

ЗАНЯТИЕ 1

Рассчитать напряжения в узлах и токи в ветвях схемы электрической сети, граф которой изображен на рис. 1.7. Исходные данные для расчета и расчет представлен в системе Mathcad.

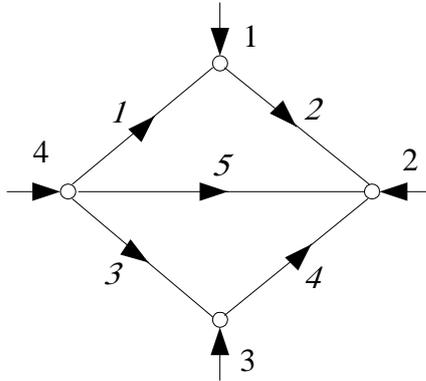


Рис. 1.7. Пример графа электрической сети

ORIGIN := 1

Единицы измерения kamp ≡ 1000 · amp kvolt ≡ 1000 · volt

Исходные данные

Напряжение базисного узла $U_0 := 222 \cdot \text{kvolt}$

Сопротивления ветвей

Задающие токи узлов.

$$Z_b := \begin{pmatrix} 3.63 + j \cdot 13.05 \\ 4.84 + j \cdot 17.4 \\ 2.42 + j \cdot 8.7 \\ 5.445 + j \cdot 19.575 \\ 6.05 + j \cdot 21.75 \end{pmatrix} \cdot \text{ohm} \quad J := - \begin{pmatrix} 0.525 - j \cdot 0.310 \\ 0.750 - j \cdot 0.370 \\ 0.420 - j \cdot 0.280 \end{pmatrix} \cdot \text{kamp}$$

Расчетные данные:

Проводимости ветвей.

$i := 1 .. 5$

$$Y_{b_i} := \frac{1}{Z_{b_i}}$$

$$Y_b = \begin{pmatrix} 0.02 - 0.071i \\ 0.015 - 0.053i \\ 0.03 - 0.107i \\ 0.013 - 0.047i \\ 0.012 - 0.043i \end{pmatrix} \text{siemens}$$

Модель электрической сети

1. Составление матрицы инцидентий узлов и ветвей M

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

2. Формирование диагональной матрицы проводимостей ветвей Y

$$Y_{i, i} := Y_{b_i}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.02 - 0.071i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.015 - 0.053i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.03 - 0.107i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.013 - 0.047i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.012 - 0.043i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

3. Составление матрицы-столбца проводимостей ветвей, связывающих узлы схемы с базисным узлом Y0

$$Y_0 := - \begin{pmatrix} Y_{b_1} \\ Y_{b_5} \\ Y_{b_3} \end{pmatrix} \quad Y_0 = \begin{pmatrix} -0.02 + 0.071i \\ -0.012 + 0.043i \\ -0.03 + 0.107i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

4. Получение матрицы узловых проводимостей Y

$$Y := M \cdot Y \cdot M^T$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.035 - 0.124i & -0.015 + 0.053i & 0 \\ -0.015 + 0.053i & 0.04 - 0.143i & -0.013 + 0.047i \\ 0 & -0.013 + 0.047i & 0.043 - 0.154i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

Вычисления

1. Решение системы линейных уравнений установившегося режима методом обратной матрицы.

$$Z := Y^{-1}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 2.522 + 9.066i & 1.044 + 3.753i & 0.321 + 1.155i \\ 1.044 + 3.753i & 2.436 + 8.758i & 0.75 + 2.695i \\ 0.321 + 1.155i & 0.75 + 2.695i & 1.906 + 6.852i \end{pmatrix} \text{ ohm}$$

$$U := Z \cdot (J - Y_0 \cdot U_0) \quad U = \begin{pmatrix} 215.236 - 6.802i \\ 214.152 - 8.236i \\ 217.195 - 4.595i \end{pmatrix} \text{ kvolt} \quad \text{Напряжения узлов.}$$

2. Расчет других параметров режима сети

$$U_b := M^T \cdot (U - U_0) \quad U_b = \begin{pmatrix} 6.764 + 6.802i \\ 1.084 + 1.434i \\ 4.805 + 4.595i \\ 3.043 + 3.641i \\ 7.848 + 8.236i \end{pmatrix} \text{kvolt} \quad \text{Напряжения ветвей.}$$

$$I := \overrightarrow{(Y_b \cdot U_b)} \quad I = \begin{pmatrix} 0.618 - 0.347i \\ 0.093 - 0.037i \\ 0.633 - 0.376i \\ 0.213 - 0.096i \\ 0.445 - 0.237i \end{pmatrix} \text{kamp} \quad \text{Токи ветвей.}$$

3. Проверка результатов: сумма задающих токов должна быть равна току балансирующего узла с обратным знаком

$$J_S := \sum J \quad J_S = -1.695 + 0.96ikamp \quad \text{Сумма задающих токов.}$$

$$I := I_1 + I_3 + I_5 \quad I = 1.695 - 0.96ikamp \quad \text{Ток балансирующего узла (знаки с учетом направлений токов на схеме сети).}$$

ЗАНЯТИЕ 2

Рассчитать напряжения в узлах и потоки мощности в ветвях схемы сети, граф которой изображен на рис. 1.7. Исходные данные для расчета и расчет представлен в системе Mathcad.

ORIGIN := 1

Единицы измерения $\text{kvolt} \equiv 1000 \cdot \text{v}$ $\text{MVA} \equiv 10^3 \cdot \text{kvolt} \cdot \text{amp}$

$\text{Mwatt} \equiv \text{MVA}$ $\text{Mvar} \equiv \text{MVA}$

Исходные данные

Погонные параметры и длины ЛЭП

$$z_0 := \begin{pmatrix} 0.121 + j \cdot 0.435 \\ 0.121 + j \cdot 0.435 \\ 0.098 + j \cdot 0.429 \\ 0.075 + j \cdot 0.420 \\ 0.075 + j \cdot 0.420 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{ohm}}{\text{km}} \quad b_0 := \begin{pmatrix} 2.60 \\ 2.60 \\ 2.64 \\ 2.70 \\ 2.70 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{siemens}}{\text{km}} \quad l := \begin{pmatrix} 98 \\ 75 \\ 120 \\ 115 \\ 144 \end{pmatrix} \cdot \text{km}$$

$$P_L := \begin{pmatrix} 70 \\ 120 \\ 120 \end{pmatrix} \cdot \text{Mwatt} \quad Q_L := \begin{pmatrix} 30 \\ 65 \\ 70 \end{pmatrix} \cdot \text{Mvar} \quad \text{Мощности нагрузок узлов.}$$

$$S_L := P_L + i \cdot Q_L$$

Комплексы мощностей нагрузок узлов

$$S := -S_L$$

Задающие мощности узлов.

$$U_{nom} := 220 \cdot kvolt$$

Номинальное напряжение сети.

$$U_0 := 222 \cdot kvolt$$

Напряжение базисного узла.

