

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

**О. М. Головач, Ю. Д. Головач**

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ  
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по дисциплине «Передача и распределение  
электрической энергии» для студентов  
специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2010

УДК 621.315(075.8)  
ББК 31.27я73  
Г61

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 30.03.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *Г. И. Селиверстов*

**Головач, О. М.**  
Г61      Компьютерные расчеты установившихся режимов электрических сетей : лаборатор. практикум по дисциплине «Передача и распределение электрической энергии» для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / О. М. Головач, Ю. Д. Головач. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 47 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Содержит лабораторные работы по дисциплине «Передача и распределение электрической энергии», выполнение которых предусматривается на ЭВМ с использованием одной из промышленных программ расчета установившихся режимов.

Для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение».

УДК 621.315(075.8)  
ББК 31.27я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2010

## ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Лабораторные работы по дисциплине «Передача и распределение электрической энергии» выполняются на персональных ЭВМ с использованием промышленных программных комплексов RASTR, MUSTANG или других программ расчета установившихся режимов.

Программные комплексы RASTR, MUSTANG предназначены для оперативного выполнения на ПЭВМ расчетов по моделированию установившихся режимов электрических сетей энергосистем. Современные версии комплексов функционируют в операционной системе Windows, имеют оконно-графический интерфейс. Предоставляют возможность проведения серии расчетов с возможностью отключения узлов и ветвей схемы, разбивкой сети на районы, утяжеления режима и др. Обеспечивают как табличное, так и графическое представление результатов расчета. Объем расчетной схемы не ограничивается. Программы реализуют в ходе расчета электрической сети решение системы нелинейных уравнений узловых напряжений современными математическими методами (метод Ньютона и др.).

Дополнительно в комплексе RASTR могут решаться задачи оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности. Комплекс MUSTANG кроме анализа установившихся режимов имеет назначение расчета электромеханических переходных процессов в энергосистемах и узлах нагрузки. Краткие инструкции по использованию программ приведены в Приложениях 1, 2.

Выполнение заданий по лабораторным работам, предлагаемых в настоящем практикуме, направлено на изучение методики компьютерного анализа режимов электрических сетей, освоение сервиса программных комплексов, получение практических навыков работы с ними и решения задач. С целью лучшего усвоения методологии расчетов режимов по ходу решения задач предполагается сравнение результатов расчета по компьютерным программам с расчетом по упрощенной методике («вручную»).

Перед началом работы следует получить у преподавателя вариант задания. Для заданной схемы составляется расчетная схема, на которой указываются номера узлов, нагрузки, напряжения в центрах питания. Далее определяются параметры схемы замещения - сопротивления и проводимости линейных и трансформаторных элементов схемы. Методические рекомендации по подготовке исходных данных к компьютерному расчету приведены в приложениях.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## Расчет и анализ установившихся режимов разомкнутой электрической сети одного номинального напряжения

### 1.1. Цель работы

Освоение методики расчета разомкнутых электрических сетей с использованием ЭВМ.

### 1.2. Краткие теоретические сведения

Расчеты установившихся режимов выполняют для того, чтобы оценить условия, в которых будут работать потребители и оборудование электрической сети.

В результате расчетов таких режимов находят потоки мощности на участках сети и напряжения в узловых точках. Кроме того, расчеты дают возможность предусмотреть меры для обеспечения требуемого качества электроэнергии и определить условия для оптимизации производства, передачи и распределения электроэнергии.

В расчетах режимов разомкнутых сетей напряжением 110-220 кВ наиболее часто встречается случай, когда известно напряжение источника питания и мощности узлов нагрузки. Расчет режимов вручную выполняется в два этапа.

На первом этапе принимают напряжения в узлах равными номинальному  $U_n$  и определяют потоки и потери мощности в линиях. При этом расчет последовательно ведется от последней линии до источника питания.

Для участка сети  $i-j$  это выглядит так:

$$\underline{S}_{ij}^H = \underline{S}_j \quad ; \quad \Delta \underline{S}_{ij} = \frac{(\underline{S}_{ij}^K)^2}{U_n^2} \quad ; \quad \underline{S}_{ij}^H = \underline{S}_{ij}^K + \Delta \underline{S}_{ij} \quad . \quad (1.1)$$

На втором этапе осуществляется расчет напряжений в узлах сети. Он начинается с наиболее близкого к источнику питания узла и ведется по падению напряжения. При оценке составляющих падения напряжения в линиях в их формулы подставляют мощности и напряжение в начале линий. Для участка сети  $i-j$  выражения  $\underline{U}_j$  и модуля  $U_j$  имеют вид:

$$\underline{U}_j = U_i - \frac{P_{ij}^H \cdot R_{ij} + Q_{ij}^H \cdot X_{ij}}{U_i} + j \frac{P_{ij}^H \cdot X_{ij} - Q_{ij}^H \cdot R_{ij}}{U_i};$$

$$U_j = \sqrt{\left( U_i - \frac{P_{ij}^H \cdot R_{ij} + Q_{ij}^H \cdot X_{ij}}{U_i} \right)^2 + \left( \frac{P_{ij}^H \cdot X_{ij} - Q_{ij}^H \cdot R_{ij}}{U_i} \right)^2}. \quad (1.2)$$

Методика и примеры расчетов режимов разомкнутых сетей напряжением 110-220 кВ приведены в [2] и [3].

### 1.3. Порядок выполнения работы

Изучить теоретическую часть работы.

Получить у преподавателя вариант задания.

Составить схему замещения сети и рассчитать ее параметры (сопротивления, проводимости, зарядные мощности). Нанести результаты расчетов на схему.

Определить расчетные нагрузки, начертить расчетную схему и нанести на нее нагрузки.

Рассчитать вручную потокораспределение в сети, потери мощности и падение напряжений, модули напряжений в узлах, в том числе на шинах вторичного напряжения ПС. Результаты расчетов представить в виде схемы с нанесенными на нее потоками мощности в начале и в конце каждого участка и напряжениями во всех узлах.

Изучить инструкцию к программе.

Загрузить на выполнение программу расчета установившегося режима. Создать расчетную модель сети (занести исходные данные о параметрах схемы замещения и нагрузках).

Выполнить на ЭВМ расчет режима сети. Результаты расчетов (значения потоков мощностей по участкам и напряжений в узлах сети) нанести на схему.

Сравнить результаты расчетов, выполненных на ЭВМ и вручную. Сделать выводы о допустимости исследуемых режимов.

Определить значения потерь активной и реактивной мощностей и зарядной мощности в процентах от соответствующей суммарной нагрузки сети.

Выполнить на ЭВМ расчет режима наименьших нагрузок, снизив активные и реактивные нагрузки в узлах на 50 %. Результаты расчетов нанести на схему.

Восстановить и сохранить исходный режим для последующей работы.

### 1.4. Варианты задания

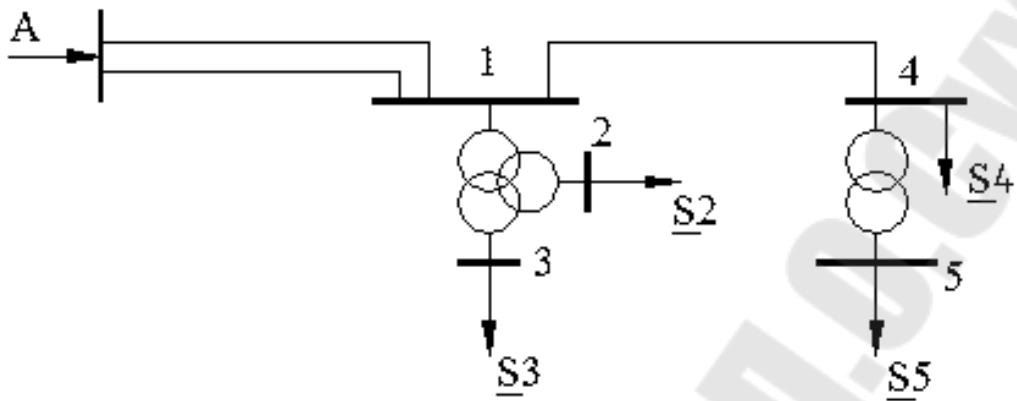


Рис. 1.1

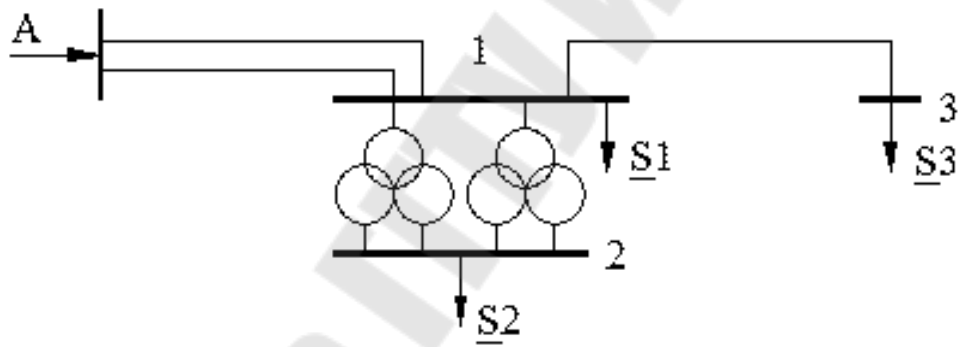


Рис. 1.2

Таблица 1.1

## Исходная информация о параметрах схемы и режима (к рис. 1.1)

Вариант задания	Марка провода Длина линии, км		Тип и мощность трансформаторов		Нагрузки в узлах, МВА				Напряжение $U_A$ , кВ
	A-1	1-4	в узле 1	в узле 4	$\underline{S}_2$	$\underline{S}_3$	$\underline{S}_4$	$\underline{S}_5$	
1	$\frac{AC-185/29}{40}$	$\frac{AC-185/29}{25}$	ТДТН-40000 115/38,5/11	ТДН-16000 115/11	$20 + j10$	$15 + j7$	$19 + j5$	$12 + j6$	119
2	$\frac{AC-240/32}{42}$	$\frac{AC-185/29}{20}$	ТДТН-63000 115/38,5/11	ТДН-10000 115/11	$30 + j15$	$27 + j14$	$26 + j10$	$7 + j3$	120
3	$\frac{AC-120/19}{28}$	$\frac{AC-120/19}{18}$	ТДТН-16000 115/38,5/11	ТМН-6300 115/10,5	$9 + j4$	$5 + j2$	$15 + j6$	$4 + j1$	121
4	$\frac{AC-185/29}{35}$	$\frac{AC-185/29}{22}$	ТДТН-25000 115/38,5/11	ТДН-16000 115/11	$16 + j8$	$8 + j4$	$18 + j9$	$10 + j7$	118
5	$\frac{AC-150/24}{24}$	$\frac{AC-185/29}{19}$	ТДТН-16000 115/38,5/11	ТМН-6300 115/11	$10 + j5$	$3 + j1,2$	$32 + j16$	$4 + j2$	117,9
6	$\frac{AC-185/29}{40}$	$\frac{AC-185/29}{24}$	ТДТН-16000 115/38,5/11	ТДН-16000 115/11	$10 + j5$	$4 + j12$	$22 + j10$	$13 + j4$	120
7	$\frac{AC-240/32}{28}$	$\frac{AC-120/19}{17}$	ТДТН-80000 115/38,5/11	ТДН-10000 115/11	$37 + j12$	$35 + j10$	-	$8 + j4$	119,8
8	$\frac{AC-185/29}{30}$	$\frac{AC-150/24}{15}$	ТДТН-40000 115/38,5/11	ТМН-6300 115/11	$25 + j12$	$10 + j4$	$27 + j14$	$3,8 + j1,7$	118,5
9	$\frac{AC-240/32}{50}$	$\frac{AC-150/24}{30}$	ТДТН-80000 115/38,5/11	ТМН-2500 115/11	$40 + j28$	$26 + j12$	$27 + j8$	$1,8 + j0,9$	118,9
10	$\frac{AC-240/32}{43}$	$\frac{AC-150/24}{17}$	ТДТН-63000 115/38,5/11	ТРДН-25000 115/10,5	$38 + j17$	$25 + j14$	$10 + j5$	$20 + j10$	119,2

