



УрФУ

Кафедра «Автоматизированные электрические системы»



Уральский
федеральный
университет
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Коэффициенты токораспределения и потокораспределения



Цель лекции: Расчет установившегося режима электрических сетей методом коэффициентов токораспределения и потокораспределения.

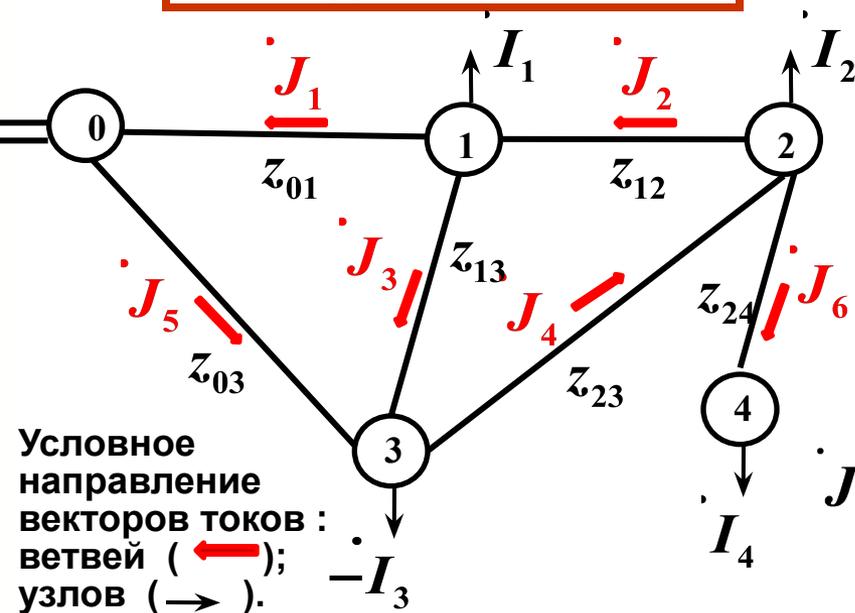
План лекции

- Принципы расчета установившегося режима сети методом коэффициентов распределения.
- Понятие и определение матрицы коэффициентов распределения.
- Использование свойства однородности электрической сети.
- Алгоритм расчета установившегося режима сети методом коэффициентов распределения.



Метод коэффициентов токораспределения

Исходная схема сети



Условное направление векторов токов: ветвей (←); узлов (→).

Коэффициент распределения - доля участия тока узла i в токе ветви q

$$J_q = \sum_{i=1}^n I_i w_{qi}, \quad q = 1, 2, \dots, m, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

I_i - ток узла i , J_q - ток ветви q .

$$I_i = I_{ai} - jI_{pi}, \quad J_q = J_{aq} - jJ_{pq}$$

$$w_{qi} = \alpha_{qi} + j\beta_{qi}$$

$$J_q = \sum_{i=1}^n (I_{ai}\alpha_{qi} + I_{pi}\beta_{qi}) - j \sum_{i=1}^n (I_{pi}\alpha_{qi} - I_{ai}\beta_{qi})$$

$$\underline{J} = \underline{W} \cdot \underline{I}$$

Матрица коэффициентов распределения

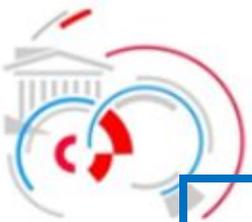
$$\underline{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1i} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2i} & \dots & w_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{q1} & w_{q2} & \dots & w_{qi} & \dots & w_{qn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{mi} & \dots & w_{mn} \end{bmatrix}$$

Вектор узловых токов

$$\underline{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Вектор неизвестных токов ветвей

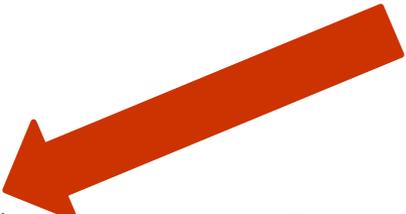
$$\underline{J} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_q \\ \dots \\ J_m \end{bmatrix}$$

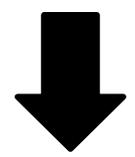


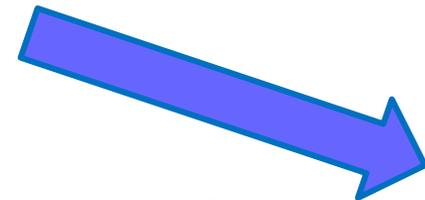
Метод коэффициентов токораспределения

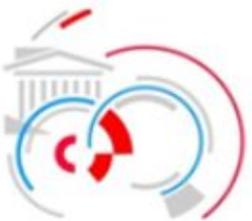
Матричная запись уравнений коэффициентов токораспределения

$$\mathbf{J} = \dot{\mathbf{W}} \mathbf{I}$$


$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_q \\ \vdots \\ J_m \end{bmatrix}$$


$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \vdots & W_{1i} & \vdots & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & \vdots & W_{2i} & \vdots & W_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{q1} & W_{q2} & \vdots & W_{qi} & \vdots & W_{qn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_{m1} & W_{m2} & \vdots & W_{mi} & \vdots & W_{mn} \end{bmatrix}$$

