

## 1. Введение.

В современных условиях расчет установившихся режимов электроэнергетической системы является наиболее часто решаемой задачей. При проектировании ЭЭС расчет установившихся режимов осуществляется с целью выбора и уточнения параметров проектируемой системы.

В процессе эксплуатации подобные расчеты позволяют оперативно управлять и прогнозировать работу ЭЭС. При этом осуществляется оценка допустимости режима по условиям обеспечения нормальной работы оборудования и определение режимов, оптимальных по технико-экономическим критериям.

Задача расчета установившихся режимов ЭЭС сводится к определению совокупности параметров, характеризующих работу системы: напряжений в различных точках системы, токов в её элементах, потоков мощности и потерь мощности и т.д.

Проведение расчета связано с рядом основных этапов:

1. предварительные преобразования и переход к расчетной схеме электрической системы;
2. формирование уравнения состояния по известным исходным данным с учетом структуры расчетной схемы;
3. выбор метода расчета и составление алгоритма и программы на ЭВМ;
4. проведение расчета установившегося режима на ЭВМ;
5. анализ точности полученных результатов.
6. выводы.

## 2. Исходные данные для выполнения курсовой работы

№ вар.	Варианты схе мы	Сопротивления ветвей							Задающие токи				
		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	J1	J2	J3	J4	J5
1	1	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,3	0,5	3	4	5	6	8
2	2	0,1	0,5	0,7	0,3	0,6	0,4	0,3	4	5	6	5	8
3	3	0,3	0,4	0,8	0,9	0,5	0,7	0,6	3	4	5	7	3
4	4	0,2	0,5	0,7	0,9	0,5	0,7	0,3	3	2	5	7	3
5	5	0,2	0,4	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	2	3	6	8	4
6	1	0,5	0,3	0,6	0,4	0,9	0,7	0,8	3	5	4	8	6
7	2	0,2	0,3	0,4	0,8	0,3	0,5	0,8	8	3	4	6	5
8	3	0,3	0,5	0,4	0,5	0,6	0,9	0,8	3	8	6	4	9
9	4	0,1	0,5	0,3	0,5	0,4	0,1	0,2	2	4	3	5	5
10	5	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	0,2	0,3	3	5	4	5	6

Сопротивления ветвей  $Z_i$  измеряются в Ом, а задающие токи  $J_i$  – в кА.

Исходные параметры генератора, подключенного к узлам 4 расчетных схем, и параметры системы одинаковы для всех вариантов. Расчет проводить в относительных единицах.

Базисные величины:  $U_B = U_{Г\text{ ном}} = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $S_B = S_{Г\text{ ном}} = 7 \text{ Мва}$ .

Параметры генератора и системы:

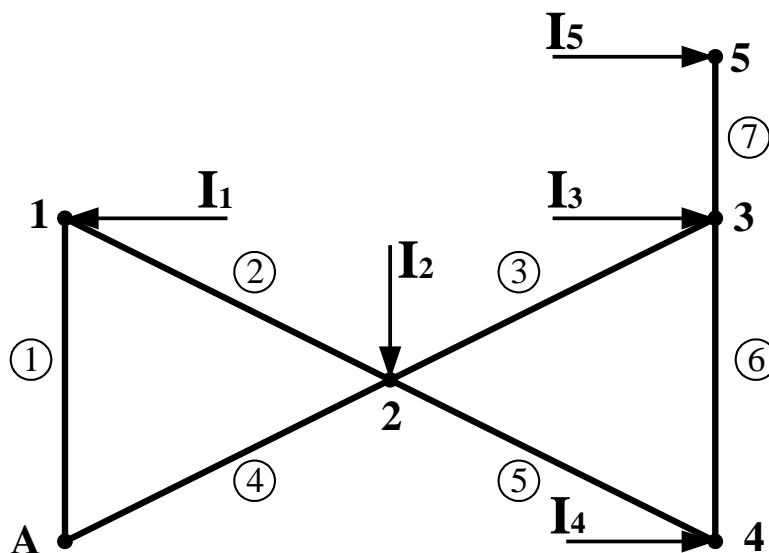
$E_g = 1.07$ ;  $U_c = 1$ ;  $P_d = 60$ ;  $T_j = 14 \text{ с}$ .

Угол  $\theta$  между осью вращающегося магнитного поля обмотки статора и продольной осью ротора в генераторе для различных вариантов задаются таблицей:

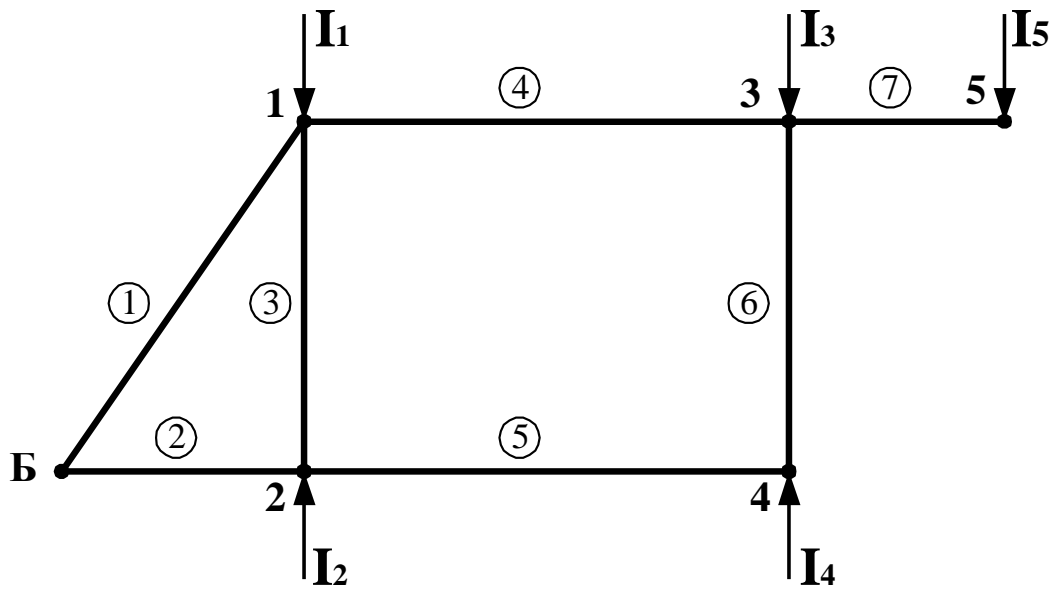
№ варианта	Угол $\theta$	№ варианта	Угол $\theta$
1	$\pi/6$	6	$\pi/4$
2	$\pi/3$	7	$\pi/6$
3	$\pi/4$	8	$\pi/3$
4	$\pi/6$	9	$\pi/4$
5	$\pi/3$	10	$\pi/6$

