

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

К Г Э У

**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Кафедра № ЭСиС

Только для преподавателей

Экз. № _____

УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

по учебной дисциплине

**Б.1.В.ДВ.13. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Практическое занятие:

РАСЧЕТ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЗЕЙДЕЛЯ.

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭСиС

Максимов В.В.

« » _____ 201_ г.

УЧЕБНО - МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА

**по учебной дисциплине «Физико-математическое моделирование
электроэнергетических систем»**

Практическое занятие:

РАСЧЕТ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЗЕЙДЕЛЯ.

Учебные и воспитательные цели:

1. Дать систематизированные знания о физико-математическом моделировании электроэнергетических систем.
2. Освоить приёмы основных вероятностных расчётов в электроэнергетических задачах

Вид занятия: Практическое занятие.

Продолжительность занятия: 2 часа.

Структура занятия и расчет времени.

№п/п	Структура занятия	Время, мин
1	Вводная часть	10-15
2	Основная часть 1. Решение задач.	70-75
3	Заключительная часть	3-5

Вводная часть занятия: проверить наличие и готовность обучающихся к занятию; провести опрос по пройденному материалу в соответствии с перечнем вопросов и подвести его итоги; объявить тему и учебные цели занятия; обратить внимание обучающихся на важность изучения учебных вопросов занятия, так как знание их может быть востребовано при выполнении курсовой работы и выпускной квалификационной работы.

Основная часть занятия: учебные вопросы занятия изучаются в составе группы с применением диафильма, диапроектора, стендов, плакатов, классной доски, цветных мелков. Изучать материал занятия следует в строгом соответствии с учебной программой и тематическим планом изучения учебной дисциплины.

Наименование учебных вопросов преподаватель объявляет последовательно по мере изложения учебного материала и записывает их на классной доске.

На классной доске следует также записывать номер и название темы и занятия, учебные вопросы, цифровые характеристики, формулы, непонятные и сложные для обучаемых термины, чертить поясняющие схемы. Записи на классной доске вести последовательно и аккуратно.

В ходе изложения учебного материала необходимо контролировать степень усвоения учебного материала путем постановки контрольных и проблемных вопросов.

При изучении учебного материала обучающихся должны вести конспект. Контроль за качеством ведения конспектов преподаватель осуществляет в ходе проведения занятия.

Основная часть занятия:

1 Теоретическое описание метода

Нелинейные уравнения узловых напряжений описывают установившийся режим электрической системы при задании нелинейных источников тока. В схеме замещения электрической систем нелинейным источникам тока соответствуют генераторы с заданной мощностью либо нагрузки потребителей, заданные статической характеристикой или постоянной мощностью. При заданной мощности нагрузки потребителя или генератора узловый ток задается в следующем виде:

$$\underline{I}_k(\underline{U}) = -\frac{\underline{S}_k^*}{\sqrt{3}\underline{U}_k^*} \quad (1.1)$$

Нелинейные уравнения узловых напряжений при задании постоянной мощности нагрузки потребителей и генераторов в узлах для системы переменного тока из четырех узлов запишем виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2 + \underline{Y}_{13}\underline{U}_3 &= \frac{\underline{S}_1^*}{\underline{U}_1^*} - \underline{Y}_{16}\underline{U}_6 \\ \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2 + \underline{Y}_{23}\underline{U}_3 &= \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2^*} - \underline{Y}_{26}\underline{U}_6 \\ \underline{Y}_{31}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{32}\underline{U}_2 + \underline{Y}_{33}\underline{U}_3 &= \frac{\underline{S}_3^*}{\underline{U}_3^*} - \underline{Y}_{36}\underline{U}_6 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Метод Зейделя и простая итерация могут применяться для решения нелинейных уравнений узловых напряжений в форме баланса токов аналогично тому, как они применялись для решения систем линейных алгебраических уравнений. Всё различие состоит в том, что вместо постоянных величин b_k в итерационных процессах или при решении нелинейных уравнений узловых напряжений необходимо использовать нелинейные токи в узлах.