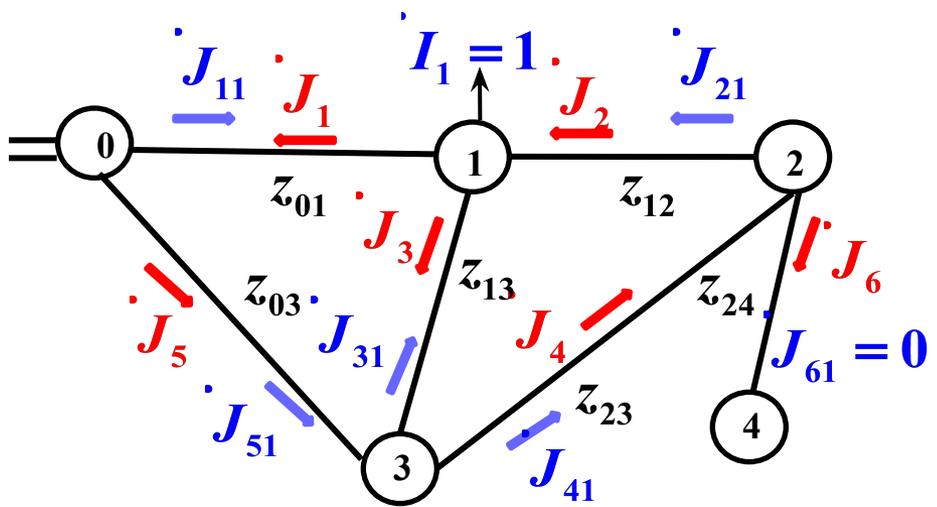

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$



Определение 1 столбца матрицы коэффициентов

Схема сети (уз.1)

$$w_{q1} = \pm J_{q1}$$

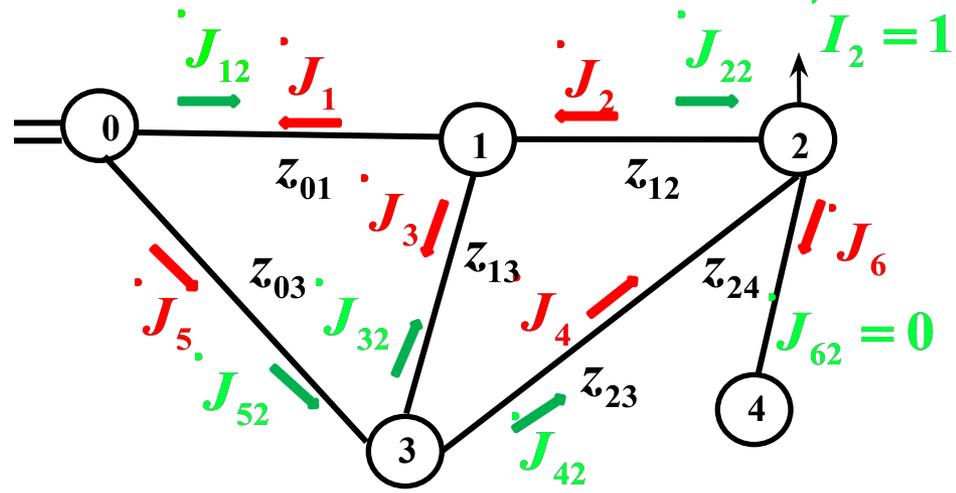


$$\bar{w}_1 = \begin{bmatrix} w_{11} = -J_{11} \\ w_{21} = +J_{21} \\ w_{31} = -J_{31} \\ w_{41} = +J_{41} \\ w_{51} = +J_{51} \\ w_{61} = 0 \end{bmatrix}$$

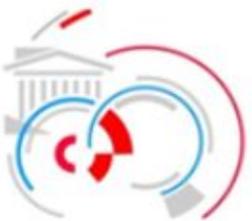
Определение 2 столбца матрицы коэффициентов

Схема сети (уз.2)

$$w_{q2} = \pm J_{q2}$$



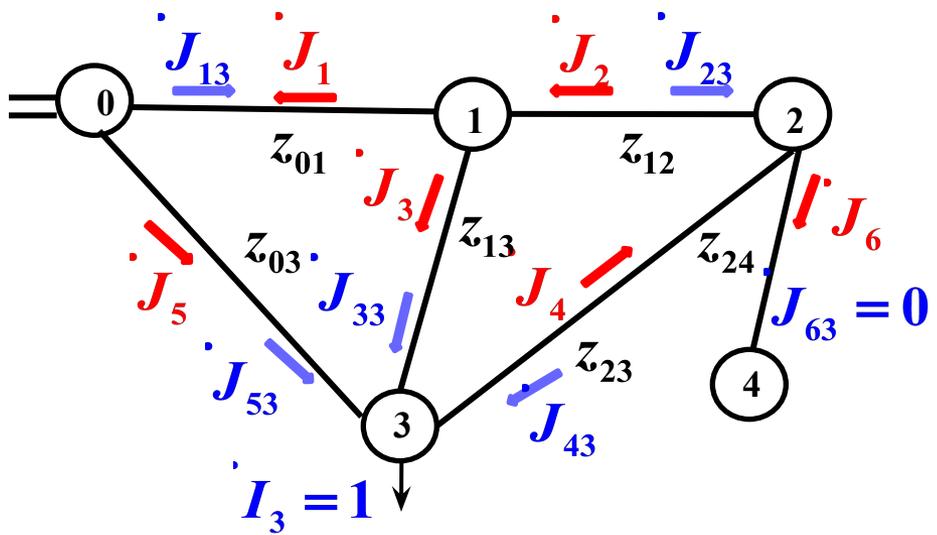
$$\bar{w}_2 = \begin{bmatrix} w_{12} = -J_{12} \\ w_{22} = -J_{22} \\ w_{32} = -J_{32} \\ w_{42} = +J_{42} \\ w_{52} = +J_{52} \\ w_{62} = 0 \end{bmatrix}$$