### 3. Варианты расчетных схем.

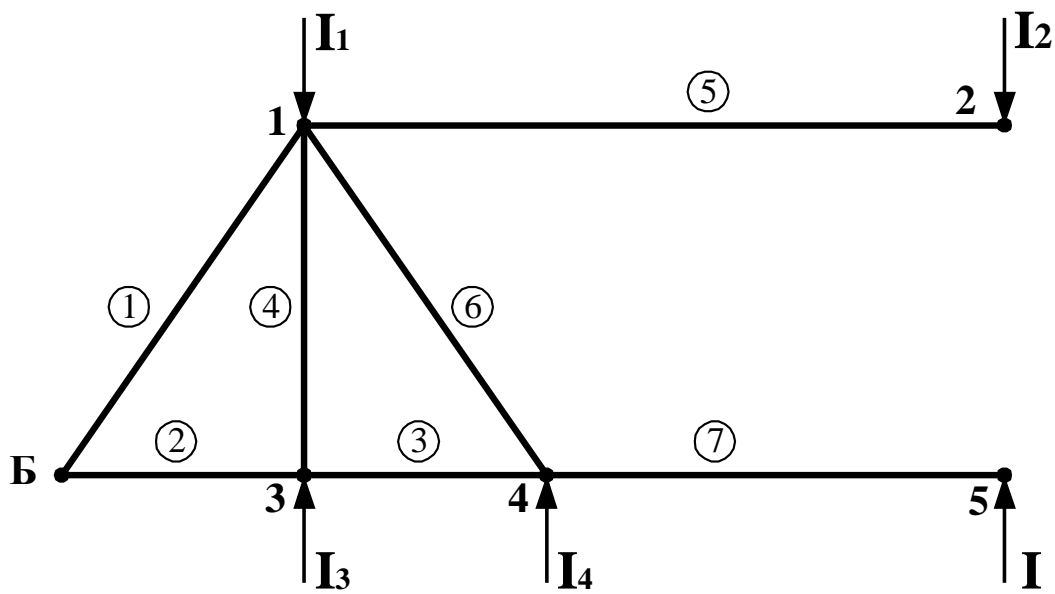
#### Вариант 1



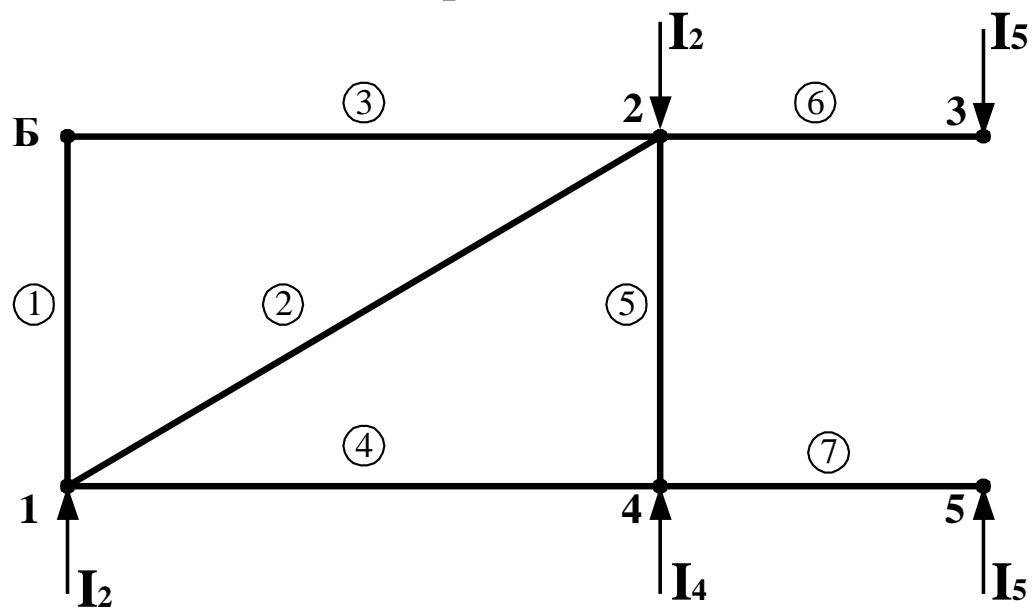
## Вариант 2



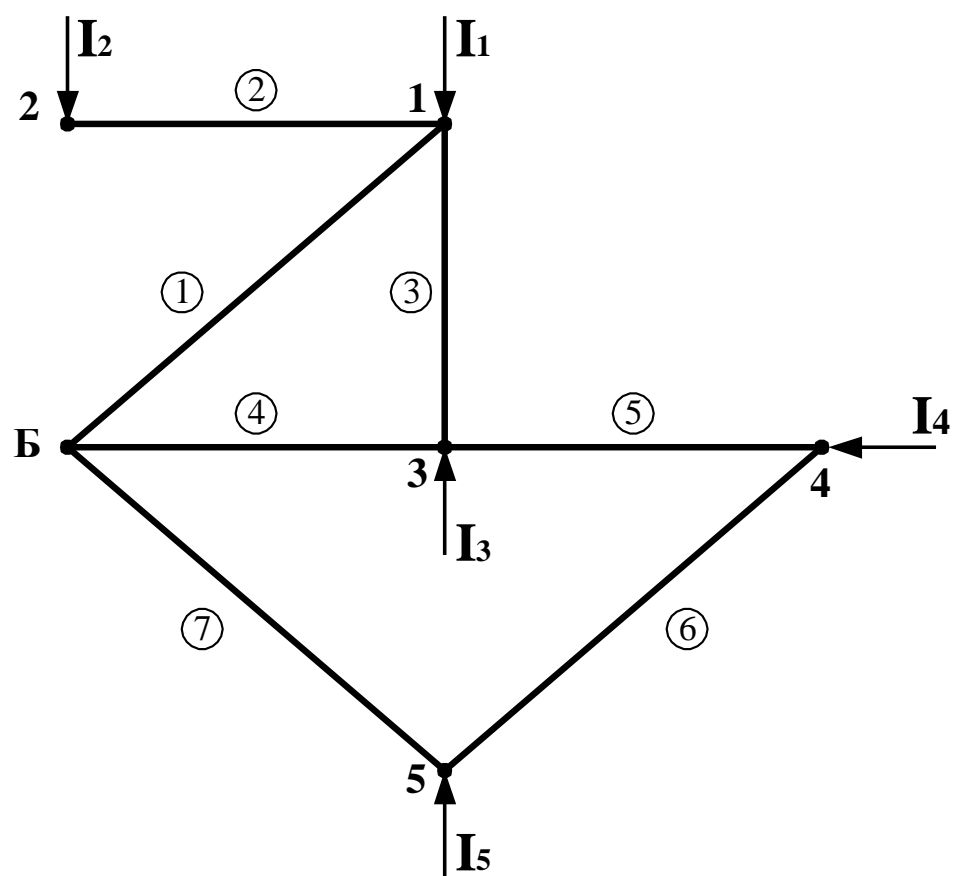
## Вариант 3



Вариант 4



Вариант 5



Направление ветвей и независимых контуров могут быть заданы произвольно самим студентом.

#### **4. Содержание заданий.**

Пояснительная записка к курсовой работе включает в себя результаты выполнения следующих заданий:

##### **Задание 1.**

Используя расчетную схему и исходные данные для ручного счета, произвести следующие действия:

- составить матрицы инцидентий  $M$  и  $N$ ;
- записать матрицы режимных параметров:
  - а)  $J$ ,  $Z_B$ ,  $Y_B$ ;
  - б)  $U_\Delta$ ,  $U_B$  в общем виде
  - в) предположить наличие ЭДС в ветвях 2,5 ( $E_{B2}$ ,  $E_{B5}$ ), записать матрицы  $E_B$ ,  $E_K$ .

##### **Задание 2.**

Используя вариант расчетной схемы и исходные данные записать 1 и 2 законы Кирхгофа в матричной форме и в виде системы уравнений.

##### **Задание 3.**

Для расчетной схемы записать в матричной форме обобщенное уравнение состояния. Перейти к системе алгебраических уравнений относительно неизвестных токов в ветвях.

##### **Задание 4.**

1. Для расчетной схемы Вашего варианта вычислите матрицу узловых проводимостей  $Y_y$ .
2. Составьте матрицу  $Y_y$  без перемножения матриц с учетом физического смысла её элементов. Сравните полученный результат с матрицей  $Y_y$ , вычисленной в п.1.