Для определенности вначале ограничимся системой уравнений третьего порядка.

$$\begin{cases} Y_{11} \cdot U_1 + Y_{12} \cdot U_2 + Y_{13} \cdot U_3 = I_1; \\ Y_{21} \cdot U_1 + Y_{22} \cdot U_2 + Y_{23} \cdot U_3 = I_2; \\ Y_{31} \cdot U_1 + Y_{32} \cdot U_2 + Y_{33} \cdot U_3 = I_3; \end{cases} \quad (1.3)$$

где I_k - задающий ток k -го узла, $k=1,2,3$; U_k - неизвестное узловое напряжение, т.е. напряжение между k -м узлом и балансирующим, совпадающим с базисным по U ; Y_{kj} - (при $k \neq j$) - взаимная проводимость узлов j и k ; Y_{kk} - собственная проводимость узла k . Взаимная проводимость узлов j и k равна взятой с обратным знаком сумме проводимостей ветвей, соединяющих эти узлы.

Предполагая, что диагональные элементы $Y_{ii} \neq 0$, $i=1,2,3$, разрешим первое уравнение системы (1.1) относительно U_1 , второе – относительно U_2 , а третье – относительно U_3 . Тогда получим систему, эквивалентную (1.1):

$$\begin{cases} U_1 = \text{-----} + b_{12} \cdot U_2 + b_{13} \cdot U_3 + b_1 \\ U_2 = b_{21} \cdot U_1 + \text{-----} + b_{23} \cdot U_3 + b_2 \\ U_3 = b_{31} \cdot U_1 + b_{32} \cdot U_2 + \text{-----} + b_3 \end{cases} \quad (1.4)$$

где

$$\begin{aligned} b_{kj} &= -\frac{Y_{kj}}{Y_{kk}}, k \neq j \\ b_k &= \frac{I_k}{Y_{kk}}; k, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Зададим начальные приближения неизвестных $U_1^{(0)}, U_2^{(0)}, U_3^{(0)}$. Подставляя их в первые части системы (1.2), получаем первые приближения $U_1^{(1)}, U_2^{(1)}, U_3^{(1)}$. Вычисление первого приближения неизвестных соответствует первому шагу итерационного процесса. Полученные первые приближения могут быть таким же образом использованы для получения вторых, третьих и последующих приближений. Используя значения переменных, полученных на предыдущем, i -м шаге, можно получить $(i+1)$ -е приближение неизвестных:

$$\left. \begin{aligned} U_1^{(i+1)} &= \text{-----} + b_{12} \cdot U_2^{(i)} + b_{13} \cdot U_3^{(i)} + b_1 \\ U_2^{(i+1)} &= b_{21} \cdot U_1^{(i)} + \text{-----} + b_{23} \cdot U_3^{(i)} + b_2 \\ U_3^{(i+1)} &= b_{31} \cdot U_1^{(i)} + b_{32} \cdot U_2^{(i)} + \text{-----} + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Введем матрицу и вектор-столбцы:

$$B = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{vmatrix}, \quad U = \begin{vmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{vmatrix}, \quad b = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{vmatrix}.$$

Диагональные элементы матрицы B равны нулю, т.е. $b_{kk} = 0$, а недиагональные элементы (т.е. b_{kj} при $k \neq j$) совпадают с коэффициентами систем (1.4) и (1.5). Учитывая правило умножения и сложения матриц, систему (1.2) можно записать в матричной форме:

$$U = B \cdot U + b \quad (1.7)$$

Аналогично итерационное выражение (1.4) можно записать в матричном виде:

$$U^{(i+1)} = B \cdot U^{(i)} + b \quad (1.8)$$

Элементы матрицы B – безразмерные величины, а элементы вектора b имеют размерность напряжений.

Для сети переменного тока комплексные уравнения узловых напряжений представляются в виде системы действительных уравнений. Затем к полученной системе действительных уравнений применяется метод простой итерации. В принципе возможно применение простой итерации по выражению (1.6) или (1.8) к комплексным числам. При практических расчётах на ЭВМ такой путь, как правило не используется.

