

Расчет режимов сети
Максимальный режим
Определение расчетной нагрузки ПС и расчет
потерь в трансформаторах

Определение расчетной нагрузки узлов (ПС) предшествует расчету режимов РЭС. Напряжение в сети принимается равным номинальному.

Расчетная нагрузка ПС определяется по формуле:

$$S_{\text{расч},i} = S_{n,i} + \Delta S_i - j(Q_c^H + Q_c^K), \quad (10)$$

где $S_{n,i}$ – нагрузка i -й ПС с учетом компенсации реактивной мощности; ΔS_i – потери полной мощности в трансформаторе, состоящие из потерь холостого хода и потерь короткого замыкания (нагрузочных) МВА; Q_c^H, Q_c^K – генерируемые реактивные мощности линий, подходящих к узлу, Мвар.

Емкостные мощности линий Q_c^H, Q_c^K определяются по номинальным напряжениям:

$$Q_c^H = \frac{1}{2} U_{\text{ном}}^2 b; \quad (11)$$

$$Q_c^K = \frac{1}{2} U_{\text{ном}}^2 b, \quad (12)$$

где b – емкостная проводимость линий.

Для одноцепных линий емкостная проводимость определяется следующим образом:

$$b_{\text{л}} = b_0 L_{\text{л}}, \quad (13)$$

где b_0 – удельная емкостная проводимость линии (выбирается по [4, табл. 7.5], исходя из марки провода), См/км; $L_{\text{л}}$ – длина линии, км.

Для параллельных линий:

$$b_{\text{л}} = 2b_0 L_{\text{л}}. \quad (14)$$

Определим потери мощности холостого хода и короткого замыкания в каждом трансформаторе, согласно выражениям:

$$\Delta P_i = \Delta P_X + \frac{\Delta P_K S_i^2}{S_{\text{ном}}^2}, \quad (15)$$

$$\Delta Q_i = \frac{I_{X\%} S_{\text{ном}}}{100} + \frac{u_{K\%} S_i^2}{100 S_{\text{ном}}}, \quad (16)$$

где S_i – реальная нагрузка одного трансформатора i -й ПС;

ΔP_X , $S_{\text{НОМ}}$, $I_{X\%}$, $u_{K\%}$ – справочные данные [4 и ГОСТ].

Потери полной мощности в трансформаторе определяются по формуле:

$$\Delta S_i = \Delta P_i + j\Delta Q_i. \quad (17)$$

Для ПС № 1 ($2 \times \text{ТРДН} - 40000/110$):

$$\Delta P_1 = \Delta P_X + \frac{\Delta P_K S_1^2}{S_{\text{НОМ}}^2}$$

$$\Delta P_1 = 36 \cdot 10^3 + \frac{172 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{36,4}{2} \cdot 10^6\right)^2}{(40 \cdot 10^6)^2} = 0,072 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_1 = \frac{0,65 \cdot 40 \cdot 10^6}{100} + \frac{10,5 \left(\frac{36,41}{2} \cdot 10^6\right)^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} = 1,13 \text{ Мвар};$$

$$\Delta S_1 = 0,072 + 1,13j \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для ПС № 2 ($2 \times \text{ТРДН} - 63000/110$):

$$\Delta P_2 = 59 \cdot 10^3 + \frac{260 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{47}{2} \cdot 10^6\right)^2}{(63 \cdot 10^6)^2} = 0,095 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_2 = \frac{0,65 \cdot 63 \cdot 10^6}{100} + \frac{10,5 \left(\frac{47}{2} \cdot 10^6\right)^2}{100 \cdot 63 \cdot 10^6} = 1,298 \text{ Мвар};$$

$$\Delta S_2 = (0,095 + j1,298) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для ПС № 3 ($2 \times \text{ТРДН} - 25000/110$):

$$\Delta P_3 = 27 \cdot 10^3 + \frac{120 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{25,9}{2} \cdot 10^6\right)^2}{(25 \cdot 10^6)^2} = 0,059 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_3 = \frac{0,7 \cdot 25 \cdot 10^6}{100} + \frac{10,5 \left(\frac{25,9}{2} \cdot 10^6\right)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} = 0,879 \text{ Мвар};$$

$$\Delta S_3 = (0,059 + j0,879) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для ПС № 4 ($2 \times \text{ТРДН} - 25000/110$):

$$\Delta P_4 = 27 \cdot 10^3 + \frac{120 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{24,1}{2} \cdot 10^6\right)^2}{(25 \cdot 10^6)^2} = 0,055 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_4 = \frac{0,7 \cdot 25 \cdot 10^6}{100} + \frac{10,5 \left(\frac{24,1}{2} \cdot 10^6 \right)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} = 0,785 \text{ Мвар};$$

$$\Delta S_4 = (0,055 + j0,785) \text{ МВ} \cdot \text{А} .$$

Определим расчетные нагрузки по каждому трансформатору соответствующих ПС:

$$S_{\text{расч},1} = S_{n,1} + \Delta S_1 - jQ_{c,21}^H = S_{n,1} + \Delta S_1 - j \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 2b_{0,21} L_{21};$$

$$S_{\text{расч},1} = 35 + j10,1 + 0,072 + j1,13 - j \frac{1}{2} 110^2 \cdot 2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 33,8 + j11,2) \text{ МВ} \cdot \text{А} ;$$

$$S_{\text{расч},2} = S_{n,2} + \Delta S_2 - j(Q_{c,A-2}^H + Q_{c,2-1}^K) = S_{n,2} + \Delta S_2 - j \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 (2b_{0,A-2} L_{A-2} + 2b_{0,2-1} L_{2-1});$$

$$S_{\text{расч},2} = 45 + j13,7 + 0,095 + j1,298 - j \frac{1}{2} 110^2 (2 \cdot 2,75 \cdot 10^{-6} \cdot 43 + 2 \cdot 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 40) = \\ = 43 + j15 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{\text{расч},3} = S_{n,3} + \Delta S_3 - j(Q_{c,A-3}^H + Q_{c,3-4}^K) = S_{n,3} + \Delta S_3 - j \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 (b_{0,A-3} L_{A-3} + b_{0,3-4} L_{3-4});$$

$$S_{\text{расч},3} = 25 + j6,7 + 0,059 + j0,879 - j \frac{1}{2} 110^2 (2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 44 + 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 23) = \\ = 24 + j7,58 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{\text{расч},4} = S_{n,4} + \Delta S_4 - j(Q_{c,A-4}^H + Q_{c,4-3}^K) = S_{n,4} + \Delta S_4 - j \frac{1}{2} U_{\text{НОМ}}^2 (b_{0,A-4} L_{A-4} + b_{0,4-3} L_{4-3});$$

$$S_{\text{расч},4} = 23 + j7,1 + 0,055 + j0,785 - j \frac{1}{2} 110^2 (2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 25 + 2,66 \cdot 10^{-6} \cdot 23) = \\ = 22,3 + j7,88 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Расчет перетоков мощностей с учетом потерь в линии

Вариант 1

Рассмотрим «кольцо» А–3–4–А (см. рис. 6.1). Определим полные сопротивления линий [4, табл. 7.5].

Таблица 9.1

Линия	Марка провода	$z_{\pi} = (r_0 + jx_0)L_{\pi}, \text{ Ом}$
А - 3	АС – 120/19	$z_{A-3} = (24,9 + j42,7) \cdot 10^{-2} \cdot 44 = 11,0 + j18,8$
А - 4	АС – 150/24	$z_{A-4} = (19,8 + j42,0) \cdot 10^{-2} \cdot 25 = 4,95 + j10,5$
4 - 3	АС – 120/19	$z_{4-3} = (24,9 + j42,7) \cdot 10^{-2} \cdot 23 = 9,96 + j17,1$

На 1-м этапе определим потоки мощности (без учета потерь мощности) с помощью выражения:

$$S_{n,n-1} = \frac{\sum_{k=2}^{n-1} S_k z_{1k}^*}{z_{n-1}}, \quad (18)$$

определим приближенное потокораспределение в кольце (без учета потерь мощности) для соответствующих линий:

$$S_{A-3} = \frac{S_{p3}(z_{3-4}^* + z_{A-4}^*) + S_{p4}z_{A-4}^*}{z_{A-3}^* + z_{3-4}^* + z_{A-4}^*};$$

$$S_{A-3} = \frac{(24 + j7,58)(4,95 - j10,5 + 5,73 - j9,82) + (22,3 + j7,88)(4,95 - j10,5)}{11,0 - j18,8 + 4,95 - j10,5 + 5,73 - j9,82} = 18,31 + j5,28 \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{A-4} = \frac{S_{p4}(z_{3-4}^* + z_{A-3}^*) + S_{p3}z_{A-3}^*}{z_{A-3}^* + z_{3-4}^* + z_{A-4}^*};$$

$$S_{A-4} = \frac{(22,3 + j7,88)(11,0 - j18,8 + 5,73 - j9,82) + (24,0 + j7,58)(11,0 - j18,8)}{11,0 - j18,8 + 4,95 - j10,5 + 5,73 - j9,82} = 27,99 + j10,18 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

По первому закону Кирхгофа определим распределение полной мощности в линии 4–3:

$$S_{4-3} = S_{A-4} - S_{p4};$$

$$S_{4-3} = 27,99 + j10,3 - 22,3 - j7,88 = 5,68 + j2,301 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

На 2-м этапе проведем расчет с учетом потерь мощности. Разрежем линию с двухсторонним питанием в узле 3 (по точке потокораздела) и представим в виде двух независимых линий с односторонним питанием,

напряжения у которых по концам равны, т.е. отсутствует падение напряжения (рис. 9.1).