Определение 3 столбца матрицы коэффициентов

Схема сети (уз.3)

$$w_{q3} = \pm J_{q3}$$

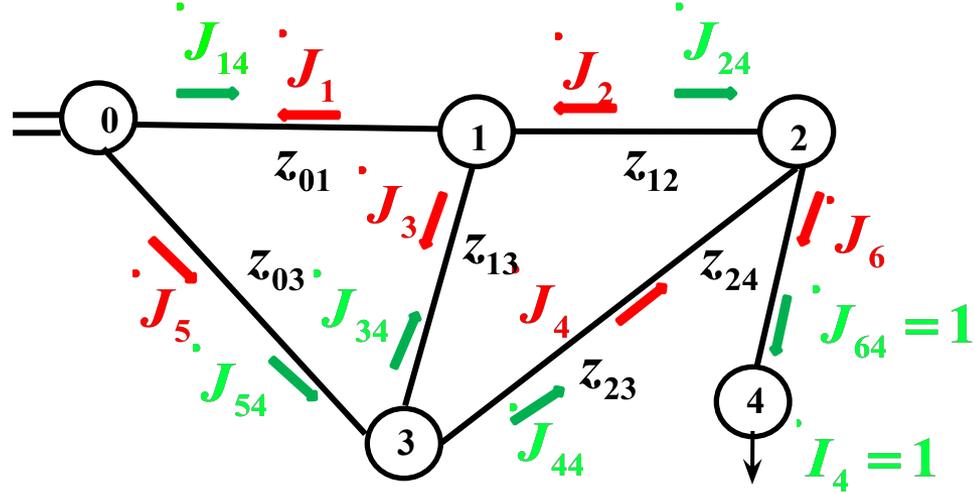


$$\bar{w}_3 = \begin{bmatrix} w_{13} = -J_{13} \\ w_{23} = -J_{23} \\ w_{33} = +J_{33} \\ w_{43} = -J_{43} \\ w_{53} = +J_{53} \\ w_{63} = 0 \end{bmatrix}$$

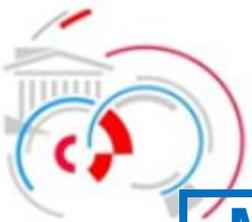
Определение 4 столбца матрицы коэффициентов

Схема сети (уз.4)

$$w_{q4} = \pm J_{q4}$$



$$\bar{w}_4 = \begin{bmatrix} w_{14} = -J_{14} \\ w_{24} = -J_{24} \\ w_{34} = -J_{34} \\ w_{44} = +J_{44} \\ w_{54} = +J_{54} \\ w_{64} = +1 \end{bmatrix}$$



Метод коэффициентов потокораспределения

 \hat{W}_{qi}

Сопряженный коэффициент распределения

- доля участия нагрузки узла i в потоке мощности по ветви q

$$\dot{S}_q = \sum_{i=1}^n \dot{S}_i \hat{w}_{qi}; \quad q = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, n$$

\dot{S}_i - поток узла i , \dot{S}_q - поток ветви q .

$$\dot{S}_i = P_i + jQ_i, \quad \dot{S}_q = P_q + jQ_q, \quad \hat{w}_{qi} = \alpha_{qi} - j\beta_{qi},$$

$$\dot{S}_q = \sum_{i=1}^n (P_i \alpha_{qi} + Q_i \beta_{qi}) + j \sum_{i=1}^n (Q_i \alpha_{qi} - P_i \beta_{qi}).$$

Допущения: $\Delta S_q = 0; \quad U_i = U_{i+1}.$

$$\overline{\dot{S}}_{вет} = \hat{W} \cdot \overline{\dot{S}}_{уз}$$

В однородной сети коэффициенты

токо- и потокораспределения действительные числа

$$Z \rightarrow L^3 \rightarrow R \rightarrow X$$



Задача: Выполнить расчет установившегося режима однородной сети, рис.1, методом коэффициентов потокораспределения. Расчет выполнить без учета генерации ЛЭП и потерь мощности.

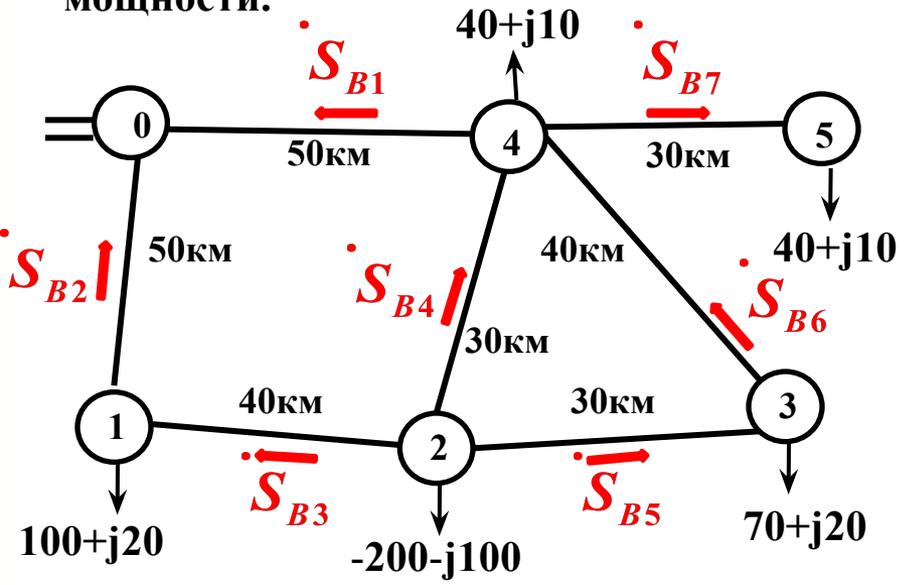


Рис. 1- Исходная схема сети

$$\vec{S}_{вет} = \hat{W} \cdot \vec{S}_{уз}$$

$$\vec{S}_{уз} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 + j20 \\ -200 - j100 \\ 70 + j20 \\ 40 + j10 \\ 40 + j10 \end{bmatrix}$$

$$\vec{S}_{вет} = \begin{bmatrix} S_{B1} \\ S_{B2} \\ S_{B3} \\ S_{B4} \\ S_{B5} \\ S_{B6} \\ S_{B7} \end{bmatrix}$$

ВНИМАНИЕ!