Таблица 1.2

## Исходная информация о параметрах схемы и режима (к рис. 1.2)

Вариант задания	Марка провода Длина линии, км		Тип и мощность трансформаторов в узле 1	Нагрузки в узлах, МВА			Напряжение $U_A$ , кВ
	A-1	1-3		$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}_3$	
1	$\frac{AC-240/32}{68}$	$\frac{AC-240/32}{45}$	ТРДН-40000/115/10,5/10,5	$44 + j12$	$52 + j20$	$90 + j35$	236
2	$\frac{AC-300/39}{70}$	$\frac{AC-240/32}{40}$	ТРДЦН-80000/115/10,5/10,5	-	$100 + j50$	$80 + j30$	237,9
3	$\frac{AC-300/39}{56}$	$\frac{AC-240/32}{35}$	ТРДЦН -63000/115/10,5/10,5	$35 + j17$	$79 + j27$	$84 + j40$	239
4	$\frac{AC-240/32}{50}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	ТРДЦН -40000/115/10,5/10,5	$40 + j20$	$50 + j25$	$82 + j35$	237
5	$\frac{AC-240/32}{80}$	$\frac{AC-240/32}{38}$	ТРДН -40000/115/10,5/10,5	$80 + j30$	$48 + j29$	$60 + j28$	235,8
6	$\frac{AC-300/39}{70}$	$\frac{AC-240/32}{40}$	ТРДН -40000/115/10,5/10,5	$77 + j40$	$53 + j17$	$91 + j14$	238
7	$\frac{AC-300/39}{90}$	$\frac{AC-240/32}{50}$	ТРДЦН-63000/115/10,5/10,5	$40 + j20$	$72 + j35$	$85 + j28$	238,5
8	$\frac{AC-240/32}{72}$	$\frac{AC-240/32}{28}$	ТРДЦН-63000/115/10,5/10,5	-	$76 + j30$	$79 + j36$	239,7
9	$\frac{AC-300/39}{60}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	ТРДЦН -80000/115/10,5/10,5	-	$95 + j47$	$82 + j45$	236,8
10	$\frac{AC-300/39}{85}$	$\frac{AC-240/32}{45}$	ТРДН -40000/115/10,5/10,5	$90 + j40$	$49 + j22$	$75 + j25$	238



## 1.5. Содержание отчета

1. Цель работы;
2. Исходная схема сети, схема замещения;
3. Расчет режима сети вручную;
4. Расчетная схема с результатами расчетов режима на ЭВМ;
5. Анализ результатов расчетов и выводы по работе.

## 1.6. Контрольные вопросы

Каковы задачи электрического расчета электрической сети?

При каких исходных условиях и как производят расчет режима линии электропередачи в два этапа?

Как определить продольную и поперечную составляющие падения напряжения?

Какая схема замещения трансформаторов напряжением 110, 220 кВ используется при расчете режимов сети?

Как осуществить приведение нагрузок к стороне высшего напряжения трансформаторов?

Какова последовательность расчета режима разомкнутой сети при задании напряжения в ее конечном узле?

Каким образом учитываются поперечные ветви при расчете режима разомкнутой сети?

Начертить векторную диаграмму линии, если известны напряжение и мощность в начале ЛЭП, пояснить ее составляющее.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Расчет и анализ установившегося режима замкнутой электрической сети одного номинального напряжения

#### 2.1. Цель работы

Изучение методики расчета замкнутых электрических сетей с использованием ЭВМ.

#### 2.2. Краткие теоретические сведения

Аналогично расчету разомкнутых сетей напряжением 110-220 кВ расчет режимов замкнутых сетей можно разбить на три стадии. Первые две стадии, когда определяются параметры схемы замещения и находятся расчетные нагрузки, полностью совпадают с расчетом разомкнутых сетей. На третьей стадии ведется расчет режима сети в несколько этапов.

На первом этапе находится распределение мощностей без учета потерь мощности. Здесь вначале рассчитываются мощности на головных участках:

$$\underline{S}_A = \frac{\sum S_{pi} \cdot \underline{Z}_{iB}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}; \quad \underline{S}_B = \frac{\sum S_{pi} \cdot \underline{Z}_{iA}^*}{\underline{Z}_{AB}^*}, \quad (2.1)$$

где А и В – два источника питания.

Затем на основании первого закона Кирхгофа находят мощности на остальных участках. Итогом этого этапа расчета является определение точки потокораздела.

В точке потокораздела схему условно разрезают, получая две разомкнутые схемы. В расчете режимов этих двух разомкнутых сетей состоит второй этап расчета. Расчет этих схем ведем независимо друг от друга в соответствии с алгоритмом расчета разомкнутой сети методом «в два этапа».

Методика и примеры расчета режимов замкнутых сетей напряжением 110-220 кВ приведены в [2] и [3].

#### 2.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы;
2. Получить у преподавателя вариант задания;
3. Составить схему замещения сети и рассчитать ее параметры (сопротивления, проводимости, зарядные мощности и т. д.);

4. Определить расчетные нагрузки, начертить расчетную схему и нанести на нее нагрузки;
5. Выполнить вручную расчет потоков мощности, потерь мощности и падений напряжения, модули напряжений в узлах, в том числе на шинах вторичного напряжения подстанции. Результаты расчетов представить в виде схемы с нанесенными на нее потоками мощности в начале и в конце каждого участка и напряжениями во всех узлах;
6. Изучить инструкцию к программе;
7. Загрузить на выполнение программу расчета установившегося режима. Создать расчетную модель сети (занести исходные данные о параметрах схемы замещения и нагрузках);
8. Выполнить на ЭВМ расчет режима сети. Результаты расчетов (значения потоков мощностей по участкам и напряжений в узлах сети) нанести на схему;
9. Сравнить результаты расчетов, выполненных на ЭВМ и вручную;
10. Выполнить на ЭВМ расчеты режима, снизив  $U_A$  а) на 10%, б) на 20%. Сделать вывод о влиянии напряжения балансирующего узла на режим электрической сети;
11. Восстановить исходный режим по напряжению  $U_A$ . Выполнить расчеты утяжеленных режимов, увеличив нагрузки в узлах по сравнению с заданными в таблице: а) на 30%, б) на 60%. Сравнить результаты расчета с полученными ранее и сделать вывод;
12. Восстановить и сохранить исходный режим нагрузок для последующей работы.

## 2.4. Варианты задания

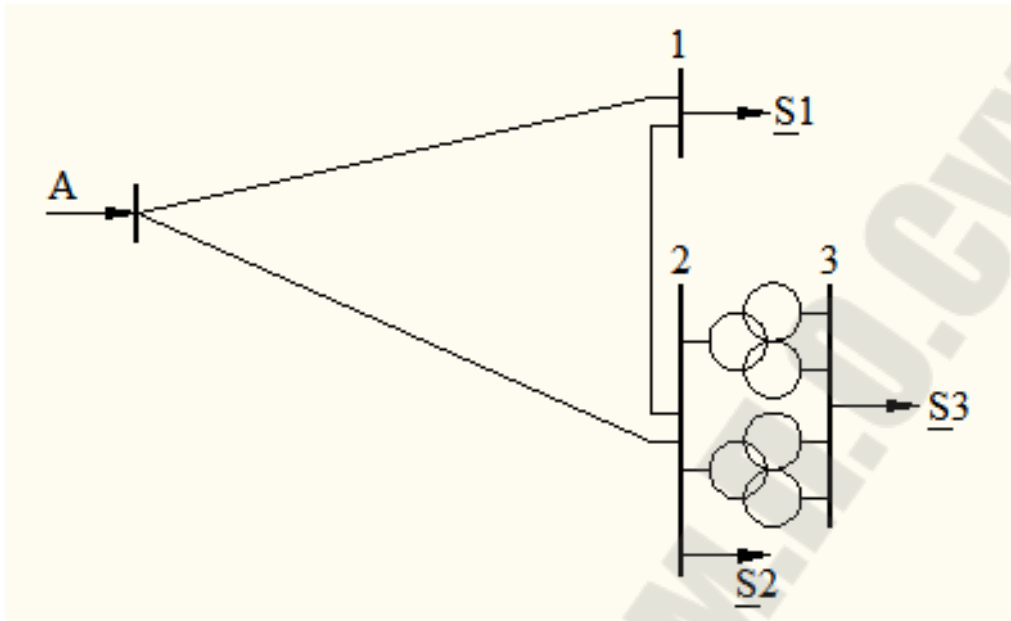


Рис. 2.1

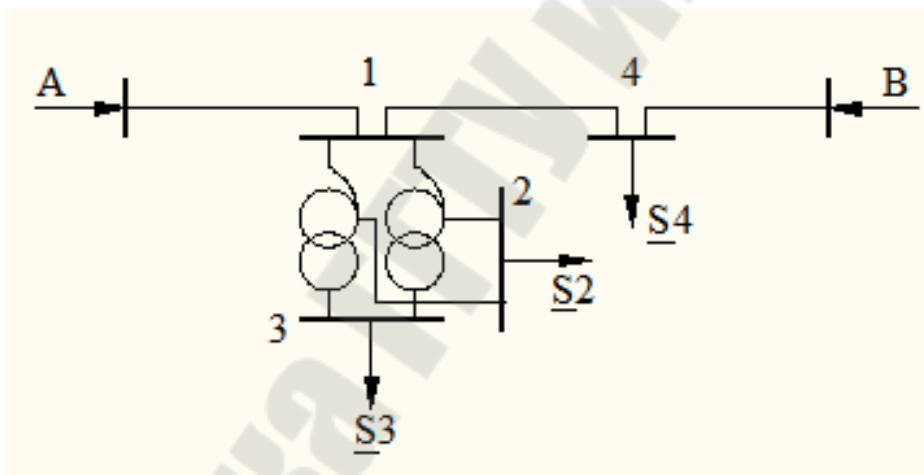


Рис. 2.2

Таблица 2.1

## Исходная информация о параметрах схемы и режима (к рис. 2.1)

Вариант задания	Марка провода Длина линии, км			Тип и мощность трансформаторов в узле 2	Нагрузки в узлах, МВ·А			Напряжение $U_A$ , кВ
	A-1	1-2	A-2		1	2	3	
1	$\frac{AC-185/29}{28}$	$\frac{AC-185/29}{15}$	$\frac{AC-185/29}{32}$	ТРДН-40000/115/10,5/10,5	$35 + j18$	$10 + j5$	$30 + j10$	120
2	$\frac{AC-240/32}{40}$	$\frac{AC-185/29}{20}$	$\frac{AC-240/32}{50}$	ТРДЦН-40000/115/10,5/10,5	$40 + j20$	-	$50 + j25$	119
3	$\frac{AC-185/29}{27}$	$\frac{AC-120/19}{16}$	$\frac{AC-185/29}{32}$	ТРДН-25000/115/10,5/10,5	$32 + j14$	$14 + j7$	$29 + j15$	118
4	$\frac{AC-240/32}{35}$	$\frac{AC-240/32}{24}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	ТРДН-40000/115/10,5/10,5	$47 + j15$	-	$52 + j28$	121
5	$\frac{AC-300/39}{82}$	$\frac{AC-240/32}{43}$	$\frac{AC-300/39}{90}$	ТРДЦН-63000/230/11/11	$112 + j40$	$18 + j9$	$80 + j30$	238
6	$\frac{AC-240/32}{42}$	$\frac{AC-240/32}{25}$	$\frac{AC-240/32}{58}$	ТРДН-40000/230/11/11	$90 + j40$	$40 + j20$	$50 + j25$	240
7	$\frac{AC-300/39}{65}$	$\frac{AC-300/39}{38}$	$\frac{AC-300/39}{52}$	ТРДЦН-63000/230/11/11	$100 + j50$	$29 + j12$	$82 + j20$	241
8	$\frac{AC-300/39}{60}$	$\frac{AC-240/32}{35}$	$\frac{AC-300/39}{75}$	ТРДЦН-63000/230/11/11	$97 + j32$	$38 + j19$	$75 + j24$	239
9	$\frac{AC-240/32}{56}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	$\frac{AC-240/32}{60}$	ТРДН-40000/230/11/11	$84 + j27$	$30 + j15$	$48 + j20$	237
10	$\frac{AC-300/39}{80}$	$\frac{AC-240/32}{40}$	$\frac{AC-400/51}{70}$	ТРДН-40000/230/11/11	$98 + j48$	$60 + j24$	$53 + j18$	242

