

## РАСЧЕТ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ ПРОСТОЙ И УСКОРЕННОЙ ИТЕРАЦИИ

Ничипорков И.А., Скурат Д.А.

Научный руководитель – старший преподаватель Мышковец Е.В.

Расчет установившихся режимов электрических систем нужен для того, чтобы знать напряжения и токи в узлах и ветвях, падение и потери напряжения, потокораспределение. Знание этих параметров помогает отражать реальную ситуацию в сетях, а также помогает избежать аварийных режимов, которые могут возникнуть вследствие перегруженности сети, либо наоборот, избавиться от нерационального использования электрических сетей.

Составление схемы замещения, определение параметров и нагрузок в узлах

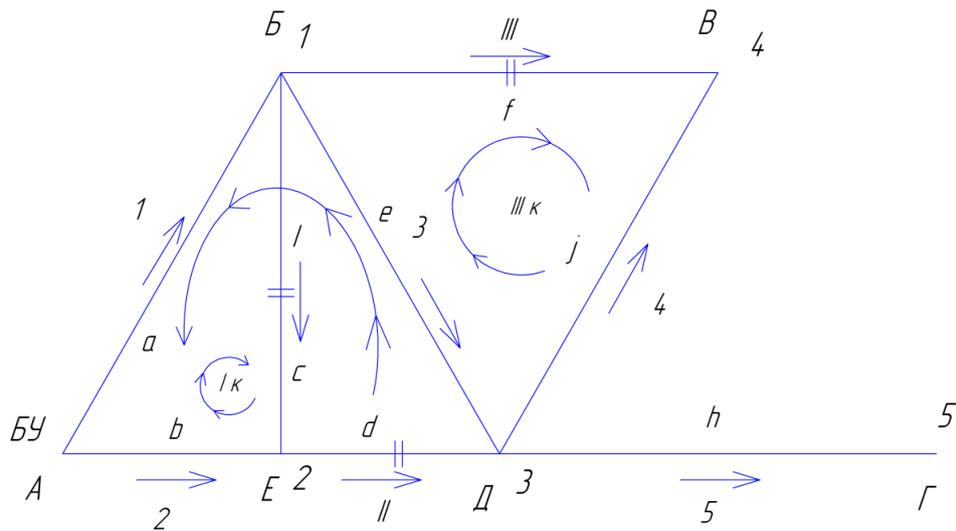


Рисунок 1. Общая схема сети

Параметры схемы сети:

Удельное сопротивление ветвей, Ом/км

$$r_0 = 0.2$$

Напряжение в балансирующем узле, кВ

$$U_{BY} = 120$$

Длины участков, км

$$52, 31, 53, 40, 27, 54, 25, 54$$

Мощности в узлах, МВт

$$0, 35, 33, 60, 66$$

Найдем диагональную матрицу сопротивлений:

$$Z_b = r_0 \cdot l_i$$

$$dZ_b := \begin{pmatrix} Z_{b_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{b_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{b_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{b_4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{b_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{b_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{b_7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{b_8} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.8 \end{pmatrix}$$

Первая матрица инцидентий:

$$M_{\Sigma} := \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Простая итерация

Закон Ома в матричной форме имеет вид:

$$Y_y \cdot \vec{U}_{\Delta} = \vec{J}_y \tag{1}$$

где  $Y_y$  - матрица узловых проводимостей без учета балансирующего узла;

$\vec{U}_{\Delta}$  - столбец падений напряжений в узлах, относительно балансирующего;

$\vec{J}_y$  - столбец задающих токов.

Так как нагрузки заданы в мощностях, то правая часть уравнения примет вид:

$$|J_i|^{(k)} = \left[ \frac{P_i}{U_{\Delta i}^{(k)} + U_{BV}} \right], \tag{2}$$

где  $P_i$  - задающая мощность в  $i$ -ом узле;

$U_{\Delta i}^{(k)}$  - падение напряжения в  $i$ -ом узле при  $k$ -ом приближении.

Подставляя в уравнение (1) выражение (2) и выразив полученные выражения для пяти узлов сети через падения напряжений получаем систему (3). Задавшись начальным приближением можем решить систему приведенную ниже.