Метод Зейделя представляет собой незначительную модификацию простой итерации. Основная его идея в отличие от простой итерации заключается в том, что найденное $(i+1)$ -е приближение $(k-1)$ -го напряжения сразу же используется для вычисления следующего, k -го напряжения. Т.е. полученное $(i+1)$ -е значение напряжения сразу же используется для вычисления $(i+1)$ -го значения напряжений U_2, U_3 и т.д. Таким образом, для системы итерационный процесс метода Зейделя описывается следующим выражением.

$$\left. \begin{aligned} U_1^{(i+1)} &= \text{---} + b_{12} \cdot U_2^{(i)} + b_{13} \cdot U_3^{(i)} + b_1 \\ U_2^{(i+1)} &= b_{21} \cdot U_1^{(i+1)} + \text{---} + b_{23} \cdot U_3^{(i)} + b_2 \\ U_3^{(i+1)} &= b_{31} \cdot U_1^{(i+1)} + b_{32} \cdot U_2^{(i+1)} + \text{---} + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

По методу простой итерации $(i+1)$ -е приближение k -го напряжения $U_k^{(i+1)}$ для системы n -го порядка вычисляется по следующему выражению:

$$U_k^{(i+1)} = \sum_{j=1}^{k-1} b_{kj} \cdot U_j^{(i)} + \sum_{j=k+1}^n b_{kj} \cdot U_j^{(i)} + b_k \quad (1.10)$$

По методу Зейделя $(i+1)$ -е приближение k -го напряжения $U_k^{(i+1)}$ вычисляется так:

$$U_k^{(i+1)} = \sum_{j=1}^{k-1} b_{kj} \cdot U_j^{(i+1)} + \sum_{j=k+1}^n b_{kj} \cdot U_j^{(i)} + b_k \quad (1.11)$$

Можно показать что метод Зейделя эквивалентен простой итерации но с другой матрицей и другим вектором.

Сходимость метода Зейделя к решению нелинейных уравнений установившихся режимов медленная. Для ускорения сходимости метода Зейделя применяют ускоряющие коэффициенты, или метод неполной релаксации. Использование ускоряющих коэффициентов сводится к следующему. Обозначим $\underline{U}_k^{(i+1)}$ напряжение k-го узла, определенное на (i+1)-м шаге по обычным итерационным формулам.

В случае $t=1$ получим обычный итерационный процесс метода Зейделя.

Метод Зейделя нашел широкое применение в расчётах установившихся режимов, в особенности на ранних этапах использования ЭВМ. Основное достоинство метода в том, что он легко программируется и требует мало оперативной памяти. Недостаток метода – в медленной сходимости. Метод Зейделя особенно медленно сходиться, а в ряде случаев и расходиться, в расчетах установившихся режимов электрических систем с устройствами продольной компенсации, с трехобмоточными трансформаторами или автотрансформаторами с очень малым сопротивлением обмотки среднего напряжения и для электрических систем с сильной неоднородностью параметров. Метод Зейделя также плохо сходиться и расходиться в расчётах режимов, близким к предельным по устойчивости.

Установившийся режим нашей сети описывается системой двух комплексных уравнений или при разделении на действительные и мнимые части при $U''_6=0$, $\underline{U}_6=U'_6=U_6$

$$\left. \begin{aligned} g_{22}U_2' + g_{23}U_3' + b_{22}U_2'' + b_{23}U_3'' &= \frac{P_2U_2' + Q_2U_2''}{U_2'^2 + U_2''^2} - g_{20}U_0 \\ g_{32}U_2' + g_{33}U_3' + b_{32}U_2'' + b_{33}U_3'' &= \frac{P_3U_3' + Q_3U_3''}{U_3'^2 + U_3''^2} - g_{30}U_0 \\ -b_{22}U_2' - b_{23}U_3' + g_{22}U_2'' + g_{23}U_3'' &= \frac{P_2U_2'' - Q_2U_2'}{U_2''^2 + U_2'^2} + b_{20}U_0 \\ -b_{33}U_2' - b_{33}U_3' + g_{32}U_2'' + g_{33}U_3'' &= \frac{P_3U_3'' - Q_3U_3'}{U_3''^2 + U_3'^2} + b_{30}U_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

2 Расчет режимов электрической сети

Дана схема электрической сети, состоящей из четырех узлов (рис.2.1). Данные проводов представлены в табл.2.1. Нужно найти узловые напряжения методом Зейделя.