Модель электрической сети

1. Расчетные параметры ЛЭП

$$\vec{z} := z_0 \cdot l$$

$$\vec{b} := i \cdot b_0 \cdot l$$

$$Z = \begin{pmatrix} 11.858 + 42.63i \\ 9.075 + 32.625i \\ 11.76 + 51.48i \\ 8.625 + 48.3i \\ 10.8 + 60.48i \end{pmatrix} \text{ ohm} \quad B = \begin{pmatrix} 2.548i \times 10^{-4} \\ 1.95i \times 10^{-4} \\ 3.168i \times 10^{-4} \\ 3.105i \times 10^{-4} \\ 3.888i \times 10^{-4} \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

2. Составление матрицы инциденций узлов и ветвей M

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

3. Формирование матрицы проводимостей ветвей Y_b

$$i := 1 .. 5$$

$$Y_{b_{i,i}} := \left(\frac{1}{Z_i} \right)$$

$$Y_b = \begin{pmatrix} 0.006 - 0.022i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.008 - 0.028i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.004 - 0.018i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.004 - 0.02i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.003 - 0.016i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

4. Получение матрицы узловых проводимостей Y

$$Y := M \cdot Y_b \cdot M^T$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.014 - 0.05i & -0.008 + 0.028i & 0 \\ -0.008 + 0.028i & 0.014 - 0.065i & -0.004 + 0.02i \\ 0 & -0.004 + 0.02i & 0.008 - 0.039i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

5. Емкостные проводимости поперечных ветвей Y_c

$$Y_{c1} := \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$Y_{c2} := \frac{B_2 + B_5 + B_4}{2}$$

$$Y_{c3} := \frac{B_3 + B_4}{2}$$

6. Корректировка диагональных элементов матрицы Y

$$Y_{1,1} := Y_{1,1} + Y_{c1} \quad Y_{2,2} := Y_{2,2} + Y_{c2} \quad Y_{3,3} := Y_{3,3} + Y_{c3}$$

7. Расширение матрицы узловых проводимостей путем добавления столбца для базисного балансирующего узла

$$Y_{1,4} := \frac{-1}{Z_1} \quad Y_{2,4} := \frac{-1}{Z_5} \quad Y_{3,4} := \frac{-1}{Z_3}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0.014 - 0.05i & -0.008 + 0.028i & 0 & -0.006 + 0.022i \\ -0.008 + 0.028i & 0.014 - 0.064i & -0.004 + 0.02i & -0.003 + 0.016i \\ 0 & -0.004 + 0.02i & 0.008 - 0.038i & -0.004 + 0.018i \end{pmatrix} \text{ siemens}$$

Вычисления

1. Решение системы нелинейных уравнений установившегося режима

Начальные приближения.

$$U_1 := (1.0 - i \cdot 0.15) \cdot U_{nom} \quad U_2 := U_1 \quad U_3 := U_1$$

Решающий блок - приближенное решение.

Given

$$U_1 \cdot (\overline{Y_{1,1}} \cdot \overline{U_1} + \overline{Y_{1,2}} \cdot \overline{U_2} + \overline{Y_{1,3}} \cdot \overline{U_3} + \overline{Y_{1,4}} \cdot \overline{U_0}) = S_1$$

$$U_2 \cdot (\overline{Y_{2,1}} \cdot \overline{U_1} + \overline{Y_{2,2}} \cdot \overline{U_2} + \overline{Y_{2,3}} \cdot \overline{U_3} + \overline{Y_{2,4}} \cdot \overline{U_0}) = S_2$$

$$U_3 \cdot (\overline{Y_{3,1}} \cdot \overline{U_1} + \overline{Y_{3,2}} \cdot \overline{U_2} + \overline{Y_{3,3}} \cdot \overline{U_3} + \overline{Y_{3,4}} \cdot \overline{U_0}) = S_3$$

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} := \text{Find}(U_1, U_2, U_3) \quad \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 206.886 - 18.347i \\ 202.435 - 22.87i \\ 199.97 - 23.759i \end{pmatrix} \text{ kvolt}$$

Результат решения - узловые напряжения - в экспоненциальной форме записи:

$$\begin{pmatrix} |U_1| \\ |U_2| \\ |U_3| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 207.698 \\ 203.722 \\ 201.377 \end{pmatrix} \text{ kvolt} \quad \begin{pmatrix} \arg(U_1) \\ \arg(U_2) \\ \arg(U_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -5.068 \\ -6.446 \\ -6.776 \end{pmatrix} \text{ deg}$$

2. Расчет других параметров режима сети

Напряжения в начале и конце ветвей и токи ветвей.

$$U_b := \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_0 \\ U_3 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad U_e := \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad I := \frac{\overrightarrow{U_b - U_e}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z} \quad \overrightarrow{|I|} = \begin{pmatrix} 310.156 \\ 108.203 \\ 354.244 \\ 30.822 \\ 282.841 \end{pmatrix} \text{ amp}$$

Мощности в начале и конце ветвей.

$$S_b := \sqrt{3} \cdot U_b \cdot \vec{I} - \left(\frac{U_b}{2} \right)^2 \cdot \frac{B}{2} \quad S_b = \begin{pmatrix} 109.002 + 42.109i \\ 35.58 + 11.581i \\ 117.999 + 60.237i \\ -6.428 - 14.913i \\ 93.783 + 45.49i \end{pmatrix} \text{ MVA}$$

$$S_e := \sqrt{3} \cdot U_e \cdot \vec{I} + \left(\frac{U_e}{2} \right)^2 \cdot \frac{B}{2} \quad S_e = \begin{pmatrix} 105.58 + 41.581i \\ 35.262 + 18.688i \\ 113.572 + 55.087i \\ -6.453 - 2.312i \\ 91.191 + 48.624i \end{pmatrix} \text{ MVA}$$

Потери мощности в ветвях.

$$dP := \text{Re}(S_b - S_e) \quad dP = \begin{pmatrix} 3.422 \\ 0.319 \\ 4.427 \\ 0.025 \\ 2.592 \end{pmatrix} \text{ Mwatt}$$

$$dQ := \text{Im}(S_b - S_e) \quad dQ = \begin{pmatrix} 0.528 \\ -7.107 \\ 5.15 \\ -12.601 \\ -3.134 \end{pmatrix} \text{ Mvar}$$

3. Проверка результатов: сумма мощностей узлов, потерь и зарядной мощности в сети должна быть равна мощности балансирующего узла

$$\sum P_L + \sum dP + i \cdot \left(\sum Q_L + \sum dQ \right) = 320.785 + 147.836i \text{ MVA}$$

ЗАНЯТИЕ 3

На подстанции установлено два понижающих трансформатора типа ТРДН-40000/110. Выбрать ответвления РПН $\pm 9 \times 1,78\%$ в режиме наибольших нагрузок при напряжении на шинах ВН 102 кВ. Мощность, протекающая по трансформаторам со стороны ВН, равна $62 + j28$ МВ·А. Номинальные напряжения обмоток трансформаторов $U_{В \text{ ном}} = 115$ кВ, $U_{Н \text{ ном}} = 10,5$ кВ. Желаемое напряжение $U_{\text{жел}} = 10,5$ кВ.

Для расчетов используем вычисления некоторых выражений в Mathcad.

$$P_1 := 62 \quad Q_1 := 23 \quad R := 0.7 \quad X := 17.4 \quad U_B := 102$$

Вычислим падение напряжения в сопротивлении схемы замещения трансформаторов:

$$\Delta U := \frac{P_1 \cdot R + Q_1 \cdot X}{U_B} + j \cdot \frac{P_1 \cdot X - Q_1 \cdot R}{U_B} \quad \Delta U = 4.349 + 10.419i$$

Напряжение на обмотке НН, приведенное к напряжению обмотки ВН $U_H^{(B)}$

$$|U_B - \Delta U| = 98.205 \text{ ■}$$

$$U_{\text{отв}} = 98,205 \frac{U_{\text{Нном}}}{U_{\text{жел}}} = 98,205 \frac{10,5}{10,5} = 98,205$$

Это напряжение соответствует ближайшему стандартному ответвлению минус 8 $U_{\text{отв}8} = 98,624$ кВ. Действительное напряжение на обмотке НН с учетом установленного ответвления:

$$U_H = U_H^{(B)} \frac{U_{\text{Нном}}}{U_{\text{отв}8}} = 98,205 \frac{10,5}{98,624} = 10,46 \text{ кВ.}$$

Если сразу вычислить номер ответвления, то будем иметь:

$$m := \frac{100}{1.78 \cdot 115} \cdot (98.205 - 115) \quad m = -8.205$$

ЗАНЯТИЕ 4

Выбрать ответвление на автотрансформаторе типа АТДЦТН-125000/220/110 с РПН в обмотке СН $\pm 6 \times 2\%$ в режиме наибольших нагрузок.

