

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

*На правах рукописи*

*УДК 621.314*

**АБДУБАННАЕВ ЖАСУР ХУСНИТДИНОВИЧ**

**Сравнительный анализ расчёта режимов энергосистемы при различных  
формах записи уравнений узловых напряжений**

**5А310204 «Электроэнергетические системы и сети (большие  
системы, включая автономные)»**

**Диссертация  
на соискание академической степени магистра**

Научный руководитель:  
доц. Шамсиев Х.А

Ташкент-2013

## Оглавление

Введение	3
1. ФОРМЫ ЗАПИСИ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА	4
1.1 Узловые уравнения в форме баланса токов	4
1.2 Узловые уравнения в форме баланса мощностей	5
2. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ	
2.1 Алгоритм решения УУ в форме баланса мощностей	
3. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РЕШЕНИЕМ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	
3.1 Алгоритм решения узловых уравнений в форме баланса мощностей	
3.2 Блок схема алгоритма решения УУН в полярных координатах	
3.2 Пример решения узловых уравнений	
4. РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РЕШЕНИЕМ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ	
4.1 Программа и результаты расчета режимов решением узловых уравнений для радиальной схем	
4.2 Программа и результаты расчета режимов решением узловых уравнений для кольцевой схем.	
4.3 Сопоставление результатов режима для УУ в декартовых и полярных координатах	
Заключение	
Литература	

## Введение

При численном решении нелинейных УУ установившегося режима независимо от выбранной их формы можно использовать различные итерационные методы, которые условно делятся на четыре группы: методы нулевого порядка (или прямой итерации), основанные на преобразовании уравнений к виду рекуррентных соотношений; методы первого порядка, основанные на линеаризации нелинейных УУ на каждом шаге (метод Ньютона, градиентный и др.) с использованием якобиана УУ и нетрадиционные методы.

Рассмотрим некоторые особенности применения методов прямой итерации к различным формам УУ. Прежде всего отметим, что итерационные методы нулевого порядка обладают свойством сходимости к определенным одним и тем же решениям нелинейных уравнений независимо от начальных приближений. Кроме того, область начальных приближений, для которых обеспечена сходимость итераций, для разных итерационных формул ( называемых так же рекуррентными соотношениями ) получаются, в общем случае, сильно различающимися.

Актуальность работы: Создание алгоритмов и программ расчета электрического режима энергосистемы.

Цель исследования: Разработка алгоритма и программ расчета электрического режима энергосистемы.

Публикации содержание результатов расчетно-экспериментальных исследований были опубликованы в журнале «Техника юлдузлари».

# 1. ФОРМЫ ЗАПИСИ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ БАЛАНСА

## 1.1 Узловые уравнения в форме баланса токов

При численном решении УУ, в зависимости от характера задачи установившегося режима, могут быть записаны в различной форме. Так, матричное уравнение [1]

$$Y\hat{U} = Y_{i0}\hat{U}_0 + (\hat{S}_i/\hat{U}_i), \quad (1.1)$$

можно записать в виде уравнений для узлов  $i = 1 \div N$ :

$$W(i) = \sum_{k=0}^N Y_{ik}\hat{U}_k + \hat{S}_i/\hat{U}_i. \quad (1.2)$$

Уравнения (6,7) разделяют при численном решении на действительную и мнимую части:

а) в прямоугольных координатах –

$$W(I'_i) = \sum_{k=0}^N (g_{ik}U'_k - b_{ik}U''_k) + I'_i, \quad (1.3)$$

$$W(I''_i) = \sum_{k=0}^N (b_{ik}U'_k + g_{ik}U''_k) + I''_i, \quad (1.4)$$

где:

$Y$  – матрица проводимостей;

$U_0$  – напряжение балансирующего узла;

$S_i$  – нагрузка узла

$g_{ik}$  и  $b_{ik}$  – соответственно активные и реактивные проводимостей для  $ik$  ой ветвей.

## 1.2 Узловые уравнения в форме баланса мощностей

В полярных координатах – в уравнениях (1.3) и (1.4)  $U_i', U_i''$  заменяют на  $U_i \cos \delta_i$ ,  $U_i \sin \delta_i$ .

Умножив каждое из уравнений (1.2) на  $\hat{U}_i$ , получим УУ в форме баланса мощностей:

$$W(S) = \hat{U}_i \sum_{k=0}^N Y_{ik} \hat{U}_k + \hat{S}_i \quad (1.5)$$

Узловые уравнения баланса активных и реактивных мощностей в прямоугольных координатах имеют вид [2]

$$W(P_i) = \sum_{k=0}^N [g_{ik}(U_i' U_k' + U_i'' U_k'') + b_{ik}(U_i'' U_k' - U_i' U_k'')] + P_i \quad (1.6)$$

$$W(Q_i) = \sum_{k=0}^N [g_{ik}(U_i'' U_k' - U_i' U_k'') - b_{ik}(U_i' U_k' + U_i'' U_k'')] + Q_i \quad (1.7)$$

в полярных координатах – соответственно:

$$W(P_i) = U_i \sum_{k=0}^N U_k (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}) + P_i, \quad (1.8)$$

$$W(Q_i) = U_i \sum_{k=0}^N U_k (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}) + Q_i, \quad (1.9)$$

где  $\delta_{ik} = \delta_i - \delta_k$

$$\hat{U}_i = \hat{A}_i \hat{U}_0 - \sum_{k=1}^N Z_{ik} \hat{S}_k / \hat{U}_k \quad (1.10)$$

$$\text{где } \hat{A}_i = \sum_{k=1}^N Z_{ik} Y_{k0} \quad (1.11)$$

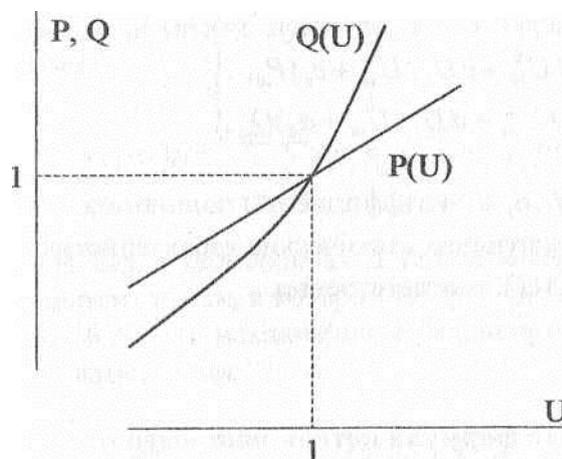
Приняв  $\delta_0=0$ , запишем комплексные уравнения (1.11) по составляющим в прямоугольных координатах:

$$U_i' = A_i' U_0 - \sum_{k=1}^N [U_k' (P_k R_{ik} + Q_k X_{ik}) - U_k'' (P_k X_{ik} - Q_k R_{ik})] / U_k^2 \quad (1.12)$$

$$U_i'' = A_i'' U_0 - \sum_{k=1}^N [U_k'' (P_k X_{ik} - Q_k R_{ik}) + U_k' (P_k R_{ik} + Q_k X_{ik})] / U_k^2 \quad (1.13)$$

В зависимости от цели анализа в дальнейшем используются те или иные формы записи УУ. [3]

Задание неизменной мощности нагрузок  $P_n$ ,  $Q_n$  при расчете установившегося режима электрической системы соответствует требованиям к работе сети по условиям электроснабжения потребителей. В реальных условиях мощность потребителей в любом заданном режиме зависит от величины напряжения –  $P(U)$ ,  $Q(U)$ . Примерный вид статических характеристик нагрузок по напряжению  $P(U)$  и  $Q(U)$  для совокупности групп потребителей, питающихся от одной подстанции или целой распределительной сети, показан на рис. 1.1,а. Однако для питающих сетей напряжением 110 кВ и выше такие статические характеристики справедливы только для случаев, когда на подстанциях отсутствует регулирование напряжения. В действительности все системные трансформаторы имеют регулирование коэффициента трансформации, в том числе под нагрузкой (РПН). В связи с этим статическая характеристика должна иметь вид, показанный на рис. 1.1, 1,б. Поэтому в пределах располагаемого диапазона регулирования  $^+\Delta U$  нагрузки питающих сетей можно задавать неизменным значением мощности. Однако в расчетах самоустанавливающихся послеаварийных режимов, рассматриваемых далее, необходим учет статических характеристик нагрузок по напряжению в исходном виде. [4]



1.1,а.

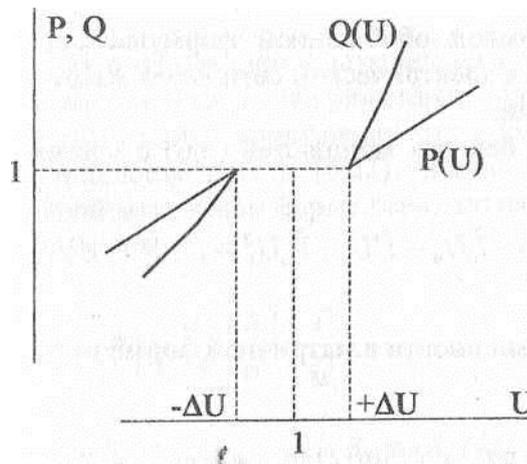


рис.1.1 б)

Так как экспериментальное получение статических характеристик для каждого узла затруднительно, пользуются характеристиками для комбинированной нагрузки, полученными расчетным путем. Для удобства они задаются в виде полиномов[5]

$$\begin{cases} P_i(U_i) = \left( \frac{c_2 U_i^2}{U_{hi}^2} + c_1 U_i / U_{hi} + c_0 \right) P_{hi}, \\ Q_i(U_i) = \left( \frac{d_2 U_i^2}{U_{hi}^2} + d_1 U_i / U_{hi} + d_0 \right) Q_{hi}, \end{cases} \quad (1.14)$$

где  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  и  $d_0, d_1, d_2$  – коэффициенты полиномов, аппроксимирующих статические характеристики  $P(U)$  и  $Q(U)$  соответственно.

## 2. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ

### 2.1 Алгоритм решения узловых уравнений в форме баланса мощностей

Применение метода Ньютона для решения узловых уравнений в форме баланса мощностей.

Рассмотрим УУ в форме баланса мощностей в полярных координатах

На каждом шаге итерационного процесса по методу Ньютона при этом решается линеаризованная система

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial W(P)}{\partial \delta} & \frac{\partial W(P)}{\partial U} \\ \frac{\partial W(Q)}{\partial \delta} & \frac{\partial W(Q)}{\partial U} \end{vmatrix}^{(n)} * \begin{vmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{vmatrix}^{(n+1)} = - \begin{vmatrix} W(P) \\ W(Q) \end{vmatrix}^{(n)}, \quad (2.1)$$

где элементы якобиана находятся из выражений

$$\frac{\partial W(P_i)}{\partial \delta_k} = \begin{cases} U_i U_k (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}), & k \neq i, \\ b_{ii} U_i^2 - Q_i, & k = i \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial W(P_i)}{\partial U_k} = \begin{cases} U_i (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}), & k \neq i \\ -g_{ii} U_i + \frac{P_i}{U_i}, & k = i \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial W(Q_i)}{\partial \delta_k} = \begin{cases} -U_i U_k (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}), & k \neq i, \\ g_{ii} U_i^2 + P_i, & k = i \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial W(Q_i)}{\partial U_k} = \begin{cases} U_i (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}), & k \neq i \\ b_{ii} U_i + \frac{Q_i}{U_i}, & k = i \end{cases} \quad (2.5)$$

К преимуществам решения УУ в форме баланса мощностей методом Ньютона следует отнести простоту фиксирования модуля напряжения и генерирующих узлах, что достигается исключением соответствующего числа уравнений  $W(Q)$  и неизвестных  $\Delta U$  из системы (2.1). Кроме того, как будет показано ниже, данная форма УУ более приспособлена для декомпозиции якобиана в модификациях метода Ньютона с разделением.[6]

Небалансы мощности и элементы якобиана в полярных координатах (2.2)-(2.5) для векторов напряжений выражаются обычно через

тригонометрические функции  $\sin\delta$  и  $\cos\delta$ , хотя это и приводит к увеличению объема требуемых вычислений при расчетах на ЭВМ.