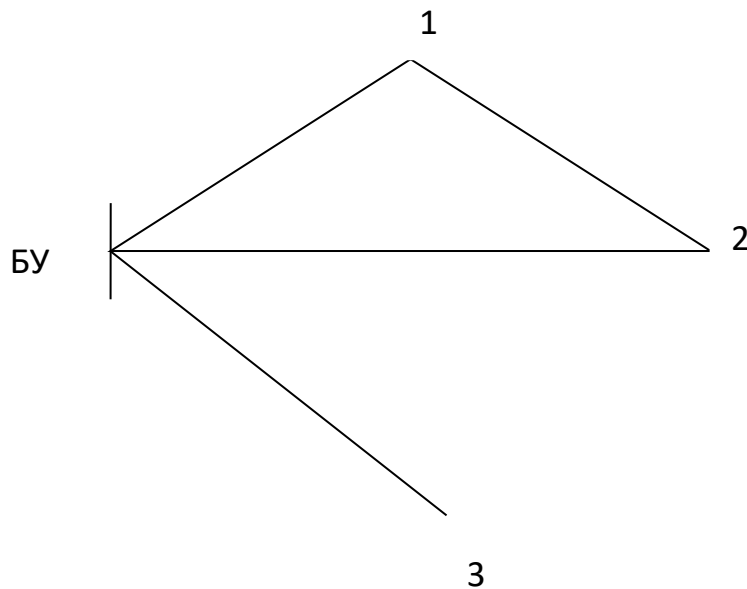


Рис.2.1 Схема электрической сети

Таблица 2.1 Данные проводов

Ветвь	Длина, км	Марка провода	x_0 , Ом	r_0 , Ом
БУ-1	80	АС-240/32	0,435	0,121
БУ-3	90	АС-300/39	0,429	0,098

БУ-2	110	АС-500/64	0,41	0,06
1-2	90	АС-300/39	0,429	0,098

2.2 Схема замещения сети

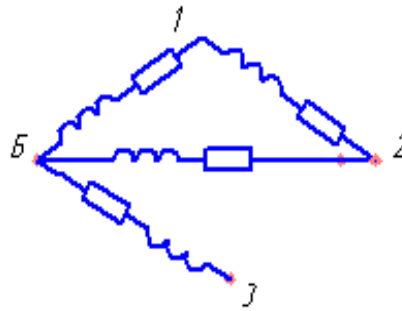


Рис.2.2 Схема замещения

2.3 Определение узловых напряжений сети

Составим уравнения узловых напряжений в виде (2.1) и (2.2) для электрической сети, схема замещения которой приведена на рис.2.2.

$$\underline{Y}_Y \cdot \underline{U} = \frac{\underline{S}^*}{\underline{U}^*} - \underline{Y}_B \underline{U}_B \quad (2.1)$$

$$\begin{vmatrix} G_Y & B_Y \\ -B_Y & G_Y \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U' \\ U'' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I' \\ I'' \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} g_B & U_B \\ -b_B & U_B \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

где $g_B \cdot U_B$ и $-b_B \cdot U_B$ - вектор-столбцы, имеющие вид, аналогичный (2.3); g_{kB}, b_{kB} - активная и реактивная взаимные проводимости узлов k -го и балансирующего.

$$Y_B \cdot U_B = \begin{vmatrix} Y_{1B} \cdot U_B \\ Y_{2B} \cdot U_B \\ Y_{3B} \cdot U_B \end{vmatrix} \quad (2.3)$$

В схеме на рис.2.2 – четыре линии электропередачи, узел 1 – генераторный, 2, 3 и 4 – нагрузочные узлы.

Сопротивления линий следующие:

$$Z_{B1} = 9,68 + j34,8 \text{ Ом};$$

$$Z_{B2} = 6,6 + j45,1 \text{ Ом};$$

$$Z_{B3} = 8,82 + j38,61 \text{ Ом};$$

$$Z_{12} = 8,82 + j38,61 \text{ Ом}.$$

Узел Б принят в качестве балансирующего и базисного, напряжение $U_1 = U_B = 220 \text{ кВ}$. Задающие токи в узлах 1, 2 и 3 рассчитываются. С клавиатуры вводятся активная и реактивная мощности 1, 2 и 3 узла. Для примера примем активные мощности 1,1,1 МВт, реактивные – 1,1,1 МВАр.