3. Записать уравнение узловых напряжений в матричной форме и в виде системы уравнений.

##### **Задание 5.**

Предположив наличие ЭДС в ветвях 2,5 расчетной схемы  $E_{B2} = 100$ ,  $E_{B5} = 300$ , записать уравнение контурных токов в матричной форме и в виде системы уравнений.

##### **Задание 6.**

1. Используя систему уравнений узловых напряжений, полученную в задании 4, рассчитать значение узловых напряжений методом Гаусса.
2. Проанализировать точность результатов расчета.

**Задание 7.**

1. Используя систему уравнений узловых напряжений (задание 4), рассчитать значения напряжений в узлах расчетной схемы методом Зейделя (провести 3 итерации).
2. Проанализировать сходимость итерационного процесса.

**Задание 8.**

На основе расчетной схемы с учетом постановки задачи раздела 3.2. и исходных данных о параметрах генератора, который подключен к 4-му узлу, определить устойчивость системы по корням характеристического уравнения.

**Задание 9.**

Для расчетной схемы задания 8 записать характеристическое уравнение с учетом переходных процессов в обмотке возбуждения. Проанализировать устойчивость системы по критерию Гурвица.

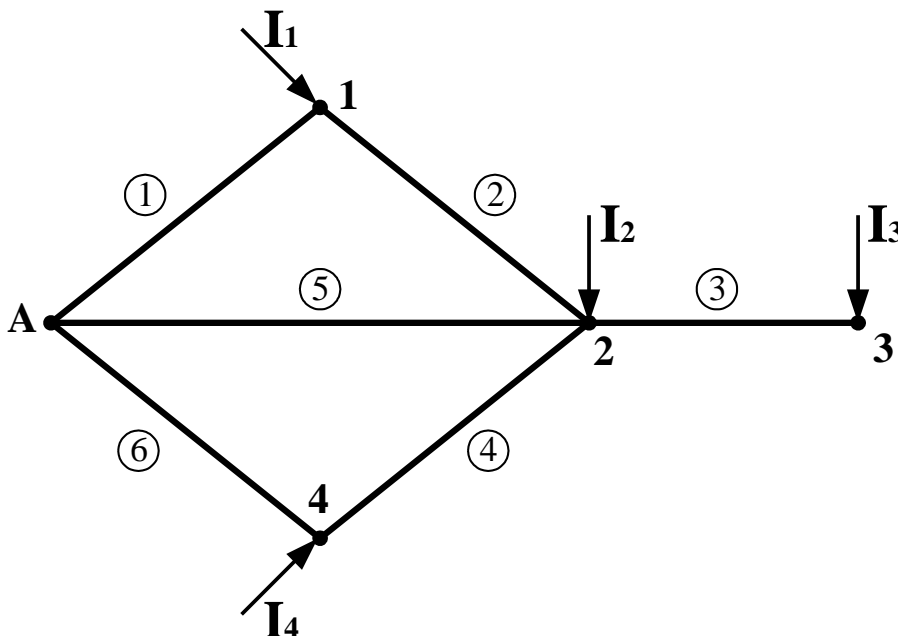
**Задание 10.**

Проанализировать устойчивость системы (задание 9) по критерию Михайлова. Построить кривую Михайлова.