Расчетная схема замещения автотрансформатора с сопротивлениями обмоток и нагрузками на сторонах СН и НН представлена на рис 3.12.

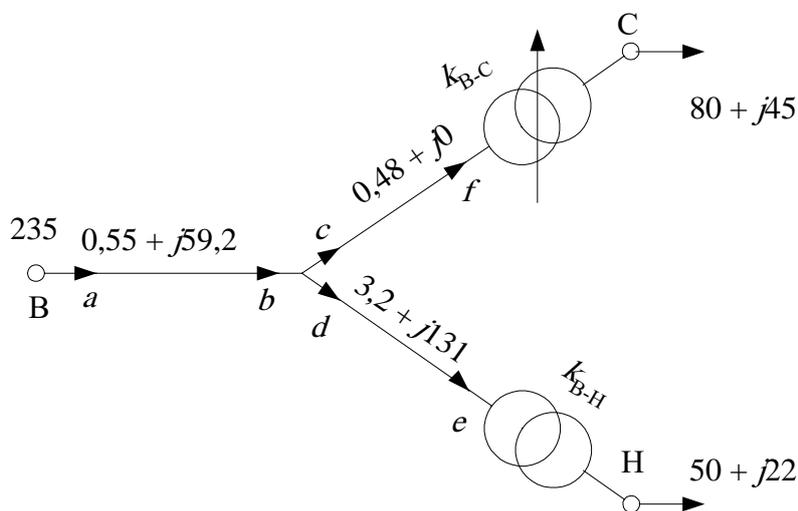


Рис. 3.12. Расчетная схема замещения автотрансформатора

Номинальные напряжения обмоток ВН/СН/НН: 230/121/11 кВ.

Напряжение со стороны обмотки ВН $U_B = 235$ кВ. Желаемое напряжение на шинах СН $U_{\text{жел}}$ не ниже 122 кВ.

Для простоты расчетов пренебрежем активными сопротивлениями обмоток, а для удобства обозначения параметров режима на схеме введем обозначения точек в начале и конце каждой ветви.

Все величины, изображенные на расчетной схеме и приведенные ниже в расчете выражены в киловольтах, мегаваттах, мегаварах и омах. Расчеты выполним в системе Mathcad.

$$U_{\text{Вном}} := 230 \quad U_{\text{Сном}} := 121 \quad U_{\text{Нном}} := 11$$

$$X_{\text{В}} := 59.2 \quad X_{\text{С}} := 0 \quad X_{\text{Н}} := 131$$

$$U_{\text{ном}} := 220 \quad U_{\text{В}} := 235 \quad U_{\text{need}} := 122$$

$$P_C := 80 \quad Q_C := 45$$

$$P_H := 59 \quad Q_H := 22$$

Расчет потоков мощностей:

$$P_b := P_C + P_H \quad P_a := P_b$$

$$Q_C := Q_C \quad Q_d := Q_H + \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_{nom}^2} \cdot X_H \quad Q_d = 32.73$$

$$Q_b := Q_C + Q_d \quad Q_b = 77.73$$

$$Q_a := Q_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{nom}^2} \cdot X_B \quad Q_a = 108.75$$

Расчет напряжения на обмотке СН, приведенного к напряжению обмотки ВН:

$$\Delta U := \frac{Q_a \cdot X_B}{U_B} + j \cdot \frac{P_a \cdot X_B}{U_B} \quad \Delta U = 27.4 + 35.02i$$

$$U_f := |U_B - \Delta U| \quad U_f = 210.54$$

Напряжение отвлечения:

$$U_{otv} := U_{Bnom} \cdot \frac{U_{need}}{U_f} \quad U_{otv} = 133.28$$

Подберем стандартную отпайку. Возьмем отпайку +5:

$$U_{otv5} := 121 + 5 \cdot \frac{2}{100} \cdot U_{Cnom} \quad U_{otv5} = 133.1$$

Действительное напряжение на обмотке СН:

$$U_C := U_f \cdot \frac{U_{otv5}}{U_{Bnom}} \quad U_C = 121.84$$

Это значение соответствует требуемому условию для $U_C \approx U_{жел} = 122$ кВ.

ЗАНЯТИЕ 5

Для схемы, изображенной на рис. 3.17,а, проверить достаточность регулировочного диапазона РПН трансформаторов для обеспечения желаемого уровня напряжения на шинах НН в режиме наибольших нагрузок. При недостаточности регулировочного диапазона РПН оценить величину мощности конденсаторной батареи, требуемой на шинах НН

Параметры схемы сети. Два понижающих трансформатора типа ТРДНС-25000/35. Для каждого трансформатора сопротивление обмоток $0,3 + j5,1$ Ом и потери холостого хода $0,025 + j0,125$ МВ·А. Номинальные напряжения обмоток ВН/НН: 36,75/10,5 кВ и РПН $\pm 8 \times 1,5$ % на стороне ВН.

Двухцепная ЛЭП 35 кВ, выполненная проводом марки АС-120/19 с $r_0 = 0,249$ Ом/км и $x_0 = 0,414$ Ом/км, длина ЛЭП 24 км.

В режиме наибольших нагрузок напряжение в ЦП $U_0 = 36$ кВ, желаемое напряжение на шинах НН подстанции $U_{\text{жел}} = 10,5$ кВ, Мощность нагрузки $P_H + jQ_H = 18 + j13$ МВ·А.

Расчетная схема сети с численными параметрами дана на рис. 5.17,б.

Для простоты расчетов пренебрежем зарядной мощностью ЛЭП и потерями холостого хода трансформаторов. В этом случае последовательно соединенные сопротивления ЛЭП и трансформаторов можно объединить в эквивалентное сопротивление, в результате сопротивление цепи: $Z = 3,14 + j7,52$ Ом, рис. 3.17,в. Для удобства записи обозначений параметров режима введем буквенные обозначения точек, в которых будем вычислять эти параметры, на расчетной схеме (a, b, c), рис. 3.17,в.

Расчеты выполним в системе Mathcad. Все величины, использованные ниже, выражены в мегаваттах, мегаварах, киловольтах и омах.