По заданным сопротивлениям ветвей вычисляем их проводимости, Ом^{-1} , по формулам:

$$\begin{aligned} Y_{kj} &= -\frac{1}{Z_{kj}}; \\ Y_{kk} &= -\sum Y_{kj}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.051 & -0.025 & 0 & 0.013 & -5.31 \times 10^{-3} & 0 \\ -0.025 & 0.046 & 0 & -5.31 \times 10^{-3} & 8.487 \times 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0.025 & 0 & 0 & 5.623 \times 10^{-3} \\ 0.013 & -5.31 \times 10^{-3} & 0 & -0.051 & 0.025 & 0 \\ -5.31 \times 10^{-3} & 8.487 \times 10^{-3} & 0 & 0.025 & -0.046 & 0 \\ 0 & 0 & 5.623 \times 10^{-3} & 0 & 0 & -0.025 \end{pmatrix}$$

Вектор узловых напряжений:

$$U = \begin{vmatrix} U'_2 \\ U'_3 \\ U'_4 \end{vmatrix} + j \begin{vmatrix} U''_2 \\ U''_3 \\ U''_4 \end{vmatrix} \quad (2.6)$$

Запишем систему уравнений установившегося режима, сформировав матрицу коэффициентов следующим образом:

$$\begin{vmatrix} B_y & G_y \\ G_y & -B_y \end{vmatrix}$$

Такое формирование матрицы удобно с точки зрения решения полученных уравнений итерационными методами, сходимость которых улучшается, если диагональные элементы доминируют, т.е. по абсолютной величине больше всех остальных элементов в строке.

В этом случае уравнение запишется в виде:

$$\begin{vmatrix} B_y & G_y \\ G_y & -B_y \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U'' \\ U' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I' \\ I'' \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} g_B \cdot U_B \\ -b_B \cdot U_B \end{vmatrix} \quad (2.7)$$

Запишем систему узловых напряжений в виде:

$$\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{11} & g_{12} & g_{13} & -b_{11} & -b_{12} & -b_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & -b_{21} & -b_{22} & -b_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & -b_{31} & -b_{32} & -b_{33} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U''_1 \\ U''_2 \\ U''_3 \\ U'_1 \\ U'_2 \\ U'_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \\ I''_1 \\ I''_2 \\ I''_3 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} g_{1B} \cdot U_B \\ g_{2B} \cdot U_B \\ g_{3B} \cdot U_B \\ -b_{1B} \cdot U_B \\ -b_{2B} \cdot U_B \\ -b_{3B} \cdot U_B \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

Таким образом получим:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{11} & g_{12} & g_{13} & -b_{11} & -b_{12} & -b_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & -b_{21} & -b_{22} & -b_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & -b_{31} & -b_{32} & -b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1'' \\ U_2'' \\ U_3'' \\ U_1' \\ U_2' \\ U_3' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{P_1 \cdot U_1'' + Q_1 \cdot U_1'}{U_1'^2 + U_1''^2} \\ \frac{P_2 \cdot U_2'' + Q_2 \cdot U_2'}{U_2'^2 + U_2''^2} \\ \frac{P_3 \cdot U_3'' + Q_3 \cdot U_3'}{U_3'^2 + U_3''^2} \\ \frac{P_1 \cdot U_1' - Q_1 \cdot U_1''}{U_1'^2 + U_1''^2} \\ \frac{P_2 \cdot U_2' - Q_2 \cdot U_2''}{U_2'^2 + U_2''^2} \\ \frac{P_3 \cdot U_3' - Q_3 \cdot U_3''}{U_3'^2 + U_3''^2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} g_{1B} \\ g_{2B} \\ g_{3B} \\ -b_{1B} \\ -b_{2B} \\ -b_{3B} \end{pmatrix} \cdot U_B \quad (2.9)$$

Перемножаем матрицы:

$$\left\{ \begin{aligned} g_{11}U_1' + g_{12}U_2' + g_{13}U_3' + b_{11}U_1'' + b_{12}U_2'' + b_{13}U_3'' &= \frac{P_1U_1' + Q_1U_1''}{U_1'^2 + U_1''^2} - g_{1B}U_B \\ g_{21}U_1' + g_{22}U_2' + g_{23}U_3' + b_{21}U_2'' + b_{22}U_2'' + b_{23}U_3'' &= \frac{P_2U_2' + Q_2U_2''}{U_2'^2 + U_2''^2} - g_{2B}U_B \\ g_{31}U_1' + g_{32}U_2' + g_{33}U_3' + b_{31}U_1'' + b_{32}U_2'' + b_{33}U_3'' &= \frac{P_3U_3' + Q_3U_3''}{U_3'^2 + U_3''^2} - g_{3B}U_B \\ -b_{11}U_1' - b_{12}U_2' - b_{13}U_3' + g_{11}U_1'' + g_{12}U_2'' + g_{13}U_3'' &= \frac{P_1U_1'' - Q_1U_1'}{U_1'^2 + U_1''^2} + b_{1B}U_B \\ -b_{21}U_1' - b_{22}U_2' - b_{23}U_3' + g_{21}U_1'' + g_{22}U_2'' + g_{23}U_3'' &= \frac{P_2U_2'' - Q_2U_2'}{U_2'^2 + U_2''^2} + b_{2B}U_B \\ -b_{31}U_1' - b_{32}U_2' - b_{33}U_3' + g_{31}U_1'' + g_{32}U_2'' + g_{33}U_3'' &= \frac{P_3U_3'' - Q_3U_3'}{U_3'^2 + U_3''^2} + b_{3B}U_B \end{aligned} \right. \quad (2.10)$$