### 5. Пример использования метода Гаусса для решения уравнений узловых напряжений электроэнергетической системы.

**Условие задачи:** Для заданной расчетной схемы составить систему уравнений узловых напряжений. Рассчитать значение напряжений в узлах схемы с использованием метода Гаусса.

Исходные данные:



$Z_1 = 0,1; Z_2 = 0,2; Z_3 = 0,4; Z_4 = 0,5; Z_5 = 0,4; Z_6 = 0,1.$

$I_1 = -10; I_2 = -20; I_3 = -40; I_4 = -20.$  Все узлы – нагрузочные.

1. Составить матрицу проводимостей ветвей.

$$Y_B = Z_B^{-1} = \begin{bmatrix} 1/Z_1 & & & & & \\ & 1/Z_2 & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & 1/Z_6 & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & & & & & \\ & 5 & & & & \\ & & 2,5 & & & \\ & & & 2 & & \\ & & & & 2,5 & \\ & & & & & 10 \end{bmatrix}$$

2. Далее получим матрицу узловых проводимостей:

$$Y_y = M Y_B M_t = \begin{bmatrix} 15 & -5 & 0 & 0 \\ -5 & 12 & -2,5 & -2 \\ 0 & -2,5 & 2,5 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 12 \end{bmatrix}$$

3. Составим систему уравнений узловых напряжений на основе матричного уравнения:  $Y_y \cdot U_\Delta = I$

$$\begin{cases} 15U_{\Delta 1} - 5U_{\Delta 2} = -10 \\ -5U_{\Delta 1} + 12U_{\Delta 2} - 2,5U_{\Delta 3} - 2U_{\Delta 4} = -20 \\ -2,5U_{\Delta 2} + 2,5U_{\Delta 3} = -40 \\ -2U_{\Delta 2} + 12U_{\Delta 4} = -20 \end{cases} \quad (5.1.)$$

4. Решим систему уравнений узловых напряжений с использованием алгоритма метода Гаусса с обратным ходом.

Алгоритм включает в себя 2 этапа:

1. Прямой ход Гаусса: состоит из одинаковых шагов, связанных с формированием из матрицы коэффициентов  $Y_y$  верхней треугольной матрицы:

**1 шаг:** получим первое ключевое уравнение для чего разделим первое уравнение системы (5.1.) на диагональный элемент  $Y_{11} = 15$ . Для исключения  $U_{\Delta 1}$  из  $i$ -го уравнения мысленно помножим ключевое уравнение на коэффициент при  $U_{\Delta 1}$   $i$ -го уравнения, взятый с обратным знаком, а затем сложим ключевое и  $i$ -е уравнение:

$$\begin{cases} U_{\Delta 1} - 0,33U_{\Delta 2} = -0,67 \\ 10,35U_{\Delta 2} - 2,5U_{\Delta 3} - 2U_{\Delta 4} = -23,35 \\ -2,5U_{\Delta 2} + 2,5U_{\Delta 3} = -40 \\ -2U_{\Delta 2} + 12U_{\Delta 4} = -20 \end{cases} \quad (5.2.)$$

**2 шаг:** Получаем второе ключевое уравнение, для чего разделим второе уравнение (5.2.) на  $Y_{22} = 10,35$ . Исключим  $U_{\Delta 2}$  из

всех уравнений ниже ключевого. Запишем преобразованную систему уравнений, начиная с ключевого

$$\begin{cases} U_{\Delta 2} - 0,24U_{\Delta 3} - 0,193U_{\Delta 4} = -2,256 \\ 1,9U_{\Delta 3} - 0,48U_{\Delta 4} = -45,64 \\ -0,48U_{\Delta 3} + 11,62U_{\Delta 4} = -24,512 \end{cases} \quad (5.3.)$$

**3 шаг:** Получаем 3-е ключевое уравнение и исключаем  $U_{\Delta 3}$  из всех уравнений ниже ключевого. Система уравнений, начиная с 3-го ключевого, будет иметь вид:

$$\begin{cases} U_{\Delta 3} - 0,253U_{\Delta 4} = -24,02 \\ 11,49U_{\Delta 4} = -36,042 \end{cases} \quad (5.4.)$$

**4 шаг:** Получаем четвертое ключевое уравнение  $U_{\Delta 4} = -3,13$ .

В результате прямого хода Гаусса уравнение узловых напряжений приобретает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} 1 & -0,33 & 0 & 0 \\ & 1 & -0,24 & -0,193 \\ & & 1 & -0,253 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\Delta 1} \\ U_{\Delta 2} \\ U_{\Delta 3} \\ U_{\Delta 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,67 \\ -2,256 \\ -24,02 \\ -3,13 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

2. Обратный ход метода Гаусса:

$$U_{\Delta 4} = -3,13;$$

$$U_{\Delta 3} = -24,02 + 0,253U_{\Delta 4} = -24,81;$$

$$U_{\Delta 2} = -2,256 + 0,24U_{\Delta 3} + 0,193U_{\Delta 4} = -8,81;$$

$$U_{\Delta 1} = -0,67 + 0,33U_{\Delta 2} = -3,577$$

3. Третий этап расчета связан с анализом точности решения. Для этого рассчитываются невязки по исходной системе уравнений.

$$W_1 = |-10 - 15U_{\Delta 1} + 5U_{\Delta 2}| = |-10 - 15(-3,577) + 5(-8,81)| = 0,395;$$

$$W_2 = |-20 + 5U_{\Delta 1} - 12U_{\Delta 2} + 2,5U_{\Delta 3} + 2U_{\Delta 4}| = |-20 + 5(-3,577) - 12(-8,81) + 2,5(-24,81) + 2(-3,13)| = 0,45;$$

$$W_3 = |-40 + 2,5U_{\Delta 2} - 2,5U_{\Delta 3}| = |-40 + 2,5(-8,81) + 2,5(-24,81)| = 0;$$

$$W_4 = |-20 + 2U_{\Delta 2} - 12U_{\Delta 4}| = |-20 + 2(-8,81) - 12(-3,13)| = 0,06;$$

Суммарная невязка

$$W \sum_{i=1}^4 W_i = 0,905$$

определяет точность полученных знаний узловых напряжений.

