

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

11/19/2

Одобрено кафедрой  
«Энергоснабжение электрических  
железных дорог»

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями  
для студентов V курса

специальности

101800 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва - 2004

Составитель: канд. техн. наук, доц. М.Ю. СУХОВ  
Рецензент: доцент Ю.Н. МИРОНОВ

## **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Теоретические основы управления» изучает пути и методы управления режимом работы электрических сетей для наиболее эффективного использования оборудования системы электроснабжения железнодорожного транспорта.

Нормальный режим работы устройств обеспечивается комплексом организационных, технических, экономических мероприятий, осуществляющих поддержание оборудования системы электроснабжения в работоспособном состоянии при рациональных затратах материальных и трудовых ресурсов с учетом имеющихся ограничений.

Цель контрольной работы — ознакомить студентов с некоторыми методами расчета установившихся режимов замкнутых сетей и дать практические навыки матричного расчета сложно-замкнутой сети: определения токов в ветвях и напряжений в узлах сети.

В контрольной работе рассматривается расчет токов в ветвях сети с помощью метода контурных токов и расчет напряжения в узлах сети с помощью метода узловых потенциалов, расчет установившихся режимов замкнутой сети.

Контрольная работа состоит из двух задач с кратким изложением теоретического материала и пояснениями.

В помощь студенту дается обширный список технической и учебной литературы. Наиболее полно теоретический материал изложен в [1–3].

## **ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ**

### **Задача 1. Матричный расчет токов и напряжений электрической сети**

1. Рассчитать токи в ветвях сети.
2. Рассчитать напряжение в узлах сети.

Исходные данные необходимо принять по рис. 1, 2 и табл. 1 в соответствии с учебным шифром студента.

Таблица 1

**Сопротивление, источники ЭДС и тока ветвей**

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1, \text{ Ом}$	6	10	3	7	2	4	8	5	9	1
$R_2, \text{ Ом}$	2	4	8	5	3	10	1	9	7	6
$R_3, \text{ Ом}$	1	9	2	10	7	3	6	8	5	4
$R_4, \text{ Ом}$	5	7	4	8	10	1	3	2	6	9
$R_5, \text{ Ом}$	4	3	7	2	8	5	9	10	1	6
$R_6, \text{ Ом}$	3	1	5	4	6	9	2	8	10	7
$E_6, \text{ кВ}$	9,9	10,5	9,6	10,8	11,7	9,3	9	10,2	11,4	11,1
$I_6, \text{ кА}$	3,3	3,5	3,2	3,6	3,9	3,1	3	3,4	3,8	3,7

**Задача 2. Расчет установившегося режима в замкнутой сети**

1. Определить напряжение в узлах сети.
  2. Показать ход итерационного процесса расчета режима сети.
- Исходные данные необходимо принять по рис. 3 и табл. 2.