Начальное приближение:

$$U_0 = [-6 \quad -6 \quad -6 \quad -6 \quad -6]$$

$$\begin{aligned} U_{y11} &:= 0 - \frac{Y_{y1,2}}{Y_{y1,1}} \cdot U_{02} - \frac{Y_{y1,3}}{Y_{y1,1}} \cdot U_{03} - \frac{Y_{y1,4}}{Y_{y1,1}} \cdot U_{04} - \frac{Y_{y1,5}}{Y_{y1,1}} \cdot U_{05} + \frac{P_{1,1}}{(U_{01} + U_{bu}) \cdot Y_{y1,1}} \\ U_{y12} &:= -\frac{Y_{y2,1}}{Y_{y2,2}} \cdot U_{01,1} - 0 - \frac{Y_{y2,3}}{Y_{y2,2}} \cdot U_{03,1} - \frac{Y_{y2,4}}{Y_{y2,2}} \cdot U_{04,1} - \frac{Y_{y2,5}}{Y_{y2,2}} \cdot U_{05,1} + \frac{P_{2,1}}{(U_{02,1} + U_{bu}) \cdot Y_{y2,2}} \\ U_{y13} &:= -\frac{Y_{y3,1}}{Y_{y3,3}} \cdot U_{01,1} - \frac{Y_{y3,2}}{Y_{y3,3}} \cdot U_{02,1} - 0 - \frac{Y_{y3,4}}{Y_{y3,3}} \cdot U_{04,1} - \frac{Y_{y3,5}}{Y_{y3,3}} \cdot U_{05,1} + \frac{P_{3,1}}{(U_{03,1} + U_{bu}) \cdot Y_{y3,3}} \\ U_{y14} &:= -\frac{Y_{y4,1}}{Y_{y4,4}} \cdot U_{01,1} - \frac{Y_{y4,2}}{Y_{y4,4}} \cdot U_{02,1} - \frac{Y_{y4,3}}{Y_{y4,4}} \cdot U_{03,1} - 0 - \frac{Y_{y4,5}}{Y_{y4,4}} \cdot U_{05,1} + \frac{P_{4,1}}{(U_{04,1} + U_{bu}) \cdot Y_{y4,4}} \\ U_{y15} &:= -\frac{Y_{y5,1}}{Y_{y5,5}} \cdot U_{01,1} - \frac{Y_{y5,2}}{Y_{y5,5}} \cdot U_{02,1} - \frac{Y_{y5,3}}{Y_{y5,5}} \cdot U_{03,1} - \frac{Y_{y5,4}}{Y_{y5,5}} \cdot U_{04,1} + \frac{P_{5,1}}{(U_{05,1} + U_{bu}) \cdot Y_{y5,5}} \end{aligned} \tag{3}$$

Результаты расчетов 1-ой, 2-ой и 40-ой итераций:

$$U_{y1} := \begin{pmatrix} U_{y11} \\ U_{y12} \\ U_{y13} \\ U_{y14} \\ U_{y15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.464 \\ -4.544 \\ -6.479 \\ -8.419 \\ -2.874 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad U_1 := U_{y1} + U_{bu} = \begin{pmatrix} 115.536 \\ 115.456 \\ 113.521 \\ 111.581 \\ 117.126 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad e_{\text{max}} := U_{y1} - U_0 = \begin{pmatrix} 1.536 \\ 1.456 \\ -0.479 \\ -2.419 \\ 3.126 \end{pmatrix}$$

$$U_{y2} := \begin{pmatrix} U_{y21} \\ U_{y22} \\ U_{y23} \\ U_{y24} \\ U_{y25} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.822 \\ -4.433 \\ -5.302 \\ -8.093 \\ -3.436 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad U_2 := U_{y2} + U_{bu} = \begin{pmatrix} 115.178 \\ 115.567 \\ 114.698 \\ 111.907 \\ 116.564 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad \varepsilon_2 := U_{y2} - U_{y1} = \begin{pmatrix} -0.358 \\ 0.111 \\ 1.177 \\ 0.326 \\ -0.562 \end{pmatrix}$$

$$U_{y40} := \begin{pmatrix} U_{y401} \\ U_{y402} \\ U_{y403} \\ U_{y404} \\ U_{y405} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.246 \\ -2.119 \\ -2.278 \\ -4.66 \\ 0.671 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad U_{40} := U_{y40} + U_{bu} = \begin{pmatrix} 117.754 \\ 117.881 \\ 117.722 \\ 115.34 \\ 120.671 \end{pmatrix} \quad \varepsilon_{40} := U_{y40} - U_{y39} = \begin{pmatrix} 3.797 \times 10^{-3} \\ 3.375 \times 10^{-3} \\ 5.063 \times 10^{-3} \\ 5.173 \times 10^{-3} \\ 5.488 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