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ном}} &:= 35 & U_{\text{ВН}} &:= 36.75 & U_{\text{НН}} &:= 10.5 \\
 R &= 3.14 & X &= 7.52 & U_0 &:= 36 & U_{\text{need}} &:= 10.5 \\
 P_H &:= 18 & Q_H &:= 13 & Q_{\text{КУ}} &:= 0 \\
 P_c &:= P_H & Q_c &:= Q_H - Q_{\text{КУ}} & P_b &:= P_c & Q_b &:= Q_c
 \end{aligned}$$

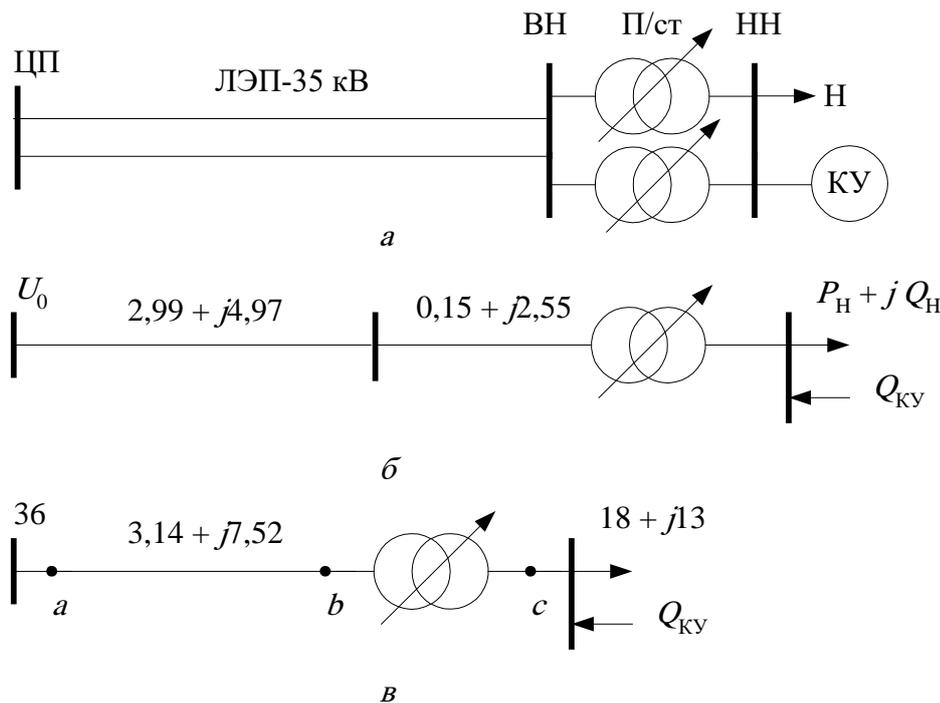


Рис. 3.17. Принципиальная (а) и расчетные (б и в) схемы электрической сети

Выполним расчет потокораспределения и найдем напряжение в точке b .

$$P_a := P_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot R \qquad Q_a := Q_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{\text{ном}}^2} \cdot X$$

$$P_a = 19.26 \qquad Q_a = 16.03$$

$$\Delta U := \frac{P_a \cdot R + Q_a \cdot X}{U_0} + j \cdot \frac{P_a \cdot X - Q_a \cdot R}{U_0} \quad \Delta U = 5.03 + 2.63i$$

$$U_b := U_0 - \Delta U \quad U_b = 30.97 - 2.63i \quad |U_b| = 31.09$$

Напряжения ответвления РПН:

$$U_{otv} := |U_b| \cdot \frac{U_{HH}}{U_{need}} \quad U_{otv} = 31.09$$

$$U_{otv8} := U_{BH} - 8 \cdot \frac{1.5}{100} \cdot U_{BH} \quad U_{otv8} = 32.34$$

Действительное напряжение на шинах НН:

$$U_2 := |U_b| \cdot \frac{U_{HH}}{U_{otv8}} \quad U_2 = 10.09$$

Необходимая мощность КУ:

$$Q_{KY} := \frac{U_{need} \cdot (U_{need} - U_2)}{X} \cdot \left(\frac{U_{otv8}}{U_{HH}} \right)^2 \quad Q_{KY} = 5.4$$

Выполним расчет потокораспределения и напряжений с установленным КУ.

$$P_c := P_H \quad Q_c := Q_H - Q_{KY} \quad P_b := P_c \quad Q_b := Q_c$$

$$P_a := P_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{nom}^2} \cdot R \quad Q_a := Q_b + \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_{nom}^2} \cdot X$$

$$P_a = 18.98 \quad Q_a = 9.95$$

$$\Delta U := \frac{P_a \cdot R + Q_a \cdot X}{U_0} + j \cdot \frac{P_a \cdot X - Q_a \cdot R}{U_0} \quad \Delta U = 3.73 + 3.1i$$

$$U_b := U_0 - \Delta U \quad U_b = 32.27 - 3.1i \quad |U_b| = 32.42$$

При том же ответвлении РПН будем иметь:

$$U_2 := |U_b| \cdot \frac{U_{HH}}{U_{otv8}} \quad U_2 = 10.52$$

Таким образом, при установке на шинах НН мощности конденсаторной батареи порядка 5,4 Мвар напряжение U_2 достигает требуемого значения.

ЗАНЯТИЕ 6

Получим закон регулирования напряжения на шинах центра питания распределительной сети 10 кВ, приведенной на рис. 3.22, по методу характеристического узла.

Для простоты примем, что электроприемники, на шинах которых следует поддерживать напряжение близкое к номинальному, находятся непосредственно в сети 10 кВ. В

действительности в расчете следует учесть сети 0,38 кВ, где, собственно, и следует поддерживать номинальное напряжение у электроприемников. В табл. 3.1 приведены параметры схемы сети.

Таблица 3.1

Сопротивления ветвей схемы сети (провод марки АС-50)

Имя ветви	R , Ом	X , Ом
1 - 3	0,5	0,36
2 - 3	0,5	0,36
3 - 5	0,5	0,36
4 - 5	0,5	0,36
5 - 6	1,04	0,72

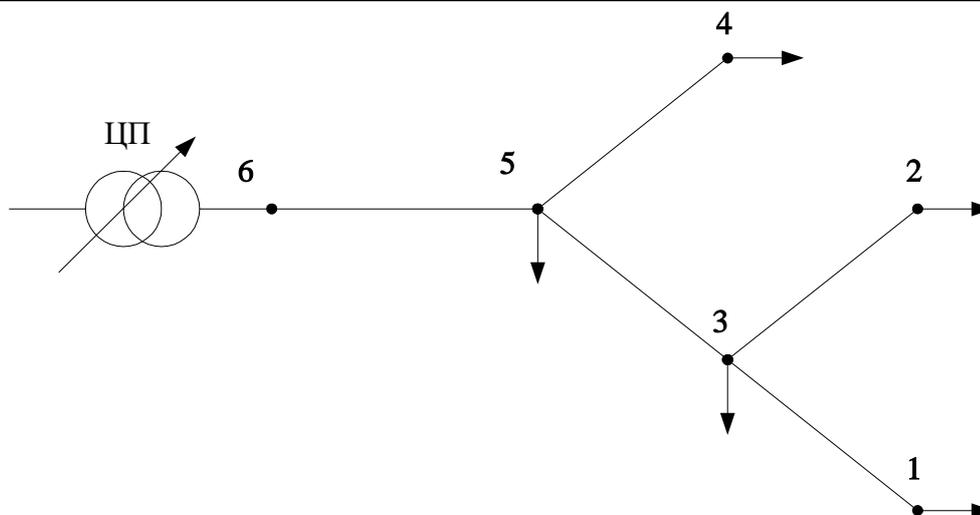


Рис. 3.22. Схема распределительной сети

Расчет приведен в системе Mathcad.

ORIGIN := 1 t := 1.. 6 $U_{nom} := 10$

Графики нагрузки узлов схемы сети по активной и реактивной мощности шесть ступеней по 4 часа.