На схеме стрелками указаны условные направления потоков мощностей в ветвях сети

$$\hat{W} = \begin{bmatrix} \hat{w}_{11} & \hat{w}_{12} & \hat{w}_{13} & \hat{w}_{14} & \hat{w}_{15} \\ \hat{w}_{21} & \hat{w}_{22} & \hat{w}_{23} & \hat{w}_{24} & \hat{w}_{25} \\ \hat{w}_{31} & \hat{w}_{32} & \hat{w}_{33} & \hat{w}_{34} & \hat{w}_{35} \\ \hat{w}_{41} & \hat{w}_{42} & \hat{w}_{43} & \hat{w}_{44} & \hat{w}_{45} \\ \hat{w}_{51} & \hat{w}_{52} & \hat{w}_{53} & \hat{w}_{54} & \hat{w}_{55} \\ \hat{w}_{61} & \hat{w}_{62} & \hat{w}_{63} & \hat{w}_{64} & \hat{w}_{65} \\ \hat{w}_{71} & \hat{w}_{72} & \hat{w}_{73} & \hat{w}_{74} & \hat{w}_{75} \end{bmatrix}$$

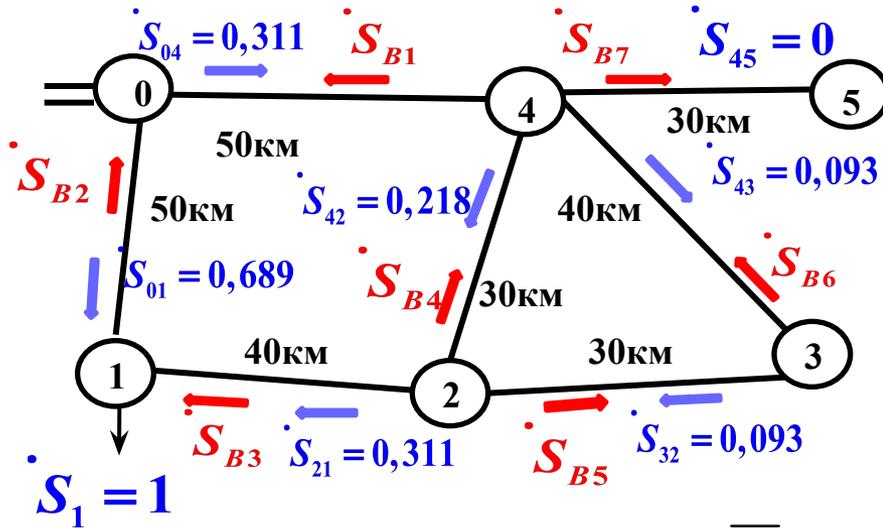


Рис. 2- Схема сети для определения $\overline{\hat{w}}_1$

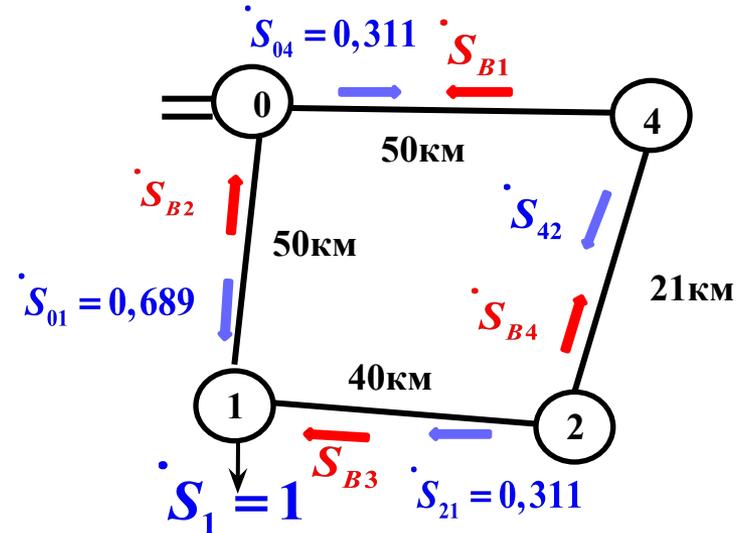


Рис. 3 – Преобразование сети

$$K_{24}^3 = \frac{L_{24} \cdot (L_{34} + L_{23})}{L_{24} + L_{34} + L_{23}} = \frac{30 \cdot (40 + 30)}{30 + 40 + 30} = 21$$

$$S_{12} = S_{01} = \frac{S_1 \cdot L_{1240}^3}{L_{01240}^3} = \frac{1 \cdot 111}{161} = 0,689$$

$$S_{12} = S_{04} = 1 - 0,689 = 0,311$$

$$S_{24} = S_{21} \frac{L_{24}^3}{L_{24}} = 0,311 \frac{21}{30} = 0,218$$

$$S_{23} = S_{34} = S_{21} \frac{L_{24}^3}{L_{234}} = 0,311 \frac{21}{70} = 0,093$$



$$\overline{\hat{w}}_1 =$$

$$\begin{bmatrix} \hat{w}_{11} = -S_{04} \\ \hat{w}_{21} = -S_{01} \\ \hat{w}_{31} = +S_{21} \\ \hat{w}_{41} = -S_{42} \\ \hat{w}_{51} = -S_{32} \\ \hat{w}_{61} = -S_{43} \\ \hat{w}_{71} = S_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,311 \\ -0,689 \\ 0,311 \\ -0,218 \\ -0,093 \\ -0,093 \\ 0 \end{bmatrix}$$