Таблица 2.2

## Исходная информация о параметрах схемы и режима (к рис. 2.2)

Вариант задания	Марка провода Длина линии, км			Тип и мощность трансформаторов в узле 2	Нагрузки в узлах, МВ·А			Напряжение $U_A$ , кВ
	А-1	1-2	В-2		2	3	4	
1	$\frac{AC-240/32}{50}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	$\frac{AC-240/32}{60}$	АТДЦТН-63000/230/121/11	$50 + j20$	$25 + j12$	$90 + j45$	239
2	$\frac{AC-300/39}{40}$	$\frac{AC-300/39}{20}$	$\frac{AC-300/39}{55}$	АТДЦТН-125000/230/121/11	$84 + j30$	$40 + j22$	$98 + j30$	240
3	$\frac{AC-300/39}{77}$	$\frac{AC-240/32}{35}$	$\frac{AC-300/39}{62}$	АТДЦТН-125000/230/121/11	$70 + j35$	$35 + j18$	$80 + j42$	238
4	$\frac{AC-240/32}{58}$	$\frac{AC-240/32}{20}$	$\frac{AC-240/32}{47}$	АТДЦТН-63000/230/121/11	$57 + j24$	$20 + j10$	$79 + j34$	237
5	$\frac{AC-400/51}{90}$	$\frac{AC-240/32}{40}$	$\frac{AC-400/51}{80}$	АТДЦТН-200000/230/121/11	$140 + j50$	$60 + j30$	$100 + j50$	241
6	$\frac{AC-240/32}{65}$	$\frac{AC-240/32}{30}$	$\frac{AC-240/32}{70}$	АТДЦТН-63000/230/121/11	$60 + j30$	$15 + j8$	$85 + j38$	237,5
7	$\frac{AC-240/32}{50}$	$\frac{AC-240/32}{12}$	$\frac{AC-240/32}{25}$	ТДТН-40000/230/38,5/11	$30 + j14$	$21 + j7$	$58 + j17$	238,2
8	$\frac{AC-240/32}{40}$	$\frac{AC-240/32}{14}$	$\frac{AC-240/32}{42}$	ТДТН-25000/230/38,5/11	$18 + j7$	$12 + j5$	$42 + j21$	232
9	$\frac{AC-185/29}{30}$	$\frac{AC-95/16}{19}$	$\frac{AC-185/29}{26}$	ТДТН-40000/115/38,5/11	$26 + j14$	$20 + j10$	$30 + j15$	118
10	$\frac{AC-185/29}{35}$	$\frac{AC-70/11}{15}$	$\frac{AC-185/29}{28}$	ТДТН-25000/115/38,5/11	$20 + j10$	$10 + j5$	$35 + j12$	117

## 2.5. Содержание отчета

1. Цель работы;
2. Исходная схема сети, схема замещения;
3. Расчет режима сети вручную;
4. Расчетная схема с результатами расчетов режима на ЭВМ;
5. Анализ результатов расчетов и выводы по работе.

## 2.6. Контрольные вопросы

1. Какие сети называются замкнутыми? В чем их преимущество?
2. Что понимают под расчетной нагрузкой узла замкнутой сети?
3. Назовите основные этапы расчета режимов замкнутых сетей.
4. В чем отличие расчета режимов замкнутых однородных и неоднородных сетей?
5. Что такое точка потокораздела и как она выбирается?
6. Как уточнить потокораспределение с учетом потерь мощности?
7. Как выполняется расчет режима линии с двухсторонним питанием, если точки потокораздела по активной и реактивной мощностям не совпадают?
8. Как уточнить потокораспределение с учетом потерь мощности?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### Расчет и анализ послеаварийных режимов электрической сети, регулирование напряжения изменением коэффициента трансформации трансформаторов

#### 3.1. Цель работы

Освоение принципа отключения ветвей и выбора ответвлений трансформаторов на ЭВМ.

#### 3.2. Краткие теоретические сведения

Послеаварийные режимы в электрической сети наступают после отключения одного или нескольких элементов (линий, трансформаторов). При этом потокораспределение в сети изменяется и может стать таким, что напряжения на шинах подстанций, удаленны от источников питания, могут оказаться недопустимо низкими. Для того, чтобы оценить величину потоков мощности и напряжения в узлах сети, необходимо выполнить расчет. Расчет послеаварийного режима в одноконтурной сети (рис. 2.1) или в линии с двухсторонним питанием (рис. 2.2) сводится к расчету разомкнутой сети, в которой заданы нагрузки в конце линии и напряжение в начале. Расчет такой сети осуществляется в два этапа.

Выбор ответвлений в двухобмоточных трансформаторах осуществляется для того, чтобы обеспечить желаемые напряжения на шинах низшего напряжения подстанций  $U_{\text{нж}}$ . Зная нагрузку подстанции  $P + jQ$  и напряжение на шинах низшего напряжения  $U$  (из расчета режима сети), определяется напряжение на стороне НН, приведенного к ВН:

$$U_{\text{н}}^{\text{в}} = |U - \Delta U_{\text{т}}|, \quad (3.1)$$

где  $\Delta U_{\text{т}}$  – падение напряжения на сопротивлениях обмоток трансформатора.

Расчетные напряжения ответвления можно определить:

$$U_{\text{отв}} = \frac{U_{\text{н}}^{\text{в}}}{U_{\text{нж}}} \cdot U_{\text{нн}}, \quad (3.2)$$

где  $U_{\text{нн}}$  – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения.

Вычисленное по (3.2) напряжение ответвления используется для определения ближайшего стандартного ответвления. Ряд стандартных ответвлений может быть получен по формуле:



$$U_{\text{отв.ст}} = U_{\text{вн}} \pm n \Delta U_{\text{отв}} = U_{\text{вн}} \pm n \frac{\Delta U_{\text{отв}} \%}{100} \cdot U_{\text{вн}}, \quad (3.3)$$

где  $n$  – номер ответвления в сторону увеличения (знак плюс) или в сторону уменьшения (знак минус) коэффициента трансформации;

$\Delta U_{\text{отв}}$  и  $\Delta U_{\text{отв}} \%$  – шаг изменения напряжения при переходе на соседнее ответвление в киловольтах и процентах соответственно.

Следует заметить, что уменьшение коэффициента трансформации приводит к увеличению напряжения на шинах НН, а увеличение – к его уменьшению.

Действительное напряжение на шинах НН, с учетом выбранного ответвления:

$$U_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}^{\text{в}}}{U_{\text{отв.ст}}} \cdot U_{\text{нн}}. \quad (3.4)$$

В автотрансформаторах устройство регулирования напряжения (РПН) встраивается на линейном конце обмотки СН, что обеспечивает изменение коэффициента трансформации только между обмотками ВН и СН. Для выбора ответвлений РПН вычисляется расчетное напряжение ответвления:

$$U_{\text{отв}} = \frac{U_{\text{вн}}}{U_{\text{с}}^{\text{в}}} \cdot U_{\text{сж}}, \quad (3.5)$$

где  $U_{\text{с}}^{\text{в}}$  – напряжение на стороне СН, приведенное к напряжению обмотки ВН;

$U_{\text{сж}}$  – желаемое напряжение на обмотке СН.

Полученное напряжение ответвления используется для подбора ближайшего стандартного напряжения ответвления.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить расчетную схему (см. рис. 2.1 или 2.2).
3. Выполнить вручную расчет послеаварийного режима по заданию преподавателя. Результаты расчетов нанести на схему.
4. Составить ряд стандартных регулировочных ответвлений трансформатора и оформить в виде таблицы.

5. Выбрать регулировочные ответвления трансформаторов для обеспечения на шинах НН напряжения  $U_{\text{нж}} = 10,5 \text{ кВ}$  (для схемы на рис. 2.1) или на шинах СН напряжения  $U_{\text{сж}} = 115 \text{ кВ}$  (для схемы на рис. 2.2).

6. Вызвать с диска исходный режим нагрузок (см. лабораторную работу № 2).

7. Выполнить расчеты для следующих случаев выбирая ответвления трансформаторов:

а) все линии включены;

б) отключена линия А-1;

в) отключены линии А-2 (рис. 2.1) и линия В-4 (рис. 2.2);

г) отключены линии 1-2 (рис. 2.1) и линия 1-4 (рис. 2.2).

8. Начертить схемы рассмотренных режимов и указать на них значения потоков мощностей, по участкам и напряжений в узлах сети, ответвления трансформаторов; записать значения потерь мощности по участкам и суммарных потерь.

9. Сравнить результаты расчетов, выполненных вручную и на ЭВМ.

10. Восстановить режим пункта 7а.

11. Выполнить расчеты по выбору ответвлений трансформаторов:

а) при увеличении напряжений в ЦП на 10%;

б) при снижении  $U_1$  на 10%;

в) в режиме наименьших нагрузок при снижении нагрузок в узлах на 50 % и исходным напряжением ЦП.

12. Выполнить сравнение и анализ результатов расчетов.

Восстановить режим п. 7, а для дальнейшей работы.

### 3.4. Содержание отчета.

1. Цель работы.

2. Расчетная схема сети.

3. Расчет режима сети вручную.

4. Расчетная схема сети с результатами расчета на ЭВМ.

5. Анализ результатов расчетов и выводы по работе.

### 3.5. Контрольные вопросы.

1. В чем различие трансформаторов с РПН и без РПН?

2. Какая информация необходима для выбора ответвлений двухобмоточных трансформаторов с РПН?

3. Почему устройство РПН устанавливают преимущественно на стороне высшего напряжения трансформатора?
4. Привести последовательность расчетов при выборе регулировочных ответвлений для различных марок трансформаторов.
5. Назовите нормы на отклонение напряжений у потребителей.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Исследование влияния компенсирующих устройств на параметры режима электрической сети

#### 4.1. Цель работы

Изучение влияния компенсирующих устройств на режим электрической сети

#### 4.2. Краткие теоретические сведения

Компенсирующие устройства поперечной компенсации, устанавливаемые в узлах электрической сети, оказывают комплексное влияние на параметры режима.

Их влияние проявляется в том, что изменяются потоки реактивной мощности по сети. Следствием этого является изменение напряжений в узлах, а также потерь мощности за счет разгрузки элементов сети от реактивной мощности.

Для простейшего случая сети, состоящей из одного элемента, взаимосвязи указанных параметров режима определяются следующими соотношениями:

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{ку}})}{U^2} \cdot R; \quad (4.1)$$

потери реактивной мощности:

$$\Delta Q = \frac{P^2 + (Q - Q_{\text{ку}})}{U^2} \cdot X; \quad (4.2)$$

потеря напряжения:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + (Q - Q_{\text{ку}}) \cdot X}{U}, \quad (4.3)$$

где  $P, Q$  – мощности нагрузок;  
 $Q_{\text{ку}}$  – мощности компенсирующего устройства;  
 $R, X$  – параметры сети;  
 $U$  – напряжение.

В сложных сетях со многими элементами проявляется взаимосвязь всех узлов и ветвей. Оценка комплексного воздействия компенсирующих устройств на параметры режима отдельных узлов и сети в целом может быть проведена с помощью ЭВМ. Для этого использу-

ются программы расчета установившихся режимов общего назначения, либо специальные программы.

### 4.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Начертить принципиальную и расчетную схему (см. рис. 2.1 или 2.2) для нанесения на нее потокораспределения и напряжений в узлах.
3. Подготовить табл. 4.1 и 4.2.
4. Из отчета по работе № 3 вписать в табл. 4.1 и 4.2 суммарные потери активной и реактивной мощности для режима п.7а, зарядную мощность и напряжения в узлах.

Таблица 4.1

#### К определению места установки компенсирующего устройства

№ п/п	Номер узла с мощностью компенсирующего устройства в нём $Q_k = 1$ Мвар	Потери мощности		Изменение потерь мощности по сравнению с исходным режимом	
		$\Delta P$ , МВт	$\Delta Q$ , Мвар	$\delta \Delta P$ , МВт	$\delta \Delta Q$ , Мвар

Таблица 4.2

#### К определению мощности компенсирующих устройств, соответствующей минимуму потерь активной мощности

№ п/п	Мощность компенсирующих устройств	Потери мощности		Зарядная мощность $Q_c$ , Мвар	Напряжение в узлах		
		$\Delta P$ , МВт	$\Delta Q$ , Мвар		1	2	...