Если подставить значения активных и реактивных составляющих проводимо стей, узловых токов и базисного напряжения, то получим в матричном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,051U'_1 - 0,025U'_2 - 0,013U''_1 - 0,0053U''_2 = \frac{P_1U'_1 + Q_1U''_1}{U_1'^2 + U_1''^2} - 1,632 \\ -0,025U'_1 + 0,046U'_2 - 0,0053U''_1 + 0,0085U''_3 = \frac{P_2U'_2 + Q_2U''_2}{U_2'^2 + U_2''^2} - 0,699 \\ -0,025U'_3 + 0,0056U''_3 = \frac{P_3U'_3 + Q_3U''_3}{U_3'^2 + U_3''^2} - 1,237 \\ -0,013U'_1 - 0,0053U'_2 - 0,051U''_1 + 0,025U''_2 = \frac{P_1U''_1 - Q_1U'_1}{U_1'^2 + U_1''^2} + 5,868 \\ -0,053U'_1 + 0,0085U'_2 + 0,025U''_1 - 0,046U''_2 = \frac{P_2U''_2 - Q_2U'_2}{U_2'^2 + U_2''^2} + 4,776 \\ 0,0056U'_3 + 0,025U''_3 = \frac{P_3U''_3 - Q_3U'_3}{U_3'^2 + U_3''^2} + 5,415 \end{array} \right.$$

После делим на V_{ii} правую и левую часть, левую часть переносим в правую и принимаем начальное приближение узловых напряжений:

$$\left| \begin{array}{l} U_1''^{(0)} = 0 \\ U_2''^{(0)} = 0 \\ U_3''^{(0)} = 0 \\ U_1'^{(0)} = 220 \\ U_2'^{(0)} = 220 \\ U_3'^{(0)} = 220 \end{array} \right|$$

Первые приближения $U_i''^{(1)}$ и $U_i'^{(1)}$ определим решая систему уравнений.

Расчет произведен на ЭВМ с использованием математического пакета MathCAD 11. Итерационный процесс при заданной точности по напряжениям $\varepsilon = 0,01 \text{ кВ}$ сошелся за 10 шагов. Значения неизвестных на каждом шаге приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Результаты расчета на ЭВМ

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	69.938	22.287	6.562	1.63	0.287	-0.044	-0.116	-0.13	-0.132	-0.132	-0.132	-0.132
1	32.784	11.562	3.387	0.8	0.079	-0.102	-0.142	-0.15	-0.151	-0.152	-0.151	-0.151
2	-5.499	0.125	-0.148	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135	-0.135
3	184.335	214.025	219.408	219.974	219.903	219.831	219.8	219.79	219.788	219.787	219.787	219.787
4	198.731	216.289	219.458	219.85	219.832	219.798	219.783	219.778	219.776	219.776	219.776	219.776
5	218.66	219.838	219.782	219.784	219.784	219.784	219.784	219.784	219.784	219.784	219.784	...