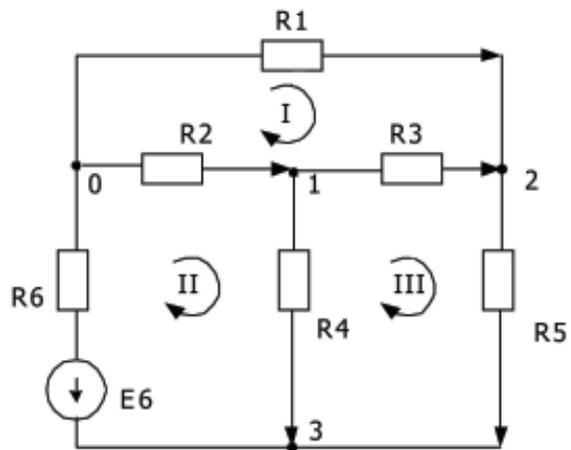


Рис. 1. Схема для расчета по методу контурных токов

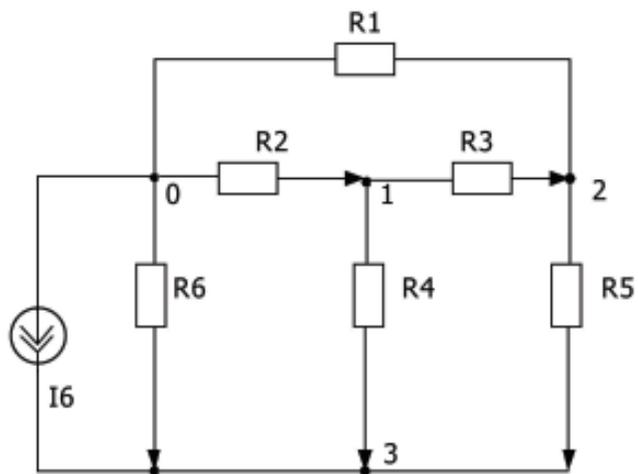


Рис. 2. Схема для расчета по методу узловых потенциалов

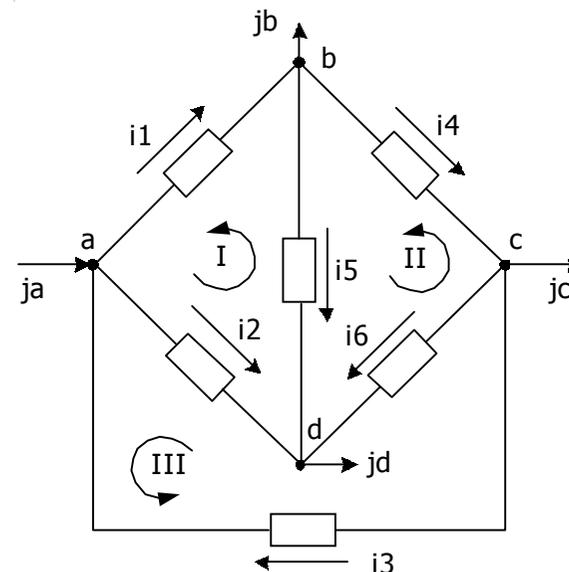


Рис. 3. Схема замещения многоконтурной электрической сети

Таблица 2

**Сопротивления ветвей, начальное напряжение  
и нагрузки узлов**

Показатели	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R$ , Ом	20	40	30	25	50	15	35	5	45	10
$U_0$ , кВ	125	105	115	110	120	145	130	140	135	150
$P_{b1}$ , МВт	15	10	5	30	40	20	45	25	15	35
$P_{c1}$ , МВт	35	22	12	45	55	34	62	38	27	57
$P_{d1}$ , МВт	50	36	25	55	70	65	80	68	63	75

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### ЗАДАЧА 1

Электрическая сеть представляет собой объект, который в электротехнике относят к категории электрических цепей, а для его управления необходим расчет режима электрической сети с помощью основных законов электрической цепи — законов Ома и Кирхгофа.

Наиболее распространенной задачей в электротехнике, требующей вычислений на ЭВМ, является расчет линейных электрических цепей.

Проектирование, изготовление и эксплуатация электрических цепей требует проведения расчета и анализа стационарных режимов их работы, что зачастую сводится к расчету цепей с линейными элементами. Однако и исследование переходных процессов в электрических устройствах и системах требует знания характеристик установившихся режимов, которые в этом случае выступают как исходные данные для расчета динамических параметров и анализа протекающих во времени процессов. С этой целью применяется эквивалентирование системы (представление ее многополюсником) линейной электрической схемой с комплексными сопротивлениями и источниками ЭДС. Полученная схема замещения рассчитывается по известным методам, и находятся проводимости и сопротивления, токи и мощности, протекающие через узлы схемы, и т.п. Анализ поведения цепи в частотной области также может быть сведен в ряде слу-

чаев к расчету линейных схем. А линеаризация и кусочно-линейная аппроксимация характеристик нелинейных элементов (применяющийся при различных расчетах) еще более расширяют область использования подобных вычислений.