График сходимости простого итерационного процесса:

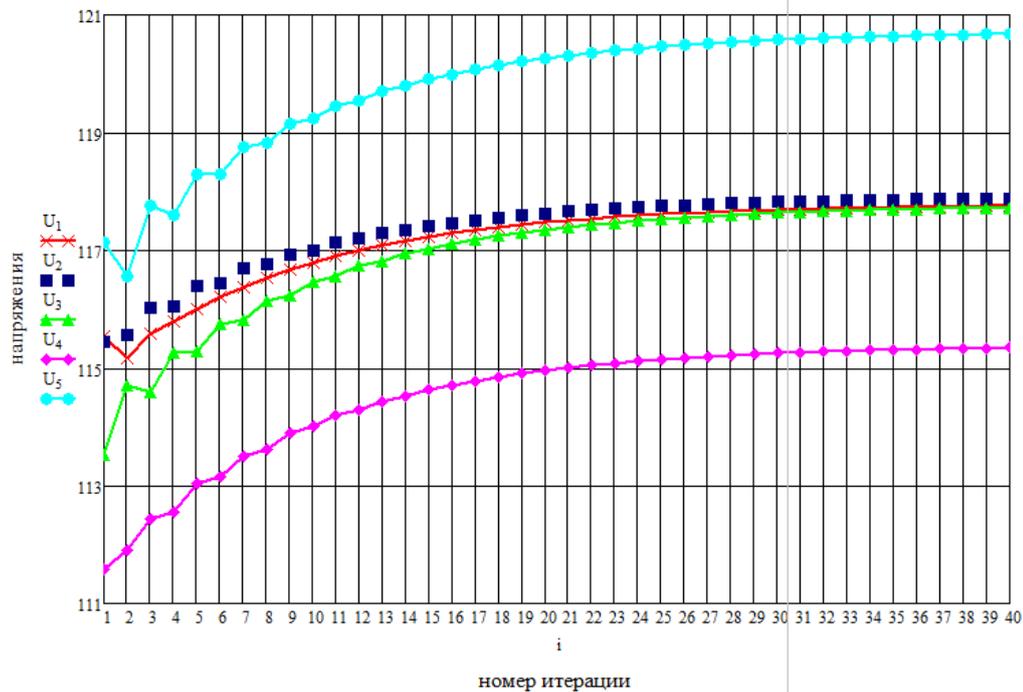


Рисунок 2. График сходимости при использовании метода простой итерации

Для расчета режима нужно определить:

7) Ток в ветвях:

$$I_B = \Delta Y_B \cdot M^T \cdot U_\Delta = [0.216 \quad 0.342 \quad 0.0029 \quad 0.298 \quad -0.546 \quad -0.012 \quad 0.032 \quad 0.223] \text{кА};$$

8) Падение напряжения в ветвях:

$$\Delta U_B = dZ_b \cdot I_B = [2.246 \quad 2.119 \quad 0.032 \quad 2.382 \quad -2.949 \quad -0.127 \quad 0.159 \quad 2.414] \text{кВ};$$

9) Приближенные потери мощности:

$$\Delta P = I_B \cdot M^T \cdot U_\Delta = [0.485 \quad 0.724 \quad 0.00009 \quad 0.709 \quad 1.61 \quad 0.0014 \quad 0.005 \quad 0.539] \text{МВт}$$

10) Токи в узлах:

$$J = M \cdot I_B = [-0.0013 \quad -0.298 \quad -0.283 \quad -0.521 \quad 0.546] \text{кА};$$

11) Мощность в узлах:

$$P = U_{40} \cdot J = [-0.149 \quad -35.162 \quad -33.319 \quad -60.116 \quad 65.89] \text{МВт};$$

12) Небаланс мощности составляет менее 1%.

Ускоренная итерация

Подготовка для расчета режима в ускоренной итерации аналогична простой итерации. Поэтому сразу приведем систему уравнений.