При использовании УУ в декартовых координатах для векторов напряжений (1.6),(1.7), итерационная формула по методу Ньютона имеет вид (при заданных  $P_i, Q_i$ )

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial W(P)}{\partial U'} & \frac{\partial W(P)}{\partial U''} \\ \frac{\partial W(Q)}{\partial U'} & \frac{\partial W(Q)}{\partial U''} \end{vmatrix}^{(n)} * \begin{vmatrix} \Delta U' \\ \Delta U'' \end{vmatrix}^{(n+1)} = - \begin{vmatrix} W(P) \\ W(Q) \end{vmatrix}^{(n)}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial W(P_i)}{\partial U'_k} = \begin{cases} g_{ik}U'_i + b_{ik}U''_i, & k \neq i, \\ -2g_{ii}U'_i + \sum_{k=0, k \neq i}^N (g_{ik}U'_k - b_{ik}U''_k), & k = i, \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial W(P_i)}{\partial U''_k} = \begin{cases} g_{ik}U''_i - b_{ik}U'_i, & k \neq i \\ -2g_{ii}U''_i + \sum_{k=0, k \neq i}^N (g_{ik}U''_k + b_{ik}U'_k), & k = i, \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial W(Q_i)}{\partial U'_k} = \begin{cases} g_{ik}U''_i - b_{ik}U'_i, & k \neq i, \\ 2b_{ii}U'_i - \sum_{k=0, k \neq i}^N (g_{ik}U''_k + b_{ik}U'_k), & k = i, \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial W(Q_i)}{\partial U''_k} = \begin{cases} -g_{ik}U'_i - b_{ik}U''_i, & k \neq i \\ 2g_{ii}U''_i + \sum_{k=0, k \neq i}^N (g_{ik}U'_k - b_{ik}U''_k), & k = i, \end{cases} \quad (2.10)$$

При данной форме УУ фиксирование напряжения в генерирующих узлах осуществляется несколько по-иному. Если в узле  $i$  заданы  $P_i, U_i$ , то в системе УУ вместо уравнения баланса реактивной мощности  $W(Q_i)$  (1.7) будет уравнение[7]

$$W(U_i^2) = U_i'^2 + U_i''^2 - U_i^2 = 0. \quad (2.11)$$

Общее число уравнений (1.6), (1.7) и (2.11) в данном случае не изменяется, т.е. остается равным  $2N$ , а в якобиан в место  $\frac{\partial W(Q_i)}{\partial U'_k}$  и  $\frac{\partial W(Q_i)}{\partial U''_k}$  будут входить производные (3.11) по  $U'_i$  и  $U''_i$ .

Несмотря на более простое вычисление якобиана и небалансов мощности в декартовых координатах (не содержащих тригонометрических

функций), на практике чаще используются уравнения в полярных координатах. Это связано с тем, что, кроме отмеченных выше преимуществ, якобиан уравнений в форме баланса мощностей при задании в генераторных узлах  $P_i, U_i$  может быть использован для анализа статической аperiodической устойчивости в процессе расчета установившегося режима.

К недостаткам решения УУ в полярных координатах следует отнести, кроме высокой чувствительности к начальному приближению, зависимость сходимости от способа задания исходных данных. Так, при задании в узлах  $P_i, U_i$  метод Ньютона для УУ в форме баланса мощностей часто расходится. Поэтому в практических алгоритмах для повышения эффективности этого метода используют способ смены переменных. Сущность этого способа заключается в том, что сначала расчет ведется при  $U_i = const$  в генерирующих узлах и полученное решение, затем используется в качестве исходного приближения для расчета при свободных  $U_i$ . Если исходное приближение оказывается вблизи области, где якобиан равен нулю, итерационный процесс даже при смене переменных может оказаться расходящимся. Поэтому практические алгоритмы основаны, как уже указывалось, на вынужденном введении параметра как уже указывалось, на вынужденном введении параметра как уже указывалось. Эффективный выбор параметра  $\lambda$  на каждом шаге итерационного процесса осуществляется на основе соотношений [7].

$$\lambda^{(n)} = \frac{1}{M^{(n)}}, \quad M^{(n)} \geq 1, \quad n=0,1,2,\dots \quad (2.12)$$

Величина  $M^{(n)}$  определяется из выражения

$$M^{(n)} = \frac{1}{\|W(X^{(n)})\|_m} \left\| \sum_{k,l} \frac{\partial^2 W(X^{(n)})}{\partial X_k \partial X_l} \Delta X_k^{(n)} \Delta X_l^{(n)} \right\|_m, \quad (2.13)$$

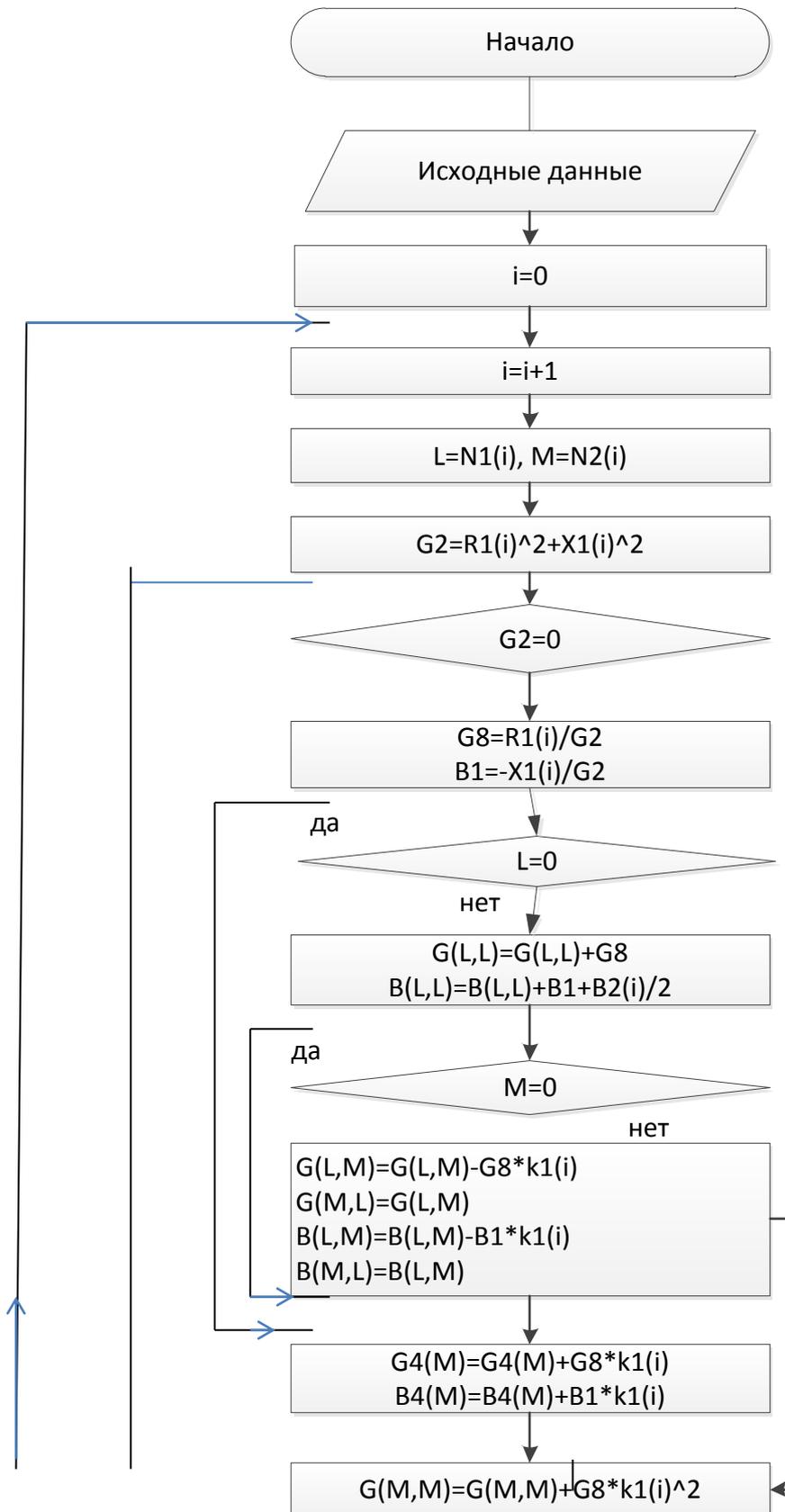
где  $\|W(X^{(n)})\|_m$  –  $m$  – норма вектора небалансов;

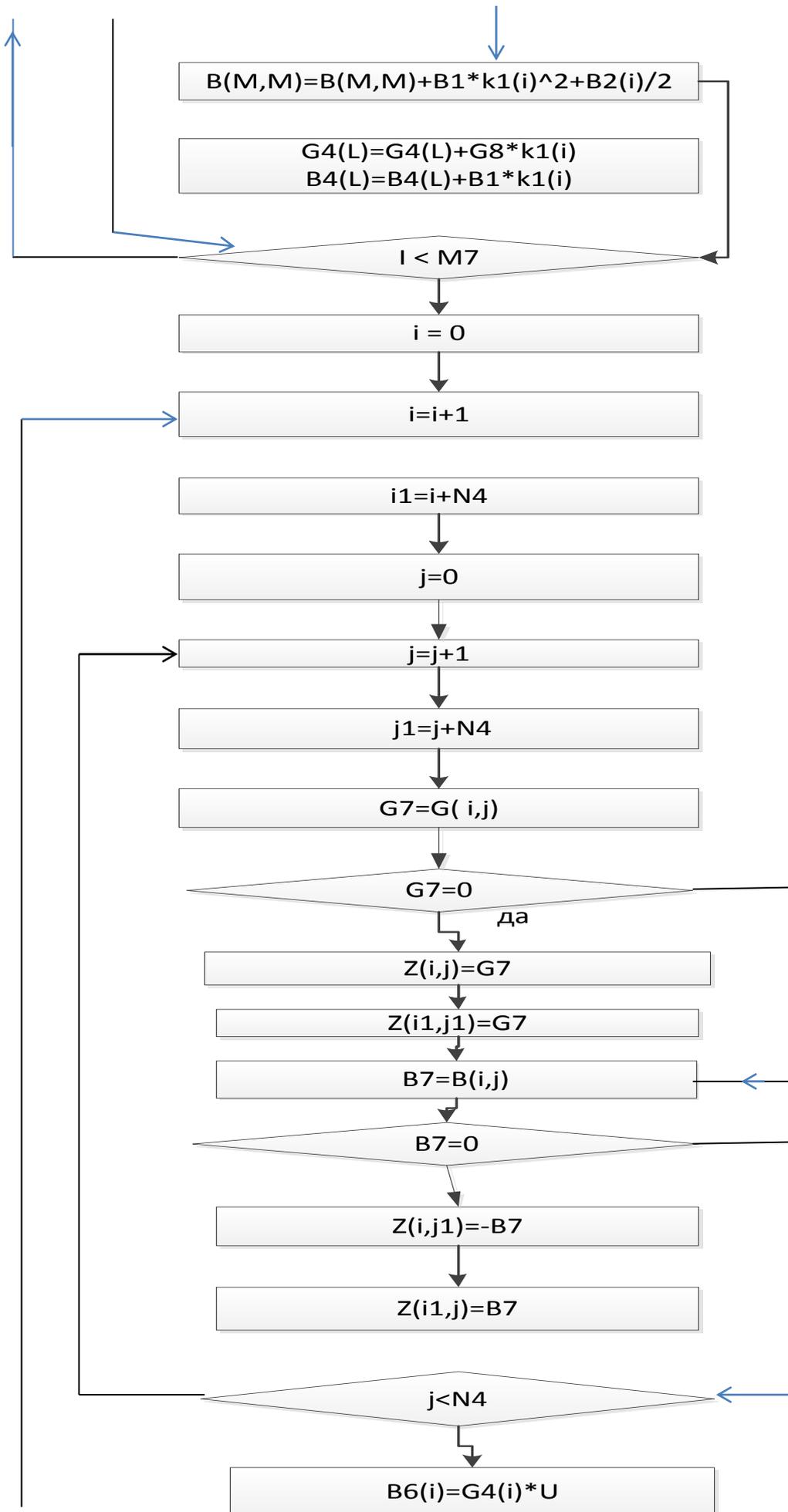
$\left\| \sum_{k,l} \frac{\partial^2 W(X^{(n)})}{\partial X_k \partial X_l} \Delta X_k^{(n)} \Delta X_l^{(n)} \right\|_m$  –  $m$  – норма вектора, равного произведению матрицы вторых производных дважды на вектор поправок  $\Delta X$ . [8]

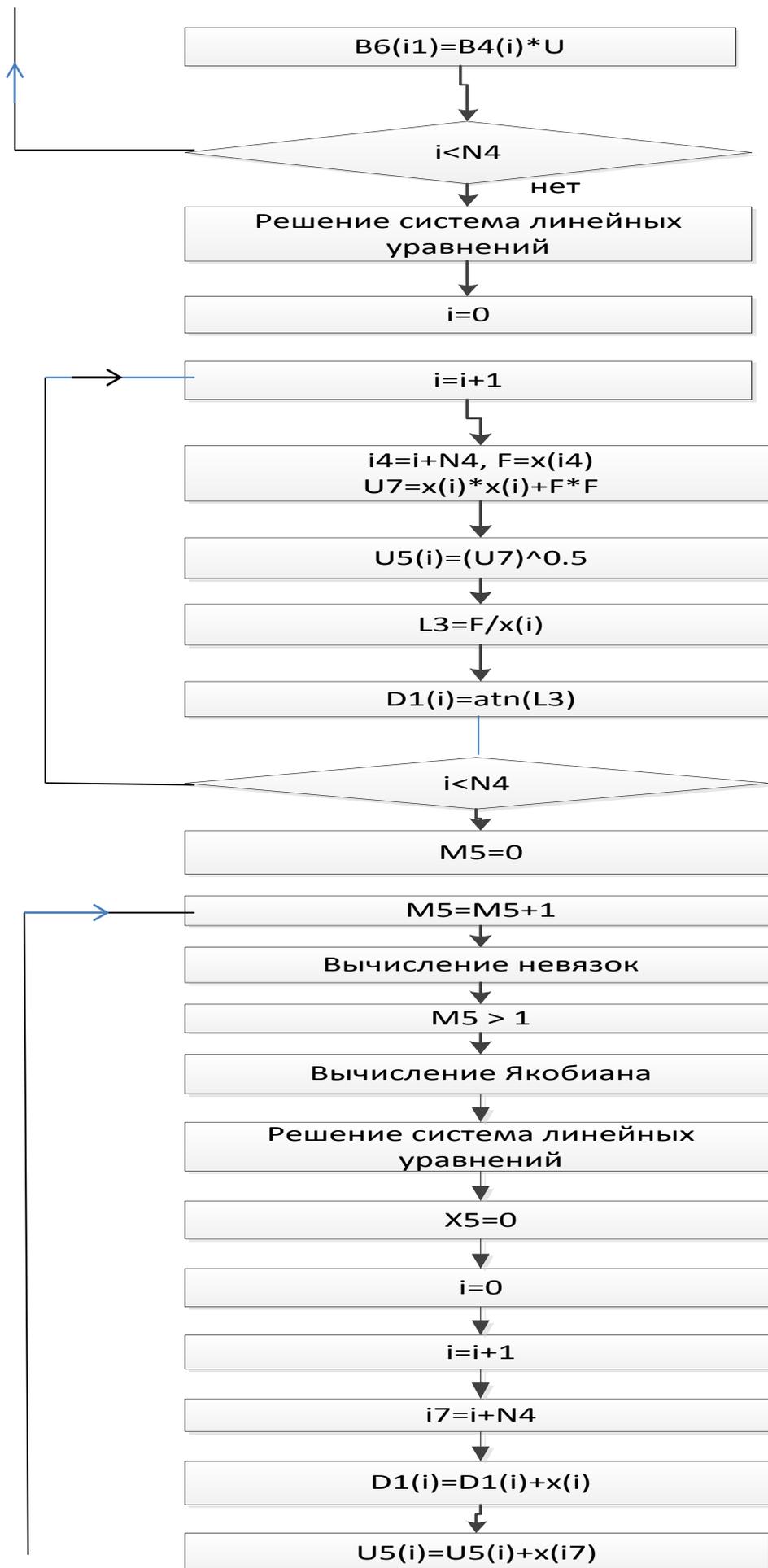
Хотя вычисление параметра  $\lambda$  по (2.12), (2.13) достаточно трудоемко, его введение в итерационный процесс обеспечивает монотонную сходимость при неизменном знаке якобиана. [9].