Расчет проводим от концов линий к началу (от т. 3 к т. А, от т. 3' к т. 4 и от т.4 к т. А)

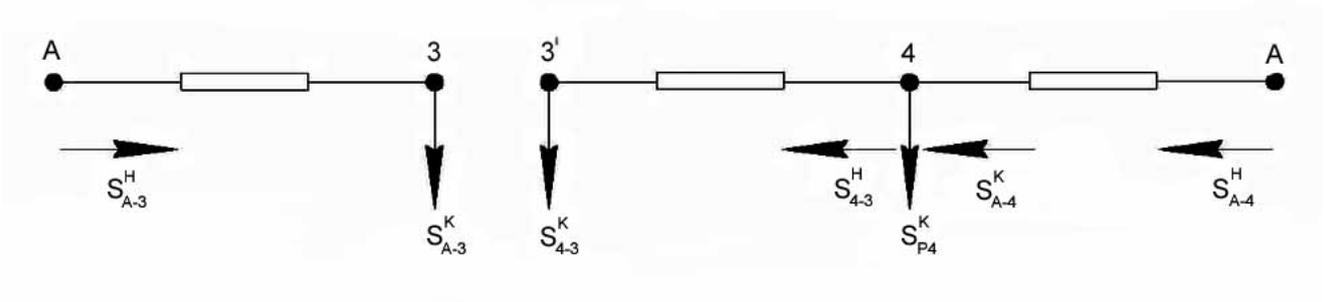


Рис. 9.1

Нагрузки в узлах 3 и 3' равны:

$$S_{A-3}^K = S_{A-3} = (18,3 + j5,28) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Потери мощности в линии А - 3:

$$\Delta S_{z,A-3} = \frac{(P_{A-3}^K)^2 + (Q_{A-3}^K)^2}{U_{НОМ}^2} z_{A-3};$$

$$\Delta S_{z,A-3} = \frac{18,3^2 + 5,28^2}{110^2} (11,0 + j18,8) = (0,33 + j0,5) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Мощность в начале линии А - 3:

$$S_{A-3}^H = S_{A-3}^K + \Delta S_{z,A-3} - \frac{1}{2} \cdot Q_{A3} = 18,3 + j5,28 + 0,33 + j0,56 - j0,5 \cdot 1,42 = (18,6 + j5,13) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для линии А - 4:

$$S_{A-4}^K = (27,99 + j10,18) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta S_{z,A-4} = \frac{(P_{A-4}^K)^2 + (Q_{A-4}^K)^2}{U_{НОМ}^2} z_{A-4};$$

$$\Delta S_{z,A-4} = \frac{27,99^2 + 10,18^2}{110^2} (4,95 + j10,5) = (0,36 + j0,77) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{A-4}^H = 27,99 + j10,18 + 0,36 + j0,77 - j0,5 \cdot 0,817 = (28,4 + j10,5) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для линии 4 - 3:

$$S_{A-4}^K = (5,69 + j2,3) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{4-3}^H = S_{4-3}^K + \Delta S_{z,4-3};$$

$$\Delta S_{z,4-3} = \frac{5,69^2 + 2,3^2}{110^2} (5,73 + j9,82) = (0,018 + j0,031) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{4-3}'' = 5,69 + j2,3 + 0,018 + j0,031 - j \cdot 0,5 \cdot 0 / 74 = (5,71 + j1,96) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Рассмотрим двухцепные линии А–2 и 2–1 (рис. 9.2):

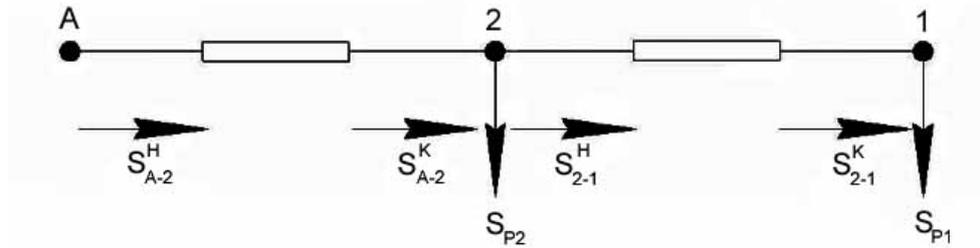


Рис. 9.2

Для линии 2 - 1:

$$S_{2-1}^K = S_{p1} = (33,8 + j11,2) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta S_{z,2-1} = \frac{(P_{2-1}^K)^2 + (Q_{2-1}^K)^2}{U_{\text{ном}}^2} z_{2-1};$$

$$z_{2-1} = (r_0 L_{2-1} + jx_0 L_{2-1});$$

$$z_{2-1} = (24,9 \cdot 40 + j42,7 \cdot 40) \cdot 10^{-2} = (9,96 + j17,1) \text{ Ом},$$