## 6. Пример расчета уравнений узловых напряжений с использованием метода Зейделя.

**Условия задачи.** Для расчетной схемы и исходных данных приведенных в разделе 2.3. , рассчитать значения узловых напряжений с

использованием метода Зейделя (провести две итерации и сделать вывод о сходимости итерационного процесса), точность расчета  $E = 0,01$ .

Расчет итерационным методом Зейделя включает в себя следующие этапы:

1. Преобразуем исходную систему узловых напряжений (5.1.) к виду, удобному для итерационного процесса.

$$\begin{cases} U_{\Delta 1} = -0,67 + 0,33U_{\Delta 2}; \\ U_{\Delta 2} = -1,67 + 0,417U_{\Delta 1} + 0,21U_{\Delta 3} + 0,167U_{\Delta 4} \\ U_{\Delta 3} = -16 + U_{\Delta 2} \\ U_{\Delta 4} = -1,67 + 0,167U_{\Delta 2} \end{cases} \quad (6.1)$$

2. Зададимся начальным приближением узловых напряжений:

$$U_{\Delta 1}^{(0)} = -0,67;$$

$$U_{\Delta 2}^{(0)} = -1,67;$$

$$U_{\Delta 3}^{(0)} = -16;$$

$$U_{\Delta 4}^{(0)} = -1,67;$$

3. На первой итерации вычисляем значения первого приближения узловых напряжений  $U_{\Delta i}^{(1)}$ , осуществляя подстановку  $U_{\Delta i}^{(0)}$  в систему уравнений (6.1.):

$$U_{\Delta 1}^{(1)} = -0,67 + 0,33 U_{\Delta 2}^{(0)} = -1,22;$$

$$U_{\Delta 2}^{(1)} = -1,67 + 0,417 U_{\Delta 1}^{(1)} + 0,21 U_{\Delta 3}^{(0)} + 0,167 U_{\Delta 4}^{(0)} = -5,81;$$

$$U_{\Delta 3}^{(1)} = -16 + U_{\Delta 2}^{(1)} = -21,82;$$

$$U_{\Delta 4}^{(1)} = -1,67 + 0,167 U_{\Delta 2}^{(1)} = -2,64.$$

4. Рассчитываем невязки на первой итерации для проверки точности полученных результатов. Для этого подставим значения напряжений  $U_{\Delta i}^{(1)}$  в исходную систему (5.1.), тогда:

$$W_1^{(1)} = 20,75;$$

$$W_2^{(1)} = 16,21;$$

$$W_3^{(1)} = 0,025;$$

$$W_4^{(1)} = 0,06.$$

Суммируя найдем  $W \Sigma = 37,045$

Следовательно, точность расчета  $E = 0,01$  не достигнута  $W \Sigma > E$

5. На второй итерации произведем подстановку  $U_{\Delta i}^{(1)}$  в систему уравнений (6.1.), именно:

$$U_{\Delta 1}^{(2)} = -0,67 + 0,33 U_{\Delta 2}^{(1)} = -2,59;$$

$$U_{\Delta 2}^{(2)} = -1,67 + 0,417 U_{\Delta 1}^{(2)} + 0,21 U_{\Delta 3}^{(1)} + 0,167 U_{\Delta 4}^{(1)} = -7,77;$$

$$U_{\Delta 3}^{(2)} = -16 + U_{\Delta 2}^{(2)} = -23,77;$$

$$U_{\Delta 4}^{(2)} = -1,67 + 0,167 U_{\Delta 2}^{(2)} = -2,968;$$

6. Рассчитаем невязки на второй итерации

$$W_1^{(2)} = 10;$$

$$W_2^{(2)} = 5,07;$$

$$W_3^{(2)} = 0;$$

$$W_4^{(2)} = 0,07;$$

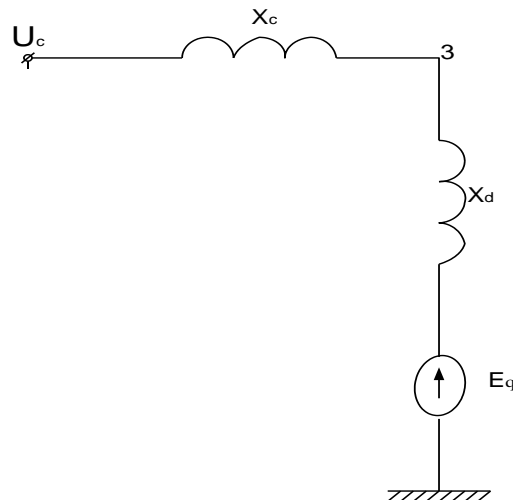
Тогда  $W\Sigma = 15,14 > E$ , следовательно, значения  $U_{\Delta i}^{(2)}$  еще не являются искомым решением системы уравнений узловых напряжений (6.1.). Однако, суммарная невязка на второй итерации  $W\Sigma^{(2)}$  значительно уменьшилась по сравнению с  $W\Sigma^{(1)}$ . Выполнение условия  $W\Sigma^{(2)} < W\Sigma^{(1)}$  свидетельствует о сходимости итерационного процесса.

## 7. Пример анализа статической устойчивости по корням характеристического уравнения электроэнергетической системы.

Установившийся режим работ ЭЭС предполагает непрерывное, стохастическое изменение во времени большого количества нагрузок. Это приводит к появлению на генераторах системы дополнительных малых моментов  $\Delta M$ , которые также стохастически увеличивают и уменьшают моменты, действующие на валах этих генераторов и смещающие их роторы на малые углы  $\Delta\delta$ .

Возникающие при этом переходные процессы могут быть описаны дифференциальными уравнениями относительно малых  $\Delta\delta$ . Порядок уравнений определяется сложностью рассматриваемой ЭЭС.

Рассмотрим простейший случай. Станция – шины бесконечной мощности. Проанализируем статистическую устойчивость системы согласно рисунку, представленному в п.5. При отсутствии нагрузки в узлах 1,2,4 q и подключения к узлу 3 синхронного неявнополюсного генератора. Для решения этой задачи целесообразно привести исходную расчетную



схему к эквивалентному виду:

Рис.1.

