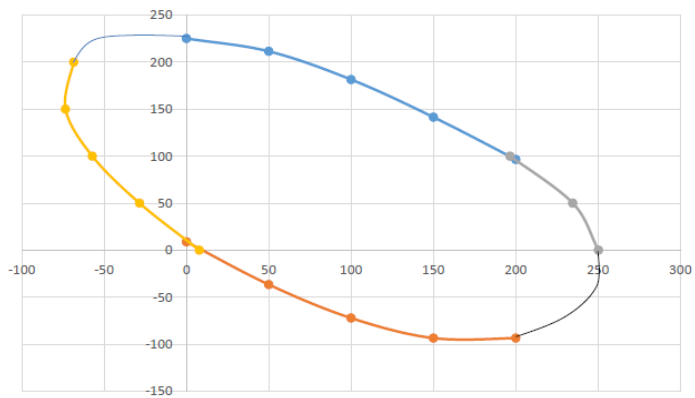


Рис. 4.17. Область допустимых режимов по активной мощности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *RastrWin3*. Помощь в ПК *RastrKZ*. Справочные материалы, Электронный ресурс: www.rastrwin.ru, 2014. 93 с.
2. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Госстандарт, 2007 г. 39 с.
3. СТО ДИВГ-058-2017. Расчет токов коротких замыканий и замыканий на землю в распределительных сетях. Стандарт организации СПб.: Изд-во ОАО НТЦ «Механотроника», 2017. 36 с.
4. Справочник по проектированию электрических сетей /С74 под ред. Д. Л. Файбисовича. –5-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2015. 376 с.
5. Расчеты допустимых перетоков мощности в энергосистемах :учебное пособие / С. А. Ерошенко, А. О. Егоров, В. О. Самойленко, А. И. Хальясмаа. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та,2017. 86с.
6. *Жданов П.С.* Вопросы устойчивости электрических систем/Под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. 456 с.
7. Правила устройства электроустановок: 7-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2004. 570 с.
8. *Калентионок Е.В.* Исследование устойчивости электроэнергетических систем на ЭВМ: учебное пособие/ Е.В. Калентионок, Ю.Д. Филипчик. – Минск: БНТУ, 2011. 75 с.
9. СТО 59012820.29.240.007–2008. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем Электронный ресурс: www.so-ups.ru.
10. ГОСТ Р 58085 – 2018. Правила предотвращения развития и ликвидации нормального режима электрической части энергосистем. М.: Стандартиформ, 2018 г. 28 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	с. 4
1. <i>Лабораторная работа 1.</i> Расчет установившихся режимов электроэнергетических систем.....	4
2. <i>Лабораторная работа 2.</i> Расчет токов КЗ.....	21
3. <i>Лабораторная работа 3.</i> Расчет послеаварийных режимов и ненормальных режимов электроэнергетических систем.....	32
4. <i>Лабораторная работа 4.</i> Определение устойчивости режимов работы электроэнергетических систем.....	42
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	58

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры направления подготовки 13.04.02*

Составитель *Т.Е. Минакова, Шишкин С.И.*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *Минакова Т.Е.*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати

Формат 60×84/16

Санкт-Петербургский горный университет

РИЦ Санкт-Петербургского горного университета

Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-линия,2