Задача управления состоянием электрической цепи формируется так. Заданы конфигурация сети (ее топология); сопротивления схемы замещения ее ветвей; нагрузки узлов в виде токов. Требуется найти напряжение в узлах сети, прежде всего в узлах с нагрузками. Вначале определяются токи в ее ветвях и затем напряжение в узлах.

Для расчета токов в ветвях используют метод контурных токов (КТ). Метод КТ основан на втором законе Кирхгофа (законе напряжений) для независимых контуров. В предположении, что цепь не содержит источников тока или последние заменены эквивалентными источниками ЭДС, он записывается в виде матричного соотношения

$$(SRS^T)X = SU, \quad (1)$$

где  $S$  — матрица контуров (матрица инцидентий), описывающая связь с контурами;

$R$  — диагональная матрица сопротивлений ветвей;

$S^T$  — транспонированная матрица  $S$ ;

$X$  — вектор контурных токов;

$U$  — вектор источников ЭДС ветвей.

Из (1) можно найти неизвестные токи в контурах, а по ним — токи в ветвях. При условии, что элементы матрицы  $R$  не зависят от токов, выражение (1) представляет собой систему линейных уравнений. Введем обозначение для матрицы коэффициентов системы

$$A = SRS^T \quad (2)$$

и столбца свободных членов (вектора ЭДС контуров)

$$C = SU. \quad (3)$$

Тогда с учетом этих обозначений (1) запишется в виде

$$AX = C. \quad (4)$$

Его решение имеет вид

$$X = A^{-1}C. \quad (5)$$

Для получения токов в ветвях (вектор  $Z$ ) достаточно умножить  $X$  слева на транспонированную матрицу инцидентий (матрицу контуров):

$$Z = S^T X. \quad (6)$$

Важное значение имеет методика составления матрицы инцидентий, рассмотрение которой проведем на примере схемы, приведенной в задании на контрольную работу (см. рис. 1).

Вначале следует выбрать положительные направления токов в ветвях, выделить независимые контуры и установить направления их обхода (заданы положительные направления контурных токов). На схеме принятые направления изображены стрелками. Матрица инцидентий заполняется по следующему правилу: каждый ее элемент  $S_{ij}$ , соответствующий  $i$ -й строке ( $i$ -му контуру) и  $j$ -му столбцу ( $j$ -й ветви), равен:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если } j\text{-я ветвь не входит в } i\text{-й контур;} \\ 1, & \text{если направление тока в ветви совпадает с направлением тока в контуре;} \\ -1, & \text{если эти токи противоположны.} \end{cases}$$

Пользуясь этим правилом, составим матрицу инцидентий (табл. 3).

Таблица 3

**Матрица инцидентий**

№ контура	№ ветви					
	1	2	3	4	5	6
I	1	-1	-1	0	0	0
II	0	1	0	1	0	-1
III	0	0	1	-1	1	0

Вторая строка ее, например, отражает тот факт, что во второй контур не входят ветви 1, 3, 5, ток в ветвях 2 и 4 совпадает с принятым направлением контурного тока, а в шестой ветви имеет противоположное направление.

Следующим шагом является подготовка диагональной матрицы — матрицы сопротивления ветвей. В нашем случае она имеет размерность  $6 \times 6$ , ее диагональные элементы равны сопротивлениям ветвей.

Необходимо также задать компоненты вектора ЭДС ветвей.

Для расчета напряжений в узлах используют метод узловых потенциалов (УП), который применяется при расчетах электрических цепей. Одной из причин, способствовавших распространению этого метода, является то, что матрица инцидентий имеет очень простой вид. Она задает связь узлов и ветвей цепи и тем самым непосредственно описывает ее топологию.