3 Текст программы

```

r01 := 0.121      x01 := 0.435      P0 := -1      Q0 := -1      l1 := 80      Ub := 220
r02 := 0.092      x02 := 0.429      P1 := -1      Q1 := -1      l2 := 90
r03 := 0.098      x03 := 0.429      P2 := -1      Q2 := -0      l3 := 90      eps := 0.001
r06 := 0.06       x06 := 0.41       l6 := 110

```

```

r1 := r01·l1      x1 := x01·l1
r2 := r02·l2      x2 := x02·l2
r3 := r03·l3      x3 := x03·l3
r6 := r06·l6      x6 := x06·l6

```

+

$$Y := \begin{bmatrix}
 \frac{x1}{r1^2 + x1^2} + \frac{x2}{r2^2 + x2^2} & \frac{-x2}{x2^2 + r2^2} & 0 & \frac{r1}{r1^2 + x1^2} + \frac{r2}{r2^2 + x2^2} & \frac{-r2}{x2^2 + r2^2} & 0 \\
 \frac{-x2}{x2^2 + r2^2} & \frac{x6}{r6^2 + x6^2} + \frac{x2}{r2^2 + x2^2} & 0 & \frac{-r2}{x2^2 + r2^2} & \frac{r6}{r6^2 + x6^2} + \frac{r2}{r2^2 + x2^2} & 0 \\
 0 & 0 & \frac{x3}{r3^2 + x3^2} & 0 & 0 & \frac{r3}{r3^2 + x3^2} \\
 \frac{r1}{r1^2 + x1^2} + \frac{r2}{r2^2 + x2^2} & \frac{-r2}{x2^2 + r2^2} & 0 & -\left(\frac{x1}{r1^2 + x1^2} + \frac{x2}{r2^2 + x2^2}\right) & \frac{x2}{x2^2 + r2^2} & 0 \\
 \frac{-r2}{x2^2 + r2^2} & \frac{r6}{r6^2 + x6^2} + \frac{r2}{r2^2 + x2^2} & 0 & \frac{x2}{x2^2 + r2^2} & -\left(\frac{x6}{r6^2 + x6^2} + \frac{x2}{r2^2 + x2^2}\right) & 0 \\
 0 & 0 & \frac{r3}{r3^2 + x3^2} & 0 & 0 & -\left(\frac{x3}{r3^2 + x3^2}\right)
 \end{bmatrix}$$

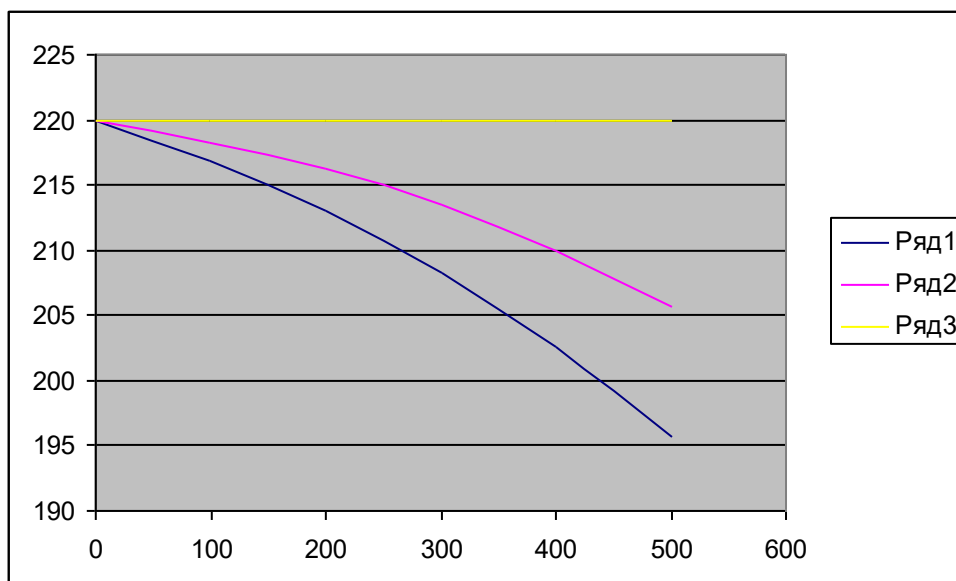
9	10	11	12	13
0.131	0.132	0.132	0.132	0.132
0.151	0.151	0.151	0.151	0.151
0.175	0.176	0.175	0.176	0.175
-219.788	-219.787	-219.787	-219.787	-219.787
-219.777	-219.776	-219.776	-219.776	-219.776
-219.96	-219.96	-219.96	-219.96	...

4. Утяжеление режима.