$$\Delta S_{z,2-1} = \frac{33,8^2 + 11,2^2}{110^2} (9,96 + j17,1) = (1,0 + j1,8) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{2-1}'' = S_{2-1}^K + \Delta S_{z,2-1} - \frac{1}{2} \cdot Q_{21},$$

$$S_{2-1}'' = 33,8 + j11,2 + 1,0 + j1,8 - j0,5 \cdot 2,57 = (34,8 + j11,7) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Полное сопротивление линии А - 2:

$$z_{A-2} = 0,5(r_0 L_{A-2} + jx_0 L_{A-2});$$

$$z_{A-2} = 0,5(16,2 \cdot 23 + j41,3 \cdot 23) \cdot 10^{-2} = (1,86 + j4,75) \text{ Ом};$$

$$S_{A-2}^K = S_{2-1}^K + \Delta S_{z,2-1} + S_{\text{расч.2}} = 33,8 + j11,2 + 1 + j1,8 + 43,0 + j15 = 77,8 + j28 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{z,A-2} = \frac{77,8^2 + 28,0^2}{110^2} (1,86 + j4,75) = (1,05 + j2,68) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{A-2}'' = S_{A-2}^K + \Delta S_{z,A-2} - \frac{1}{2} Q_{A-2};$$

$$S_{A-2}'' = 77,8 + j28,0 + 1,05 + j2,68 - j0,5 \cdot 1,53 = (78,8 + j29,9) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Определение значения напряжения в узловых точках (в точках на стороне ВН) в максимальном режиме

Расчет проводим от начала (от известного заданного значения напряжения в т. А) к концам.

Для ПС № 2:

$$U_2 = U_{A \max} - \frac{P_{A-2}^{\kappa} \frac{r_0 L_{A-2}}{2} + Q_{A-2}^{\kappa} \frac{x_0 L_{A-2}}{2}}{U_{A \max}};$$
$$U_2 = 117 - \frac{78,8 \cdot \frac{0,162 \cdot 23}{2} + 29,9 \cdot \frac{0,413 \cdot 23}{2}}{117} = 114,53 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 1:

$$U_1 = U_2 - \frac{\frac{P_{2-1}^{\kappa}}{2} r_0 L_{2-1} + \frac{Q_{2-1}^{\kappa}}{2} x_0 L_{2-1}}{U_2};$$
$$U_1 = 114,53 - \frac{\frac{34,8}{2} \cdot 0,249 \cdot 40 + \frac{11,7}{2} \cdot 0,427 \cdot 40}{114,53} = 112,15 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 3:

$$U_3 = U_{A \max} - \frac{P_{A-3}^{\kappa} r_{A-3} + Q_{A-3}^{\kappa} x_{A-3}}{U_{A \max}};$$
$$U_3 = 117 - \frac{18,6 \cdot 0,249 \cdot 44 + 5,13 \cdot 0,427 \cdot 44}{117} = 114,34 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 4:

$$U_4 = U_{A \max} - \frac{P_{A-4}^{\kappa} r_{A-4} + Q_{A-4}^{\kappa} x_{A-4}}{U_{A \max}};$$
$$U_4 = 117 - \frac{28,4 \cdot 0,198 \cdot 25 + 10,5 \cdot 0,42 \cdot 25}{117} = 114,86 \text{ кВ.}$$

Регулирование напряжения в электрической сети в максимальном режиме

Для расчета регулирования напряжения в сети необходимо ознакомиться с разделом 5 настоящих методических указаний.

Напряжение на шинах низшего напряжения, приведенное к стороне высшего напряжения для каждого из трансформаторов с расщепленными обмотками типа ТРДН для подстанций 1,2,3 и 4 U'_H , определяется по формуле:

$$U'_H = \frac{U_B}{2} + \sqrt{\frac{U_B^2}{4} - \left[\left(P_H R_{ТВ} + \frac{P_H}{2} R_{ТН} \right) + \left(Q_H X_{ТВ} + \frac{Q_H}{2} X_{ТН} \right) \right]}, \quad (19)$$

где P'_H , Q'_H – активная и реактивная мощности, поступающие в трансформатор (после потерь холостого хода) на стороне ВН; $R_{ТВ}$, $X_{ТВ}$, – активное и реактивное сопротивления обмотки ВН; $R_{ТН}$, $X_{ТН}$, – активное и реактивное сопротивления обмотки НН1 или НН2 трансформаторов, определенные расчетным путем:

$$P'_H = \frac{P_H + \Delta P_T}{2} - \Delta P_{XX}; \quad (20)$$

$$Q'_H = \frac{Q_H + \Delta Q_T}{2} - \Delta Q_{XX}; \quad (21)$$

$$R_{ТВ} = \frac{\Delta R_{К,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{2 S_{НОМ}^2}; \quad (22)$$

$$R_{ТН1} = R_{ТН2} = 2 R_{ТВ}; \quad (23)$$

$$X_{ТВ} = \frac{u_{К,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} \left(1 - \frac{K_p}{4} \right), \quad (24)$$

где:
$$K_p = 4 \left(\frac{u_{К,ВН-НН1}}{u_{К,ВН-НН}} - 1 \right); \quad (25)$$

$$X_{ТН} = \frac{u_{К,ВН-НН} U_{НОМ}^2}{100 S_{НОМ}} \frac{K_p}{2}. \quad (26)$$

Используя формулы (21)–(28), определим соответствующие показатели для всех подстанций.