5. Для исследуемой схемы определяется наивыгоднейшее место установки компенсирующего устройства, для чего:
  - а) поочередно в каждом из узлов нагрузки устанавливается мощность компенсирующего устройства  $Q_k = 1$  Мвар и выполняется расчет режима. В качестве исходного принимается режим п. 7, а из работы № 3 и в него вносятся изменения мощности генерации соответствующего узла;
  - б) для каждого из режимов рассчитываются изменения потерь мощности в виде разности потерь в исходном режиме и потерь при установке компенсирующего устройства мощностью 1 Мвар в соответствующем  $i$ -м узле

$$\delta \Delta P_i = \Delta P_{\text{исх}} - \Delta P_{ki}; \quad (4.3)$$

$$\delta\Delta Q_i = \Delta Q_{\text{исх}} - \Delta Q_{ki}; \quad (4.4)$$

Результаты всех расчетов заносятся в табл. 4.1.

в) определяется узел, в котором установка компенсирующего устройства единичной мощности дает наибольшее снижение потерь активной мощности.

6. Для узла сети, определяемого в п.5 находится мощность компенсирующего устройства, соответствующая минимальным потерям активной мощности, для чего:

а) увеличивается дискретно мощность компенсирующего устройства в этом узле с шагом, согласованным с преподавателем. Мощность компенсирующего устройства, устанавливаемого в узле для сохранения положительного регулирующего эффекта нагрузки не должна превышать  $\approx 30\%$  реактивной нагрузки этого узла. Для каждого значения мощности производится расчет режима и определяются потери. Результаты заносятся в табл. 4.2;

б) расчеты выполняются до тех пор, пока не будет найдена точка минимума функции  $\Delta P = f(Q_k)$ .

7. Результаты расчета режима при мощности компенсирующего устройства, соответствующей минимуму потерь активной мощности, наносится на расчетную схему.

8. По результатам расчетов строятся и анализируются зависимости от мощности компенсирующих устройств в  $i$ -м узле: потерь активной и реактивной мощностей  $\Delta P = f(Q_{ki})$ ,  $\Delta Q = f(Q_{ki})$ ; зарядной мощности  $Q_c = f(Q_{ki})$ , напряжений в узлах  $U = f(Q_{ki})$ .

#### 4.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная схема сети.
3. Таблицы 4.1 и 4.2.
4. Зависимости  $\Delta P = f(Q_{ki})$ ,  $\Delta Q = f(Q_{ki})$ ,  $Q_c = f(Q_{ki})$ ,  $U = f(Q_{ki})$ .
5. Расчетная схема сети с результатами расчетов потокораспределения и напряжений в узлах для режима при мощности компенсирующих устройств, соответствующей минимуму потерь активной мощности.
6. Сравнительный анализ исходного и конечного режимов.

#### 4.5. Контрольные вопросы

1. Для чего устанавливают компенсирующие устройства в электрической сети?
2. В чем заключается сущность регулирования напряжения изменением потоков реактивной мощности?
3. С помощью каких средств можно изменять потоки реактивной мощности в электрической цепи?
4. Как влияет установка компенсирующих устройств на потери мощности и напряжения в узлах сети? Почему?
5. Чем объясняется, что мощность по линиям изменяется при изменении мощности компенсирующих устройств?

## Порядок выполнения компьютерного расчета режима электрической сети

1. Проверить подготовку исходной и расчетной схем исследуемой электрической сети, включая нумерацию узлов и определение параметров схемы замещения. Убедиться в достаточной полноте исходной информации и ее соответствии формату ввода данных в программный комплекс. (Примеры исходной и расчетной схем – рис.П3 и П4).
2. Загрузить на выполнение заданный для использования программный комплекс (исполняемые модули *RastrWin\RastrWin.exe* либо *Mustang.win\Mustang.exe*).
3. Перейти в главное меню комплекса. Выполнить операцию создания нового файла исходных данных (режима) либо чтения ранее созданного файла с исходными данными (режимом).
4. Ввести исходные данные о расчетной схеме в таблицы узлов и ветвей:
5. Сохранить введенную информацию на диск в виде файла данных (режима).
6. Задать константы и параметры, характеризующие ход итерационного процесса.
7. Выполнить команду *Расчет*.
8. Просмотр результатов с использованием табличного и графического сервиса программного комплекса. Анализ полученного решения задачи.
9. При необходимости вносятся коррективы в исходную информацию, и повторяется процедура расчета-анализа.
10. Сохранение расчетного режима на диск, вывод исходных данных и результатов расчета на печать.



# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### ИНСТРУКЦИЯ

#### по использованию программного комплекса *RASTR*

Программный комплекс *RASTR* предназначен для компьютерного решения задач расчета, анализа и оптимизации установившихся режимов электрических сетей и систем. Позволяет вести расчет электрической сети произвольного размера и сложности, любых номинальных напряжений (от 0,38 до 1150 кВ). Программы комплекса обеспечивают возможности экранного ввода и коррекции исходных данных, быстрого отключения узлов и ветвей схемы, имеет возможность районирования сети. Предусмотрено графическое представление схемы или отдельных ее фрагментов вместе с любыми расчетными и исходными параметрами. Позволяет производить расчет и утяжеление режима, эквивалентирование сети. В комплекс также включена оптимизация режима по уровням напряжения и распределению реактивной мощности.

#### Принципы работы с комплексом *RASTR*

В настоящей инструкции приводится описание функций и сервисных возможностей комплекса версии *RastrWin 2.22*, работающего в операционной системе Windows2000/WindowsXP.

Для занесения в оперативную память компьютера, коррекции и отображения расчетной схемы используется табличный и графический интерфейс. Исходная информация помещается в таблицы *Узлы*, *Ветви*. Графический редактор предоставляет пользователю средства автоматизированной подготовки однолинейной графической схемы на основе расчетной. Графическое представление сети обеспечивает наиболее удобное восприятие информации о расчете режима.

При подготовке и выполнении расчетов имеется возможность проведения коммутаций (включение/отключение элементов схемы). Хранение исходных и расчетных параметров производится в единой базе данных. Для взаимодействия с другими программами возможно выполнение операций импорта-экспорта данных в специализированных форматах.

Подробное описание функций и сервиса программ приведено в служебном файле *RastrWinHelp.pdf*. Доступ к справочной системе возможен через главное меню комплекса.

## Подготовка исходных данных для расчета

Принципы представления электрической схемы в формате *RASTR* поясняют схемы замещения отдельных узла и ветви, показанные на рис. П1-П2.

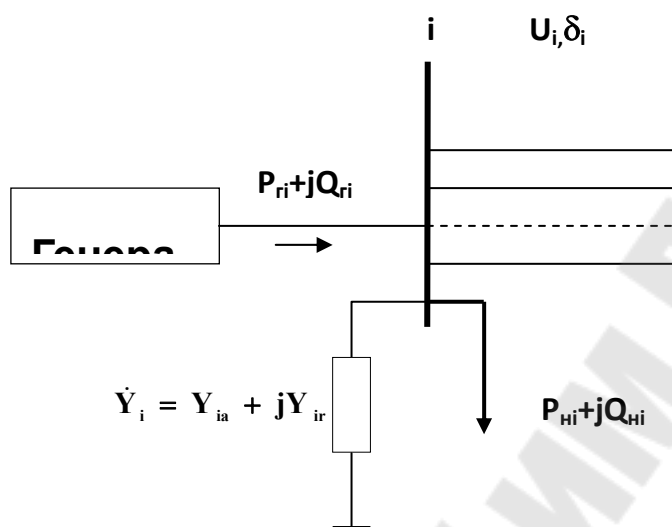


Рис. П1. Схема замещения узла *i*

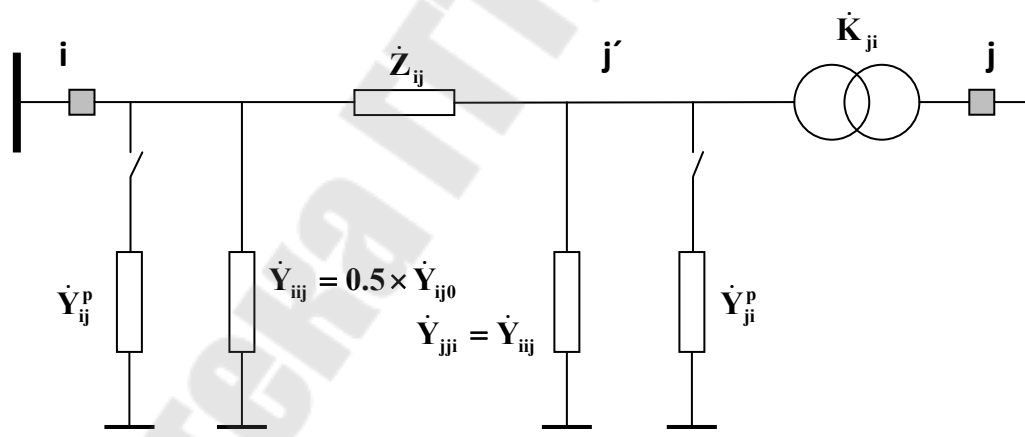


Рис. П2. Схема замещения ветви *i-j*

Для всей схемы выполняется нумерация узлов. Узлы представляются величиной нагрузки, генерации [*МВт, Мвар*]. При наличии в узле шунта на землю – БСК, шунтирующий реактор, потери холостого хода трансформаторов – его проводимость определяется в *мкСм*. Для каждого узла указывается номинальное напряжение.

Генераторные узлы задаются фиксированной величиной модуля напряжения [ $kV$ ] и пределами регулирования реактивной мощности [ $Mвар$ ] – балансирующий узел, либо фиксированными значениями активной мощности, напряжения и пределами регулирования реактивной мощности – узел базисный (опорный, балансирующий по реактивной мощности).

Ветви замещаются комплексными продольными сопротивлениями [ $Ом$ ] и поперечными проводимостями [ $мкСм$ ], причем емкостный характер проводимости задается со знаком «минус». Для трансформаторных ветвей сопротивление должно быть приведено к стороне высокого напряжения, а коэффициент трансформации определяется как отношение низшего номинального напряжения к высшему (т.е. меньше единицы).

На рис. П4 приведена расчетная схема в формате комплекса RASTR для исходной схемы электрической сети по рис. П3.