Мощности даны в киловаттах (P) и киловоарах (Q).

$$P_1 := \begin{bmatrix} 210 \\ 235 \\ 511 \\ 420 \\ 430 \\ 402 \end{bmatrix} \quad
 P_2 := \begin{bmatrix} 210 \\ 235 \\ 511 \\ 420 \\ 430 \\ 402 \end{bmatrix} \quad
 P_3 := \begin{bmatrix} 126 \\ 141 \\ 280 \\ 250 \\ 270 \\ 241 \end{bmatrix} \quad
 P_4 := \begin{bmatrix} 315 \\ 352 \\ 725 \\ 528 \\ 550 \\ 601 \end{bmatrix} \quad
 P_5 := \begin{bmatrix} 419 \\ 468 \\ 832 \\ 713 \\ 720 \\ 801 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 Q_1 &:= \begin{bmatrix} 289 \\ 315 \\ 250 \\ 220 \\ 300 \\ 420 \end{bmatrix} &
 Q_2 &:= \begin{bmatrix} 289 \\ 315 \\ 250 \\ 220 \\ 300 \\ 420 \end{bmatrix} &
 Q_3 &:= \begin{bmatrix} 116 \\ 126 \\ 110 \\ 120 \\ 160 \\ 168 \end{bmatrix} &
 Q_4 &:= \begin{bmatrix} 289 \\ 315 \\ 320 \\ 330 \\ 380 \\ 420 \end{bmatrix} &
 Q_5 &:= \begin{bmatrix} 289 \\ 315 \\ 310 \\ 300 \\ 359 \\ 420 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Графики напряжений в узлах схемы сети, полученные на основе вычислительного эксперимента путем расчета режимов для каждой ступени графиков мощностей, кВ при $U_6 = 10,5$ кВ.

$$\begin{aligned}
 U_1 &:= \begin{bmatrix} 10.21 \\ 10.18 \\ 9.99 \\ 10.07 \\ 10.03 \\ 9.99 \end{bmatrix} &
 U_2 &:= \begin{bmatrix} 10.21 \\ 10.18 \\ 9.99 \\ 10.07 \\ 10.03 \\ 9.99 \end{bmatrix} &
 U_3 &:= \begin{bmatrix} 10.23 \\ 10.20 \\ 10.03 \\ 10.01 \\ 10.03 \\ 10.03 \end{bmatrix} &
 U_4 &:= \begin{bmatrix} 10.25 \\ 10.23 \\ 10.07 \\ 10.13 \\ 10.1 \\ 10.07 \end{bmatrix} &
 U_5 &:= \begin{bmatrix} 10.28 \\ 10.26 \\ 10.11 \\ 10.17 \\ 10.15 \\ 10.11 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

График мощностей 5-го узла

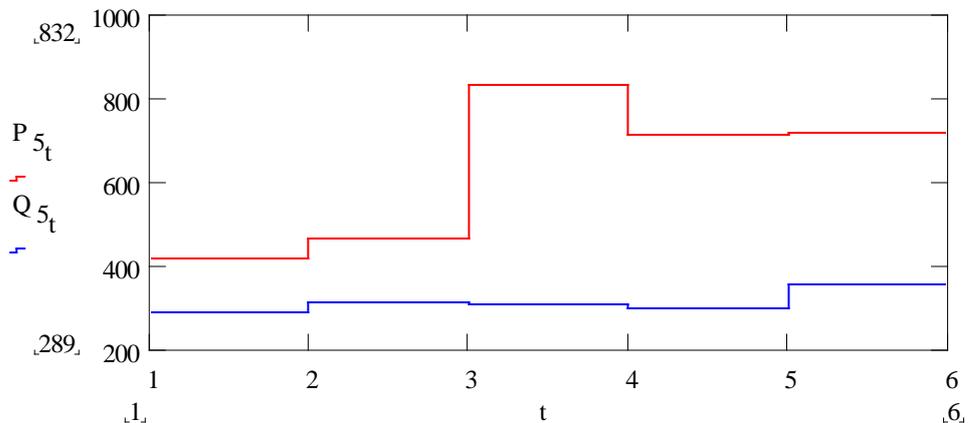
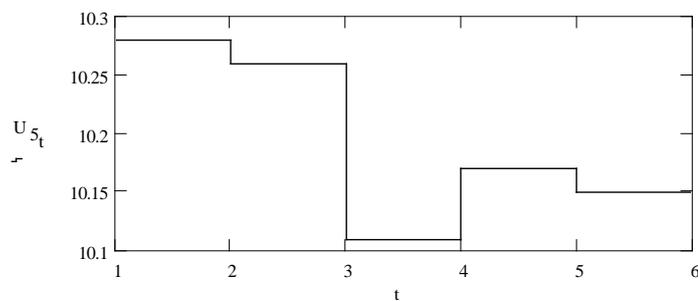


График напряжения в 5-м узле



Суммарный график нагрузки сети

$$P_s := P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad Q_s := Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

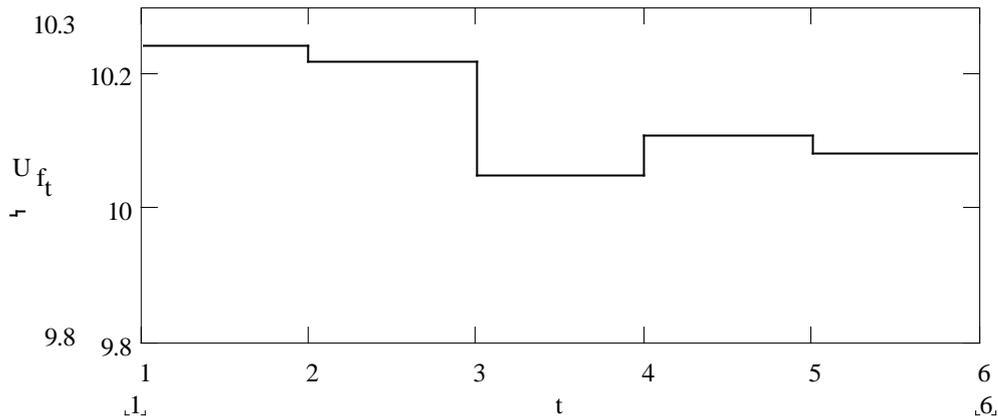
Суточное потребление энергии в каждом узле нагрузки и по сети в целом

$$W_1 := \sum P_1 \cdot 4 \quad W_2 := \sum P_2 \cdot 4 \quad W_3 := \sum P_3 \cdot 4 \quad W_4 := \sum P_4 \cdot 4 \quad W_5 := \sum P_5 \cdot 4$$

$$W := \sum P_s \cdot 4 \quad W = 5.099 \cdot 10^4$$

График напряжения фиктивного узла

$$U_f := \frac{W_1 \cdot U_1 + W_2 \cdot U_2 + W_3 \cdot U_3 + W_4 \cdot U_4 + W_5 \cdot U_5}{W}$$



Расчет статистических характеристик параметров моделей

$$V_f := \frac{10.5 - U_f}{U_{nom}} \quad \Delta V := \text{mean}(V_f) \quad \Delta V = 0.037$$

$$\sigma_{\Delta V} := \text{stdev}(V_f) \quad \sigma_{\Delta V} = 7.727 \cdot 10^{-3}$$

Примем коэффициенты корреляции:

$$r_{p\Delta V} := 0.8 \quad r_{q\Delta V} := 0.8$$

$$m_p := \text{mean}(P_s) \quad \sigma_p := \text{stdev}(P_s) \quad m_p = 2.125 \cdot 10^3 \quad \sigma_p = 570.988$$

$$m_q := \text{mean}(Q_s) \quad \sigma_q := \text{stdev}(Q_s) \quad m_q = 1.406 \cdot 10^3 \quad \sigma_q = 222.329$$