Для ПС № 1 ($2 \times ТРДН - 40000 / 110$):

$$P_{H,1} = \frac{35 + 0,072}{2} - 0,036 = 17,5 \text{ МВт};$$

$$Q_{H,1} = \frac{10,1 + 1,13}{2} - 0,26 = 5,35 \text{ Мвар};$$

$$R_{ТВ} = \frac{172 \cdot 10^3 (115 \cdot 10^3)^2}{2 (40 \cdot 10^6)^2} = 0,71 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{TH1}} = R_{\text{TH2}} = 2 \cdot 0,71 = 1,42 \text{ Ом};$$

$$K_p = 4 \left(\frac{20}{10,5} - 1 \right) = 3,62;$$

$$X_{\text{TB}} = \frac{10,5(115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} \left(1 - \frac{3,62}{4} \right) = 3,3 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{TH1}} = X_{\text{TH2}} = \frac{10,5(115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 40 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,62}{2} = 62,84 \text{ Ом};$$

$$U'_{\text{H,1}} = \frac{112,15}{2} + \sqrt{\frac{112,15^2}{4} - \left[\left(17,5 \cdot 0,71 + \frac{17,5}{2} \cdot 1,42 \right) + \left(5,35 \cdot 3,3 + \frac{5,35}{2} \cdot 64,84 \right) \right]} = 110,23 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 2 ($2 \times \text{ТРДН} - 63000/110$):

$$P_{\text{H,2}} = \frac{45 + 0,095}{2} - 0,059 = 22,49 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{H,2}} = \frac{13,7 + 1,29}{2} - 0,41 = 7,09 \text{ Мвар};$$

$$R_{\text{TB}} = \frac{260 \cdot 10^3 (115 \cdot 10^3)^2}{2(63 \cdot 10^6)^2} = 0,43 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{TH1}} = R_{\text{TH2}} = 2 \cdot 0,63 = 0,86 \text{ Ом};$$

$$K_p = 4 \left(\frac{20}{10,5} - 1 \right) = 3,62,$$

$$X_{\text{TB}} = \frac{10,5(115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 63 \cdot 10^6} \left(1 - \frac{3,62}{4} \right) = 2,09 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{TH1}} = X_{\text{TH2}} = \frac{10,5(115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 63 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,62}{2} = 39,9 \text{ Ом};$$

$$U'_{\text{H,2}} = \frac{114,53}{2} + \sqrt{\frac{114,53^2}{4} - \left[\left(22,49 \cdot 0,43 + \frac{22,49}{2} \cdot 0,86 \right) + \left(7,09 \cdot 2,09 + \frac{7,09}{2} \cdot 39,9 \right) \right]} = 112,97 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 3 и 4 ($2 \times \text{ТРДН} - 25000/110$):

$$P_{\text{H,3}} = \frac{25 + 0,059}{2} - 0,027 = 12,5 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{H,3}} = \frac{6,7 + 0,88}{2} - 0,175 = 3,62 \text{ Мвар};$$

$$P_{\text{H,4}} = \frac{23 + 0,055}{2} - 0,027 = 11,5 \text{ МВт};$$

$$Q_{H,4} = \frac{7,1 + 0,78}{2} - 0,175 = 3,76 \text{ Мвар};$$

$$R_{TB} = \frac{120 \cdot 10^3 (115 \cdot 10^3)^2}{2(25 \cdot 10^6)^2} = 1,27 \text{ Ом};$$

$$R_{TH1} = R_{TH2} = 2 \cdot 1,27 = 2,54 \text{ Ом};$$

$$K_p = 4 \left(\frac{20}{10,5} - 1 \right) = 3,62;$$

$$X_{TB} = \frac{10,5 (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} \left(1 - \frac{3,62}{4} \right) = 5,27 \text{ Ом};$$

$$X_{TH1} = X_{TH2} = \frac{10,5 (115 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 25 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,62}{2} = 100,5 \text{ Ом};$$

$$U'_{H,3} = \frac{114,43}{2} + \sqrt{\frac{114,43^2}{4} - \left[\left(12,4 \cdot 1,27 + \frac{12,5}{2} \cdot 2,54 \right) + \left(3,62 \cdot 5,27 + \frac{3,62}{2} \cdot 100,5 \right) \right]} = 112,37 \text{ кВ};$$

$$U'_{H,4} = \frac{114,86}{2} + \sqrt{\frac{114,86^2}{4} - \left[\left(11,5 \cdot 1,27 + \frac{11,5}{2} \cdot 2,54 \right) + \left(3,77 \cdot 5,27 + \frac{3,77}{2} \cdot 100,5 \right) \right]} = 112,74 \text{ кВ}.$$