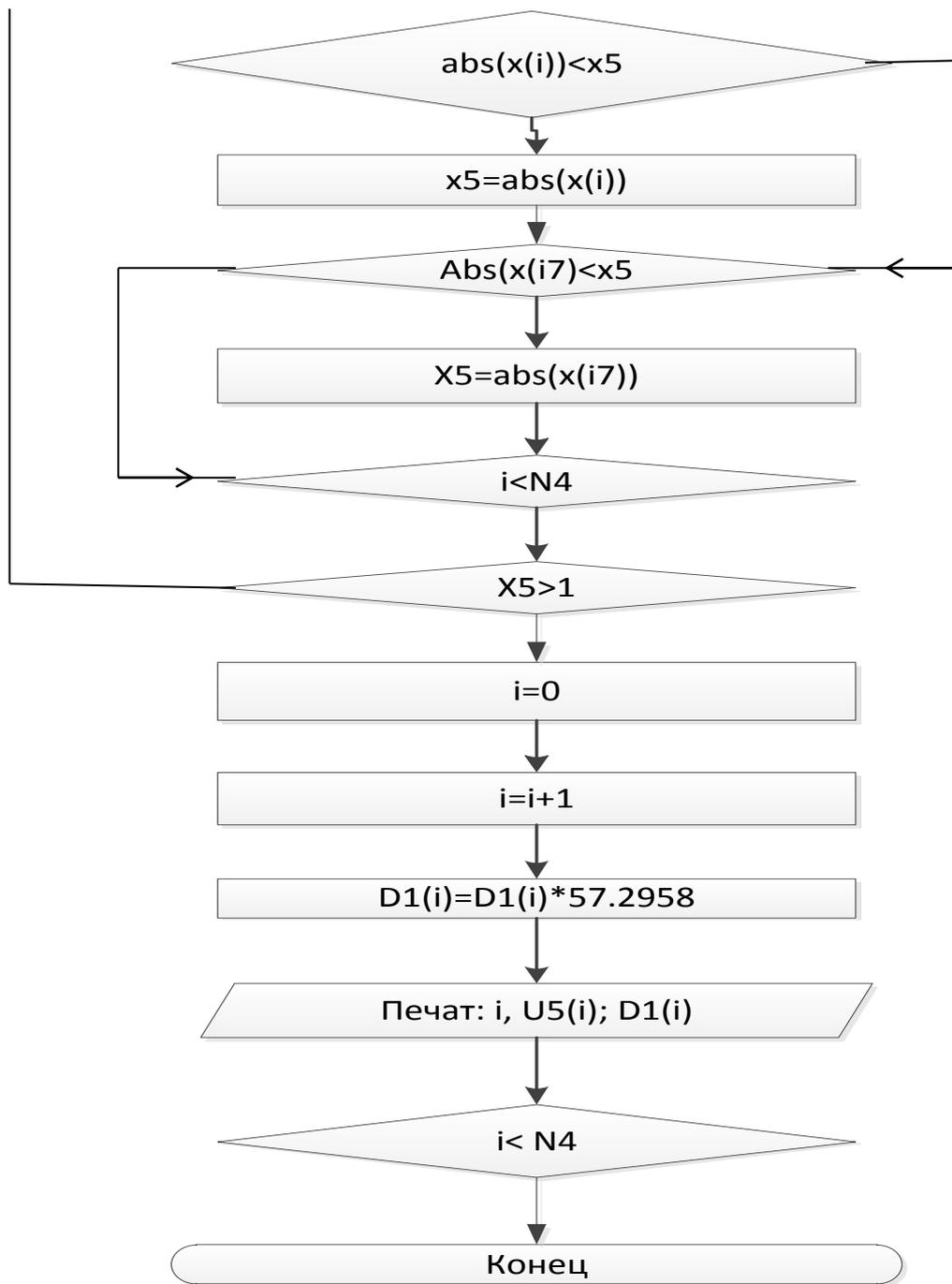
### 3. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РЕШЕНИЕМ УРАВНЕНИЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

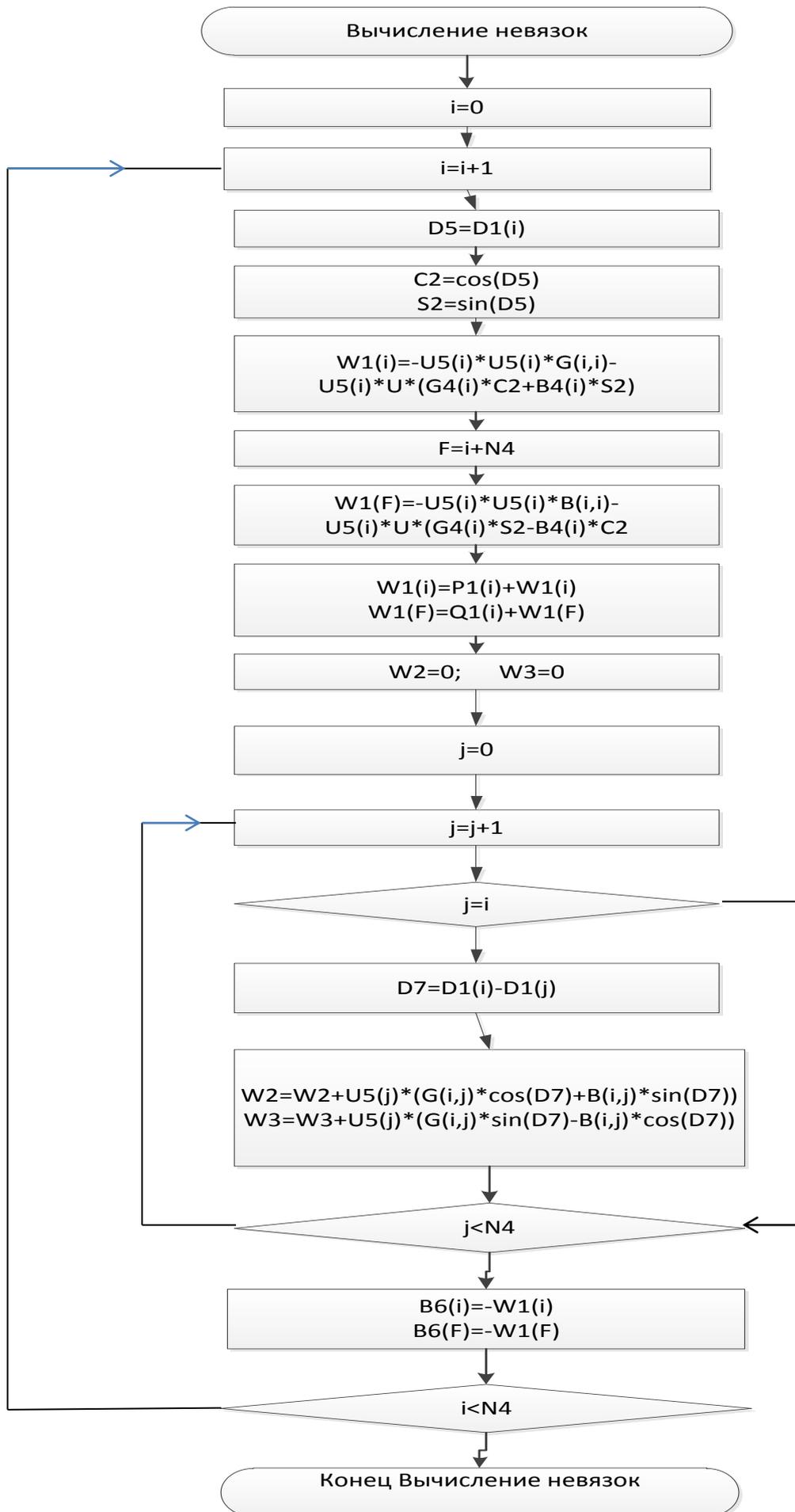
#### 3.1 Блок схема алгоритма решения УУН в полярных координатах