Сопротивления модели и параметр настройки

$$R := \frac{U_{nom}^2 \cdot \sigma_{\Delta V}}{2 \cdot \sigma_p} \cdot r_{p\Delta V} \cdot 10^3 \quad R = 0.541$$

$$X := \frac{U_{nom}^2 \cdot \sigma_{\Delta V}}{2 \cdot \sigma_q} \cdot r_{q\Delta V} \cdot 10^3 \quad X = 1.39$$

$$V_0 := \Delta V - \left(\frac{R}{U_{nom}^2} \cdot m_p + \frac{X}{U_{nom}^2} \cdot m_q \right) \cdot 10^{-3} \quad V_0 = 0.006$$

ЗАНЯТИЕ 7

Рассмотрим варианты конфигурации схемы электрической сети для электроснабжения трех новых нагрузок, план расположения которых на местности относительно ЦП в масштабе дан на рис. 5.2,*а*. Расстояния между ближайшими пунктами нанесено на плане в километрах (рис. 5.2,*а*). Мощности нагрузок новых пунктов равны: $P_1 = 40$ МВт, $P_2 = 30$ МВт, $P_3 = 25$ МВт. Пункт 1 расположен ближе всех к ЦП и мощность его нагрузки самая большая, следовательно, следует сразу предусмотреть его питание по кратчайшему пути и наметить двухцепную линию ЦП-1. Питание остальных двух пунктов нагрузки может быть выполнено по различным вариантам через пункт 1: четырьмя вариантами разомкнутого типа (рис. 5.2,*б, в, г*) и двумя вариантами замкнутого типа (рис. 5.2,*д, е*).

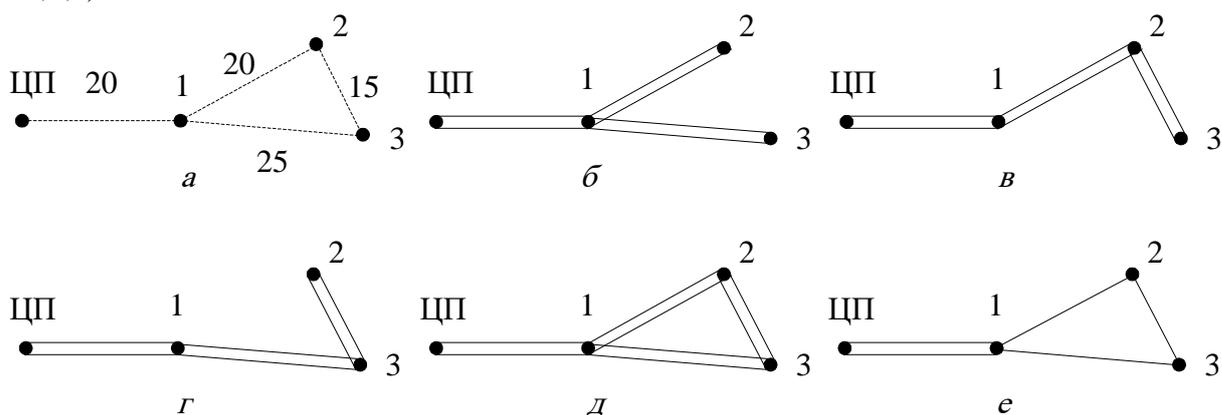


Рис. 5.2. Варианты конфигурации схем электрической сети

Следует сразу убрать из рассмотрения вариант *д*, так как дублирование линий в кольце является излишним и приведет к необоснованному удорожанию сети. Рассмотрим три варианта разомкнутых схем *б*, *в* и *г* с точки зрения критерия суммарной длины линий, причем длину линии ЦП-1 не будем учитывать, так как она присутствует во всех вариантах. Вариант *в* имеет самую маленькую суммарную длину линий $L_v = 15 + 20 = 35$; другие варианты: $L_b = 20 + 25 = 45$, $L_g = 25 + 15 = 40$.

Из дальнейшего рассмотрения можно убрать вариант *г*, так как по способу присоединения подстанций он равноценен лучшему варианту *в*, а также имеет питание пункта 2 «по обходному пути», т. е. через пункт 3 слева направо и далее назад к пункту 2. Это необоснованно увеличивает длину пути питания пункта 2, что скажется как на увеличении стоимости сооружаемых линий, так и завышении потерь электрической энергии.

Из оставшихся двух вариантов разомкнутого типа на данном этапе нельзя выбрать лучший. Несмотря на меньшую суммарную длину вариант *в* имеет недостатки. Во-первых, питание пункта осуществляется по пути через транзитный пункт 2, что, естественно, увеличивает потери энергии, а во-вторых, загрузка линии 1-2 будет выше, чем в другом варианте, что повлечет выбор большего сечения проводов и увеличение стоимости капитальных вложений. В то же время вариант *в* имеет более простую схему присоединения к сети подстанции 1 – количество отходящих линий здесь меньше, но для подстанции 2 наоборот схема несколько сложнее, так как в варианте *б* подстанция 2 становится тупиковой, схема присоединения которой к сети является одной из самых простых и дешевых.

Вариант кольцевого типа *е* ничем не уступает по надежности электроснабжения и ориентировочной стоимости сооружения сети (линии, входящие в кольцо одноцепные, а, следовательно, дешевле двухцепных). Дать сравнительную оценку величины потерь энергии в этом варианте на этапе предварительного выбора конфигурации сети нельзя.

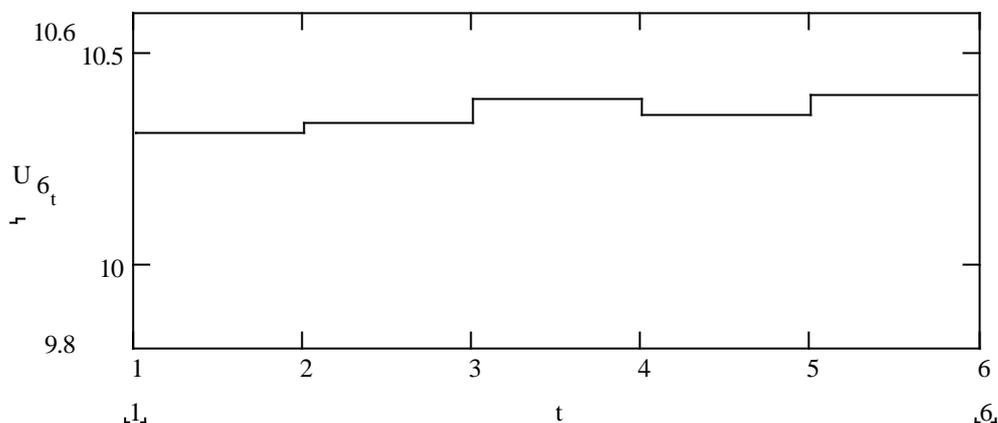
Следовательно, для дальнейшего рассмотрения следует выбрать три варианта конфигурации сети: *б*, *в* и *е*. После выбора номинальных напряжений линий и количества номинальных напряжений на подстанциях можно вторично рассмотреть выбранные конфигурации сети.

График напряжения в центре питания, который должна поддерживать система регулирования

$$\Delta U := \frac{(P_s \cdot R + Q_s \cdot X) \cdot 10^{-3}}{U_{\text{ном}}}$$

$$U_6 := U_{\text{ном}} + V_0 \cdot U_{\text{ном}} + \Delta U$$

$$U_6 = \begin{pmatrix} 10.31 \\ 10.334 \\ 10.391 \\ 10.355 \\ 10.402 \\ 10.453 \end{pmatrix}$$



ЗАНЯТИЕ 8

Пример 1. Выбрать сечение сталеалюминиевых проводов двухцепной ВЛ 35 кВ длиной 18 км с передаваемой мощностью на одну цепь 8 +j3 МВ·А. Время использования максимума нагрузки $T_{\text{max}} = 5500$ ч, коэффициент попадания нагрузки линии в максимум энергосистемы $k_M = 0,9$.