Если не учитывать переходные процессы в обмотке возбуждения генератора, но учесть демпфирующие моменты, дифференциальное уравнение относительно  $\Delta\delta$  имеет вид:

$$T_j \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\Delta\delta}{dt} + C_1 \Delta\delta = 0, \quad (7.1.)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции [4,6]

$P_d$  – коэффициент демпфирования

Коэффициент  $C_1$  уравнения (7.1.), определяется исходя из соотношения:

$$C_1 = \frac{E_q U_c}{X_{d\Sigma} \cos\delta}, \quad (7.2.)$$

где  $E_q$  – синхронная ЭДС,

$U_c$  – напряжение системы,

$\delta$  – угол между векторами  $E_q$  и  $U_c$

Значение  $X_{d\Sigma}$  определяется по формуле:

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_c,$$

$X_d$  – синхронное индуктивное сопротивление генератора по продольной оси,

$X_c$  – эквивалентное сопротивление системы.

Тогда характеристическое уравнение имеет вид:

$$T_j p^2 + P_d p + C_1 = 0 \quad (7.4)$$

Определив значение корней характеристического уравнения (7.4.), на основании теоремы Ляпунова будем судить об устойчивости электроэнергетической системы. Зададимся исходными параметрами генератора и системы.

Расчет будем вести в относительных единицах:

$$U_\delta = U_{\text{гном}} = 10,5 \text{ кВ}, \quad S_\delta = S_{\text{гном}} = 7,5 \text{ МВА}$$

$$E_q = 1,07, \quad U_c = 1, \quad P_d = 60, \quad \delta = \pi/3, \quad X_d = 1,7, \quad T_j = 14 \text{ с.}$$

Для определения коэффициента  $C_1$  по (7.2) необходимо рассчитать значение эквивалентного сопротивления системы  $X_c$ , которое соответствует диагональному элементу матрицы узловых сопротивлений  $Z_y$ :

$$X_c = Z_{y33}, \quad \text{так как генератор подключен к узлу 3.}$$

Матрица узловых сопротивлений  $Z_y$  обратно по отношению к матрице узловых проводимостей, поэтому выполняется соотношение

$$Y_y Z_y = E, \quad \text{где}$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ единичная матрица}$$

$$Z_y = \begin{bmatrix} Z_{11}Z_{12}Z_{13}Z_{14} \\ Z_{21}Z_{22}Z_{23}Z_{24} \\ Z_{31}Z_{32}Z_{33}Z_{34} \\ Z_{41}Z_{42}Z_{43}Z_{44} \end{bmatrix} \text{ матрица узловых сопротивлений для расчетной схемы}$$

Отсюда следует матричное уравнение для определения элементов третьего столбца  $Z_y$ , а следовательно  $Z_{y33}$

$$Y_y \begin{bmatrix} Z_{y31} \\ Z_{y32} \\ Z_{y33} \\ Z_{y34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.5.)$$

При решении системы уравнений воспользуемся уже имеющимся у нас результатами расчета узловых напряжений методом Гаусса по матричному уравнению  $Y_y U_\Delta = I$

Поскольку матрица коэффициентов  $Y_y$  одинакова, заменим вектор неизвестных  $U_{\Delta i}$  в (5.1) на  $Z_{yij}$ , а столбец свободных членов  $I$  на столбец единичной матрицы. Тогда все преобразования до третьего ключевого уравнения аналогичны.

Запишем преобразованную матрицу, начиная с третьего ключевого уравнения:

$$\begin{cases} 1,9 Z_{y33} - 0,48 Z_{y34} = 1 \\ -0,48 Z_{y33} + 11,62 Z_{y34} = 0 \end{cases}$$

Завершим прямой ход Гауса:

$$\begin{cases} Z_{y33} - 0,25 Z_{y34} = 0,526 \\ 11,5 Z_{y34} = 1 \end{cases}$$

Тогда

$$Z_{y34} = 0,0219 \text{ Ом}$$

$$Z_{y33} = X_C = 0,53 \text{ Ом}$$

Переведем  $X_C$  и  $T_j$  в относительных единицах:

$$X_{C(\text{отн. ед})} = X_{C(\text{Ом})} S_\delta / U_\delta^2 = 0,53 \cdot 75 / 10,5^2 = 0,036$$

$$T_{j(\text{рад})} = \omega_0 T_{j(\text{с})},$$

Где  $\omega_0 = 2\pi/60$  синхронная угловая частота при  $n = 3000$  об/мин,  $\omega_0 = 314$  рад/сек,  $T_j = 14 \cdot 314 = 4396$  (рад)

Определим значение коэффициента  $C_1$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_C = 1,7 + 0,036 = 1,736$$

$$C_1 = \frac{E_q U_c}{X_{d\Sigma} \cos \delta} = \frac{1,07 \cdot 1}{1,736 \cos(\pi/3)} = 0,308$$

Найдем корни характеристического уравнения вида:

$$4396p^2 + 60p + 0,308 = 0$$

$$P_{1,2} = \frac{-60 \pm \sqrt{60^2 - 4 \cdot 4396 \cdot 0,308}}{2 \cdot 4396} ;$$

$$P_{1,2} = \frac{-60 \pm j42,6}{2 \cdot 4396}$$

$$P_{1,2} = -6,8 \cdot 10^{-3} \pm j4,8 \cdot 10^{-3}$$

Исходя из теоремы Ляпунова, система является статически устойчивой, поскольку оба корня содержат отрицательную вещественную часть. Решение дифференциального уравнения (7.1) имеет вид:

$$\Delta\delta(t) = A_1 e^{P_{1t}} + A_2 e^{P_{2t}}$$

Однако для инженерных задач нет необходимости расчета зависимости  $\Delta\delta(t)$ . Достаточно по корням характеристического уравнения определить вид переходного процесса при отклонении угла  $\Delta\delta$ . В рассмотренном примере система колебательно устойчива, изменения  $\Delta\delta(t)$  имеют вид затухающих гармонических колебаний с частотой около  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^{-1}$  или 24 Гц.