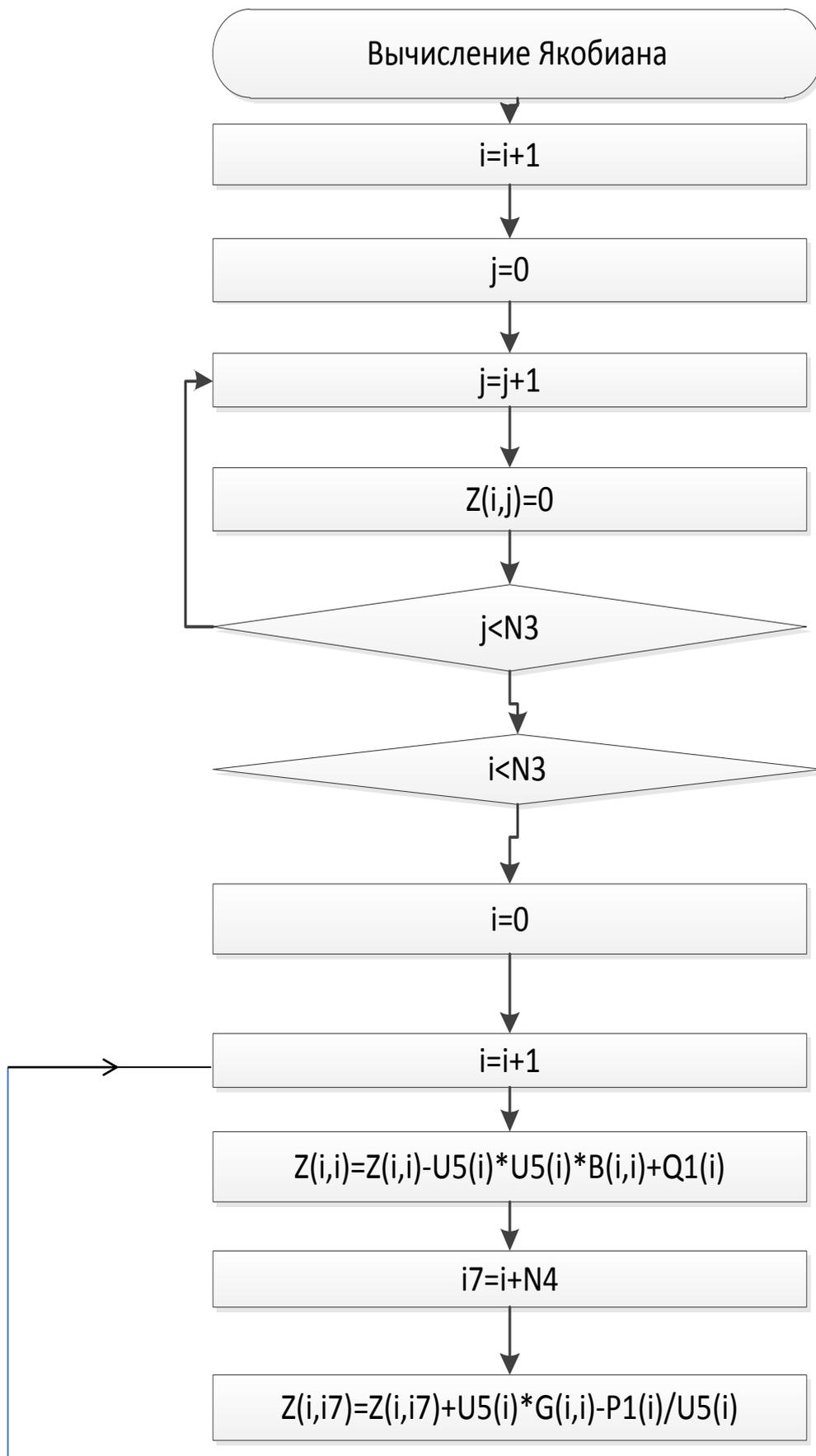


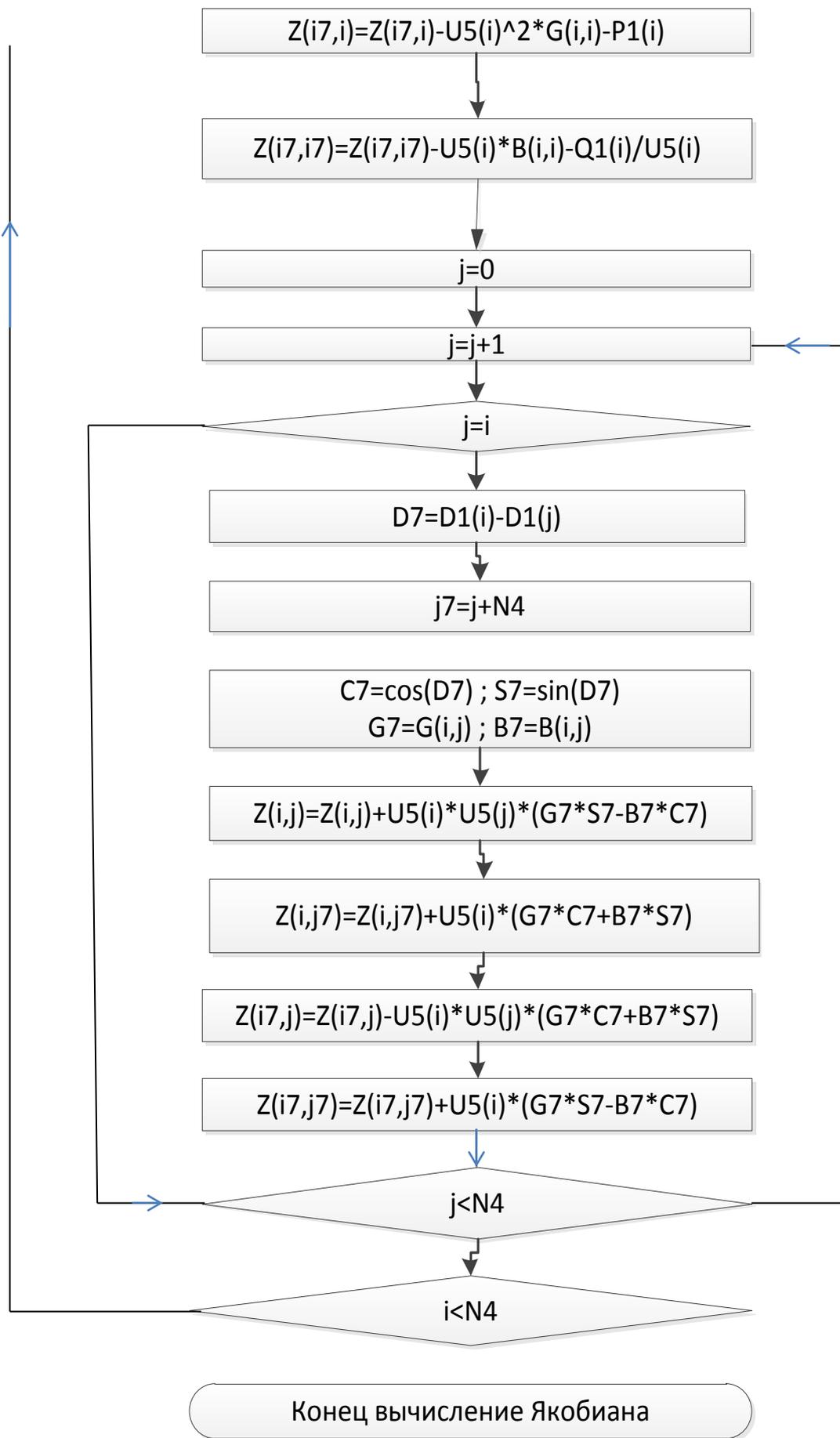












### 3.2 Пример решения узловых уравнений

Рассмотрим решение узловых уравнений применительно к ниже приведенной схеме рис.3.1.

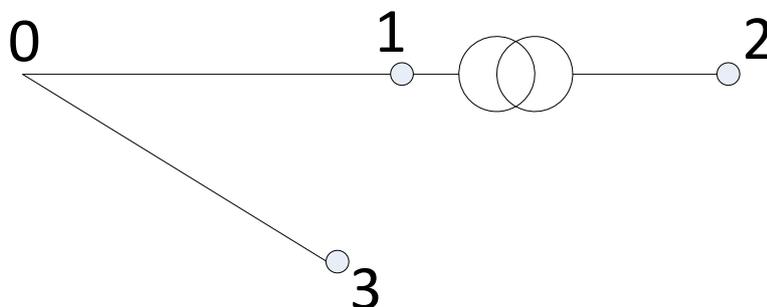


Рис. 3.1

Схема замещения

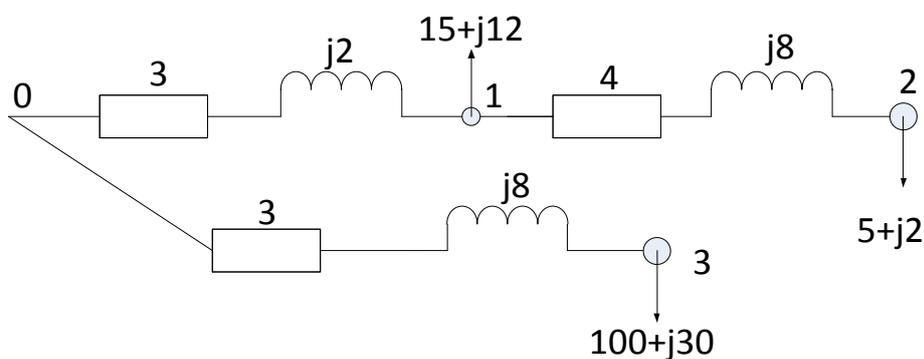


Рис. 3.2

Исходные данные:

$$R_{01}=3 \text{ Ом} \quad X_{01}=2 \text{ Ом} \quad P_1=15 \text{ кВт} \quad Q_1=12 \text{ кВт}$$

$$R_{12}=4 \text{ Ом} \quad X_{12}=8 \text{ Ом} \quad K_t=20.9 \quad P_1=5 \text{ кВт} \quad Q_1=2 \text{ кВт}$$

$$R_{03}=3 \text{ Ом} \quad X_{03}=8 \text{ Ом} \quad P_3=100 \text{ кВт} \quad Q_3=30 \text{ кВт} [10]$$

На основании исходных данных определяем проводимость каждого узла

$$Y_{01} = \frac{1}{Z_{01}} = \frac{3}{13} - j \frac{2}{13} = 0.2308 - j0.15385$$

$$Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{4}{80} - j \frac{8}{80} = 0.05 - j0.1$$

$$Y_{03} = \frac{1}{Z_{13}} = \frac{3}{73} - j \frac{8}{73} = 0.0411 - j0.1096$$

$$\tilde{Y}_{11}=(Y_{01}+Y_{12})=(0.2308-j0.15385+0.05-j0.1)=0.2809-j0.25385$$

$$\tilde{Y}_{12}=0.05-j0.1 \quad \tilde{Y}_{13}=0$$

$$\tilde{Y}_{22}=Y_{21} * K_T^2 = (0,05-j0.1)*20.9^2=21.8405-j43.681$$

$$\tilde{Y}_{33}=Y_{03}=0.0411-j0.1096$$

С использование (2.1) составляем УУН :

$$\begin{cases} (0,2809 - j0.25385)U_1 - 20.9 * (0.05 - j0.1) = \\ = (0.2308 - j0.15385)U_0 - \frac{15 + j12}{U_2} \\ (21.48405 - j43.681)U_2 - 20.9 * (0.05 - j0.1) * U_1 = 0 - \frac{5 + j2}{U_2} \\ (0.0411 - j0.1096)U_3 = Y(0.0411 - j0.1096) * U_0 - \frac{100 + j30}{U_3} \end{cases}$$

Выведенное уравнение согласно уравнению (1.5) записываем в форме баланса мощности

$$\begin{cases} (0,2809 - j0.25385)U_1^2 - 20.9 * (0.05 - j0.1)\hat{U}_1\hat{U}_2 = (0.2308 - j0.15385)230 * \hat{U}_1 - 15 - j12 \\ (21.4805 - j43.681) * U_2^2 - 20.9(0.05 - 0.1) * \hat{U}_2\hat{U}_1 = -5 - j2 \\ (0.0411 - j0.1096) * U_3^2 = (0.0411 - j0.1096) * 230\hat{U}_3 - 100 - j30 \end{cases}$$

Рассмотрим методы отражения систем уравнений в координатах Декарта.

Согласно формуле (1.7) разделяем на активных и реактивных частей. -

$$\begin{cases} 0,2809 * U_1^2 - 1.045(U_1'U_2' + U_1''U_2'') + 2.09(U_1''U_2' - U_1'U_2'') - 53.084U_1' + 35.3855U_1'' + 15 \\ 21.48405U_2^2 - 1.045(U_2'U_1' + U_2''U_1'') + 2.09(U_2''U_1' - U_2'U_1'') + 5 \\ 0.0411U_3^2 - 9.453U_3' + 25.208U_3'' + 100 = 0 \end{cases}$$

Реактивные части

$$\begin{cases} 0,25385 * U_1^2 - 1.045(U_1''U_2' - U_1'U_2'') - 2.09(U_1'U_2' - U_1''U_2'') - 53.084U_1'' - 35.3855U_1'' + 12 \\ 43.681U_2^2 - 1.045(U_2''U_1' - U_2'U_1'') - 2.09(U_2'U_1' + U_2''U_1'') + 2 \\ 0.1096U_3^2 - 9.453U_3'' - 25.208U_3'' + 30 = 0 \end{cases}$$

Систему уравнений решаем согласно методу Ньютона-Рафсона.

Согласно формуле (2.6) рассмотрим матрицу якобиан.

$$J_{11} = 2 * 0.2809U_1' - (1.045U_2' + 2.09U_2'') - (53.084)$$

$$J_{12} = -(1.045U_1' - 2.09U_1'')$$

$$J_{13} = 0$$

$$\begin{aligned}
J_{21} &= -(1.045U_1' + 2.09U_2'') \\
J_{22} &= 2 * 21.4805U_2' - (1.045U_1' + 2.09U_1'') \\
J_{23} &= 0 \\
J_{31} &= 0 \\
J_{32} &= 0 \\
J_{33} &= 2 * 0.0411U_3' - 9.453 \\
J_{14} &= 2 * 0.2809U_1'' - (1.045U_2'' - 2.09U_2') + 35.3855 \\
J_{15} &= -(1.045U_1'' + 2.09U_1') \\
J_{16} &= 0 \\
J_{24} &= -(1.045U_2'' - 2.09U_2') \\
J_{25} &= 2 * 21.4805U_2' - (1.045U_1' + 2.09U_1'') \\
J_{26} &= 0 \\
J_{34} &= 0 \\
J_{35} &= 0 \\
J_{36} &= 2 * 0.0411U_3'' + 25.208 \\
J_{41} &= 2 * 0.25385U_1' + (1.045U_2'' - 2.09U_2') - 35.3855 \\
J_{42} &= -(1.045U_1'' - 2.09U_1') \\
J_{43} &= 0 \\
J_{51} &= -(1.045U_2'' + 2.09U_2') \\
J_{52} &= 2 * 43.681U_2' + (1.045U_1'' - 2.09U_1') \\
J_{53} &= 0 \\
J_{61} &= 0 \\
J_{62} &= 0 \\
J_{63} &= 2 * 0.1096U_3' - 25.203 \\
J_{44} &= 2 * 0.25385U_1'' - (1.045U_2'' + 2.09U_2'') - 53.084 \\
J_{45} &= (1.045U_1' - 2.09U_1'') \\
J_{46} &= 0 \\
J_{54} &= (1.045U_2' - 2.09U_2'') \\
J_{55} &= 2 * 43.681U_2'' - (1.045U_1' + 2.09U_1'')
\end{aligned}$$

$$J_{56} = 0$$

$$J_{64} = 0$$

$$J_{65} = 0$$

$$J_{66} = 2 * 0.1096U_3'' - 9.453$$

Так как  $U_i \approx U_{hi}$

определяем начальные приближения

$$U_1' = 230 \text{ кВ}$$

$$U_1'' = 0$$

$$U_2' = 11 \text{ кВ}$$

$$U_2'' = 0 \text{ кВ}$$

$$U_3' = 230 \text{ кВ}$$

$$U_3'' = 0 \text{ кВ}$$

При заданной точности  $\varepsilon = 0.001$  результаты расчета напряжений установившегося режима приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1