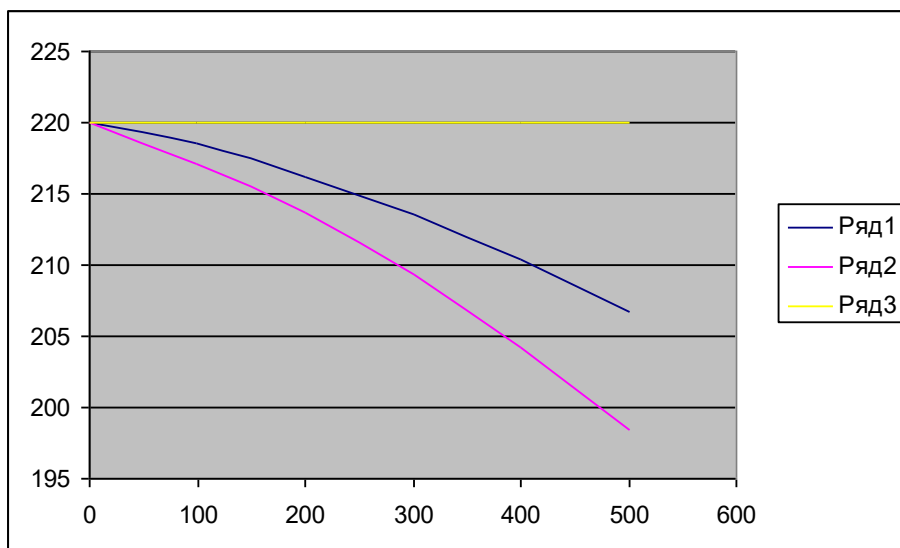
Зададимся постоянными значениями нагрузок в 2 узлах, и будем постепенно увеличивать нагрузку в третьем узле, при этом будем находить напряжения во всех трех узлах. Утяжеление останавливаем при уменьшении напряжения в узле менее допустимого по условиям качества электроэнергии.

Произведем компьютерный эксперимент для всех трех узлов и результаты представим в виде графиков.

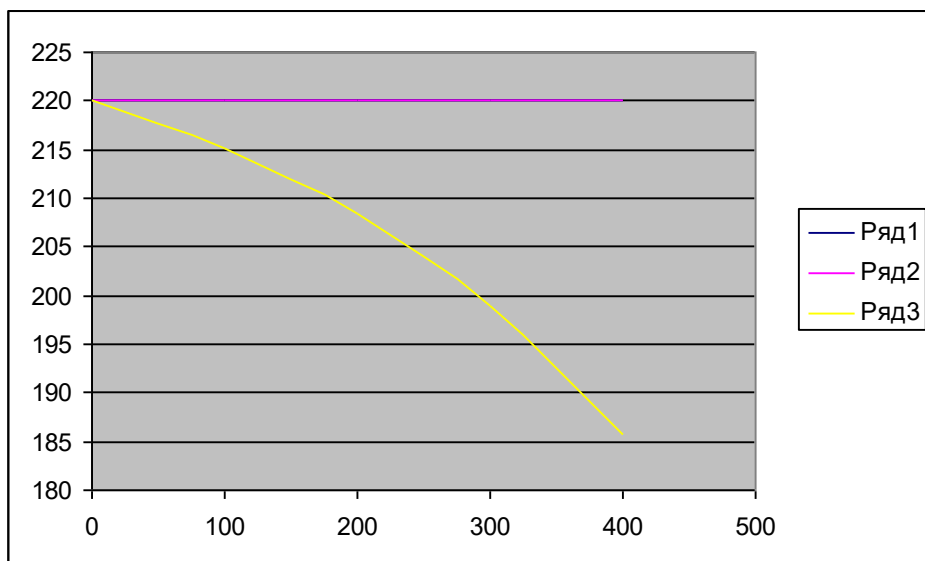
Утяжеление режима в узле 1.



Утяжеление режима в узле 2.



Утяжеление режима в узле 3.



Заключительная часть занятия: Ответить на вопросы, обратить их внимание на необходимость знания изученного материала.

Проверить качество усвоения учебного материала занятия.

Подвести итог занятия, оценить знания и действия.

Выдать задание на самостоятельную работу.

Объявить тему и место проведения очередного занятия, дать команду о наведении порядка в классе и об окончании занятия.

Доцент кафедры к.т.н. доцент:

Максимов В.В

« ___ » _____ 201 г.

Обсуждено на заседании кафедры « ___ » _____ 201 г.,

протокол № ____