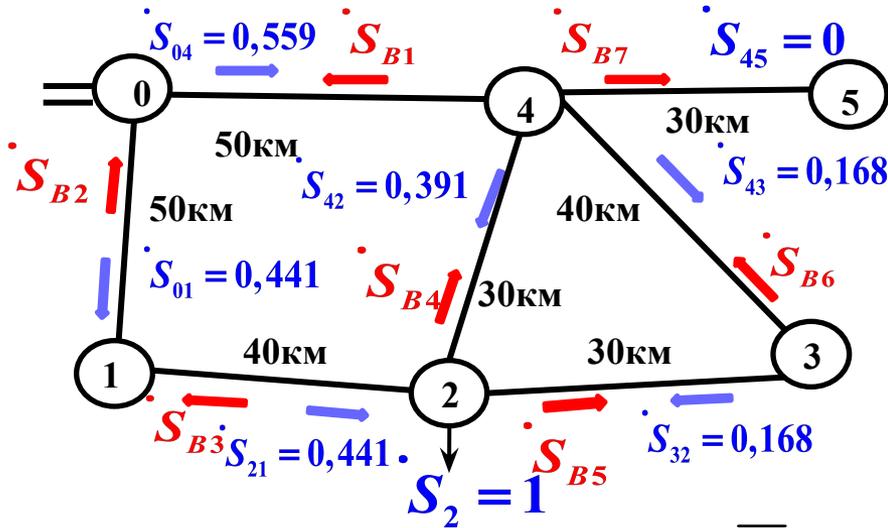


Рис. 4- Схема сети для определения $\overline{\hat{w}}_2$

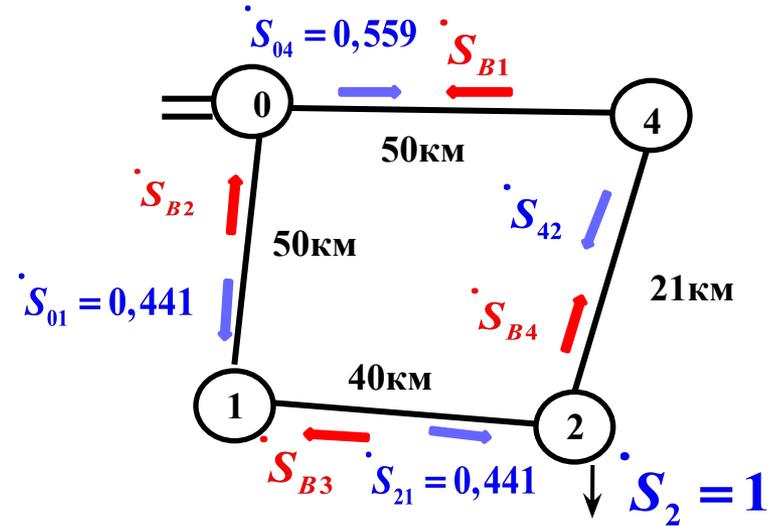


Рис. 5 – Преобразование сети

$$L_{24}^3 = \frac{L_{24} \cdot (L_{34} + L_{23})}{L_{24} + L_{34} + L_{23}} = \frac{30 \cdot (40 + 30)}{30 + 40 + 30} = 21$$

$$S_{r1} = S_{01} = \frac{S_2 \cdot L_{240}^3}{L_{01240}^3} = \frac{1 \cdot 71}{161} = 0,441$$

$$S_{24}^3 = S_{04} = 1 - 0,441 = 0,559$$

$$S_{24}^3 = S_{24}^3 \frac{L_{24}^3}{L_{24}} = 0,559 \frac{21}{30} = 0,391$$

$$S_{23}^3 = S_{34}^3 = S_{24}^3 \frac{L_{24}^3}{L_{234}^3} = 0,559 \frac{21}{70} = 0,168$$



$$\overline{\hat{w}}_2 = \begin{bmatrix} \hat{w}_{12} = -S_{04} \\ \hat{w}_{22} = -S_{01} \\ \hat{w}_{32} = -S_{21} \\ \hat{w}_{42} = -S_{42} \\ \hat{w}_{52} = -S_{32} \\ \hat{w}_{62} = -S_{43} \\ \hat{w}_{72} = S_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,559 \\ -0,441 \\ -0,441 \\ -0,391 \\ -0,168 \\ -0,168 \\ 0 \end{bmatrix}$$

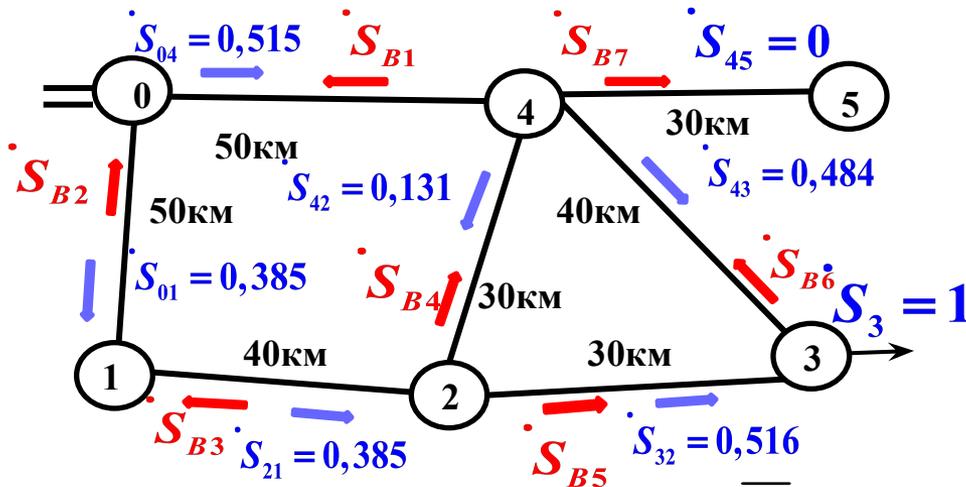


Рис. 6 - Схема сети для определения $\bar{\hat{w}}_3$

$$L_{I I}^3 \cdot S_I + L_{I II}^3 \cdot S_{II} + S_3 \cdot l_{04}^3 = 0; \quad 170S_I + 30S_{II} + 1 \cdot 50 = 0;$$