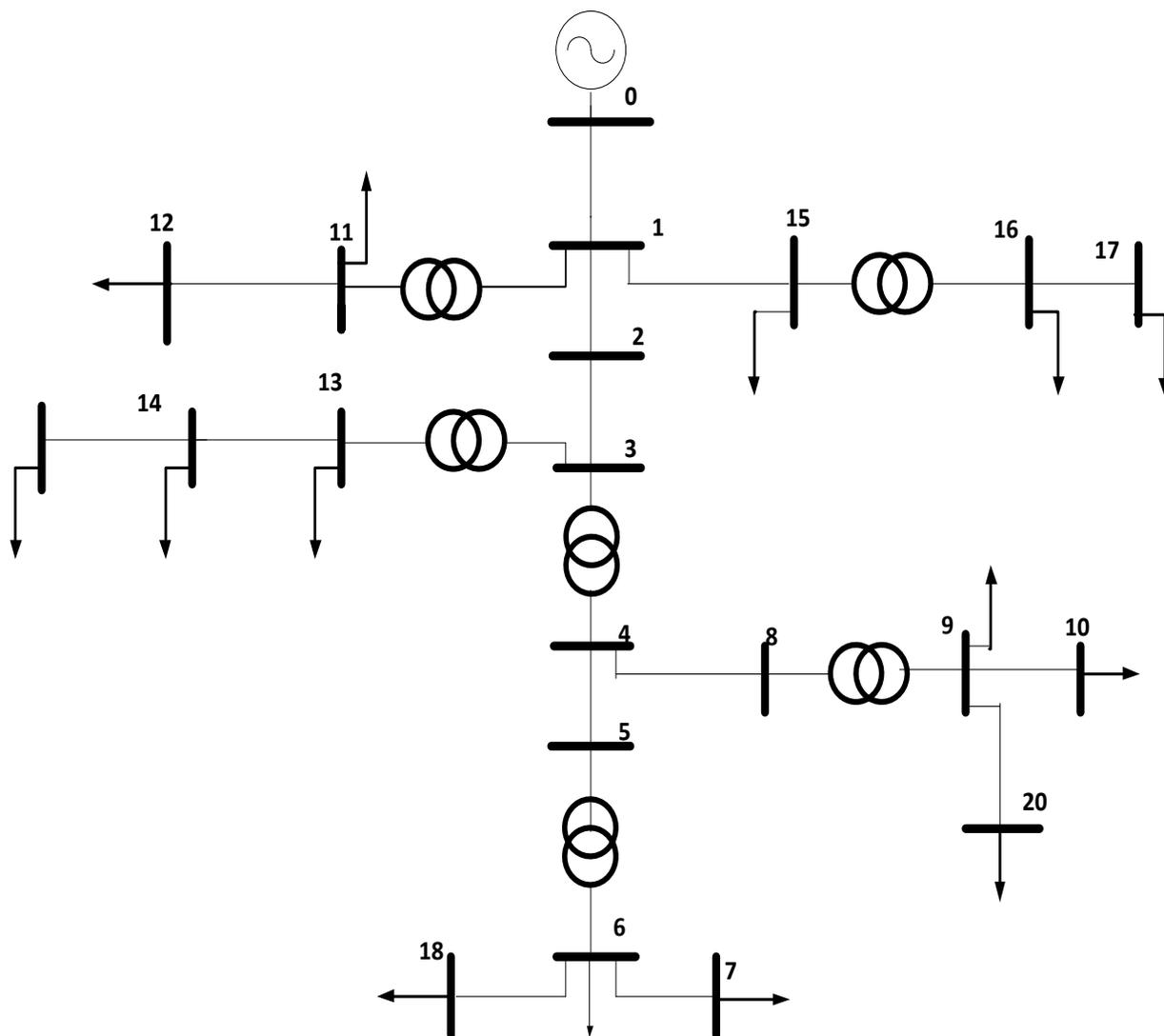
Итерации №	№ Узел	U	U'	U''
1	1	230,018	230,018	-0,0273
	2	11,006	11,006	-0,0013
	3	230,064	230,064	-0,0238
2	1	229,636	229,636	-0,0185
	2	10,980	10,980	-0,0075
	3	227,736	227,715	-3,1103
3	1	229,635	229,635	-0,0184
	2	10,980	10,980	-0,0755
	3	227,671	227,650	-3,1103
4	1	229,635	229,635	-0,0184
	2	10,980	10,980	-0,0075
	3	227,670	227,648	-3,1103

Расчет завершен на 4 итерации.

## 4. РАСЧЕТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РЕШЕНИЕМ УЗЛОВЫХ УРАВНЕНИЙ

### 4.1 Программа и результаты расчета режимов решением узловых уравнений в полярных координатах

На основании данного алгоритма составляем BASIC-программу решения УУН. Вначале рассмотрим программу, основанную на уравнениях в полярных координатах для радиальной схемы из 20 узлов.



Параметры узлов (активные и реактивные нагрузки) и ветвей (сопротивления и проводимости) данной схемы приведены в таблице 4.1.

Рис.4.1

№	i-j	$R_{i-j, \text{OM}}$	$X_{i-j, \text{OM}}$	$K_t$	P, МВт	Q, МВАР	$B_c$
1	0-1	8	12	1	0	0	0
2	1-2	4	6	1	0	0	0
3	2-3	1	35	1	0	0	0
4	3-4	1	25	3	0	0	0
5	4-5	4	5	1	0	0	0
6	5-6	4	20	3	1.2	0.9	0
7	6-7	3	2	1	0.6	0.7	0
8	4-8	3	4	1	0	0	0
9	8-9	2	10	6	0.4	0.5	0
10	9-10	4	2	1	0.5	0.8	0
11	1-11	4	10	10	0.6	0.8	0
12	11-12	2	3	1	0.5	0.7	0
13	3-13	1	0	18	0.9	1.2	0
14	13-14	2	2	1	0.4	0.5	0
15	1-15	6	8	1	0	0	0
16	15-16	3	20	18	0.6	0.8	0
17	16-17	2	2	1	1.2	1.4	0
18	6-18	4	3	1	0.4	0.6	0
19	14-19	4	5	1	0.08	0.1	0
20	9-20	2.	1	1	0.07	0.09	0

Результаты расчета получены на 4-й итерации и приведены в таблице 4.2.

1. Результаты расчета в декартовых координатах, при заданных  $U_0=230$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.001$ , приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

№ узла	U, кВ	U', кВ	U'', кВ
1	229,250	229.2505	-0.07230486
2	229,025	229.0255	-0.0968236
3	228,164	228.1627	-0.7775663
4	75,916	75.91512	-0.3708955

5	75,65087	75.64983	-0.3974216
6	24,98102	24.97937	-0.2868966
7	24,85223	24.85098	-0.2493925
8	75,8024	75.80151	-0.3671472
9	12,59843	12.5982	-0.07670326
10	12,3045	12.3041	0.09971417
11	22,91656	22.91656	-0.009414032
12	22,78047	22.78047	-0.01372089
13	12,67544	12.67537	-0.04275672
14	12,5025	12.50248	-0.02322265
15	229,1236	229.1236	-0.07780969
16	12,71685	12.71684	-0.01163252
17	12,29384	12.29382	0.02020829
18	24,84412	24.84299	-0.2372907
19	12,43657	12.43655	-0.02310016
20	12,58014	12.57996	-0.06786077

В этом случае результаты расчета получены на 4-й итерации.

2. Для этой же схемы с использованием уравнений в полярных координатах результаты расчета при задании  $U_0=230$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.001$  результаты получены на на 4-й итерации и приведены в таблице 4.3

Таблица 4.?

№ узел	U	U'	U''	$\delta$
1	229,2508	229.2508	-0,0720	-0,00031
2	229,0260	229.026	-0,0963	-0,00042
3	228,1635	228.1635	-0,7758	-0,0034
4	75,9154	75.91541	-0,3703	-0,00488
5	75,6501	75.65014	-0,3968	-0,00525
6	24,9795	24.97948	-0,2867	-0,01148
7	24,8511	24.85109	-0,2492	-0,01003
8	75,8018	75.80182	-0,3666	-0,00484
9	12,5983	12.59825	-0,0766	-0,00608
10	12,3042	12.30424	0,0998	0,008111
11	22,9166	22.9166	-0,0094	-0,00041
12	22,7805	22.78051	-0,0137	-0,0006
13	12,6754	12.67541	-0,0427	-0,00337

14	12,5025	12.50253	-0,0231	-0,00185
15	229,1240	229.124	-0,0775	-0,00034
16	12,7169	12.71686	-0,0116	-0,00091
17	12,2938	12.29383	0,0202	0,001645
18	24,8431	24.84309	-0,2371	-0,00954
19	12,4366	12.4366	-0,0230	-0,00185
20	12,5800	12.58002	-0,0678	-0,00539

#### 4.2 Расчеты для кольцевых схем

Теперь рассмотрим программу, основанную на уравнениях в полярных координатах для Кольцовых схем Рассчитываемые значения -  $U$  и  $\delta$ . Вначале рассмотрим расчеты для 5-узловой схемы, приведенной на рис.4.2

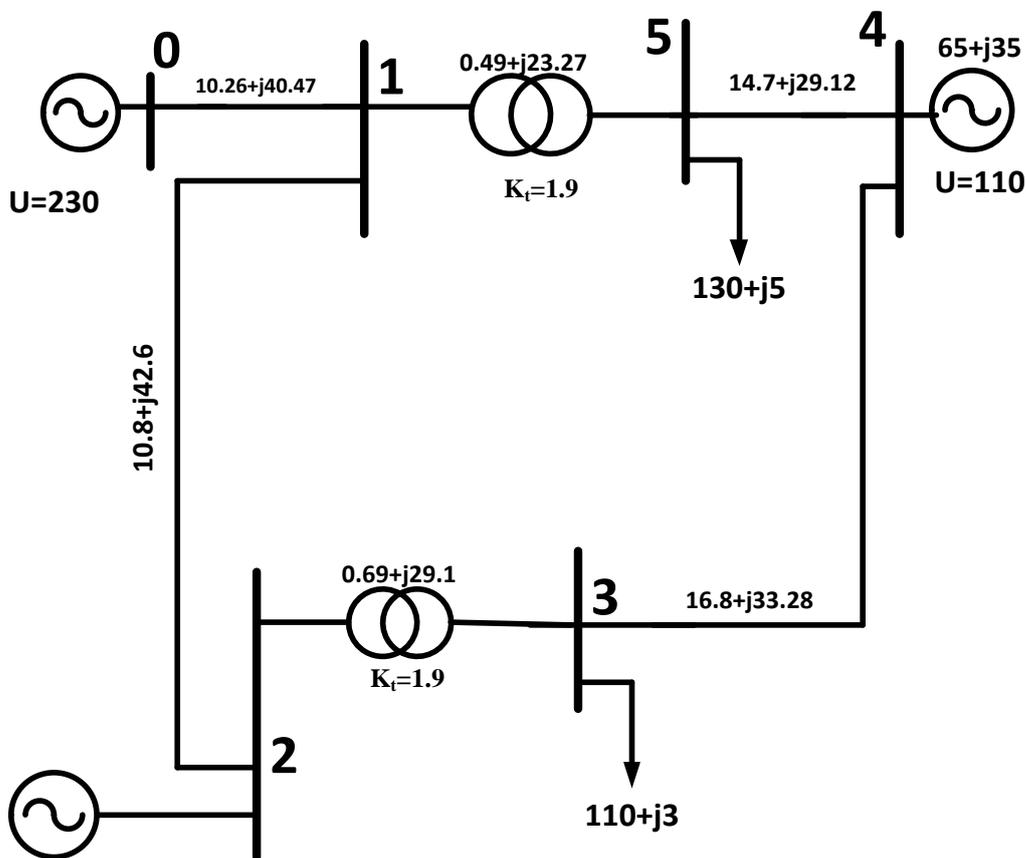


Рис 4.1

В расчетах использована разработанная программа, текст которой приведен ниже.

```

10 PRINT "Rashet regima UUN v POLYARNIH koordinatah"
100 DIM N1(50), N2(50), R1(50), X1(50), K1(50), P1(50), Q1(50), B2(50)
110 DIM G(100, 100), B(100, 100), Z(100, 100), B6(100), X(100), W1(100)
120 DIM G4(100), B4(100), U1(50), U2(50), U5(50), D1(50)
130 PRINT "U0, Chislo Uzlov i Vetvey="
140 INPUT U, N4, M7
200 N3 = N4 * 2
230 FOR i = 1 TO M7
240 READ N1(i), N2(i), R1(i), X1(i), K1(i), P1(i), Q1(i), B2(i)
250 NEXT i
260 DATA 0,1,10.26,40.47,1,0,0,0
261 DATA 1,2,10.8,42.6,1,0,0,0
262 DATA 2,3,0.69,29.1,2,110,3,0
263 DATA 3,4,16.8,33.28,1,-65,-35,0
265 DATA 4,5,14.7,29.12,1,130,5,0
266 DATA 1,5,0.49,23.27,2,130,5,0
600 FOR i = 1 TO N3
610 FOR j = 1 TO N3
620 G(i, j) = 0
621 B(i, j) = 0
630 NEXT j
640 G4(i) = 0
641 B4(i) = 0
650 NEXT i
660 FOR i = 1 TO M7
670 L = N1(i)
680 M = N2(i)
690 G2 = R1(i) ^ 2 + X1(i) ^ 2
700 IF G2 = 0 GOTO 890
710 G8 = R1(i) / G2