## 8. Пример анализа устойчивости электроэнергетической системы по критерию Гурвица.

Анализ статистической устойчивости электрических систем путем прямого отыскания корней характеристического уравнения связан с практическими трудностями, поскольку отсутствуют аналитические выражения корней уравнений выше четвертого порядка. Однако для суждения об устойчивости системы достаточно знать, что все корни расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости, т.е. имеют отрицательную вещественную часть. Условия которые позволяют судить о наличии отрицательной вещественной части у всех корней характеристического уравнения называются **критериями устойчивости**. Критерии устойчивости делятся на алгебраические и частотные. Рассмотрим применение алгебраического критерия Гурвица для анализа статической устойчивости простейшей электрической системы: станция-шины бесконечной мощности, рассмотренной в предыдущем подразделе 7. При этом учтен не только демпфирующие моменты в обмотке возбуждения генератора. В этом случае характеристическое уравнение будет иметь третий порядок

$$\underbrace{T_j T_d'}_{a_0} P^3 + \underbrace{(T_j + P_d T_d')}_{a_1} P^2 + \underbrace{(C_2 T_d' + P_d)}_{a_3} P + \underbrace{C_1}_{a_4} = 0, \quad (8.1.)$$

где  $T_j$  – постоянная инерции генератора;

$P_d$  – коэффициент демпфирования;

$T_d'$  – переходная постоянная времени генератора по продольной оси.

Значение коэффициента  $C_1$  вычисляется по (7.4), а для определения  $C_2$  используется выражение:

$$C_2 = C_1 + \frac{X_d - X'_d}{X_{d\Sigma} X'_{d\Sigma}} U_C^2 \sin^2 \delta, \quad (8.2)$$

где  $X_{d\Sigma} = X_d + X_C$

Переходная постоянная времени генератора  $T'_d$  рассчитывается из выражения:

$$T'_d = \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} T_{d0} - \text{постоянная времени обмоток возбуждения синхронной машины при разомкнутой обмотке статора.}$$

Произведем расчет коэффициентов характеристического уравнения (3.10), используя исходные данные примера (§7) и дополнительные справочные данные генератора в относительных единицах:

$$E_g = 1,07; T_{d0} = 7,26; X'_d = 0,172; U_C = 1; P_d = 60; \delta = \pi/3; X_d = 1,7; T_j = 14\text{с}; U_\delta = U_{\text{гном}} = 10,5 \text{ кВ}; S_B = S_{\text{гном}} = 7,5 \text{ МВА.}$$

Находим  $T'_d$  по (8.3)

$$X'_{d\Sigma} = X'_d + X_C = 0,172 + 0,036 = 0,208$$

$$T'_d = \frac{0,208}{1,736} \cdot 7,26 = 0,87,$$

Тогда

$$a_0 = T_j T'_d = 4396 \cdot 0,87 = 3824,5$$

$$a_1 = T_j + P_d T'_d = 4396 + 60 \cdot 0,87 = 4448,2$$

$$a_3 = C_1 = 0,308$$

Для определения  $a_2$  найдем значение коэффициента  $C_2$  по (8.2)

$$C_2 = 0,308 + \frac{1,7 - 0,172}{0,208 \cdot 1,736} \cdot 1^2 \sin^2(\pi/3) = 3,48;$$

Тогда

$$a_2 = C_2 T'_d + P_d = 3,48 \cdot 0,87 + 60 = 63,03$$

Запишем характеристическое уравнение (8.1) с учетом значений коэффициентов:

$$3824,5p^3 + 4448,2p^2 + 63,03p + 0,308 = 0, \quad (8.4)$$

Для использования Критерия Гурвица определитель Гурвица по следующим правилам:

- по главной диагонали располагаются коэффициенты уравнения (8.1) в порядке возрастания индексов, начиная с  $a_1$ ;
- построчно помещаются коэффициенты только с четными или только нечетными индексами, влево от диагонали индексы уменьшаются, вправо увеличиваются;
- все оставшиеся коэффициенты заменяются нулями.

Определитель Гурвица для характеристического уравнения (8.4) имеет вид:

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} 4448,2 & 0,308 & 0 \\ 3824,5 & 63,03 & 0 \\ 0 & 4448,2 & 0,308 \end{bmatrix}$$

Выделим миноры относительно главной диагонали  $\Delta_3$  и применением критерий Гурвица. Для устойчивости электроэнергетической системы необходимо и достаточно, чтобы при  $a_0 > 0$  все главные диагональные миноры определителя Гурвица были положительны:

$$a_0 = 3824,5 > 0;$$

$$\Delta_1 = a_1 = 4448,2 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{bmatrix} 4448,2 & 0,308 \\ 3824,5 & 63,03 \end{bmatrix} = 4448,2 \cdot 63,03 - 3824,5 \cdot 0,308 = 280370,046 - 1177,946 = 279192,1 > 0$$

$$\Delta_3 = a_3 \Delta_2 = 85991166 > 0.$$

Таким образом, рассматриваемая ЭЭС является статистически устойчивой.

## 9. Пример использования критерия Михайлова для анализа статистической устойчивости электроэнергетической системы.

Критерий Михайлова является частотным критерием устойчивости. В его основу положен принцип аргумента, известный из теории функций комплексного переменного. Рассмотрим использование частотного критерия Михайлова для анализа устойчивости простейшей ЭЭС, рассмотренной в предыдущих разделах.

Исходя из вида характеристического уравнения (8.4), запишем характеристический многочлен  $D(p)$ :

$$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 3824,5p^3 + 4448,2p^2 + 63,03p + 0,308$$

Осуществляя подстановку  $P = j\omega$  в (8.5), получим характеристический вектор  $D(j\omega)$

$$D(j\omega) = 3824,5(j\omega)^3 + 4448,2(j\omega)^2 + 63,03(j\omega) + 0,308 \quad (8.6)$$

Разделим вещественную и мнимую составляющую вектора  $D(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ ; где  $U(\omega) = 0,308 - 4448,2\omega$ ;  $V(\omega) = 63,03\omega - 3824,5\omega^3$ ; Вектор  $D(j\omega)$ , изображенный в декартовых координатах на плоскости, при изменениях  $-\infty < \omega < +\infty$ , вращается, и конец вектора описывает кривую, которая называется **годографом** характеристического уравнения.