$$L_{I II}^3 \cdot S_I + L_{II II}^3 \cdot S_{II} - S_3 \cdot l_{43}^3 = 0. \quad \rightarrow \quad 30S_I + 100S_{II} - 1 \cdot 40 = 0.$$

$$170S_I + 30S_{II} = -50; \quad 161S_I = -62. \quad \rightarrow \quad 30S_{II} = 15,486$$

$$9S_I + 30S_{II} = 12. \quad \rightarrow \quad S_I = -0,385 \quad \rightarrow \quad S_{II} = 0,516$$

$$S_{23} = S_{II} = 0,516 \quad S_{43} = 1 - 0,516 = 0,484$$

$$S_{21} = -S_I = 0,385 \quad S_{42} = 0,516 - 0,385 = 0,131$$

$$S_{01} = S_{21} = 0,385 \quad S_{04} = 0,131 + 0,484 = 0,515$$

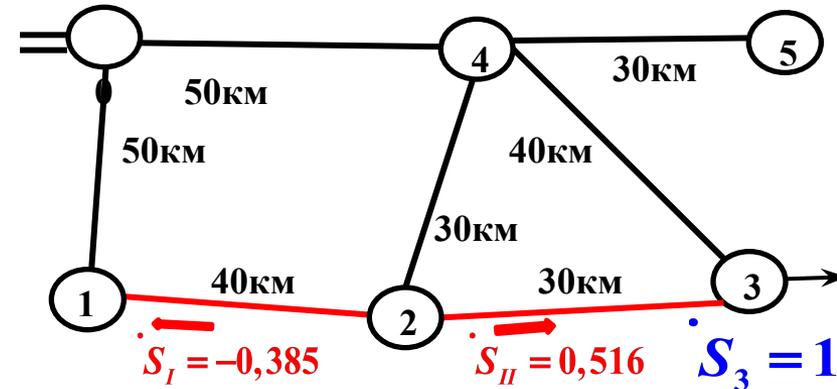
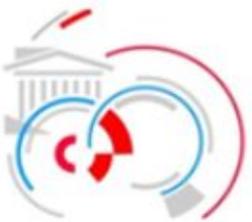


Рис. 7 - Схема сети для составления КУ

$$\bar{\hat{w}}_3 = \begin{bmatrix} \hat{w}_{13} = -S_{04} \\ \hat{w}_{23} = -S_{01} \\ \hat{w}_{33} = -S_{21} \\ \hat{w}_{43} = -S_{42} \\ \hat{w}_{52} = +S_{32} \\ \hat{w}_{62} = -S_{43} \\ \hat{w}_{72} = S_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,515 \\ -0,385 \\ -0,385 \\ -0,131 \\ +0,516 \\ -0,484 \\ 0 \end{bmatrix}$$



Определение 4 столбца матрицы коэффициентов

$\overline{\hat{w}}_4$

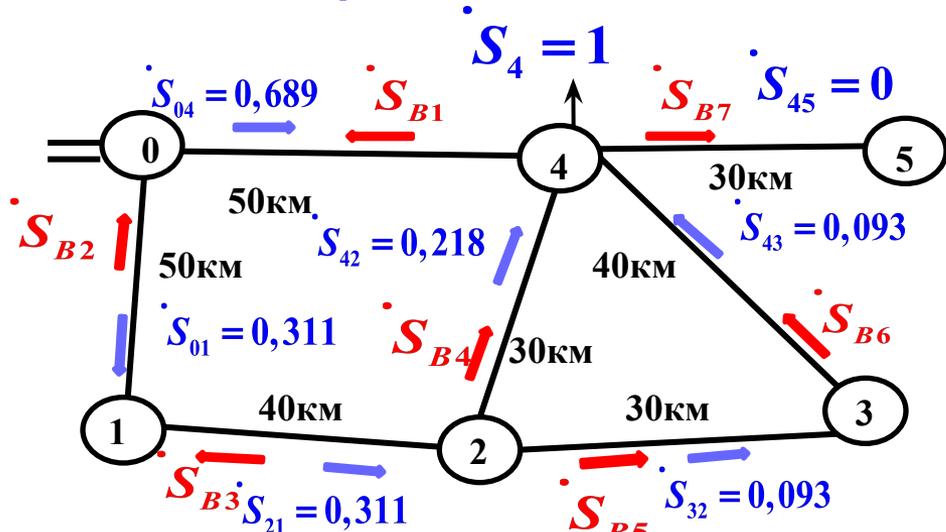


Рис. 8 - Схема сети для определения $\overline{\hat{w}}_4$

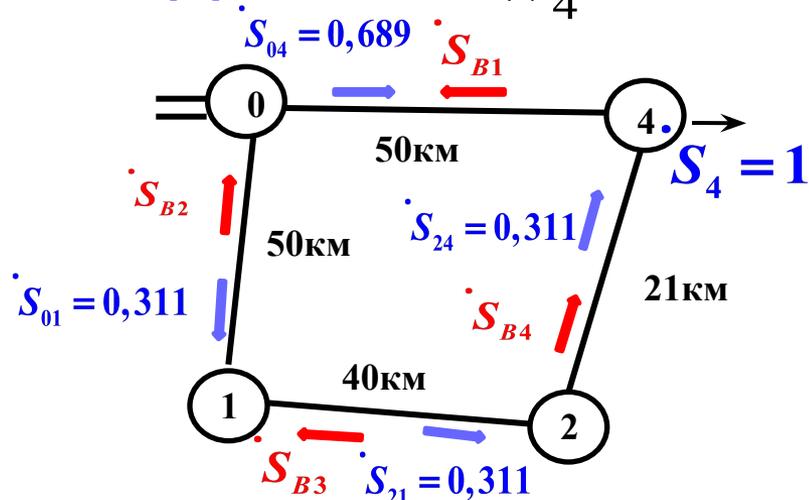


Рис. 9 – Преобразование сети

$$S_G = S_{01} = \frac{S_4 \cdot L_{40}^{\vartheta}}{L_{01240}^{\vartheta}} = \frac{1 \cdot 50}{161} = 0,311$$