Найдем ток по линии:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{8^2 + 3^2}}{\sqrt{3} \cdot 35} 10^3 = 140,94 \text{ А.}$$

По [2, табл. 8] списка методической литературы для $T_{\text{max}} = 5500$ ч и $k_M = 0,9$ находим $\alpha_T = 1,1$, коэффициент α_i примем равным 1,05. Расчетный ток:

$$I_p = I \cdot \alpha_i \cdot \alpha_T = 140,94 \cdot 1,05 \cdot 1,1 = 162,79 \text{ А.}$$

По [2, табл. П15] списка методической литературы для двухцепных ВЛ на железобетонных опорах находим сечение провода АС-120 (при любом районе по гололеду).

Предельно допустимый ток для выбранного сечения составляет 390 А. В случае отключения одной цепи ВЛ по оставшейся в работе одной цепи потечет послеаварийный ток $I_{ав} = 2 \cdot I = 2 \cdot 140,94 = 281,88$, что меньше допустимого.

Пример 2. Выбрать сечение сталеалюминиевых проводов ВЛ 110 кВ – линии Л₁, Л₂, Л₃ и ВЛ 220 кВ – линия Л₄ (две цепи), рис. 5.5,а. Материал опор – железобетон, район по гололеду – III. Время использования максимума нагрузки $T_{max} = 5200$ ч, коэффициент попадания нагрузок в максимум энергосистемы $k_m = 0,8$.

Мощности нагрузок в мегаваттах и мегаварах и длины ВЛ в километрах нанесены на схеме сети.

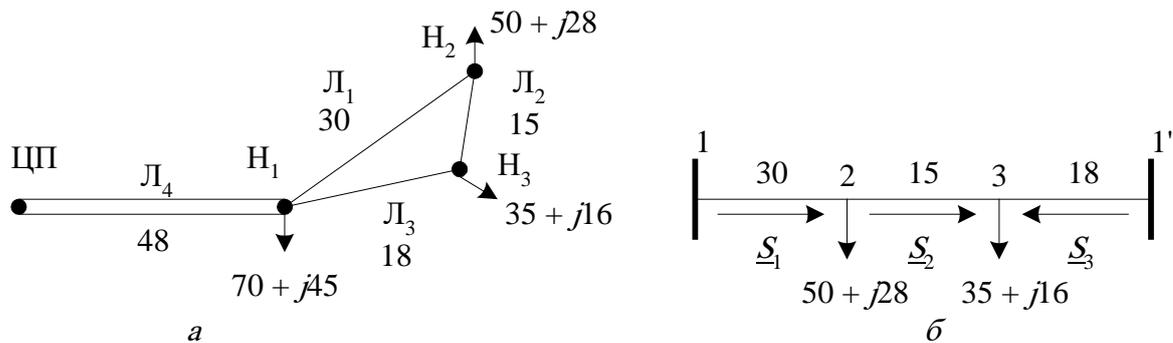


Рис. 5.5. Схема сети 110/220 кВ: а – граф сети, б – линия с двусторонним питанием для кольцевой части сети 110 кВ

Расчеты представим в системе Mathcad. Единицы измерения использованных величин: напряжение в киловольтах, мощности в мегаваттах и мегаварах, длины ВЛ в километрах, токи в амперах.

Исходные данные:

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad T_{\max} := 5200 \quad k_m := 0.8$$

$$P_H := \begin{pmatrix} 70 \\ 50 \\ 35 \end{pmatrix} \quad Q_H := \begin{pmatrix} 45 \\ 28 \\ 16 \end{pmatrix} \quad L := \begin{pmatrix} 30 \\ 15 \\ 18 \\ 48 \end{pmatrix}$$

$$S_H := P_H + j \cdot Q_H \quad U_{110} := 110 \quad U_{220} := 220$$

Потоки мощности в кольце 110 кВ найдем путем приведения замкнутого контура к линии с двусторонним питанием, рис 4.5,б. Так как сопротивления линий еще не известны, то для расчета потокораспределения используем длины ВЛ:

$$S_1 := \frac{S_{H_2} \cdot (L_2 + L_3) + S_{H_3} \cdot L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad S_2 := S_1 - S_{H_2}$$

$$S_3 := S_{H_3} - S_2$$

$$S_4 := \sum S_H$$

$$S = \begin{pmatrix} 36.19 + 19.24i \\ -13.81 - 8.76i \\ 48.81 + 24.76i \\ 155 + 89i \end{pmatrix}$$

Токи в линиях на одну цепь:

$$i := 1 .. 3$$

$$I_i := \frac{|S_i| \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{110}} \quad I_4 := \frac{|S_4| \cdot 10^3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{220}} \quad I = \begin{pmatrix} 215.12 \\ 85.84 \\ 287.27 \\ 234.53 \end{pmatrix}$$

Расчетные токи и выбранные по ним сечения по таблице экономических токовых интервалов [2, табл. П15] списка методической литературы:

$$\alpha_i := 1.05 \quad \alpha_T := 1.2$$

$$I_P := I \cdot \alpha_i \cdot \alpha_T \quad I_P = \begin{pmatrix} 271.05 \\ 108.16 \\ 361.95 \\ 295.51 \end{pmatrix} \quad F := \begin{pmatrix} 185 \\ 120 \\ 240 \\ 240 \end{pmatrix}$$

Послеаварийные токи при поочередных отключениях линий в кольце и одной цепи Л4:

$$I_{f_1} := \frac{|S_{H_2} + S_{H_3}|}{\sqrt{3} \cdot U_{110}} \cdot 10^3 \quad I_{f_2} := \frac{\max(|S_{H_2}|, |S_{H_3}|)}{\sqrt{3} \cdot U_{110}} \cdot 10^3$$

$$I_{f_3} := I_{f_1} \quad I_{f_4} := 2 \cdot I_4$$

$$I_f = \begin{pmatrix} 502.36 \\ 300.78 \\ 502.36 \\ 469.06 \end{pmatrix} \quad I_{\max} := \begin{pmatrix} 520 \\ 390 \\ 605 \\ 605 \end{pmatrix}$$

Послеаварийные токи меньше предельно допустимых, следовательно сечения проводов не требуют изменений.

ЗАНЯТИЕ 9

Пример 1. Выбрать сечение сталеалюминиевых проводов двухцепной ВЛ 35 кВ длиной 18 км из примера 1 подраздела 4.5 по допустимой потере напряжения. Удельное сопротивление алюминиевых проволок 28,8 Ом·мм²/км. Допустимая потеря напряжения 6 %.

Расчеты представим в системе Mathcad. Единицы измерения использованных величин: напряжение в киловольтах, потери напряжения в вольтах, мощности в мегаваттах и мегаварах, длина в километрах, сопротивления в омах, токи в амперах.