Ответвление регулируемой части обмотки, обеспечивающее желаемое напряжение на шинах низшего напряжения $U_{H,жел}$, определим по выражению (5.2). Для ПС № 1:

$$n_{отв,1}^{жел} = \left(\frac{110,23 \cdot 10,5}{10,5 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -2,3, \text{ округляем } n_{отв,1} = -2.$$

Действительное напряжение на шинах низшего напряжения подстанций определим по формуле (5.3):

$$U_{H,1} = \frac{110,23 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-2) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,44 \text{ кВ}.$$

По выражению (5.4) рассчитаем отклонение напряжения на этих шинах от номинального напряжения ($U_{ном} = 10 \text{ кВ}, \%$):

$$\delta U_1 = \frac{10,44 - 10}{10} \cdot 100 = 4,4\%$$

Для ПС № 2:

$$n_{отв,2}^{жел} = \left(\frac{112,97 \cdot 10,5}{10,5 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -0,99, \text{ округляем } n_{отв,2} = -1;$$

$$U_{H,2} = \frac{112,97 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-1) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,5 \text{ кВ};$$

$$\delta U_2 = \frac{10,5 - 10}{10} \cdot 100 = 5\%.$$

Для ПС № 3:

$$n_{\text{отв},3}^{\text{жел}} = \left(\frac{112,36 \cdot 10,5}{10,5 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -1,3, \text{ округляем } n_{\text{отв},3} = -1;$$

$$U_{H,3} = \frac{112,36 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-1) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,45 \text{ кВ},$$

$$\delta U_3 = \frac{10,45 - 10}{10} \cdot 100 = 4,5\%.$$

Для ПС № 4:

$$n_{\text{отв},4}^{\text{жел}} = \left(\frac{112,74 \cdot 10,5}{10,5 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -1,1, \text{ округляем } n_{\text{отв},4} = -1.$$

$$U_{H,4} = \frac{112,74 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-1) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,48 \text{ кВ};$$

$$\delta U_4 = \frac{10,48 - 10}{10} \cdot 100 = 4,8\%.$$

Результаты расчета запишем в табл. 9.2.

Таблица 9.2

№ ПС	$U'_H, \text{кВ}$	$n_{\text{отв}}$	$U_H, \text{кВ}$	$\delta U, \%$
1	110.23	-2	10.44	4.4
2	112.98	-1	10.5	5
3	112.36	-1	10.45	4.5
4	112.74	-1	10.48	4.8

Выбранные рабочие ответвления понижающих трансформаторов обеспечивают поддержание требуемых отклонений напряжения на шинах 10 кВ подстанций во всех рассмотренных режимах работы.

Послеаварийный режим

Рассмотрим обрыв линии А - 3 в треугольнике А-3-4-А (рис. 9.3) и обрывы одной из цепей двухцепных линий.

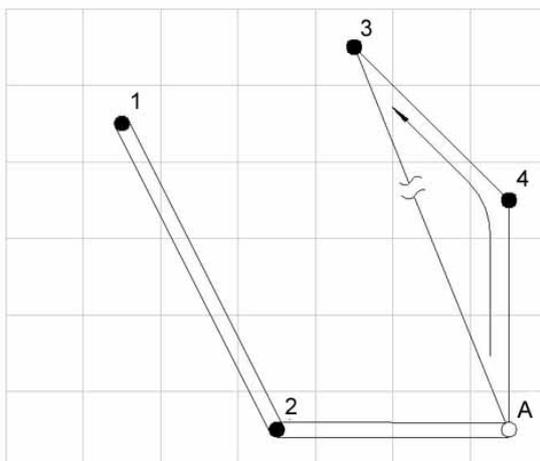


Рис. 9.3

Определим расчетную мощность подстанции № 3 согласно рис. 9.4:

$$S_{p,3} = S_{н,3} + \Delta S_3 - jQ_{c,3-4}'' = S_{н,3} + \Delta S_3 - j \frac{1}{2} U_{ном}^2 b_{0,3-4} L_{3-4};$$

$$S_{p,3} = S_{4-3}^к = 25 + j6,7 + 0,118 + j1,76 - j0,5 \cdot 110^2 \cdot 2,66 \cdot 23 \cdot 10^{-6} = (25,118 + j8,05) MB \cdot A.$$