Отличие ускоренной итерации от простой заключается в том, что в ускоренной итерации используется только что вычисленное приближение для узла  $k-l$ .

$$\begin{aligned}
 Ud_{11} &:= 0 - \frac{Y_{y_{1,2}}}{Y_{y_{1,1}}} \cdot Ud_{0(2,1)} - \frac{Y_{y_{1,3}}}{Y_{y_{1,1}}} \cdot Ud_{0_{3,1}} - \frac{Y_{y_{1,4}}}{Y_{y_{1,1}}} \cdot Ud_{0_{4,1}} - \frac{Y_{y_{1,5}}}{Y_{y_{1,1}}} \cdot Ud_{0_{5,1}} + \frac{P_{1,1}}{(Ud_{0_{1,1}} + Ubu) \cdot Y_{y_{1,1}}} \\
 Ud_{12} &:= -\frac{Y_{y_{2,1}}}{Y_{y_{2,2}}} \cdot Ud_{11} - 0 - \frac{Y_{y_{2,3}}}{Y_{y_{2,2}}} \cdot Ud_{0_{3,1}} - \frac{Y_{y_{2,4}}}{Y_{y_{2,2}}} \cdot Ud_{0_{4,1}} - \frac{Y_{y_{2,5}}}{Y_{y_{2,2}}} \cdot Ud_{0_{5,1}} + \frac{P_{2,1}}{(Ud_{0_{2,1}} + Ubu) \cdot Y_{y_{2,2}}} \\
 Ud_{13} &:= -\frac{Y_{y_{3,1}}}{Y_{y_{3,3}}} \cdot Ud_{11} - \frac{Y_{y_{3,2}}}{Y_{y_{3,3}}} \cdot Ud_{12} - 0 - \frac{Y_{y_{3,4}}}{Y_{y_{3,3}}} \cdot Ud_{0_{4,1}} - \frac{Y_{y_{3,5}}}{Y_{y_{3,3}}} \cdot Ud_{0_{5,1}} + \frac{P_{3,1}}{(Ud_{0_{3,1}} + Ubu) \cdot Y_{y_{3,3}}} \\
 Ud_{14} &:= -\frac{Y_{y_{4,1}}}{Y_{y_{4,4}}} \cdot Ud_{11} - \frac{Y_{y_{4,2}}}{Y_{y_{4,4}}} \cdot Ud_{12} - \frac{Y_{y_{4,3}}}{Y_{y_{4,4}}} \cdot Ud_{13} - 0 - \frac{Y_{y_{4,5}}}{Y_{y_{4,4}}} \cdot Ud_{0_{5,1}} + \frac{P_{4,1}}{(Ud_{0_{4,1}} + Ubu) \cdot Y_{y_{4,4}}} \\
 Ud_{15} &:= -\frac{Y_{y_{5,1}}}{Y_{y_{5,5}}} \cdot Ud_{11} - \frac{Y_{y_{5,2}}}{Y_{y_{5,5}}} \cdot Ud_{12} - \frac{Y_{y_{5,3}}}{Y_{y_{5,5}}} \cdot Ud_{13} - \frac{Y_{y_{5,4}}}{Y_{y_{5,5}}} \cdot Ud_{14} + \frac{P_{5,1}}{(Ud_{0_{5,1}} + Ubu) \cdot Y_{y_{5,5}}}
 \end{aligned}$$

Результаты расчетов 1-ой, 2-ой и 21-ой итераций:

$$\underbrace{Ud_1}_{\text{кВ}} := \begin{pmatrix} Ud_{11} \\ Ud_{12} \\ Ud_{13} \\ Ud_{14} \\ Ud_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.464 \\ -4.231 \\ -5.654 \\ -7.567 \\ -2.528 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad U_1 := \begin{pmatrix} U_{11} \\ U_{12} \\ U_{13} \\ U_{14} \\ U_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 115.536 \\ 115.769 \\ 114.346 \\ 112.433 \\ 117.472 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad \epsilon_2 := Ud_1 - Ud_0 = \begin{pmatrix} 1.536 \\ 1.769 \\ 0.346 \\ -1.567 \\ 3.472 \end{pmatrix} \quad \text{кВ}$$

$$\underbrace{Ud_2}_{\text{кВ}} := \begin{pmatrix} Ud_{21} \\ Ud_{22} \\ Ud_{23} \\ Ud_{24} \\ Ud_{25} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.328 \\ -4.04 \\ -4.828 \\ -7.068 \\ -1.794 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad U_2 := \begin{pmatrix} U_{21} \\ U_{22} \\ U_{23} \\ U_{24} \\ U_{25} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 115.672 \\ 115.96 \\ 115.172 \\ 112.932 \\ 118.206 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad \epsilon_2 := Ud_2 - Ud_1 = \begin{pmatrix} 0.137 \\ 0.191 \\ 0.826 \\ 0.499 \\ 0.733 \end{pmatrix} \quad \text{кВ}$$