Как известно, метод УП основан на первом законе Кирхгофа. В предположении, что имеющиеся в цепи источники ЭДС заменены источниками тока, применение метода сводится к составлению и последующему решению уравнения

$$(SRS^T)X = SU, \quad (7)$$

где  $S$  — матрица инцидентий;

$R$  — диагональная матрица проводимостей ветвей;

$S^T$  — транспонированная матрица  $S$ ;

$X$  — вектор напряжений в узлах;

$U$  — вектор источников токов в ветвях.

Решение (7) имеет вид

$$X = (SRS^T)^{-1}SU. \quad (8)$$

Особенность в подготовке к вычислениям по методу УП состоит в выделении базисного узла (называемого также нулевым узлом), в котором потенциал условно принимается равным 0. Получаемые по данному методу значения потенциалов определены относительно потенциала базисного узла. Истинные значения всех потенциалов можно получить простым пересчетом в случае, когда известен потенциал одного из узлов.

При нумерации базисному узлу целесообразно присвоить нулевой номер, так как это существенно упростит в дальнейшем подготовку системы линейных уравнений.

После выбора направлений токов приступим к построению матрицы инцидентий, которая дает связь между узлами схемы

(базисный узел в нее не включается) и условно выбранными направлениями токов в ветвях и составляется по следующему правилу:

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{если ветвь не примыкает к узлу;} \\ 1, & \text{если ветвь примыкает к узлу } i, \text{ и ток направлен в сторону узла;} \\ -1, & \text{если ветвь примыкает к узлу } j, \text{ и ток направлен от узла.} \end{cases}$$

Пользуясь этим правилом, составим матрицу инцидентий (табл. 4).

Таблица 4

**Матрица инцидентий**

№ контура	№ ветви					
	1	2	3	4	5	6
I	0	1	-1	-1	0	0
II	1	0	1	0	-1	0
III	0	0	0	1	1	0

Следующим шагом является подготовка диагональной матрицы — матрицы проводимости ветвей. В нашем случае она имеет размерность 6×6, ее диагональные элементы равны проводимостям ветвей.

Необходимо также задать компоненты вектора источников тока в ветвях.

## ЗАДАЧА 2

Режим напряжений в узлах электрической сети получают в результате расчета установившегося режима. Расчеты установившихся режимов при управлении и развитии электрической сети составляют существенную часть общего объема исследований электроэнергетических систем, выполняемых и на стадии проектирования, и в процессе эксплуатации. Эти расчеты необходимы при определении наиболее экономичных режимов ее работы, при анализе устойчивости системы, при выборе конфигурации схемы сети и параметров ее элементов. Они имеют и большое самостоятельное значение, поскольку отвечают на ряд практически важных вопросов:

- осуществим ли данный режим, т.е. возможна ли передача требуемой мощности от электростанций к потребителям;
- не превышают ли допустимые значения токи в отдельных линиях в послеаварийных режимах, т.е. в случаях, когда некоторые линии отключены;
- не выходят ли за допустимые пределы напряжения в узловых точках сети.

Для выполнения расчета установившегося режима необходима информация о конфигурации и параметрах элементов сети (площадь сечения и длина линий, мощности трансформаторов и др.), о нагрузках потребителей и об электростанциях. Электрическая сеть представляется схемой замещения, конфигурация и параметры которой отображаются матрицей узловых проводимостей  $Y_y$ .

Исходными данными о нагрузках обычно служат значения потребляемых активных и реактивных мощностей  $S_i = P_i + jQ_i$ , которые чаще всего принимают постоянными, не зависящими от напряжения в точках подключения потребителей к сети. Исходными данными об электростанциях служат выдаваемые генераторами активные и реактивные мощности. Для электростанции, выполняющей функции балансирующего узла в сети, задается значение напряжения  $U_0 = \text{const}$ .