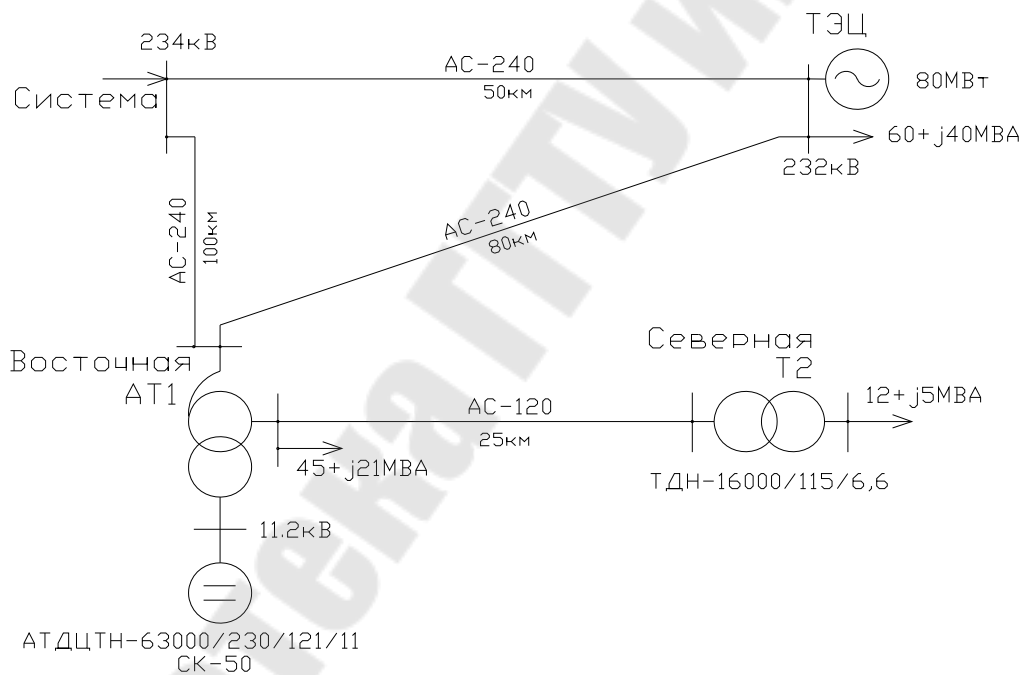


Рис. П3. Исходная схема

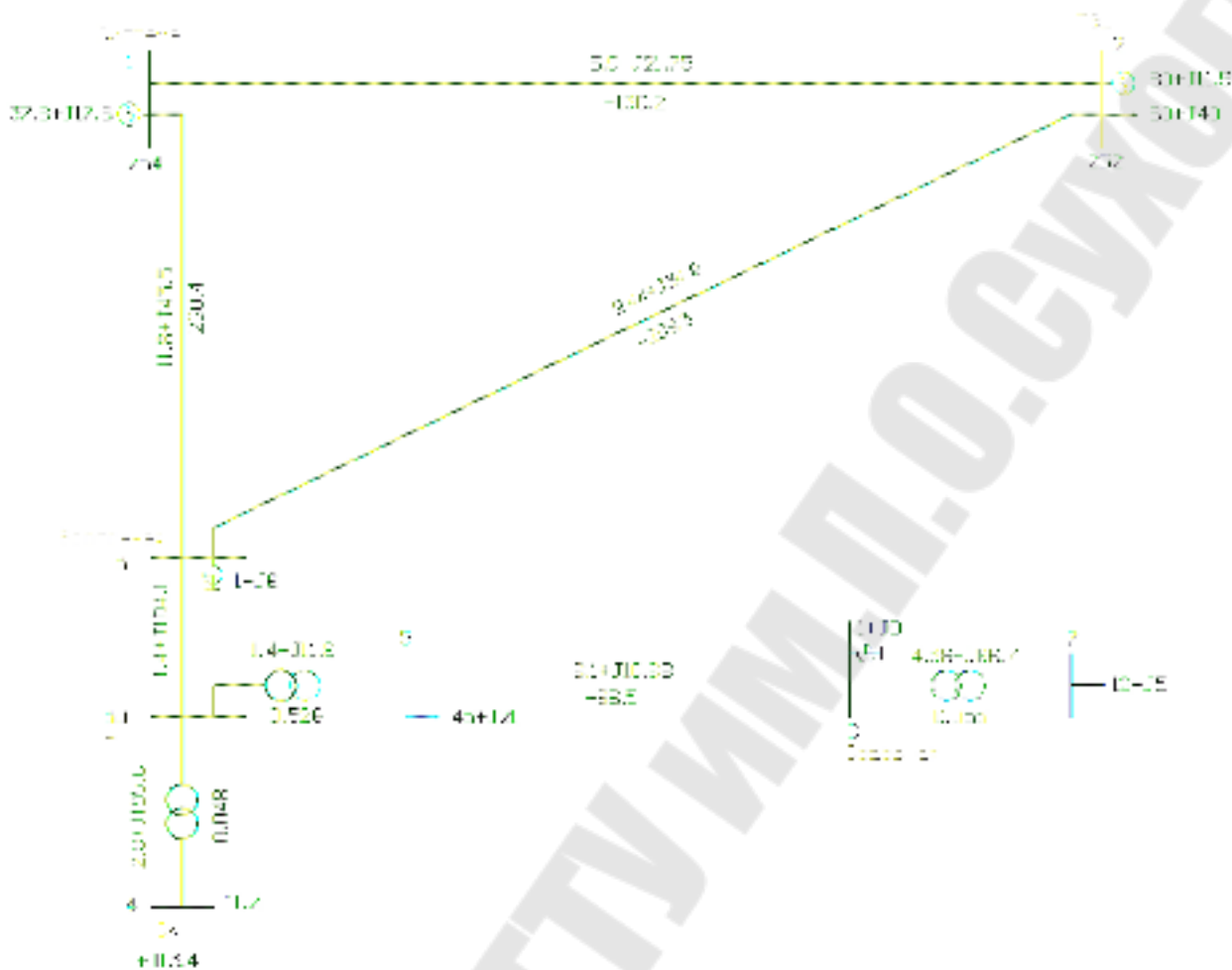


Рис. П4. Пример расчетной схемы в формате графики комплекса *RASTR*

### Начало работы с комплексом *RastrWin*

Программы комплекса загружаются на выполнение исполняемым модулем *RastrWin\RastrWin.exe*. После запуска на экране открывается окно с главным меню комплекса (см. рисунок П5).



Рис. П5. Главное меню программного комплекса *RastrWin*

Все пункты главного меню и выпадающих подменю с выполняемыми функциями подробно описаны в справочной системе *RastrWinHelp*.

### Ввод исходных данных

Перед началом работы с данными следует создать файл, если данные вводятся впервые, либо загрузить с диска уже имеющийся файл данных. Для создания новых файлов данных и графики нужно открыть диалоговое окно

**Файлы>Новый>Открыть новый файл** (в оперативной памяти компьютера создаются новые файлы *Новый.rg2* и *Новый.grf*). Далее эти файлы требуется **Сохранить** с желаемыми именами, например *Пример 1.rg2* и *Пример 1.grf*.

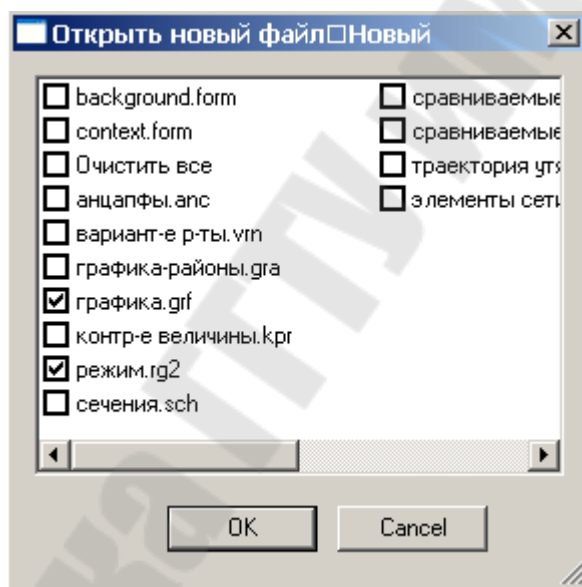


Рис. П6. Создание файлов данных новой схемы

Далее командами **Открыть>Узлы>Узлы**,  
**Открыть>Ветви>Ветви**,  
**Открыть>Графика**

открываются таблицы узлов и ветвей, а также окно для создания графического образа схемы.

Заполненные таблицы с данными по узлам и ветвям расчетной схемы рис. П4 показано на рисунках П7-П8.

№	Тип	Номер	Название	U_ном	Район	P_n	Q_n	P_r	Q_r	U_зд	Q_min	Q_max	G_ш	B_ш	Y	Delta
1	База 1		Система	220	1					234	-200	300			234	
2	Ген. 2		ТЭЦ	220	1	60	40	60		232	-60	90			232	
3	Нагр. 3		Восточная	220	1								0.9	6		
4	Нагр. 30		АТ	220	1											
5	Ген. 4		СК	110	1					11.2	-18	45			11.2	
6	Нагр. 5			110	2	45	21									
7	Нагр. 6		Северная	110	2								1.4	8.5		
8	Нагр. 7			5	2	12	5									

Рис. П7. Ввод исходных данных в формате таблицы *Узлы*

№	O	S	Тип	N_нач	N_кон	Название	R	X	G	B	Кт/г	Na
1			ЛЭП	1	3	Система - Восточная	11.8	43.5		-260.4		
2			ЛЭП	2	3	ТЭЦ - Восточная	9.44	34.8		-208.3		
3			ЛЭП	1	2	Система - ТЭЦ	5.9	21.75		-130.2		
4			ЛЭП	5	6	- Северная	6.1	10.68		-66.5		
5			ЛЭП	3	30	Восточная - АТ	1.4	104.1				
6			Тр-р	30	5	АТ -	1.4	-11.8			0.526	
7			Тр-р	30	4	АТ - СК	2.8	195.6			0.048	
8			Тр-р	6	7	Северная -	4.38	86.7			0.055	

Рис. П8. Ввод исходных данных в формате таблицы *Ветви*

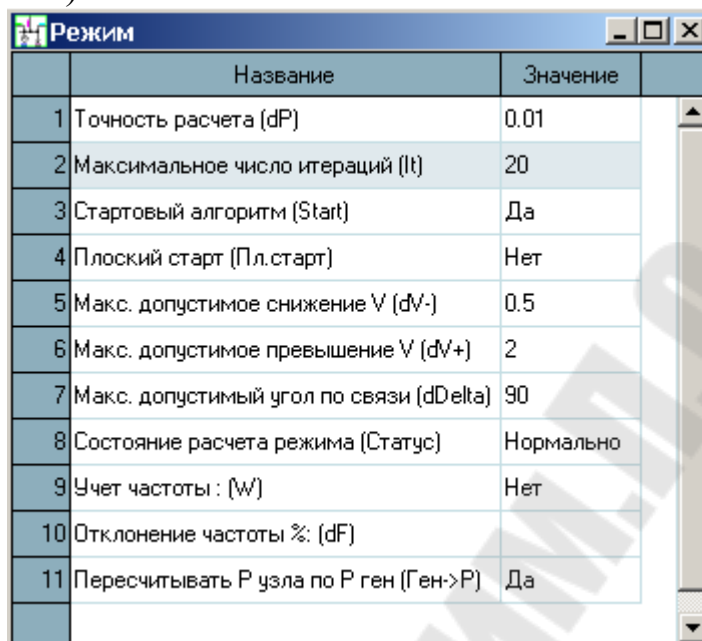
Примечание: поля *O* и *S* в таблицах узлов и ветвей позволяют отключить элемент схемы либо изменить состояние линии (например, моделировать одностороннее отключение ЛЭП).

### Расчет

Запуск процедуры расчета установившегося режима осуществляется командой *Расчеты>Режим*. Программа выполняет расчет путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений режима с использованием современных модификаций метода Ньютона и (при необходимости) стартового алгоритма по методу Зейделя.

Перед началом расчетов следует уточнить установленные константы и параметры, управляющие работой вычислительного алго-

ритма. Диалоговое окно констант открывается командой **Расчеты>Параметры>Режим** (рекомендуемые значения параметров приведены на рис. П9).



	Название	Значение
1	Точность расчета (dP)	0.01
2	Максимальное число итераций (It)	20
3	Стартовый алгоритм (Start)	Да
4	Плоский старт (Пл. старт)	Нет
5	Макс. допустимое снижение V (dV-)	0.5
6	Макс. допустимое превышение V (dV+)	2
7	Макс. допустимый угол по связи (dDelta)	90
8	Состояние расчета режима (Статус)	Нормально
9	Учет частоты: (W)	Нет
10	Отклонение частоты %: (dF)	
11	Пересчитывать P узла по P ген (Ген->P)	Да

Рис. П9. Константы и ограничения для вычислительного процесса

### Анализ результатов расчета

Комплекс *RASTR* предлагает пользователю большое количество форм для просмотра и анализа полученных результатов расчета. Интересующая пользователя табличная форма вызывается командой из выпадающего меню **Открыть>**. На рис. П10-П11 приведены таблицы узлов и ветвей рассматриваемой схемы рис ПЗ-П4, в которых исходные данные дополнены расчетными значениями напряжений, токов, потоков мощности. На рис. П12 расчетные параметры режима узлов и ветвей объединены общей таблицей. Рис. П13-П14 иллюстрируют возможность систематизировать результаты расчета для анализа напряжений в узлах схемы, параметров генерирующих источников, потерь в поперечных проводимостях расчетной схемы, загрузки токами и мощностями линий и трансформаторов. В таблицы на рис. П15-П16 помещены результаты определения потерь мощности в продольных и поперечных элементах расчетной схемы, баланс мощности и сводные общие данные по данному режиму. Обозначения расчетных величин традиционны для анализа электрических режимов. Их подробное описание приведено в справочной системе *RastrWinHelp*.