$$S_{04} = 1 - 0,311 = 0,689$$

$$S_{24} = S_{24}^{\vartheta} \frac{L_{24}^{\vartheta}}{L_{24}} = 0,311 \frac{21}{30} = 0,218$$

$$S_{23} = S_{34} = S_{24}^{\vartheta} \frac{L_{24}^{\vartheta}}{L_{234}} = 0,311 \frac{21}{70} = 0,093$$



$$\overline{\hat{w}}_4 = \begin{bmatrix} \hat{w}_{14} = -S_{04} \\ \hat{w}_{24} = -S_{01} \\ \hat{w}_{34} = -S_{21} \\ \hat{w}_{44} = +S_{42} \\ \hat{w}_{54} = +S_{32} \\ \hat{w}_{64} = +S_{43} \\ \hat{w}_{74} = S_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,689 \\ -0,311 \\ -0,311 \\ 0,218 \\ 0,093 \\ 0,093 \\ 0 \end{bmatrix}$$



Определение 5 столбца матрицы коэффициентов $\overline{\hat{W}}_5$

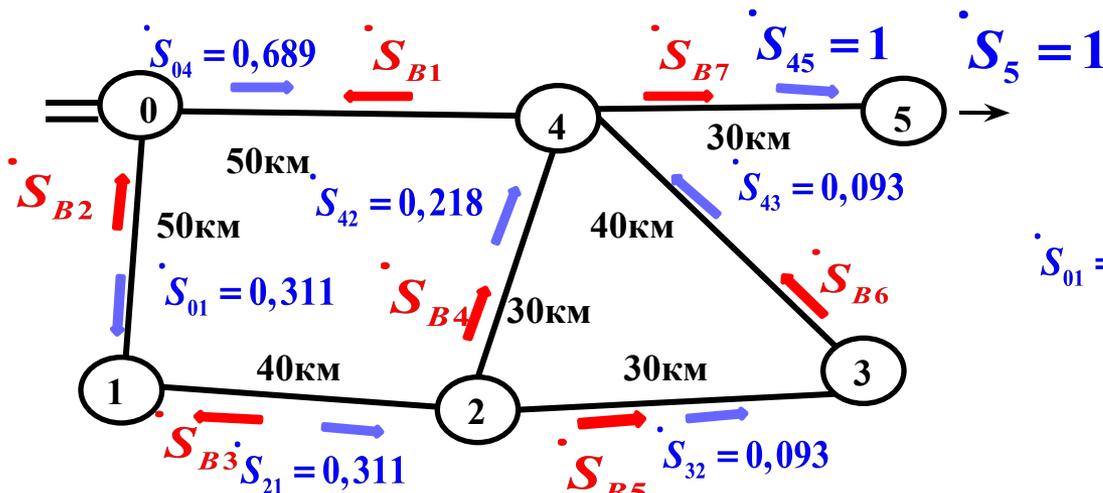


Рис. 10 - Схема сети для определения $\overline{\hat{W}}_4$

$$S_{\Gamma} = S_{01} = \frac{S_4 \cdot L_{40}^{\partial}}{L_{01240}^{\partial}} = \frac{1 \cdot 50}{161} = 0,311$$

$$S_{04} = 1 - 0,311 = 0,689$$

$$S_{24} = S_{24}^{\partial} \frac{L_{24}^{\partial}}{L_{24}} = 0,311 \frac{21}{30} = 0,218$$

$$S_{23} = S_{34} = S_{24}^{\partial} \frac{L_{24}^{\partial}}{L_{234}} = 0,311 \frac{21}{70} = 0,093$$



$$\overline{\hat{W}}_5 = \begin{bmatrix} \hat{w}_{15} = -S_{04} \\ \hat{w}_{25} = -S_{01} \\ \hat{w}_{35} = -S_{21} \\ \hat{w}_{45} = +S_{42} \\ \hat{w}_{55} = +S_{32} \\ \hat{w}_{65} = +S_{43} \\ \hat{w}_{75} = +S_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,689 \\ -0,311 \\ -0,311 \\ 0,218 \\ 0,093 \\ 0,093 \\ 1 \end{bmatrix}$$