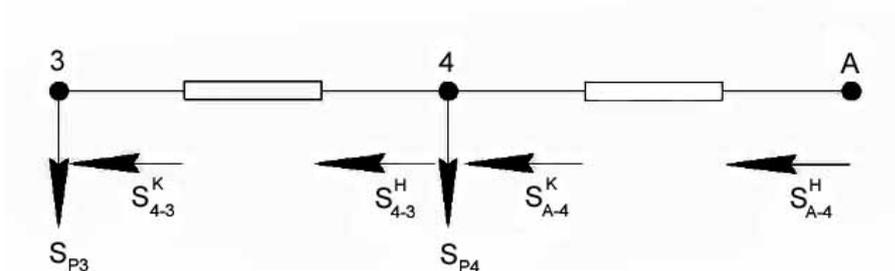


Рис. 9.4

Мощность в начале линии 4 - 3:

$$S_{4-3}'' = S_{4-3}^к + \Delta S_{Z,4-3}$$

Потери мощности в линии 4 - 3 при обрыве линии А - 3:

$$\Delta S_{Z,4-3} = \frac{(P_{4-3}^к)^2 + (Q_{4-3}^к)^2}{U_{авар}^2} z_{4-3};$$

$$\Delta S_{Z,4-3} = \frac{25,118^2 + 8,05^2}{108^2} (9,96 + j17,1) = (0,34 + j0,58) MB \cdot A;$$

$$S_{4-3}'' = 25,118 + j8,05 + 0,34 + j0,58 = (25,46 + j8,63) MB \cdot A.$$

Для линии А - 4:

$$S_{A-4} = S_{4-3}^H + S_{p,4};$$

$$S_{A-4}^K = 25,118 + j8,05 + 23,109 + j7,88 = (48,23 + j15,93) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta S_{Z,A-4} = \frac{(P_{A-4}^K)^2 + (Q_{A-4}^K)^2}{U_{\text{авар}}^2} z_{A-4};$$

$$\Delta S_{Z,A-4} = \frac{48,23^2 + 15,93^2}{108^2} (6,16 + j10,56) = 0,221(6,16 + j10,56) = (1,36 + j2,33) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{A-4}^H = S_{A-4}^K + \Delta S_{Z,A-4};$$

$$S_{A-4}^H = 48,23 + j15,93 + 1,36 + j2,33 = (49,59 + j18,26) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для линии 2 - 1:

$$S_{2-1}^K = S_{p1} = (33,8 + j11,2) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta S_{Z,2-1} = \frac{(P_{2-1}^K)^2 + (Q_{2-1}^K)^2}{U_{\text{ном}}^2} z_{2-1};$$

$$z_{2-1} = (r_0 L_{2-1} + jx_0 L_{2-1});$$

$$z_{2-1} = (24,9 \cdot 40 + j42,7 \cdot 40) \cdot 10^{-2} = (9,96 + j17,1) \text{ Ом},$$

$$\Delta S_{Z,2-1} = \frac{33,8^2 + 11,2^2}{110^2} (9,96 + j17,1) = (1,0 + j1,8) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{2-1}^H = S_{2-1}^K + \Delta S_{Z,2-1} - \frac{1}{2} \cdot Q_{21},$$

$$S_{2-1}^H = 33,8 + j11,2 + 1,0 + j1,8 - j0,5 \cdot 2,57 = (34,8 + j11,7) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Для линии А - 2:

$$S_{A-2}^K = S_{2-1}^K + \Delta S_{Z,2-1} + S_{PACЧ2} = 33,8 + j11,2 + 1 + j1,8 + 43,0 + j15 = 77,8 + j28 \text{ МВА}$$

$$\Delta S_{Z,A-2} = \frac{77,8^2 + 28,0^2}{110^2} (1,86 + j4,75) = (1,05 + j2,68) \text{ МВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{A-2}^H = S_{A-2}^K + \Delta S_{Z,A-2} - \frac{1}{2} Q_{A-2};$$

$$S_{A-2}^H = 77,8 + j28,0 + 1,05 + j2,68 - j0,5 \cdot 1,53 = (78,8 + j29,9) \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

**Определение значения напряжения в узловых точках
в послеаварийном режиме**

Расчет проводим от начала (от известного заданного значения напряжения в т. А) к концам.

Для ПС № 2:

$$U_2 = U_{\text{авар}} - \frac{P_{A-2}^{\kappa} \cdot r_0 L_{A-2} + Q_{A-2}^{\kappa} \cdot x_0 L_{A-2}}{U_{\text{авар}}};$$

$$U_2 = 108 - \frac{78,8 \cdot 0,162 \cdot 23 + 29,9 \cdot 0,413 \cdot 23}{108} = 104,53 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 1:

$$U_1 = U_2 - \frac{P_{2-1}^{\kappa} \cdot r_0 L_{2-1} + Q_{2-1}^{\kappa} \cdot x_0 L_{2-1}}{U_2};$$

$$U_1 = 104,53 - \frac{34,8 \cdot 0,249 \cdot 40 + 11,7 \cdot 0,427 \cdot 40}{104,53} = 102,1 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 4:

$$U_4 = U_{\text{авар}} - \frac{P_{A-4}^{\kappa} \cdot r_0 L_{A-4} + Q_{A-4}^{\kappa} \cdot x_0 L_{A-4}}{U_{\text{авар}}};$$

$$U_4 = 108 - \frac{49,59 \cdot 78,8 \cdot 0,198 \cdot 25 + 18,26 \cdot 0,42 \cdot 25}{108} = 103,8 \text{ кВ.}$$