```

```

720 B1 = -X1(i) / G2
730 IF L = 0 GOTO 820
740 G(L, L) = G(L, L) + G8
750 B(L, L) = B(L, L) + B1 + B2(i) / 2
760 IF M = 0 GOTO 870
770 G(L, M) = G(L, M) - G8 * K1(i)
780 G(M, L) = G(L, M)
790 B(L, M) = B(L, M) - B1 * K1(i)
800 B(M, L) = B(L, M)
810 GOTO 840
820 G4(M) = G4(M) + G8 * K1(i)
830 B4(M) = B4(M) + B1 * K1(i)
840 G(M, M) = G(M, M) + G8 * K1(i) ^ 2
850 B(M, M) = B(M, M) + B1 * K1(i) ^ 2 + B2(i) / 2
860 GOTO 890
870 G4(L) = G4(L) + G8 * K1(i)
880 B4(L) = B4(L) + B1 * K1(i)
890 NEXT i
900 FOR i = 1 TO N4
910 i1 = i + N4
920 FOR j = 1 TO N4
930 j1 = j + N4
940 G7 = G(i, j)
950 IF G7 = 0 GOTO 980
960 Z(i, j) = G7
970 Z(i1, j1) = G7
980 B7 = B(i, j)
990 IF B7 = 0 GOTO 1020
1000 Z(i, j1) = -B7
1010 Z(i1, j) = B7

```

```

1020 NEXT j
1030 B6(i) = G4(i) * U
1040 B6(i1) = B4(i) * U
1050 NEXT i
1060 GOSUB 3780
1070 GOSUB 3930
1090 FOR i = 1 TO N4
1100 i4 = i + N4
1102 U7 = X(i) * X(i) + X(i4) * X(i4)
1110 U5(i) = SQR(U7)
1120 L3 = X(i4) / X(i)
1130 D1(i) = ATN(L3)
1140 NEXT i
1150 M5 = 0
1160 M5 = M5 + 1
1170 GOSUB 1410
1180 IF M5 > 1 GOTO 1210
1190 GOSUB 1630
1200 GOSUB 3780
1210 GOSUB 3930
1220 X5 = 0
1230 FOR i = 1 TO N4
1240 i7 = i + N4
1250 D1(i) = D1(i) + X(i)
1260 U5(i) = U5(i) + X(i7)
1270 IF ABS(X(i)) < X5 GOTO 1290
1280 X5 = ABS(X(i))
1290 IF ABS(X(i7)) < X5 GOTO 1310
1300 X5 = ABS(X(i7))
1310 NEXT i

```

```

1320 IF X5 > .01 GOTO 1160
1340 FOR i = 1 TO N4
1361 U1(i) = U5(i) * COS(D1(i))
1362 U2(i) = U5(i) * SIN(D1(i))
1390 NEXT i
1395 PRINT h
1400 STOP
1401 END
1410 REM Raschet Nevyazok W
1420 FOR i = 1 TO N4
1430 D5 = D1(i)
1440 C2 = COS(D5)
1441 S2 = SIN(D5)
1450 W1(i) = U5(i) * U5(i) * G(i, i) - U5(i) * U * (G4(i) * C2 + B4(i) * S2)
1460 i4 = i + N4
1470 W1(i4) = -U5(i) * U5(i) * B(i, i) - U5(i) * U * (G4(i) * S2 - B4(i) * C2)
1480 W1(i) = P1(i) + W1(i)
1490 W1(i4) = Q1(i) + W1(i4)
1500 W2 = 0
1501 W3 = 0
1510 FOR j = 1 TO N4
1520 IF j = i GOTO 1560
1530 D7 = D1(i) - D1(j)
1540 W2 = W2 + U5(j) * (G(i, j) * COS(D7) + B(i, j) * SIN(D7))
1550 W3 = W3 + U5(j) * (G(i, j) * SIN(D7) - B(i, j) * COS(D7))
1560 NEXT j
1570 W1(i) = W1(i) + U5(i) * W2
1580 W1(i4) = W1(i4) + U5(i) * W3
1590 B6(i) = -W1(i)
1600 B6(i4) = -W1(i4)

```

```

1601 REM PRINT "i i4 B6(i) B6(i4) ="; i; i4; B6(i); B6(i4)
1610 NEXT i
1620 RETURN
1630 REM Jacobian
1640 FOR i = 1 TO N3
1650 FOR j = 1 TO N3
1660 Z(i, j) = 0
1670 NEXT j
1680 NEXT i
1690 FOR i = 1 TO N4
1700 Z(i, i) = -U5(i) ^ 2 * B(i, i) + Q1(i)
1710 i7 = i + N4
1720 Z(i, i7) = U5(i) * G(i, i) - P1(i) / U5(i)
1730 Z(i7, i) = -U5(i) * U5(i) * G(i, i) - P1(i)
1740 Z(i7, i7) = -U5(i) * B(i, i) - Q1(i) / U5(i)
1750 FOR j = 1 TO N4
1760 IF j = i GOTO 1840
1770 D7 = D1(i) - D1(j)
1780 j7 = j + N4
1790 C7 = COS(D7)
1791 S7 = SIN(D7)
1792 G7 = G(i, j)
1793 B7 = B(i, j)
1800 Z(i, j) = Z(i, j) + U5(i) * U5(j) * (G7 * S7 - B7 * C7)
1810 Z(i, j7) = Z(i, j7) + U5(i) * (G7 * C7 + B7 * S7)
1820 Z(i7, j) = Z(i7, j) - U5(i) * U5(j) * (G7 * C7 + B7 * S7)
1830 Z(i7, j7) = Z(i7, j7) + U5(i) * (G7 * S7 - B7 * C7)
1840 NEXT j
1850 NEXT i
1860 RETURN

```

```

3770 REM Pryamoy hod
3780 N = N3
3790 N6 = N - 1
3800 FOR k = 1 TO N6
3810 k2 = k + 1
3820 FOR i = k2 TO N
3830 IF Z(i, k) = 0 GOTO 3890
3840 c = Z(i, k) / Z(k, k)
3850 FOR j = k2 TO N
3860 IF Z(k, j) = 0 GOTO 3880
3870 Z(i, j) = Z(i, j) - c * Z(k, j)
3880 NEXT j
3890 NEXT i
3900 NEXT k
3910 RETURN
3920 REM Pryamoy i obr hod
3930 N = N3
3940 REM A1 = c1
3950 N7 = N - 1
3960 FOR k = 1 TO N7
3970 k2 = k + 1
3980 c1 = B6(k) / Z(k, k)
3990 IF c1 = 0 GOTO 4030
4000 FOR i = k2 TO N
4010 B6(i) = B6(i) - c1 * Z(i, k)
4020 NEXT i
4030 NEXT k
4040 i = N + 1
4050 i = i - 1
4060 IF i = 0 GOTO 4150

```

```

4070 X(i) = 0
4080 j = N + 1
4090 j = j - 1
4100 IF j = i GOTO 4130
4110 X(i) = X(i) - Z(i, j) * X(j)
4120 GOTO 4090
4130 X(i) = (X(i) + B6(i)) / Z(i, i)
4140 GOTO 4050
4150 REM c1 = A1
4160 RETURN

```

Результаты расчета получены на 9-й итерации и приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

№ узел	U	U'	U''	δ
1	205.947	201.7162	-41.53001	-11.63369
2	195.0984	185.4979	-60.4477	-18.0491
3	101.5836	93.58729	-39.50247	-22.88424
4	104.6213	98.91599	-34.07714	-19.00914
5	107.7263	103.65	-29.35339	-15.81198

## 4.2 Программа и результаты расчета режимов решением узловых уравнений в декартовых координатах

Теперь рассмотрим программу, основанную на уравнениях в декартовых координатах для схемы 4.1.

```
10 PRINT "Raschet rejima UUN v Dekartov koordinatah"
100 DIM N1(50), N2(50), R1(50), X1(50), K1(50), P1(50), Q1(50), B2(50)
110 DIM G(100, 100), B(100, 100), Z(100, 100), B6(100), X(100), W1(100)
120 DIM G4(100), B4(100), U1(50), U2(50), U5(50), D1(50)
130 PRINT "U0, Chislo Uzlov i Vetvey="
140 INPUT U, N4, M7
200 N3 = N4 * 2
230 FOR i = 1 TO M7
240 READ N1(i), N2(i), R1(i), X1(i), K1(i), P1(i), Q1(i), B2(i)
250 NEXT i
260 DATA 0,1,10.26,40.47,1,0,0,0
261 DATA 1,2,10.8,42.6,1,0,0,0
262 DATA 2,3,0.69,29.1,2,110,3,0
263 DATA 3,4,16.8,33.28,1,-65,-35,0
265 DATA 4,5,14.7,29.12,1,130,5,0
266 DATA 1,5,0.49,23.27,2,130,5,0
600 FOR i = 1 TO N3
610 FOR j = 1 TO N3
620 G(i, j) = 0
621 B(i, j) = 0
630 NEXT j
640 G4(i) = 0
641 B4(i) = 0
650 NEXT i
660 FOR i = 1 TO M7
670 L = N1(i)
680 M = N2(i)
690 G2 = R1(i) ^ 2 + X1(i) ^ 2
700 IF G2 = 0 GOTO 890
710 G8 = R1(i) / G2
```

```

720 B1 = -X1(i) / G2
730 IF L = 0 GOTO 820
740 G(L, L) = G(L, L) + G8
750 B(L, L) = B(L, L) + B1 + B2(i) / 2
760 IF M = 0 GOTO 870
770 G(L, M) = G(L, M) - G8 * K1(i)
780 G(M, L) = G(L, M)
790 B(L, M) = B(L, M) - B1 * K1(i)
800 B(M, L) = B(L, M)
810 GOTO 840
820 G4(M) = G4(M) + G8 * K1(i)
830 B4(M) = B4(M) + B1 * K1(i)
840 G(M, M) = G(M, M) + G8 * K1(i) ^ 2
850 B(M, M) = B(M, M) + B1 * K1(i) ^ 2 + B2(i) / 2
860 GOTO 890
870 G4(L) = G4(L) + G8 * K1(i)
880 B4(L) = B4(L) + B1 * K1(i)
890 NEXT i
900 FOR i = 1 TO N4
910 i1 = i + N4
920 FOR j = 1 TO N4
930 j1 = j + N4
940 G7 = G(i, j)
950 IF G7 = 0 GOTO 980
960 Z(i, j) = G7
970 Z(i1, j1) = G7
980 B7 = B(i, j)
990 IF B7 = 0 GOTO 1020
1000 Z(i, j1) = -B7
1010 Z(i1, j) = B7
1020 NEXT j
1030 B6(i) = G4(i) * U
1040 B6(i1) = B4(i) * U
1050 NEXT i
1060 GOSUB 3780

```

```

1070 GOSUB 3930
1071 FOR i = 1 TO N4
1072 FOR j = 1 TO N4
1073 IF j = i GOTO 1076
1074 G(i, j) = -G(i, j)
1075 B(i, j) = -B(i, j)
1076 NEXT j
1077 NEXT i
1090 FOR i = 1 TO N4
1100 i4 = i + N4
1104 U1(i) = X(i)
1105 U2(i) = X(i4)
1110 U5(i) = SQR(U1(i) ^ 2 + U2(i) ^ 2)
1140 NEXT i
1150 M5 = 0
1160 M5 = M5 + 1
1170 GOSUB 1410
1180 IF M5 > 1 GOTO 1210
1190 GOSUB 1715
1200 GOSUB 3780
1210 GOSUB 3930
1220 X5 = 0
1230 FOR i = 1 TO N4
1240 i4 = i + N4
1250 U1(i) = U1(i) + X(i)
1260 U2(i) = U2(i) + X(i4)
1262 PRINT "i="; i; "U'="; U1(i); "U"="; U2(i); "dU'="; X(i); "dU"="; X(i4)
1270 IF ABS(X(i)) < X5 GOTO 1290
1280 X5 = ABS(X(i))
1290 IF ABS(X(i4)) < X5 GOTO 1310
1300 X5 = ABS(X(i4))
1310 NEXT i
1320 IF X5 > .001 GOTO 1160
1331 FOR i = 1 TO N4
1332 PRINT "Uzel"; i; " U'="; U1(i); " U2(i)="; U2(i)

```

```

1335 NEXT i
1338 PRINT "Raschet zavershen na iteracii ="; M5
1400 STOP
1401 END
1410 REM Raschet Nevyazok
1420 FOR i = 1 TO N4
1425 i4 = i + N4
1500 W2 = 0
1501 W3 = 0
1510 FOR j = 1 TO N4
1515 IF j = i GOTO 1530
1520 W2 = W2 + (G(i, j) * (U1(i) * U1(j) + U2(i) * U2(j)) + B(i, j) * (U2(i) * U1(j) - U1(i) *
U2(j)))
1525 W3 = W3 + (G(i, j) * (U2(i) * U1(j) - U1(i) * U2(j)) - B(i, j) * (U1(i) * U1(j) + U2(i) *
U2(j)))
1530 NEXT j
1540 U5(i) = SQR(U1(i) ^ 2 + U2(i) ^ 2)
1545 W10 = G(i, i) * U5(i) ^ 2 + P1(i)
1546 W11 = -B(i, i) * U5(i) ^ 2 + Q1(i)
1547 W12 = G4(i) * U1(i) * U + B4(i) * U2(i) * U
1548 W13 = G4(i) * U2(i) * U - B4(i) * U1(i) * U
1550 W1(i) = W10 - (W2 + W12)
1555 W1(i4) = W11 - (W3 + W13)
1580 B6(i) = -W1(i)
1585 B6(i4) = -W1(i4)
1590 NEXT i
1600 RETURN
1710 REM J a c o b i a n
1715 FOR i = 1 TO N3
1720 FOR j = 1 TO N3
1725 Z(i, j) = 0
1730 NEXT j
1735 NEXT i
1740 FOR i = 1 TO N4
1745 i4 = i + N4