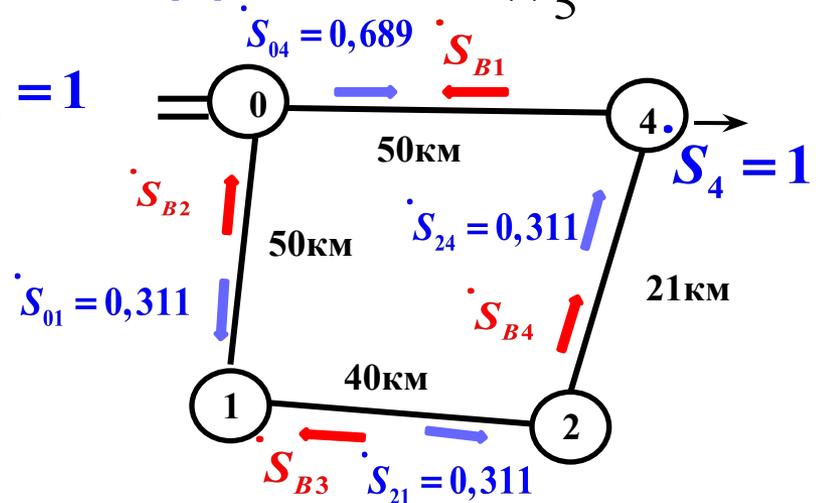
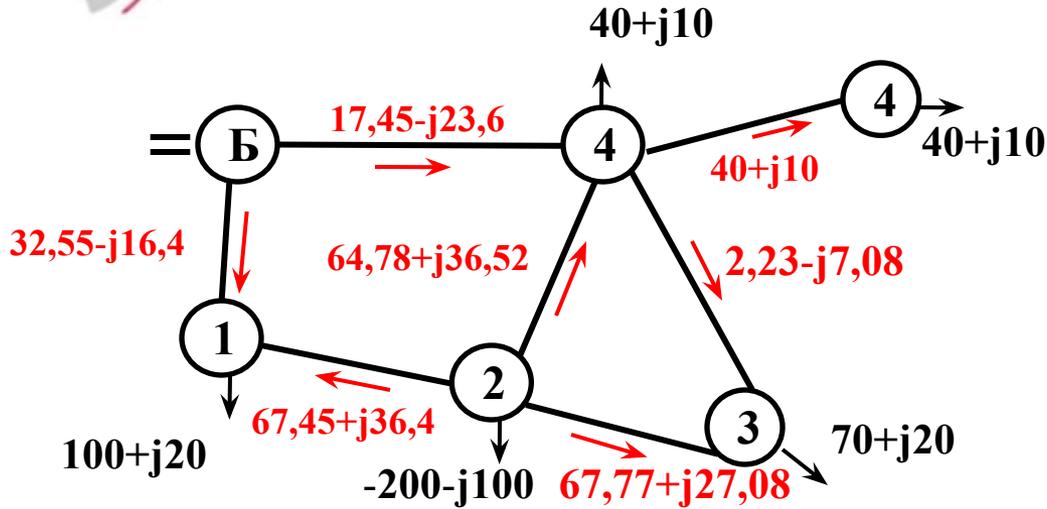


Рис. 11 – Преобразование сети



$$\vec{S}_{вет} = \hat{W} \cdot \vec{S}_{уз}$$

Рис. 3 – Потокораспределение в исходной сети

$$\begin{bmatrix} S_{B1} \\ S_{B2} \\ S_{B3} \\ S_{B4} \\ S_{B5} \\ S_{B6} \\ S_{B7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,311 & -0,559 & -0,515 & -0,689 & -0,689 \\ -0,689 & -0,441 & -0,385 & -0,311 & -0,311 \\ 0,311 & -0,441 & -0,385 & -0,311 & -0,311 \\ -0,218 & -0,391 & -0,131 & 0,218 & 0,218 \\ -0,093 & -0,168 & -0,516 & 0,093 & 0,093 \\ -0,093 & -0,168 & -0,484 & 0,093 & 0,093 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 100+j20 \\ -200-j100 \\ 70+j20 \\ 40+j10 \\ 40+j10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -17,47+j23,6 \\ 32,55-j16,6 \\ 67,45+j36,4 \\ 64,78+j36,52 \\ 67,77-j27,08 \\ 2,23-j7,08 \\ 40+j10 \end{bmatrix}$$



Метод коэффициентов распределения

Алгоритм расчета установившегося режима сети

1. Вычисление матрицы коэффициентов распределения для заданной схемы замещения сети

2. Выбор начальных приближений напряжений в узлах сети

$$U_i^{(0)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

3. Определение потерь мощности в шунтах

$$\Delta S_{\text{ш } i}^{(1)} = \left(U_i^{(0)} \right)^2 Y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

4. Вычисление приближений эквивалентных нагрузок узлов

$$S_{\text{э } i}^{(1)} = S_i + \Delta S_{\text{ш } i}^{(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

5. Расчет приближений эквивалентных узловых токов

$$I_i^{(1)} = \frac{S_{\text{э } i}^{* (1)}}{U_i^{* (0)} \sqrt{3}}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$



6. Нахождение приближенного токораспределения в сети с помощью матрицы коэффициентов

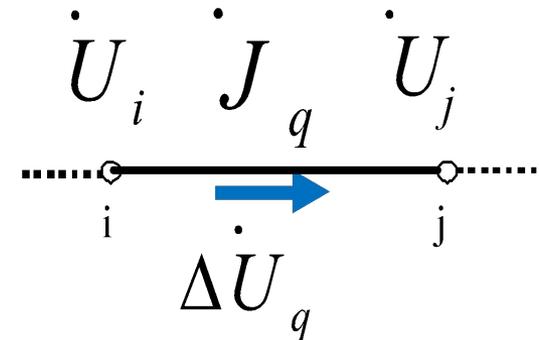
$$J_q^{(1)} = \sum_{i=1}^n K_i^{(1)} W_{qi}, \quad q = 1, 2, \dots, m$$

7. Определение падений напряжений в ветвях сети

$$\Delta \dot{U}_q^{(1)} = \sqrt{3} J_q^{(1)} Z_q, \quad q = 1, 2, \dots, m$$

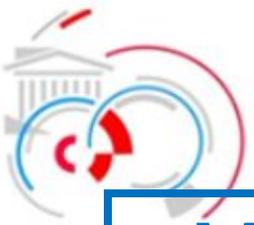
8. Уточнение напряжений узлов сети

$$\dot{U}_i^{(1)} = \dot{U}_j^{(1)} + \Delta \dot{U}_q^{(1)},$$
$$i = 1, 2, \dots, n; \quad q = 1, 2, \dots, m$$



9. Проверка точности расчета параметров режима

$$\left| U_i^{(k)} - U_i^{(k-1)} \right| < \varepsilon \quad \left| \delta_{i\sigma}^{(k)} - \delta_{i\sigma}^{(k-1)} \right| < \varphi$$



Метод коэффициентов распределения

ВЫВОДЫ

- Метод использует принципы наложения и справедлив для линейных электрических цепей.
- Необходим предварительный узловых токов.
- Метод основан на однократном предварительном расчете матрицы коэффициентов распределения.
- Метод эффективен при многочисленных расчетах сети с неизменной схемой сети и меняющимися нагрузками.



УрФУ
Кафедра «Автоматизированные электрические системы»



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