$$\underbrace{Ud_{21}}_{\text{кВ}} := \begin{pmatrix} Ud_{211} \\ Ud_{212} \\ Ud_{213} \\ Ud_{214} \\ Ud_{215} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.243 \\ -2.116 \\ -2.27 \\ -4.649 \\ 0.684 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad \underbrace{U_{21}}_{\text{кВ}} := \begin{pmatrix} U_{211} \\ U_{212} \\ U_{213} \\ U_{214} \\ U_{215} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 117.757 \\ 117.884 \\ 117.73 \\ 115.351 \\ 120.684 \end{pmatrix} \quad \text{кВ} \quad \epsilon_{21} := U_{21} - U_{20} = \begin{pmatrix} 7.169 \times 10^{-3} \\ 6.243 \times 10^{-3} \\ 8.547 \times 10^{-3} \\ 8.174 \times 10^{-3} \\ 8.292 \times 10^{-3} \end{pmatrix} \quad \text{кВ}$$

Расчет режима производится так же, как и при простой итерации. Результаты расчета аналогичны тем, что получились в простой итерации. По этой причине подробные расчеты режима методом ускоренной итерации в данной работе опускаются.

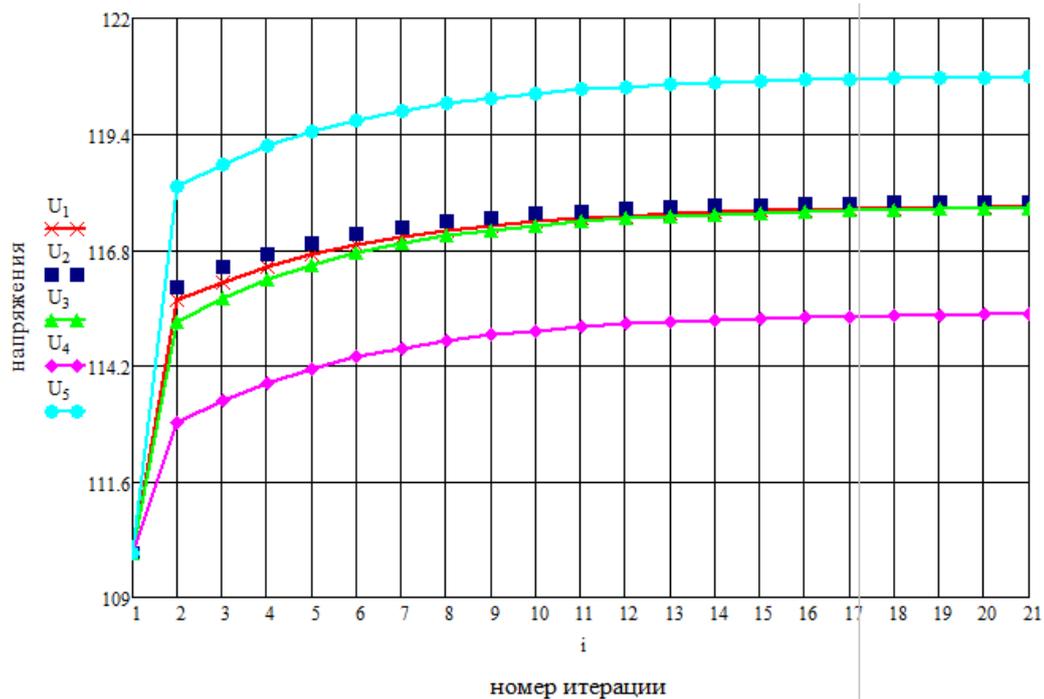


Рисунок 3. График сходимости при использовании метода ускоренной итерации

Из результатов расчета видно, что при расчете режима методом простой итерации получилось 40 итераций, а при ускоренной – 21 итерация. Исходя из этого можно сделать вывод, что скорость сходимости ускоренной итерации выше. Отсюда и время сходимости меньше. Однако в пользу простой итерации можно отметить, что ее проще поддается программированию.

### Литература

1. Применение матричных моделей для расчета и анализа режимов электрических сетей: метод. пособие/Т.А. Шиманская-Семенова.- Минск: БНТУ,2010.-158с.
2. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: Учебник для студентов вузов / Под ред. В. А. Веникова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 288 с.