№	S	Тип	Имя	Название	U_ном	Район	P_л	Q_л	P_г	Q_г	V_за	Q_min	Q_max	G_ш	B_ш	V	Delta
1		База	1	Система	220	1			37.6	17.6	234	-200	300			234	
2		Ген	2	ТЭЦ	220	1	90	40	00	11.9	232	-60	80			232	-0.1
3		Нагр	3	Восточная	220	1								0.9	6	230.88	-1.2
4		Ген	4	СК	110	1			13.4	11.2	-18	45			11.2	-7.8	
5		Нагр	5		110	2	45	21							117.84	-7	
6		Нагр	6	Северная	110	2								1.4	0.5	116.67	-7.4
7		Нагр	7		6	2	12	5							6.21	-11.9	
8		Нагр	30	АТ	220	1										222.99	7.8

Рис. III.0. Результаты расчета – таблица *Узлы*

№	S	Тип	N_нач	N_кон	Название	P	X	B	КСЛ	P_нач	Q_нач	I_нач	P_кон	Q_кон	I_кон
1		ЛЭП	1	2	Система - ТЭЦ	5.0	21.75	-130.2		-0.41	-15.4	45	-0.37	-22.29	80
2		ЛЭП	2	3	ТЭЦ - Восточная	9.44	34.9	-208.3		-29.37	5.33	75	-29.21	-4.77	74
3		ЛЭП	1	3	Система - Восточная	11.8	43.5	-260.4		-28.4	2.22	70	-28.21	15.58	81
4		ЛЭП	3	30	Восточная - АТ	1.4	10.41			-57.37	-20.03	162	-57.28	-12.82	162
5		Трр	30	5	АТ -	1.4	-11.8		0.525	-57.27	-25.57	162	-57.15	-25.5	306
6		Трр	30	4	АТ - СК	2.0	165.6		0.048	-0.01	12.76	33	0	13.4	691
7		ЛЭП	5	6	- Северная	8.1	10.00	-68.5		-12.16	-5.5	85	-12.06	-6.26	87
8		Трр	6	7	Северная -	4.38	96.7		0.055	-12.06	-6.16	87	-12	5	1209

Рис. III.1. Результаты расчета – таблица *Ветви*



Узлы+Ветви														
	O	S	Номер	Название	V	Delta	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	Q_ш
	O	S	№	Название	V_2	dDelta	P_л	Q_л	dP	dQ	I_л	P_ш	Q_ш	
1			1	Система	234				37.8	17.6	234	-200	300	
2			2	ТЭЦ	232	-0.1	-9	-15	0.05	0.18	45		-7.07	
3			3	Восточная	230.9	-1.2	-28	-2	0.19	0.71	70	-0	-14.07	
4			2	ТЭЦ	232	-0.1	60	40	80	11.9	232	-60	80	
5			1	Система	234	0.1	9	22	0.05	0.18	60		-7.07	
6			3	Восточная	230.9	-1.1	-29	6	0.15	0.56	75		-11.16	
7			3	Восточная	230.88	-1.19								0
8			2	ТЭЦ	232	1.1	29	5	0.15	0.56	74		-11.16	
9			1	Система	234	1.2	28	16	0.19	0.71	81	-0	-14.07	
10			30	АТ	223	-6.6	-57	-20	0.1	7.21	152			
11			30	АТ	222.99	-7.82								
12			3	Восточная	230.9	6.6	57	13	0.1	7.21	152			
13			5		117.8	0.8	-57	-26	0.11	-0.93	162			
14			4	СК	11.2	-0	-0	13	0.01	0.64	33			
15			4	СК	11.2	-7.86				13.4	11.2	-18	45	
16			30	АТ	223	0	-0	-13	0.01	0.64	691			
17			5		117.84	-7.01	45	21						
18			30	АТ	223	-0.8	57	27	0.11	-0.93	309			
19			6	Северная	116.7	-0.4	-12	-6	0.08	0.14	65		-0.91	
20			6	Северная	116.67	-7.4								0
21			5		117.8	0.4	12	6	0.08	0.14	67		-0.91	
22			7		6.2	-4.5	-12	-6	0.06	1.17	67			
23			7		6.21	-11.87	12	5						
24			6	Северная	116.7	4.5	12	5	0.06	1.17	1209			

Рис. П12. Результаты расчета – таблица *Узлы+Ветви*

**Напряжения**

S	Номер	Название	U_ном	V	dV%
1	1	Система	220	234	6.36
2	2	ТЭЦ	220	232	5.45
3	4	СК	10	11.2	12
4	5		110	117.84	7.13
5	6	Северная	110	116.67	6.06

**Ген.узлы**

DS	Номер	Название	Тип	P_г	Q_г	Q_min	Q_max	V_зд	V
1	1	Система	База	37.8	17.6	-200	300	234	234
2	2	ТЭЦ	Ген	80	11.9	-60	80	232	232
3	4	СК	Ген		13.4	-18	45	11.2	11.2

**Шунты**

Номер	Название	V	G_ш	B_ш	P_ш	Q_ш	G_расч	B_расч	
1	3	Восточная	230.88	0.9	6	0.05	0.32	0	6
2	6	Северная	116.67	1.4	8.5	0.02	0.12	0	8.5

Рис. П13. Результаты расчета режима в окнах *Напряжения*, *Ген.узлы*, *Шунты*

**Загрузка**

S	N_ном	N_кон	Название	Тип	P_ном	PF	P_кон	dDelta	P_шунт	dQ	Q_н	Q_кон	Мощ	Угол	dV%
1	1	2	Система - ТЭЦ	ЛЭП	+9	0.05	4	0.1	+45	0.10	-7.07	-22	+234	232	0.01
2	2	3	ТЭЦ - Восточная	ЛЭП	+26	0.15	23	1.1	+5	0.96	-11.16	-5	+232	230.9	0.01
3	1	3	Система - Восточная	ЛЭП	+28	0.19	28	1.2	+2	0.71	-14.07	-16	+234	230.9	1.42
4	3	3C	Восточная - АТ	ЛЭП	+57	0.1	57	5.6	+20	7.21		13	+230.9	223	3.09
5	3C	5	АТ -	Тр-р	+57	0.11	57	-0.9	+23	-0.00		-27	+223	117.0	-0.45
6	3C	4	АТ - СК	Тр-р	+40	0.01	0	0	+13	0.64		13	+223	117.0	-5.35
7	5	6	- Северная	ЛЭП	+12	0.08	-12	0.4	+6	0.14	-0.91	-6	+117.3	116.7	1.05
8	6	7	Северная	Тр-р	+12	0.05	12	4.5	+6	1.17		5	+116.7	6.2	4.33

**Токковая загрузка ЛЭП**

N_ном	N_кон	Название	I_ном	кон	Мощ	Угол	дV, дV%
1	2	Система - ТЭЦ	45	00	34		
2	3	ТЭЦ - Восточная	75	74	34		
3	3	Система - Восточная	70	81	34		
4	3C	Восточная - АТ	152	152	34		
5	5	- Северная	65	07	34		

**Токковая загрузка Тр-ов**

N_ном	N_кон	Название	I_ном	I_кон	Мощ	дV, дV%
1	3C	5	АТ	162	303	ВН
2	3C	4	АТ - СК	39	691	ВН
3	5	7	Северная -	07	1230	ВН

Рис. П14. Результаты расчета режима в окнах *Загрузка*, *Токковая загрузка ЛЭП*, *Токковая загрузка Тр-ов*

The image shows two windows from a software application. The top window, titled 'Потери' (Losses), contains a table with 13 columns and 2 rows. The bottom window, titled 'Районы' (Districts), contains a table with 7 columns and 2 rows.

U_ном	dP	dP_ЛЭП	dP_Трр	Корона	%X_тр	dP_Ш-нг	dQ	dQ_ЛЭП	dQ_Трр	Ген_ПЗ	Q_XX_тр	dQ_Ш-нг
1 220	0.61	0.45	0.12	-0		0.05	-23.93	8.55	-0.29	-32.3		0.32
2 110	0.14	0.08	0.06			0.02	0.39	0.14	1.17	-0.91		0.12

Нрн	Рген	Рнаг	Dr	Рпогр	Рвн	Tr
1 1	118	60	0.66	61	57	
2 2		57	0.16	57	57	

Рис. III.5. Результаты расчета режима в окнах *Потери, Районы*

The image shows a window titled 'Общая инф.' (General Info) containing a table with 21 rows. Each row lists a system parameter and its corresponding numerical value.

	Название	Значение
1	Узлов : (Nu)	8
2	Ветвей : (Nv)	8
3	Районов : (Na)	
4	Число отключенных узлов : (Nu_откл)	
5	Число отключенных ветвей : (Nv_откл)	
6	Число балансир. узлов : (N_бу)	1
7	Число узлов с заданн. V: (N_ген)	2
8	Число трансформаторов : (N_Тр)	3
9	Число ЛЭП : (N_ЛЭП)	5
10	Число выключателей : (N_выкл.)	
11	P_ген: (Pg)	118
12	P_наг: (Pn)	117
13	Потери P (переменные): (dP)	1
14	P_баланс. узла: (P_бу)	38
15	Постоянные Потери : (dP_пост)	
16	Минимальное отклонение V (%) (dV_min)	1.36
17	Максимальное отклонение V (%) (dV_max)	12
18	Число перегруженных тр-ров (по I_доп) (I_тр)	
19	Макс загрузка по току ТР (%) (I/I_доп-тр)	
20	Число перегруженных ЛЭП (по I_доп) (I_лэп)	
21	Макс загрузка по току ЛЭП (%) (I/I_доп-лэп)	

Рис. III.6. Результаты расчета режима в окне *Общая информация*

## Графика

Графическое окно для создания графического образа расчетной схемы открывает команда **Открыть>Графика**. Перед запуском графики должна быть загружена расчетная схема. Программы работы с графической схемой автоматически извлекают из расчетной схемы топологическую информацию, схему замещения, нагрузки, расчетные параметры и т.д.

### **Порядок подготовки графической схемы:**

- расстановка узлов на условно бесконечной плоскости;
- редактирование – придание схеме более наглядного вида путем изменения точек присоединения ветвей к узловым точкам и создания изломов ветвей;
- расстановка окон отображения текстовой информации;
- ввод поясняющих надписей (при необходимости).

Для первоначальной расстановки узлов применяется команда **Ввод**, которая вызывает на экран диалоговое окно с рекомендуемым для ввода списком узлов (см. рис. П17). При вводе узла используется широко известная технология *drag 'n' drop* (нажми – перемести – отпусти).

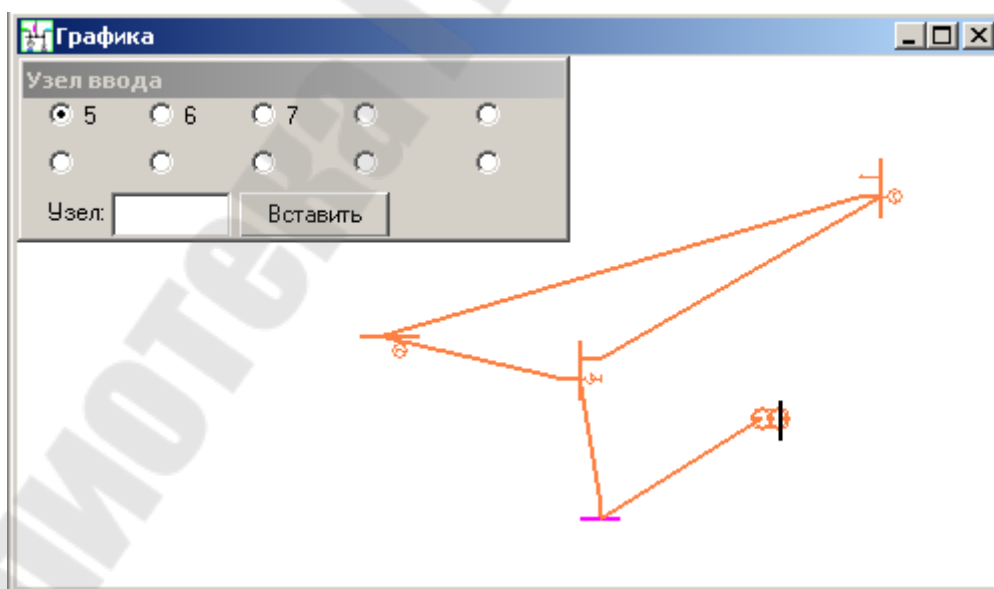


Рис. П17. Ввод данных графической схемы

В процессе редактирования схемы используются команды *Присоединение*, *Излом*. Стандартные приемы редактирования описаны в соответствующем разделе *RastrWinHelp*.