```

```

1750 REM Diagonalnii elementi:
1755 FOR j = 1 TO N4
1760 IF j = i GOTO 1790
1770 Z(i, i) = Z(i, i) + (G(i, j) * U1(j) - B(i, j) * U2(j))
1775 Z(i, i4) = Z(i, i4) + (G(i, j) * U2(j) + B(i, j) * U1(j))
1780 Z(i4, i) = Z(i4, i) + (G(i, j) * U2(j) + B(i, j) * U1(j))
1785 Z(i4, i4) = Z(i4, i4) + (G(i, j) * U1(j) - B(i, j) * U2(j))
1790 NEXT j
1795 Z(i, i) = 2 * G(i, i) * U1(i) - (Z(i, i) + G4(i) * U)
1800 Z(i, i4) = 2 * G(i, i) * U2(i) - (Z(i, i4) + B4(i) * U)
1805 Z(i4, i) = -2 * B(i, i) * U1(i) + (Z(i4, i) + B4(i) * U)
1810 Z(i4, i4) = -2 * B(i, i) * U2(i) - (Z(i4, i4) + G4(i) * U)
1811 REM PRINT "i i4 Zii Zii4 Zi4i Zi4i4 = "; i; i4; Z(i, i); Z(i, i4); Z(i4, i); Z(i4, i4)
1812 REM INPUT h
1815 REM Nediagonalnii elementi Jacobiana:
1820 FOR j = 1 TO N4
1830 IF j = i GOTO 1865
1840 Z(i, j) = -(G(i, j) * U1(i) + B(i, j) * U2(i))
1845 j4 = j + N4
1850 Z(i, j4) = -(G(i, j) * U2(i) - B(i, j) * U1(i))
1855 Z(i4, j) = -(G(i, j) * U2(i) - B(i, j) * U1(i))
1860 Z(i4, j4) = (G(i, j) * U1(i) + B(i, j) * U2(i))
1865 NEXT j
1870 NEXT i
1871 INPUT h
2000 RETURN
3770 REM Pryamoy hod
3780 N = N3
3790 N6 = N - 1
3800 FOR k = 1 TO N6
3810 k2 = k + 1
3820 FOR i = k2 TO N
3830 IF Z(i, k) = 0 GOTO 3890
3840 c = Z(i, k) / Z(k, k)
3850 FOR j = k2 TO N

```

```

3860 IF Z(k, j) = 0 GOTO 3880
3870 Z(i, j) = Z(i, j) - c * Z(k, j)
3880 NEXT j
3890 NEXT i
3900 NEXT k
3910 RETURN
3920 REM Pryamoy i obr hod
3930 N = N3
3940 A1 = c1
3950 N7 = N - 1
3960 FOR k = 1 TO N7
3970 k2 = k + 1
3980 c1 = B6(k) / Z(k, k)
3990 IF c1 = 0 GOTO 4030
4000 FOR i = k2 TO N
4010 B6(i) = B6(i) - c1 * Z(i, k)
4020 NEXT i
4030 NEXT k
4040 i = N + 1
4050 i = i - 1
4060 IF i = 0 GOTO 4150
4070 X(i) = 0
4080 j = N + 1
4090 j = j - 1
4100 IF j = i GOTO 4130
4110 X(i) = X(i) - Z(i, j) * X(j)
4120 GOTO 4090
4130 X(i) = (X(i) + B6(i)) / Z(i, i)
4140 GOTO 4050
4150 c1 = A1
4160 RETURN

```

Расчёт завершён на итерации = 12.

Результат расчета показан в таблица 4.2.

Таблица 4.2

Результат расчета режима для расчетной схемы 4.1.

№ узел	U'	U''
1	201,7064	-41,53279
2	185,46	-60,45032
3	93,55796	-39,50623
4	98,94048	-34,09245
5	103,6502	-34,09245

## 4.4 Сравнительная оценка алгоритмов

### при различных формах записи узловых уравнений

Рассмотрим для нижеследующей схемы сопоставительные расчеты для программ с использованием уравнений как в полярных, так и декартовых координатах

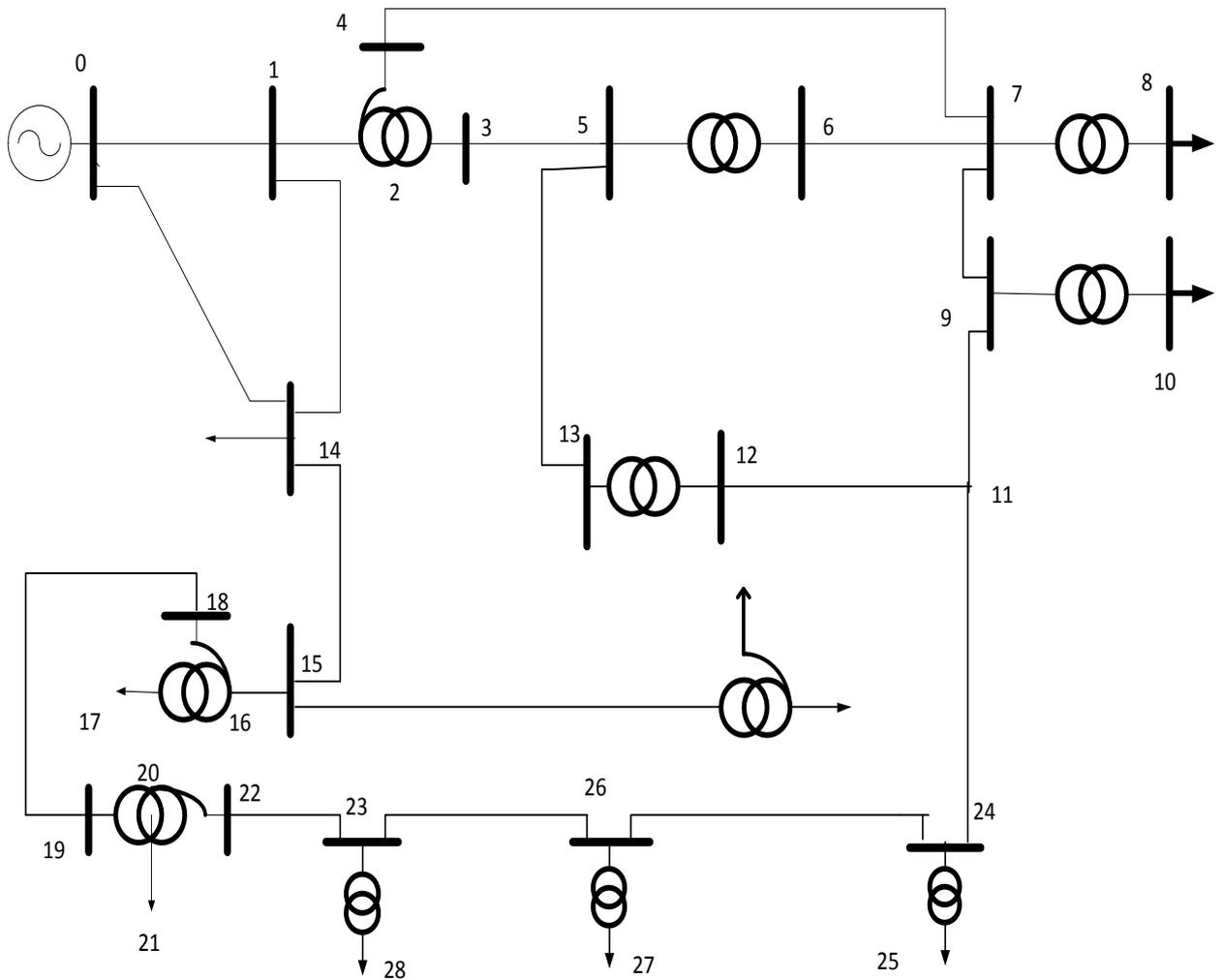


Рис 4.2

Параметры сети для схемы рисунка (4.2) приведены в табл.4.3

Таблица 4.3

№	i-j	$R_{i-j, \text{ом}}$	$X_{i-j, \text{ом}}$	$K_t$	P, МВТ	Q, МВАР	$B_c$
1	0-1	3	32.5	1	0	0	0
2	1-2	0.58	61.1	1	0	0	0
3	2-3	0.19	0	2.17	0	0	0

4	2-4	1.45	56.75	4.13	0.6	0.3	0
5	3-5	0.6	4.13	1	110	55	0
6	5-6	5.6	158.7	1.9	0	0	0
7	6-7	10.71	15.19	1	0	0	0
8	4-7	1.24	2.13	1	0	0	0
9	7-8	1.95	50.35	10.6	50	20	0
10	7-9	12.45	21.35	1	0	0	0
11	9-10	2.8	79.35	10.6	30	12	0
12	9-11	12.45	21.35	1	0	0	0
13	12-11	12.24	17.36	1	0	0	0
14	5-13	5.78	21.2	1	0	0	0
15	13-12	2.8	79.35	1.8	0	0	0
16	0-14	4.35	50.54	1	50	20	0
17	1-14	4.58	48	1	50	20	0
18	14-15	4.38	40	1	0	0	0
19	15-16	0.58	61.1	1	0	0	0
20	16-17	2.9	113.5	4.55	25	10	0
21	16-18	0.39	0.2	2.27	0	0	0
22	18-19	8.62	37.75	1	0	0	0
23	19-20	0.5	48.6	1	0	0	0
24	20-21	1	82.5	21.45	30	12	0
25	20-22	0.5	0	2	0	0	0
26	22-23	13.77	19.53	1	0	0	0
27	12-24	11.20	19.21	1	0	0	0
28	24-25	42.6	508.2	9.8	10	3	0
29	24-26	0.622	1.07	1	0	0	0
30	26-27	5.6	158.7	10	10	3	0
31	26-23	7.47	12.81	1	0	0	0
32	23-28	7.35	110.2	10	10	5	0
33	15-29	1.53	47	1	0	0	0
34	29-30	0.58	61.1	1	0	0	0
35	30-31	2.9	113.5	4.54	18	10	0
36	30-32	0.39	0	2.08	0	0	0

**1. В декартовых координатах, при заданных  $U_0=525$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.001$**

Таблица 4.4

№ узла	U, кВ	U', кВ	U'', кВ
1	514,8234	514,6482	-13,4299
2	497,7792	496,2383	-39,1368
3	228,9402	228,2330	-17,9807
4	119,7772	119,2642	-11,0733
5	226,6034	225,6823	-20,4109
6	119,0321	118,4669	-11,5863
7	118,7500	118,1610	-11,8123
8	11,2028	11,1473	-1,1144
9	108,5232	106,7500	-19,5376
10	10,2380	10,0708	-1,8432
11	108,3807	106,2096	-21,5848
12	113,4422	111,4863	-20,9745
13	220,8623	219,6462	-23,1451
14	515,7005	515,5035	-14,2542
15	509,0826	508,4141	-26,0814
16	502,4315	500,6154	-42,6807
17	109,3296	108,6982	-11,7332
18	221,0291	220,2304	-18,7728
19	217,8554	216,3863	-25,2574
20	216,1308	213,4019	-34,2364
21	10,0760	9,9488	-1,5961
22	108,0462	106,6813	-17,1193
23	106,6486	104,6973	-20,3076
24	107,2679	105,0235	-21,8282
25	10,9457	10,7167	-2,2274
26	107,2196	104,9984	-21,7112
27	10,7220	10,4998	-2,1711
28	10,2168	9,7877	-2,9300
29	508,2692	507,5049	-27,8628
30	507,2770	506,3770	-30,2041
31	111,6009	111,4029	-6,6449
32	243,4897	243,0578	-14,4959

Расчет завершён на итерации = 178

**2. В декартовых координатах**, при заданных  $U_0=525$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.01$

Таблица 4.5

№ узла	U, кВ	U', кВ	U'', кВ
1	514,6500	-13,4215	514,825
2	496,2420	-39,1144	497,7811
3	228,2348	-17,9704	228,9412
4	119,2653	-11,0679	119,7777
5	225,6842	-20,4006	226,6044
6	118,4680	-11,5810	119,0327
7	118,1627	-11,8070	118,7511
8	11,1474	-1,1139	11,20288
9	106,7514	-19,5326	108,5237
10	10,0709	-1,8427	10,23809
11	106,2112	-21,5799	108,3813
12	111,4877	-20,9692	113,4426
13	219,6482	-23,1350	220,8632
14	515,5057	-14,2443	515,7024
15	508,4185	-26,0622	509,0861
16	500,6215	-42,6545	502,4354
17	108,6997	-11,7275	109,3305
18	220,2332	-18,7613	221,0308
19	216,3893	-25,2461	217,8571
20	213,4052	-34,2253	216,1323
21	9,9490	-1,5956	10,0761
22	106,6839	-17,1138	108,0478
23	104,6990	-20,3023	106,6492
24	105,0252	-21,8230	107,2685
25	10,7168	-2,2268	10,94575
26	105,9000	-21,7060	108,1016
27	10,5800	-2,1706	10,80037
28	9,7879	-2,9295	10,21688
29	507,5099	-27,8380	508,2728
30	506,3827	-30,1720	507,2808
31	111,4042	-6,6379	111,6018
32	243,0605	-14,4805	243,4915