Исходные данные:

$$U_{\text{nom}} := 35 \quad L := 18 \quad \rho := 28.8$$

$$P := 8 \quad Q := 3 \quad dU := 0.06 \cdot U_{\text{nom}} \cdot 10^3 \quad dU = 2100$$

Потеря напряжения на индуктивном сопротивлении и допустимая потеря напряжения на активном сопротивлении:

$$dU_x := \frac{0.4}{U_{nom}} \cdot Q \cdot L \cdot 10^3 \quad dU_x = 617.143$$

$$dU_r := dU - dU_x \quad dU_r = 1482.857$$

Сечение провода:

$$F := \frac{\rho}{U_{nom} \cdot dU_r} \cdot P \cdot L \cdot 10^3 \quad F = 79.908$$

Стандартное сечение провода АС-95 /16и его параметры:

$$F := 95 \quad r_0 := 0.306 \quad x_0 := 0.421$$

Допустимый и рабочий токи провода:

$$I_{max} := 330 \quad I := \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom}} \cdot 10^3 \quad I = 140.94$$

Действительная величина потери напряжения:

$$dU := \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0) \cdot L}{U_{nom}} \cdot 10^3 \quad dU = 1908.514$$

Действительная величина потери напряжения меньше допустимой (2100 В).

Сечение проводов при выборе по экономическим токовым интервалам (см. пункт 4.4) получилось другое (АС-120), так как там были использованы дополнительные данные о конструкции линии и характеристиках графиков нагрузки линии.

Пример 2. Выбрать сечения сталеалюминиевых проводов ВЛ 10 кВ, схема которой представлена на рис.5.8. Удельное сопротивление алюминиевых проволок 28,8 Ом·мм²/км. Допустимая потеря напряжения 5 %. При выборе использовать критерий минимума расхода цветного металла.

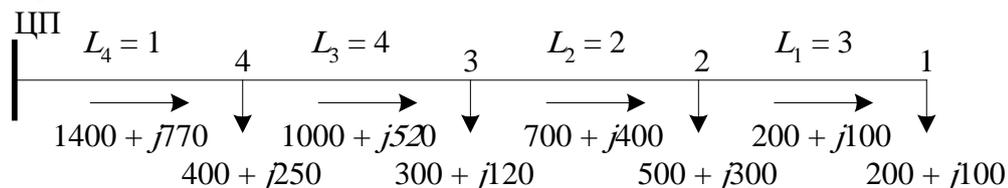


Рис.5.8. Схема сети 10 кВ к примеру 2. (мощности в киловаттах и киловоарах, длины участков в километрах)

Расчеты представим в системе Mathcad. Единицы измерения использованных величин: напряжения в киловольтах, потери напряжения в вольтах, мощности в киловаттах и киловоарах, длины участков в километрах, сопротивления в омах, токи в амперах.

Исходные данные:

$$ORIGIN := 1 \quad i := 1 .. 4 \quad U_{nom} := 10 \quad \rho := 28.8$$

$$L := \begin{pmatrix} 3 \\ 2 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad P_{load} := \begin{pmatrix} 200 \\ 500 \\ 300 \\ 400 \end{pmatrix} \quad Q_{load} := \begin{pmatrix} 100 \\ 300 \\ 120 \\ 250 \end{pmatrix}$$

Потоки мощности по участкам линии:

$$P_1 := P_{load_1} \quad Q_1 := Q_{load_1}$$

$$P_2 := P_1 + P_{load_2} \quad Q_2 := Q_1 + Q_{load_2}$$

$$P_3 := P_2 + P_{load_3} \quad Q_3 := Q_2 + Q_{load_3}$$

$$P_4 := P_3 + P_{load_4} \quad Q_4 := Q_3 + Q_{load_4}$$

$$P = \begin{pmatrix} 200 \\ 700 \\ 1000 \\ 1400 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 100 \\ 400 \\ 520 \\ 770 \end{pmatrix}$$

Потеря напряжения на индуктивных сопротивлениях и допустимая потеря на активных сопротивлениях участков:

$$dU_x := \frac{0.4}{U_{nom}} \cdot \sum_i (Q_i \cdot L_i) \quad dU_x = 158$$

$$dU_r := 0.05 \cdot U_{nom} \cdot 10^3 - dU_x \quad dU_r = 342$$

Сечение на четвертом участке:

$$F_4 := \frac{\rho \cdot \sqrt{P_4}}{U_{nom} \cdot dU_r} \cdot \sum_i (\sqrt{P_i} \cdot L_i)$$

Сечения на остальных участках и стандартные сечения:

$$j := 1 .. 3 \quad F_j := F_4 \cdot \sqrt{\frac{P_j}{P_4}} \quad F = \begin{pmatrix} 30.874 \\ 57.761 \\ 69.037 \\ 81.686 \end{pmatrix} \quad F := \begin{pmatrix} 50 \\ 70 \\ 70 \\ 95 \end{pmatrix}$$

Максимально допустимые токи проводов марки АС стандартных сечений и максимальные рабочие токи по участкам линии:

$$I_{max} := \begin{pmatrix} 175 \\ 265 \\ 265 \\ 330 \end{pmatrix} \quad I_i := \frac{\sqrt{(P_i)^2 + (Q_i)^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{nom}} \quad I = \begin{pmatrix} 12.91 \\ 46.547 \\ 65.074 \\ 92.248 \end{pmatrix}$$

Справочные данные выбранных проводов марки АС:

$$r_{0_1} := 0.830 \quad r_{0_2} := 0.428 \quad r_{0_3} := 0.428 \quad r_{0_4} := 0.306$$

$$x_{0_1} := 0.361 \quad x_{0_2} := 0.34 \quad x_{0_3} := 0.34 \quad x_{0_4} := 0.332$$

Действительная потеря напряжения в линии:

$$dU := \frac{\sum_i [(P_i \cdot r_{0_i} + Q_i \cdot x_{0_i}) \cdot L_i]}{U_{nom}} \quad dU = 458.074$$

Полученное значение потери напряжения меньше допустимой (500 В).

Пример 3. Выбрать сечения ВЛ 10 кВ в сети на рис. 5.8 по критерию минимума потерь мощности. Исходные данные те же, что в примере 2.

Коэффициенты мощности потоков мощности по участка ВЛ и плотность тока:

$$\cos\phi_i := \sqrt{\frac{(P_i)^2}{(P_i)^2 + (Q_i)^2}} \quad j := \frac{dU_r}{\sqrt{3} \cdot \rho \sum_i \cos\phi_i \cdot L_i}$$

$$\cos\phi = \begin{pmatrix} 0.894 \\ 0.868 \\ 0.887 \\ 0.876 \end{pmatrix} \quad j = 0.775$$

Расчетные и стандартные сечения проводов:

$$F_i := \frac{I_i}{j} \quad F = \begin{pmatrix} 16.655 \\ 60.05 \\ 83.951 \\ 119.007 \end{pmatrix} \quad F := \begin{pmatrix} 25 \\ 70 \\ 95 \\ 120 \end{pmatrix} \quad I_{max} := \begin{pmatrix} 142 \\ 265 \\ 330 \\ 390 \end{pmatrix}$$

Максимальные токи по участкам ВЛ также меньше предельно допустимых.

Справочные данные проводов:

$$r_{0_1} := 1.140 \quad r_{0_2} := 0.428 \quad r_{0_3} := 0.306 \quad r_{0_4} := 0.249$$

$$x_{0_1} := 0.368 \quad x_{0_2} := 0.34 \quad x_{0_3} := 0.332 \quad x_{0_4} := 0.326$$

Действительная потеря напряжения:

$$dU := \frac{\sum_i [(P_i \cdot r_{0_i} + Q_i \cdot x_{0_i}) \cdot L_i]}{U_{nom}} \quad dU = 417.978$$

Полученное значение потерь напряжения меньше допустимой (500 В).

В этом примере критерий минимума потерь дал другие результаты – сечения проводов на более загруженных участках оказались больше, а на участке 1 с самой маленькой нагрузкой меньше тех, которые получились по критерию минимума расхода цветного металла.