Расстановка текстовых окон, в которых отображаются исходные данные по схеме и расчетные данные, производится в режиме *Текст*. Настройка графического вывода (выбор выводимых параметров, цветовая гамма и т.п.) осуществляется в диалоговых окнах

*Графика>Параметры>Общие* и

*Графика>Параметры>Текст* (см. рис. П18).

После редактирования графическая схема может принять примерный вид рис. П19.

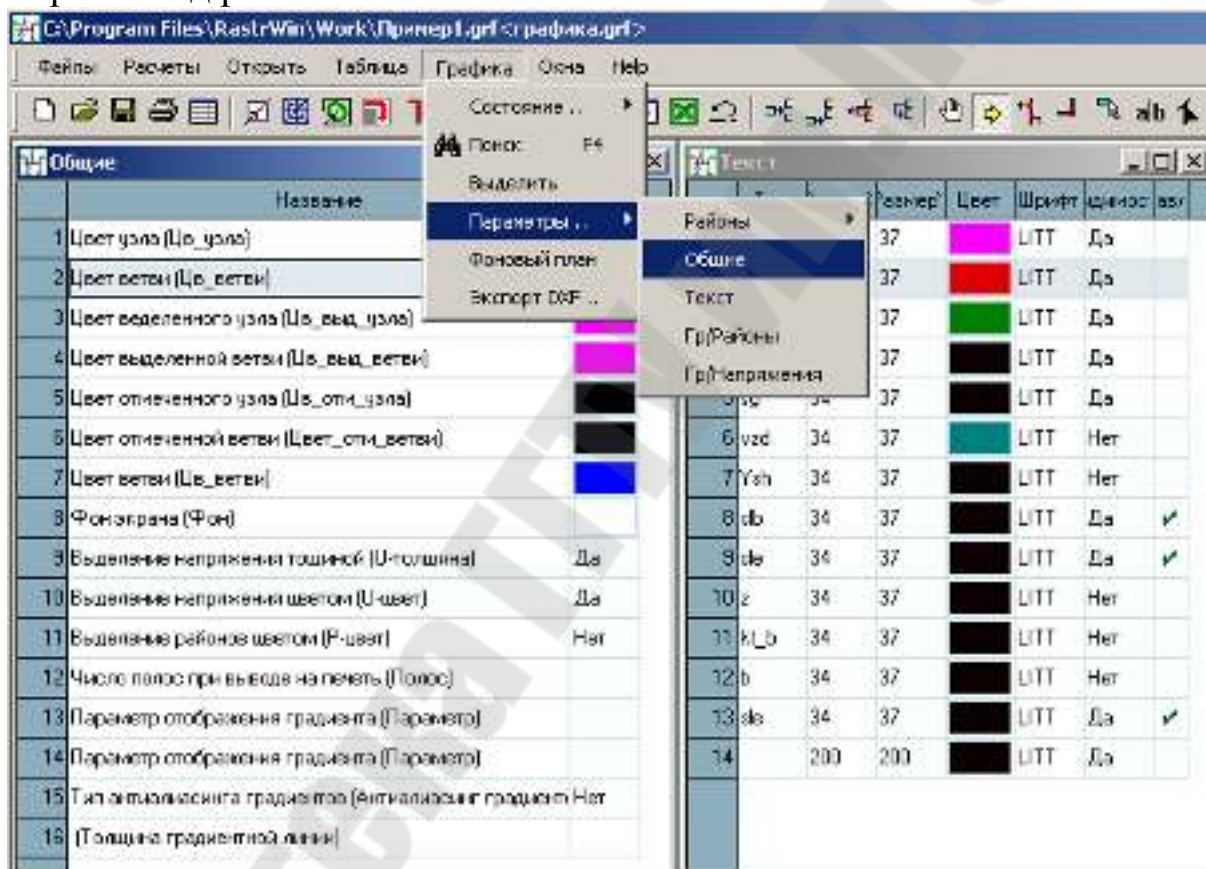


Рис. П18. Настройка графического вывода

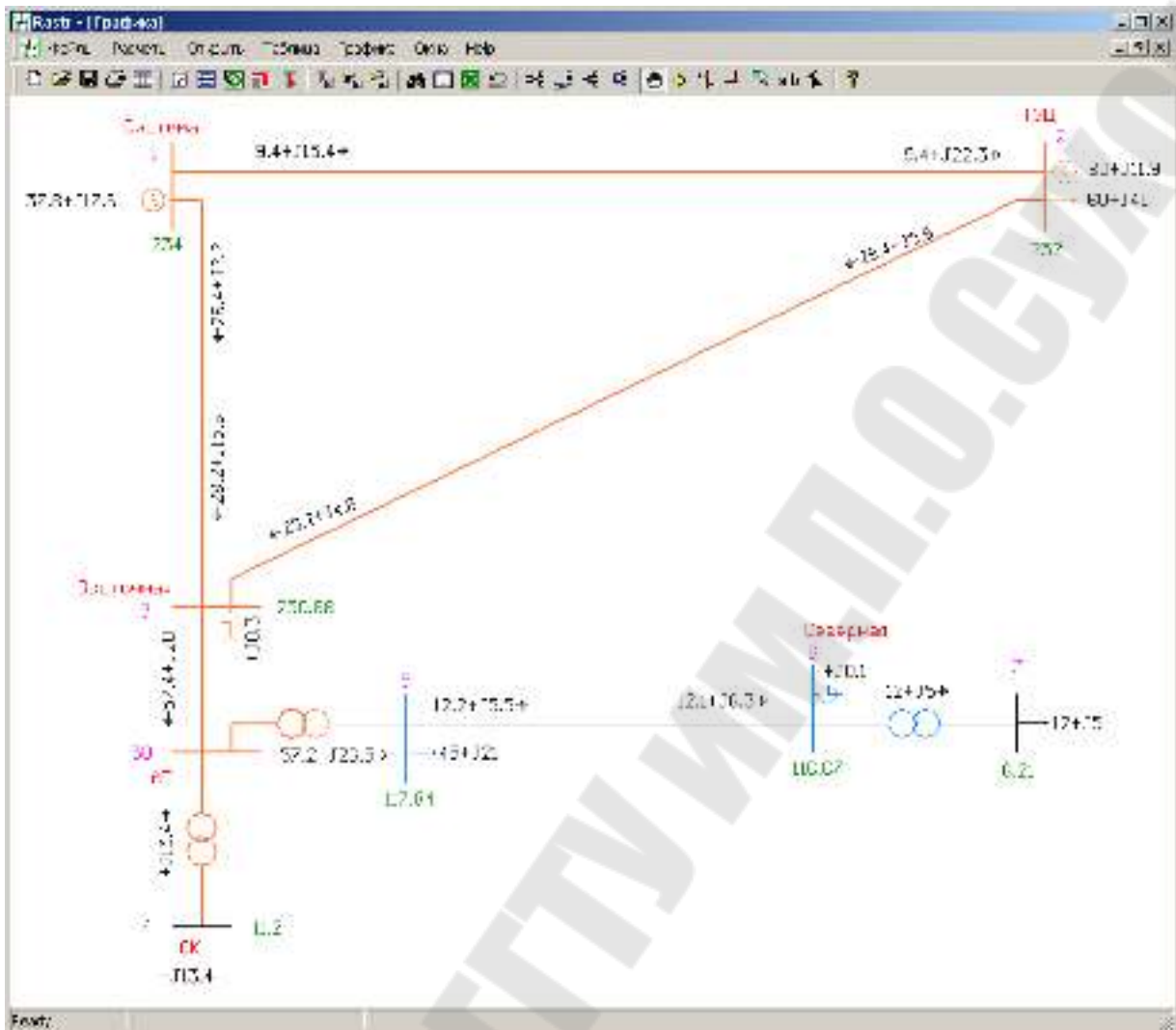


Рис. П19. Представление результатов расчета в графическом виде

### Расширенные возможности программы RASTR

В числе дополнительных возможностей комплекса программ RASTR следует отметить:

- расчет режима с учетом изменения частоты;
- расчет с учетом статических характеристик нагрузки;
- расчет предельных режимов;
- оптимизация режима по напряжению и реактивной мощности;
- эквивалентирование схем и др.

Решение подобных задач требует высокой квалификации пользователя и опыта работы с программным комплексом.

## ИНСТРУКЦИЯ

### по использованию программного комплекса *MUSTANG*

Программный комплекс *MUSTANG* относится к той же группе промышленных компьютерных программ оперативного решения электро-технических задач, что и *RASTR*, *КОСМОС*, *АНАРЭС* и др. Он предназначен и используется в учреждениях энергетического профиля для моделирования установившихся режимов и переходных электромеханических процессов энергосистем.

В последних версиях комплекса реализованы современные алгоритмы и математические методы решения задач, которые обеспечивают расчет электрической сети произвольного размера и сложности для всех имеющихся классов номинальных напряжений с высокой надежностью. Сервис программ комплекса обустроен современным оконно-графическим интерфейсом с возможностями экранного ввода и удобной коррекции исходных данных, быстрого выполнения коммутаций и выполнения серии расчетов.

### Принципы работы с комплексом *MUSTANG*

В настоящей инструкции приводится описание функций и сервисных возможностей комплекса версии *Mustang 5.0* (2002 г.), работающего в операционной системе Windows2000/WindowsXP. Отличительной особенностью всех версий комплекса является возможность как выполнения расчетов установившихся режимов, так и решения задач динамической устойчивости энергосистем. В данном документе кратко рассматривается использование комплекса только для расчета установившихся режимов.

Информация о параметрах расчетной схемы помещается в оперативную память компьютера в форме таблиц *Узлы*, *Ветви*. Хранение исходных и расчетных параметров производится в единой базе данных. Файлы расчетных режимов имеют обозначение *\*.SSP* – *Пример 2. SSP* и т. д. – и помещаются в папку *Mustang.win\Nabori\*.

При подготовке и выполнении расчетов имеется возможность проведения коммутаций (включение/отключение элементов схемы). Для взаимодействия с другими программами возможно выполнение операций импорта-экспорта данных в специализированных форматах (например – передача файла режима из комплекса *MUSTANG* в комплекс *RASTR* и наоборот).

Подробное описание функций и сервиса программ приведено в служебном файле *M2000.hlp*. Доступ к справочной системе возможен через главное меню комплекса.

### Подготовка исходных данных для расчета

Принципы представления электрической схемы в формате *MUSTANG* аналогичен принципам, используемым комплексом *RASTR*, и поясняется схемами замещения отдельных узла и ветви, показанных на рис. П1-П2. Ниже приводятся исходные данные и результаты расчета режима электрической сети по исходной схеме рис. П3 и соответствующей ей расчетной схеме рис. П4.

### Начало работы с комплексом *Mustang 5.0 (Mustang.win)*

Программы комплекса загружаются на выполнение исполняемым модулем *Mustang.win\Mustang.exe*. После запуска на экране открывается окно с главным меню комплекса (см. рисунок П20).

Для создания нового файла исходных данных (нового режима) следует вызвать диалоговое окно **Файлы>Сформировать и сохранить КОМПЛЕКТ файлов>Комплект файлов** (см. рис. П20).