Расчет завершён на итерации = 28

**3. В декартовых координатах, при заданных  $U_0=500$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.01$**

Таблица 4.6

№ узла	U, кВ	U', кВ	U'', кВ
1	488,7957	-14,1133	488,9994
2	468,9497	-41,1470	470,7514
3	215,6796	-18,9040	216,5064
4	112,5570	-11,6555	113,1589
5	212,9707	-21,4464	214,0478
6	111,6914	-12,1902	112,3546
7	111,3417	-12,4173	112,032
8	10,5039	-1,1714	10,56905
9	98,8218	-20,3767	100,9007
10	9,3228	-1,9223	9,518935
11	98,1271	-22,4918	100,6718
12	103,7779	-21,9083	106,0652
13	206,6610	-24,2732	208,0816
14	489,6073	-14,9971	489,8369
15	481,7565	-27,4460	482,5376
16	472,9792	-44,9831	475,1135
17	102,5155	-12,3599	103,2579
18	208,0715	-19,7844	209,01
19	203,4403	-26,5985	205,1717
20	199,5787	-36,1915	202,8336
21	9,3044	-1,6872	9,45611
22	99,7679	-18,0940	101,3954
23	97,1392	-21,2495	99,43628
24	97,1812	-22,7900	99,81766
25	9,9164	-2,3255	10,18548
26	97,1780	-22,6715	99,78754
27	9,7178	-2,2671	9,978752
28	8,9386	-3,0671	9,450126
29	480,7848	-29,3156	481,6778
30	479,5787	-31,7735	480,6301
31	105,5073	-6,9902	105,7386
32	230,1944	-15,2491	230,6989

Расчет завершён на итерации = 25

**4. В декартовых координатах, при заданных  $U_0=500$  кВ и точности расчета  $\epsilon_{ps}=0.001$**

Таблица 4.7

№ узел	U, кВ	U', кВ	U'', кВ
1	488,7960	-14,1129	488,9997
2	468,9503	-41,1458	470,7519
3	215,6798	-18,9034	216,5066
4	112,5502	-11,6552	113,1521
5	212,9709	-21,4458	214,0480
6	111,6915	-12,1899	112,3547
7	111,3419	-12,4170	112,0321
8	10,5040	-1,1714	10,5691
9	98,8222	-20,3763	100,9010
10	9,3229	-1,9223	9,5190
11	98,1276	-22,4913	100,6722
12	103,7785	-21,9077	106,0657
13	206,6605	-24,2726	208,0810
14	489,6077	-14,9966	489,8373
15	481,7571	-27,4450	482,5382
16	472,9803	-44,9813	475,1144
17	102,5156	-12,3595	103,2580
18	208,0715	-19,7836	209,0099
19	203,4414	-26,5968	205,1726
20	199,5805	-36,1885	202,8349
21	9,3045	-1,6871	9,4562
22	99,7688	-18,0925	101,3960
23	97,1401	-21,2484	99,4369
24	97,1820	-22,7891	99,8183
25	9,9165	-2,3254	10,1855
26	97,1788	-22,6706	99,7882
27	9,7179	-2,2671	9,9788
28	8,9387	-3,0670	9,4502
29	480,7856	-29,3146	481,6785
30	479,5793	-31,7725	480,6306
31	105,5074	-6,9899	105,7387
32	230,1947	-15,2486	230,6992

Расчет завершён на итерации = 419

1. **В полярных координатах**, Результаты расчета при задании  $U_0=525\text{kV}$  и точности расчета  $\text{eps}=0.001$

Таблица 4.8

№ узел	U	U'	U''	$\Delta$
1	514,8253	514,6503	-13,421	-1,49457
2	497,7823	496,2434	-39,1108	-4,50867
3	228,9417	228,2355	-17,9688	-4,50384
4	119,7779	119,2655	-11,067	-5,30415
5	226,6049	225,6849	-20,399	-5,16739
6	119,0329	118,4683	-11,5801	-5,58567
7	118,7508	118,1624	-11,8061	-5,70863
8	11,2029	11,1474	-1,11379	-5,70863
9	108,5241	106,752	-19,5319	-10,3737
10	10,23813	10,07095	-1,84263	-10,3737
11	108,3817	106,2117	-21,5792	-11,4904
12	113,443	111,4883	-20,9685	-10,657
13	220,8638	219,6489	-23,1335	-6,01529
14	515,7025	515,5057	-14,2455	-1,58372
15	509,0861	508,4183	-26,066	-2,93641
16	502,4357	500,6213	-42,6611	-4,87324
17	109,3306	108,6996	-11,7289	-6,16163
18	221,0309	220,233	-18,7641	-4,87238
19	217,8576	216,3897	-25,2472	-6,65826
20	216,1328	213,406	-34,2242	-9,11565
21	10,07612	9,948997	-1,59554	-9,11565
22	108,0472	106,6834	-17,1133	-9,11789
23	106,6496	104,6994	-20,3017	-10,9793
24	107,2688	105,0257	-21,8224	-11,7439
25	10,9458	10,7169	-2,22677	-11,7439
26	107,2205	105,0006	-21,7054	-11,6854
27	10,72205	10,50006	-2,17054	-11,6854
28	10,21694	9,787968	-2,92942	-16,6702
29	508,2726	507,5094	-27,8427	-3,14177
30	507,2802	506,3818	-30,1778	-3,41224
31	111,6016	111,404	-6,63912	-3,41224
32	243,4912	243,0601	-14,4833	-3,4118

Расчет завершён на итерации = 131

2. **В полярных координатах** Результаты расчета при задании  $U_0=525\text{кВ}$   
и  $\epsilon_{ps}=0.01$

Таблица 4.0

№ узел	U	U'	U''	$\delta$
1	514,8237	514,6486	-13,4261	-1,49515
2	497,7791	496,2389	-39,1278	-4,51066
3	228,9402	228,2334	-17,9758	-4,50564
4	119,7771	119,2643	-11,0716	-5,3064
5	226,6034	225,6827	-20,4064	-5,16929
6	119,032	118,467	-11,5839	-5,58756
7	118,7499	118,1612	-11,8097	-5,71042
8	11,20282	11,14728	-1,11415	-5,71053
9	108,5232	106,7504	-19,5355	-10,3757
10	10,23803	10,07079	-1,84295	-10,3756
11	108,3807	106,2101	-21,5822	-11,4921
12	113,442	111,4867	-20,9715	-10,6587
13	220,8623	219,6467	-23,1405	-6,01716
14	515,7012	515,5044	-14,2457	-1,58374
15	509,0842	508,4164	-26,067	-2,93653
16	502,4323	500,6178	-42,6619	-4,87336
17	109,3299	108,6989	-11,7293	-6,16186
18	221,0294	220,2314	-18,765	-4,87265
19	217,8561	216,3881	-25,2482	-6,65856
20	216,1318	213,4044	-34,2274	-9,11655
21	10,07607	9,948923	-1,59566	-9,11639
22	108,0467	106,6826	-17,1147	-9,11871
23	106,6488	104,6982	-20,304	-10,9807
24	107,2679	105,0242	-21,8248	-11,7453
25	10,9457	10,71676	-2,22697	-11,7451
26	107,2196	104,9991	-21,7079	-11,6869
27	10,72196	10,49991	-2,17079	-11,6869
28	10,21686	9,787829	-2,92961	-16,6715
29	508,2714	507,5082	-27,8432	-3,14184
30	507,28	506,3815	-30,179	-3,41238
31	111,6016	111,4039	-6,63989	-3,41264
32	243,4911	243,06	-14,4828	-3,41169

Расчет завершён на итерации = 101

3. В полярных координатах. Результаты расчета при задании  $U_0=500$  кВ и  $\epsilon_{ps}=0.001$  Расчет завершён на итерации = 73

Таблица 4.10

№ узел	U	U'	U''	$\delta$
1	491,1	490,9	-14,05	-1,641
2	472,9	471,2	-40,97	-4,972
3	217,5	216,7	-18,82	-4,967
4	113,7	113,1	-11,6	-5,861
5	215,1	214	-21,35	-5,702
6	112,9	112,2	-12,14	-6,175
7	112,6	111,9	-12,36	-6,309
8	10,62	10,56	-1,166	-6,309
9	101,5	99,47	-20,31	-11,54
10	9,578	9,384	-1,916	-11,54
11	101,3	98,79	-22,42	-12,79
12	106,7	104,4	-21,83	-11,81
13	209,1	207,7	-24,17	-6,642
14	491,9	491,7	-14,93	-1,741
15	484,7	483,9	-27,33	-3,234
16	477,3	475,2	-44,8	-5,388
17	103,7	103	-12,31	-6,817
18	210	209,1	-19,7	-5,387
19	206,2	204,5	-26,49	-7,384
20	203,9	200,7	-36,03	-10,18
21	9,506	9,357	-1,68	-10,18
22	101,9	100,3	-18,01	-10,18
23	100	97,76	-21,17	-12,23
24	100,4	97,82	-22,71	-13,08
25	10,25	9,982	-2,317	-13,08
26	100,4	97,82	-22,59	-13,01
27	10,04	9,782	-2,259	-13,01
28	9,513	9,009	-3,056	-18,75
29	483,8	482,9	-29,19	-3,46
30	482,8	481,7	-31,63	-3,758
31	106,2	106	-6,958	-3,758
32	231,7	231,2	-15,18	-3,758

4. **В полярных координатах** Изменим требуемую точность:  $U_0=500$  кВ и  $\epsilon_{ps}=0.01$  Расчет завершён на итерации = 49

Таблица 4.11

№ узел	U	U'	U''	$\Delta$
1	491,1	490,9	-14,06	-1,641
2	472,9	471,2	-40,97	-4,973
3	217,5	216,7	-18,82	-4,967
4	113,7	113,1	-11,6	-5,861
5	215,1	214	-21,36	-5,702
6	112,9	112,2	-12,14	-6,176
7	112,6	111,9	-12,36	-6,309
8	10,62	10,56	-1,167	-6,309
9	101,5	99,48	-20,31	-11,54
10	9,578	9,384	-1,916	-11,54
11	101,3	98,79	-22,42	-12,79
12	106,7	104,4	-21,83	-11,81
13	209,1	207,7	-24,18	-6,642
14	491,9	491,7	-14,94	-1,741
15	484,7	483,9	-27,33	-3,234
16	477,4	475,3	-44,79	-5,387
17	103,8	103	-12,31	-6,816
18	210	209,1	-19,7	-5,386
19	206,2	204,5	-26,49	-7,383
20	203,9	200,7	-36,03	-10,18
21	9,507	9,358	-1,68	-10,18
22	101,9	100,3	-18,01	-10,18
23	100	97,77	-21,17	-12,22
24	100,4	97,83	-22,71	-13,07
25	10,25	9,983	-2,317	-13,08
26	100,4	97,83	-22,59	-13,01
27	10,04	9,783	-2,259	-13,01
28	9,514	9,01	-3,056	-18,74
29	483,9	483	-29,19	-3,46
30	482,9	481,8	-31,63	-3,758
31	106,2	106	-6,959	-3,758

32	231,8	231,3	-15,18	-3,758
----	-------	-------	--------	--------

## **Заключение**

В соответствии с поставленной задачей, в диссертационной работе получены следующие результаты:

- I. Выполнен анализ уравнений узловых напряжений в различных формах их записи с оценкой достоинств и недостатков.
- II. Разработаны алгоритм и программа расчета электрических режимов на основе решения уравнений узловых напряжений в форме баланса мощностей в декартовых координатах
- III. Разработаны алгоритм и программа расчета электрических режимов на основе решения уравнений узловых напряжений в форме баланса мощностей в полярных координатах.
- IV. Выполненные серии электрических расчетов для различных схем подтвердили корректность разработанных алгоритмов и программ с использованием уравнений в полярных и декартовых координатах. Осуществлена сравнительная численная оценка результатов, полученных по разработанным программам

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х.** Установившиеся режимы электроэнергетических систем и их оптимизация.-«Молия»,1999.-370с
2. **Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х.** Основы теории и расчета установившихся режимов электрических систем.Ташкент,Фан,1985.
3. **Идельчик В.И.** Расчеты установившихся режимов электрических систем. М.: Энергия, 1977
4. **Насыров Т.Х.** К расчету установившихся режимов электрических систем методом Ньютона-Рафсона// Изв.АН УзССР. Сер.техн.наук.1979.№5.С.19-22
5. **Рыкин О.Р., Чечурин Л.С.** Теория автоматического управления/ Основы анализа и синтеза линейных систем. Учебное пособие.-Санкт-Петербург:Изд-во СПбГПУ, 2004.-84с.
6. **Лоханин Е.К., Скрыпник А.И.** Диалоговый автоматизированный комплекс анализа режимов ( ДАКАР). Том I. Расчётные алгоритмы и математические модели элементов энергосистемы (издание третье). Институт « Энергосетьпроект»-М.2009.-301 с.
7. Правила устройства электроустановок. (ПУЭ)/ Инспекция «Узгосэнергонадзор». Под общей редакцией Гулямова Б.Х.,Салиева А.Г.,Ташпулатова Б.Т., Тешабаева Б.М.-типография института Математики и информационных технологии, Ташкент, 2007.-732с
8. **Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.** Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебное пособие для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989,-608с
9. **Веников В.А., Строев В.А.** Электрические системы. Электрические сети/ Учебное пособие для вузов-М.: Высшая школа,1998, 512с
10. **Строев В.А.** Электрические системы в примерах иллюстрациях-М.: Высшая школа,1999,312с

11. **Каримов Х.Г., Расулов А.Н.** Электр тармоклари ва системалари, Укув кулланма.1-қисм.-Тошкент: ТошДУ, 1996.