Практическая формулировка критерия Михайлова: система будет устойчива, если при возрастании  $\omega$  от 0 до  $\infty$  годограф, начинаясь на положительной части вещественной оси, проходит последовательно в

положенном направлении  $n$  квадратов, где  $n$  - степень характеристического уравнения.

Такое перемещение годографа соответствует повороту вектора  $D(j\omega)$  на угол  $0,5 \pi$ . Для построения годографа определим точки пересечения с вещественной  $U$  и мнимой  $V$  осями:

а) пересечение годографа с осью  $U$  проходит при  $V(\omega) = 0$

$$V(\omega) = \omega (63,03 - 3824,5 \omega^2) = 0$$

$$\omega_1 = 0; \omega_2 = \sqrt{\frac{63,03}{3824,5}} = 0,128.$$

Таким образом, первая точка пересечения при  $\omega_1 = 0$  соответствует  $U(\omega_1) = 0,308$ ; вторая точка при  $\omega_2 = 0,128$  соответствует  $U(\omega_2) = -73$ ;

б) пересечения годографа с осью  $V$  проходит при  $U(\omega) = 0,308 - 4448,2\omega^2 = 0$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{0,308}{4448,2}} = 8,3 \cdot 10^{-3}; \quad V(\omega_1) = 0,522.$$

Выбираются только положительные значения корней, т.к.  $\omega$  изменяется от 0 до  $\infty$ . Для построения графика зададим рядом значений  $0 < \omega < \infty$  и рассмотрим соответствующие значения  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$

$\omega$	0	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	...	$\infty$
$U$	0,308	-10,8	-28,16	-44,17	-177,6	...	$\infty$
$V$	0	2,67	3,08	2,47	-17,99	...	$\infty$

Построим годограф характеристического уравнения, который показан на рисунке 2.

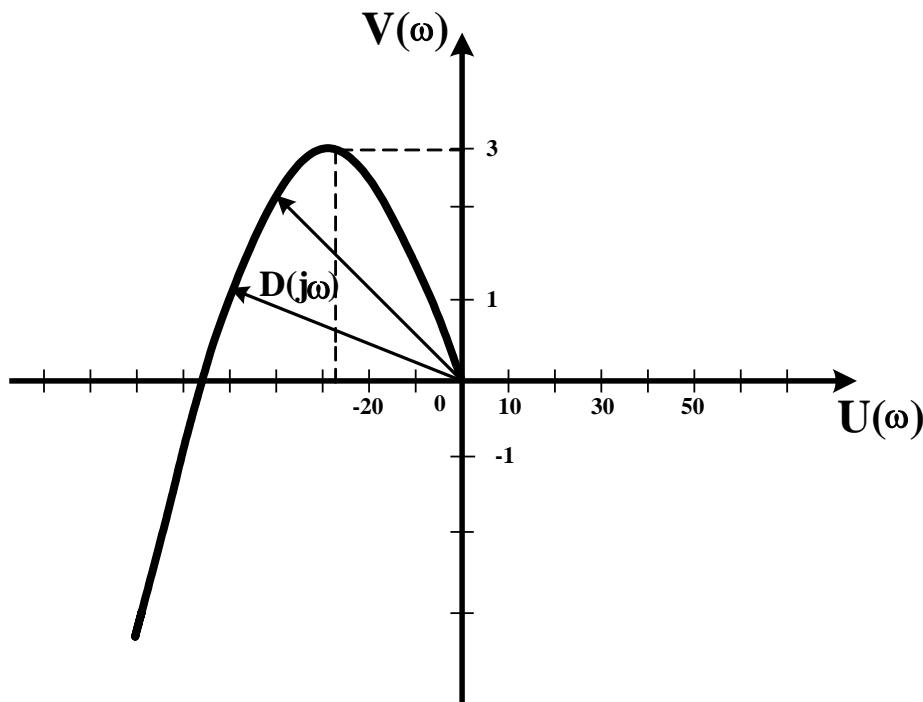


Рис.2.

На основании годографа, используя критерий Михайлова, можно сделать выводы об устойчивости системы.

## 10. ЛИТЕРАТУРА.

1. Веников В.А. Электрические системы. Математические задачи в энергетике. Учебник для студентов вузов. -М.: Высшая школа, 1981. – 288с.
2. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. -М.: Энергия, 1969.- 456с.
3. Идельчик В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. -М.: Энергоатомиздат, 1988.-288с.
4. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики.- М.: Наука, 1996.-1966.-664с.
5. Любченко В.А., Манусов В.З. Физико-математические основы электроэнергетики: Учебное пособие: В2ч.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1994.Ч1.-58с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение .....	1
2. Исходные данные для выполнения курсовой работы.....	1
3. Вариант расчетных схем.....	2
4. Содержание заданий.....	5
5. Пример использования метода Гаусса для решения уравнений узловых напряжений электроэнергетической системы .....	6
6. Пример расчета уравнений узловых напряжений с использованием метода Зейделя .....	8
7. Пример анализа статистической устойчивости по корням характеристического уравнения электроэнергетической системы .....	10
8. Пример анализа устойчивости электроэнергетической системы по критерию Гурвица.....	13
9. Пример использования критерия Михайлова для анализа статистической устойчивости электроэнергетической системы.....	15
10. Литература.....	17

Методические указания к курсовой работе «Расчет установившихся режимов электроэнергетических систем» по дисциплине «Математические модели в электроэнергетике» для студентов направления 140200 – Электроэнергетика очной и заочной форм обучения

Составители: д.т.н., профессор Кицис С.И.  
к.т.н., доцент кафедры ЭЭ Паутов Д.Н.

Подписано к печати

Заказ.

Формат 60×84/16

Отпечатано на RISO GR 3750

Печать плоская

Бум. писч. № 1

Уч. изд. л.

Усл.печ.л.

Тираж 50 экз.

---

Издательство «Нефтегазовый университет»  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Тюменский государственный нефтегазовый университет»  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38  
«Отдел оперативной полиграфии издательства»  
«Нефтегазовый университет»  
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38