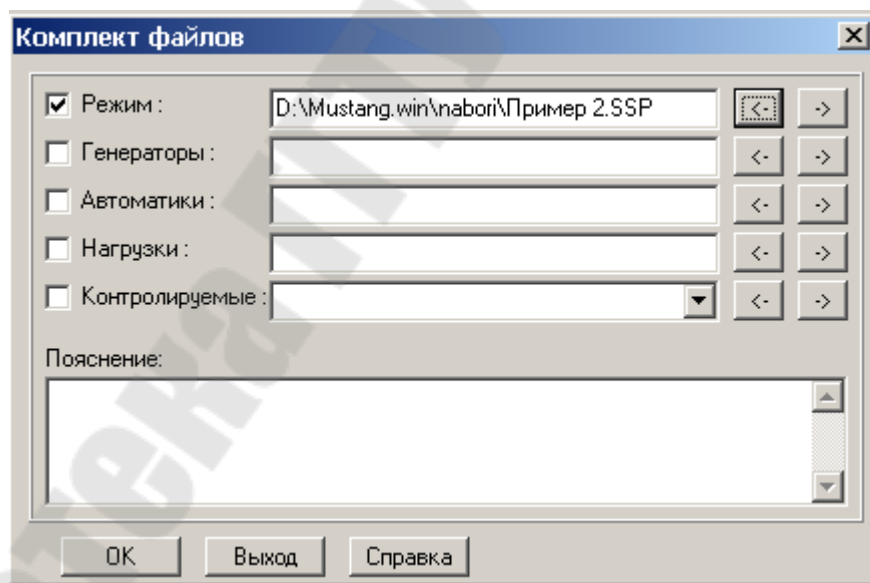


Рис. П.20. Главное меню программного комплекса *Mustang 5.0* и подменю расчета установившегося режима

После задания имени в оперативной памяти компьютера создается новый файл режима *Пример 2.SSP*. Для расчета установившегося режима достаточно создать файл *\*.SSP*, другие файлы исходных дан-



ных создаются для расчета переходных процессов. Для записи на диск необходимо выполнить команду **Файлы>Сохранить УР**.

Все пункты главного меню и выпадающих подменю с выполняемыми функциями подробно описаны в справочной системе *M2000.hlp*.

### Ввод исходных данных

Перед началом работы с данными следует создать файл, если данные вводятся впервые, либо загрузить с диска уже имеющийся файл данных: **Файлы>Читать УР**. Далее следует перейти к пункту меню **УР>Исходные данные. Результаты** (см. рис. П21).

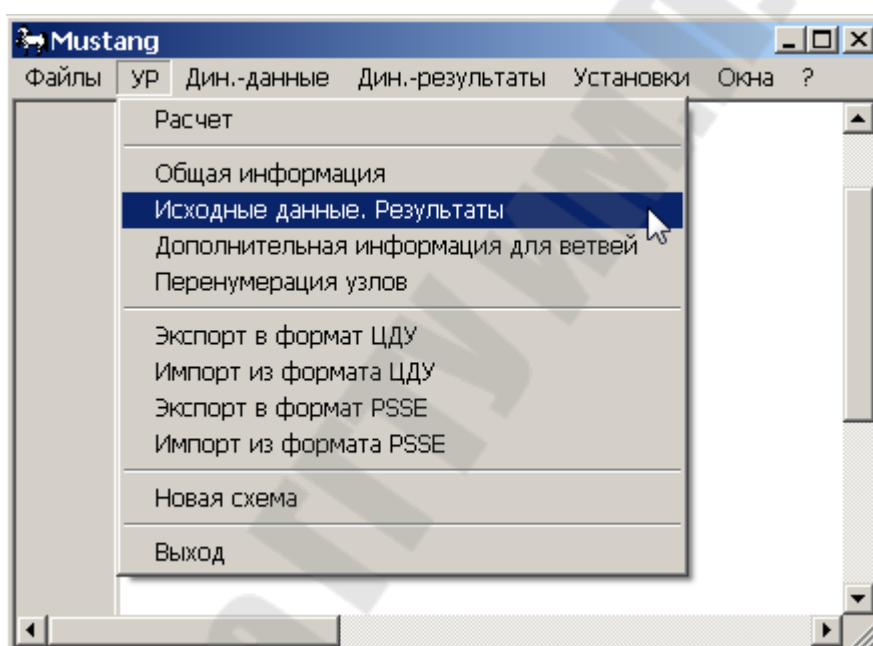


Рис. П.21. Главное меню комплекса и подменю расчета установившихся режимов

Заполненные таблицы с данными по узлам и ветвям расчетной схемы рис. П4 показано на рисунках П22-П23.

Имя	N	Род	Потреб.	Потр.	РГД	ОД	Потр.	Р <sub>г</sub>	Q <sub>г</sub>	У <sub>н</sub>	У <sub>с</sub>	Q <sub>н</sub>	Q <sub>с</sub>
Система	1	1100	234.00	234.00			220.00					200	300
ТЭЦ	2	1030	232.00	232.00	80.000	40.000	220.00	80.0				-60	80
Восточн.	3	11	220.00				220.00			0.9	6.0		
АТ	30	11	220.00				220.00						
СК	4	1030	11.20	11.20			10.00					-18	45
	5	11	115.00		45.000	21.000	110.00						
Северная	6	11	115.00				110.00			1.4	8.5		
	7	11	6.30		12.000	5.000	5.00						

Рис. П.22. Ввод исходных данных в формате таблицы **Узлы**

Name Ni	Name Nj	Ni	Nj	Np	DispName	Rij	Xij	Gij	Bij	КТа
Система	ТЭЦ	1	2		ВЛ456	5.900	21.750		-130.2	
ТЭЦ	Восточн.	2	3		ВЛ458	9.440	34.800		-208.3	
Система	Восточн.	1	3		ВЛ437	11.800	43.500		-260.4	
Восточн.	АТ	3	30		АТ1	1.400	104.10			
АТ		30	5			1.400	-11.80			1.9010
АТ	СК	30	4			2.800	195.60			20.9090
	Северная	5	6			6.100	10.680		-66.50	
Северная		6	7		Т2	4.380	86.700			18.0450

Рис. П.22. Ввод исходных данных в формате таблицы **Ветви**

## Расчет

Запуск процедуры расчета установившегося режима осуществляется командой **УР>Расчет**. Программа выполняет расчет путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений режима с использованием современных модификаций метода Ньютона и (при необходимости) стартового алгоритма по методу Зейделя.

Перед началом расчетов следует уточнить установленные константы и параметры, управляющие работой вычислительного алгоритма. Диалоговое окно констант открывается командой **УР>Общая**

**информация** (рекомендуемые значения параметров приведены на рис. П23).

Рис. П23. Константы и ограничения для вычислительного процесса

### Анализ результатов расчета

Формы для просмотра и анализа полученных результатов расчета представлены ниже. Интересующая пользователя табличная форма вызывается закладками **Результаты>Узлы** и т.д. На рис. П24-П25 приведены расчетные значения параметров режима по узлам и ветвям рассматриваемой схемы рис. П3-П4, на рис. П26 - сводные обобщенные параметры данного режима. Таблица рис. П27 характеризует ход итерационного вычислительного процесса. На рис. П28 дан пример графического представления результатов расчета сервисными средствами комплекса **Mustang 5**. В этом режиме существует возможность поэлементного рассмотрения объектов схемы с результатами расчета.

Описание расчетных приведено в справочной системе *M2000.hlp*.

Узлы	Ветви	Небалансы	Суммарные параметры				Пограничные связи				Заданные сечения и составляющие				Наборные с			
			Code	Qneb	Ucal	Angle	Pg	Qg	Qmin	Qmax	Code	Qneb	Ucal	Angle	Code	Qneb	Ucal	Angle
300	Система	1	1100		234.00			37.81	17.62									
70	ТЭЦ	2	1010	-0.0000	232.00	-0.10	80.00	11.88		-60	80							
	Восточн.	3	11	0.0011	230.88	-1.19												
	АТ	30	11	0.0024	222.99	-7.82												
-18	45	СК	4	1010	11.20	-7.86			13.39	-18	45							
			5	11	117.84	-7.01	80.00	11.88										
Ω	Северная	6	11	0.0033	116.67	-7.40												
		7	11	-0.0022	6.21	-11.87												

Рис. П24. Результаты расчета – таблица Узлы

Узлы	Ветви	Небалансы	Суммарные параметры				Пограничные связи				Заданные сечения и составляющие				PIT	PIT100%	PIT100%100%	
			Code	Qneb	Ucal	Angle	Pg	Qg	Qmin	Qmax	Code	Qneb	Ucal	Angle				Code
Система	ТЭЦ	1	3	1100	234.00	37.81	17.62	-200	300									
ТЭЦ	Восточн.	2	3	1010	232.00	80.00	11.88	-60	80									
Система	Восточн.	1	3	1100	230.88	37.81	17.62	-200	300									
Восточн.	АТ	3	30	11	222.99	37.81	17.62	-200	300									
АТ	70	1	3	1010	232.00	80.00	11.88	-60	80									
АТ	СК	30	4	1010	11.20	-7.86			13.39	-18	45							
Северная	Северная	5	5	11	117.84	-7.01	80.00	11.88										
Северная		6	7	11	116.67	-7.40												

Рис. П25. Результаты расчета – таблица Ветви

Узлы	Ветви	Небалансы	Суммарные параметры				Пограничные связи				Заданные сечения и составляющие							
			Code	Qneb	Ucal	Angle	Pg	Qg	Qmin	Qmax	Code	Qneb	Ucal	Angle	Code	Qneb	Ucal	Angle
70	Северная	5	11	117.84	-7.01	80.00	11.88											

Рис. П26. Результаты расчета – таблица Суммарные параметры

Узлы	Ветви	Небалансы	Суммарные параметры				Пограничные связи				Заданные сечения и составляющие							
Name	N	Code	Pneb	Qneb	Ucal	Angle	Pg	Qg	Qmin	Qmax	Code	Qneb	Ucal	Angle	Code	Qneb	Ucal	Angle
Система	1	1100			234.00		37.81	17.62	-200	300								
ТЭЦ	2	1010	-0.0000		232.00	-0.10	80.00	11.88	-60	80								
Восточн.	3	11	0.0011	-0.0001	230.88	-1.19												
СК	4	1010	-0.0000		11.20	-7.86			13.39	-18	45							
	5	11	-0.0052	-0.0001	117.84	-7.01	80.00	11.88										
Северная	6	11	0.0033	-0.0020	116.67	-7.40												
	7	11	-0.0022	-0.0036	6.21	-11.87												
АТ	30	11	0.0024	-0.0009	222.99	-7.82												

Рис. П27. Результаты расчета – таблица Небалансы

УР. Исходные данные. Результаты

"Дерево" Шрифт Поиск узлов Сохранить

Исходные данные Результаты Кусты узлов

Восточн. 3 Code = 11 Ustart = 220.0 Ucal = 230.9 Ps = 0 Qs = 0 PNEB = 0.0011 QNEB = -0.0001	$57 + j20$	АТ1	$-57 - j13$	АТ	30
	0.152		0.152		223.0
	$-28 - j16$	ВЛ437	$28 + j2$	Система 1	
	0.081	-j14	0.070		234.0
	$-29 - j5$	ВЛ458	$29 - j6$	ТЭЦ	2
	0.074	-j11	0.075		232.0

Рис. П28. Графическое представление результатов

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – Ростов-на-Дону: Феникс, Красноярск: Издательские проекты, 2006.
2. Поспелов Г.Е., Федин В.Т., Лычев П.В. Электрические системы и сети. – Минск: Технопринт, 2004.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – Москва: Энергоатомиздат, 1989.
4. Лычев П.В., Федин В.Т. Электрические системы и сети. Решение практических задач. – Минск: Дизайн ПРО. 1997.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.А. Файбисовича. – Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2005.
6. Фадеева Г.А., Федин В.Т., Шиманская Т.А. Установившиеся режимы электрических систем и сетей. Лабораторные работы. – Минск: Технопринт, 2000.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общая информация .....	3
Лабораторная работа №1. Расчет и анализ установившихся режимов разомкнутой электрической сети одного номинального напряжения .....	4
Лабораторная работа №2. Расчет и анализ установившихся режимов замкнутой электрической сети одного номинального напряжения .....	10
Лабораторная работа №3. Расчет и анализ послеаварийных режимов электрической сети. Регулирование напряжения изменением коэффициента трансформации трансформаторов .....	16
Лабораторная работа №4. Исследование влияния компенсирующих устройств на параметры режима электрической сети .....	20
Приложение. Инструкция по использованию программных комплексов RASTR, MUSTANG расчета установившихся режимов электрических сетей .....	24
Литература .....	45

**Головач Ольга Михайловна  
Головач Юрий Дмитриевич**

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ  
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

**Лабораторный практикум  
по дисциплине «Передача и распределение  
электрической энергии» для студентов  
специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 20.09.10.

Рег. № 25Е.  
E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)  
<http://www.gstu.by>