Для ПС № 3:

$$U_3 = U_4 - \frac{P_{3-4}^{\kappa} \cdot r_0 L_{3-4} + Q_{3-4}^{\kappa} \cdot x_0 L_{3-4}}{U_4};$$

$$U_3 = 103,8 - \frac{25,46 \cdot 0,249 \cdot 23 + 8,63 \cdot 0,427 \cdot 23}{103,8} = 101,7 \text{ кВ.}$$

Регулирование напряжения в электрической сети в послеаварийном режиме

Определим значения напряжений в электрической сети в послеаварийном режиме:

$$U'_{H,1} = \frac{102,1}{2} + \sqrt{\frac{102,1^2}{4} - \left[\left(17,5 \cdot 0,71 + \frac{17,5}{2} 1,42 \right) + \left(5,35 \cdot 3,3 + \frac{5,35}{2} 64,84 \right) \right]} = 100,5 \text{ кВ};$$

$$U'_{H,2} = \frac{104,53}{2} + \sqrt{\frac{104,53^2}{4} - \left[\left(22,49 \cdot 0,43 + \frac{22,49}{2} 0,86 \right) + \left(7,09 \cdot 2,09 + \frac{7,09}{2} 39,9 \right) \right]} = 102,62 \text{ кВ};$$

$$U'_{H,3} = \frac{101,7}{2} + \sqrt{\frac{101,7^2}{4} - \left[\left(12,41 \cdot 1,27 + \frac{12,41}{2} 2,54 \right) + \left(3,62 \cdot 5,27 + \frac{3,62}{2} 100,5 \right) \right]} = 100,2 \text{ кВ};$$

$$U'_{H,4} = \frac{103,8}{2} + \sqrt{\frac{103,8^2}{4} - \left[\left(11,5 \cdot 1,27 + \frac{11,5}{2} 2,54 \right) + \left(3,77 \cdot 5,27 + \frac{3,77}{2} 100,5 \right) \right]} = 102,1 \text{ кВ}.$$

Для ПС № 1:

$$n_{\text{отв},1}^{\text{жел}} = \left(\frac{100,5 \cdot 10,5}{11 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -9,3, \text{ округляем } n_{\text{отв},1} = -9.$$

$$U_{H,1} = \frac{100,5 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-9) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,9 \text{ кВ},$$

$$\delta U_1 = \frac{10,9 - 10}{10} \cdot 100 = 9\%.$$

Для ПС № 2:

$$n_{\text{отв},2}^{\text{жел}} = \left(\frac{102,62 \cdot 10,5}{11 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -8,3, \text{ округляем } n_{\text{отв},2} = -8.$$

$$U_{H,2} = \frac{102,62 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-8) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,9 \text{ кВ},$$

$$\delta U_2 = \frac{10,9 - 10}{10} \cdot 100 = 9\%.$$

Для ПС № 3:

$$n_{\text{отв},3}^{\text{жел}} = \left(\frac{100,2 \cdot 10,5}{11 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -9,45, \text{ округляем } n_{\text{отв},3} = -9.$$

$$U_{H,3} = \frac{100,2 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-9) \frac{1,78}{100} \right)} = 10,89 \text{ кВ},$$

$$\delta U_3 = \frac{10,89 - 10}{10} \cdot 100 = 8,9\% .$$

Для ПС № 4:

$$n_{\text{отв},4}^{\text{жел}} = \left(\frac{102,1 \cdot 10,5}{11 \cdot 115} - 1 \right) \frac{100}{1,78} = -8,6, \text{ округляем } n_{\text{отв},4} = -9 .$$

$$U_{H,4} = \frac{102,1 \cdot 10,5}{115 \left(1 + (-9) \frac{1,78}{100} \right)} = 11 \text{ кВ},$$

$$\delta U_4 = \frac{11 - 10}{10} \cdot 100 = 10\% .$$

Результаты расчета запишем в таблицу 9.3.

Таблица 9.3

№ ПС	$U'_H, \text{кВ}$	$n_{\text{отв}}^{\text{жел}}$	$n_{\text{отв}}$	$U_H, \text{кВ}$	$\delta U, \%$
1	100,5	-9,3	-9	10,9	9
2	102,62	-8,3	-8	10,9	9
3	100,2	-9,45	-9	10,89	8,9
4	102,1	-8,6	-9	11	10