Расчет режима сети сводится к решению системы нелинейных уравнений (из-за нелинейной зависимости тока нагрузок от мощности и напряжения).

$$\underline{S}_y = \sqrt{3} U_0 \underline{J}; \quad (9)$$

$$\underline{Y}_y U_0 = \sqrt{3} \underline{J}. \quad (10)$$

Система нелинейных (9) и линейных (10) уравнений при заданных мощностях узлов может быть решена только итерационным путем. Наиболее просто это сделать так:

- для всех узлов задать одно и то же начальное напряжение  $U_0$ ;

- по значению  $\dot{U}_0$  и заданным мощностям  $\underline{S}_y$ , определить согласно уравнению (9) задающие токи  $\dot{J}^{(1)}$ ;
- решить систему уравнений (10) при токах  $\dot{J}^{(1)}$  и определить в первом приближении напряжения  $U^{(1)}$  в узлах;
- по значениям  $U^{(1)}$  уточнить токи  $\dot{J}^{(2)}$  и выполнить следующий шаг итерации.

Ход итерационного процесса показан на рис. 4.

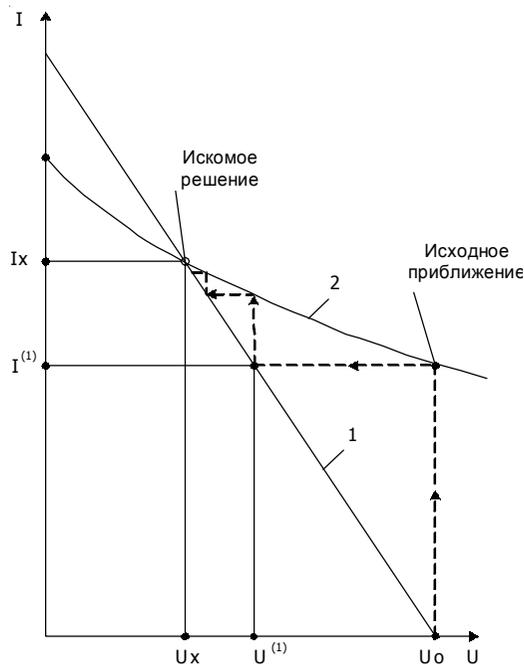


Рис. 4. Итерационный расчет напряжения

Таким образом, на каждом шаге решается система линейных уравнений (10). Вычислительная эффективность расчета установившихся режимов работы сети определяется тем, насколько рационально решаются такие системы уравнений. Поэтому при решении систем линейных уравнений необходимо использовать

метод последовательного исключения неизвестных, так называемый метод Гаусса. Это наиболее рациональный метод расчета, позволяющий максимально использовать свойство малой заполненности матрицы  $\underline{Y}_y$ . Он состоит в поочередном исключении неизвестных до тех пор, пока не останется одно уравнение с одним неизвестным. Решая его, начинают расчет в обратной последовательности для определения остальных неизвестных [1].

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. — М.: Транспорт, 1988. — 326 с.
2. Баринов В.А., Савалов С.А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 440 с.
3. Электрические системы. Автоматизированные системы управления режимами энергосистем: Учебник для вузов/ В.А.Багданов, В.А.Веников, Я.Н.Лугинский, Г.А.Черня; Под ред. В.А. Веникова. — М.: Высшая школа, 1979. — 447 с.
4. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 216 с.
5. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учеб. для электротехн. и радиотехн. спец. вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1990. — 400 с.
6. Герман Л.А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения: Конспект лекций. — Ч. I. — М.: РГОТУПС, 1998.
7. Герман Л.А., Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения: Конспект лекций. — Ч. II. — М.: РГОТУПС, 2000.
8. Дьяконов В.П. Mathcad 2001: специальный справочник. — СПб.: Питер, 2002. — 832 с.
9. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Задание на контрольную работу  
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

---

Тип. зак.	Изд. зак. 208	Тираж 500 экз.
Подписано в печать 27.04.04	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 1,0		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПСа, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2