







$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{C}}_{m_N, l_N} &= \mathbf{Z}_{m_N k_N} \mathbf{Z}_{k_N l_N}^{-1} = \mathbf{Z}_{m_N k_N} \mathbf{Y}_{k_N, l_N}; \\ \dot{\mathbf{D}}_{k_N, n_N} &= -\mathbf{Z}_{k_N l_N}^{-1} \mathbf{Z}_{l_N n_N} = -\mathbf{Y}_{k_N, l_N} \mathbf{Z}_{l_N n_N}; \\ \mathbf{Z}_{k_N l_N}^{-1} &= \mathbf{Z}_{k_N, l_N}^{-1} = \mathbf{Y}_{k_N, l_N}.\end{aligned}$$

Здесь величины  $\dot{\mathbf{C}}$  и  $\dot{\mathbf{D}}$  являются безразмерными и комплексными.

Для рассматриваемой БЭЭС блочно-диагональную  $Z$ - $Y$  диакоптическую модель можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{m_1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{k_1} \\ \dots \\ \dot{\mathbf{U}}_{m_N} \\ \dot{\mathbf{I}}_{k_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{B_1} \\ \dot{\mathbf{I}}_{B_1} \\ \dots \\ \dot{\mathbf{U}}_{B_N} \\ \dot{\mathbf{I}}_{B_N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{m_1, n_1} & \dot{\mathbf{B}}_{m_1, l_1} & & & \\ \mathbf{C}_{k_1, n_1} & \mathbf{Y}_{k_1, l_1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \mathbf{Z}_{m_N, n_N} & \dot{\mathbf{B}}_{m_N, l_N} \\ & & & \mathbf{C}_{k_N, n_N} & \mathbf{Y}_{k_N, l_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{n_1} \\ \dot{\mathbf{U}}_{l_1} \\ \dots \\ \dot{\mathbf{I}}_{n_N} \\ \dot{\mathbf{U}}_{l_N} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Полученная  $Z$ - $Y$  форма (6) является исходной для построения соответствующей диакоптической математической модели установившегося режима БЭЭС

$$\begin{bmatrix} F_{pm_1}(I_{n_1}, I_{n_1}'') = 0, \\ F_{qm_1}(I_{n_1}, I_{n_1}'') = 0; \\ F_{pk_1}(U_{l_1}', U_{l_1}'') = 0, \\ F_{qk_1}(U_{l_1}', U_{l_1}'') = 0; \\ \vdots \\ F_{pm_N}(I_{n_N}, I_{n_N}'') = 0, \\ F_{qm_N}(I_{n_N}, I_{n_N}'') = 0; \\ F_{pk_N}(U_{l_N}', U_{l_N}'') = 0, \\ F_{qk_N}(U_{l_N}', U_{l_N}'') = 0. \end{bmatrix} \quad (7)$$

В полученной диакоптической  $Z$ - $Y$  модели установившегося режима, отдельные блочные уравнения определяются следующим образом:

- для первой подсистемы:

$$\begin{cases} F_{pm_1}(I_{n_1}, I_{n_1}'') = P_{m_1} - \left\{ P_{B_{m_1}} + \sum_{n_1} [R_{m_1, n_1} (I_{m_1}' I_{n_1} + I_{m_1}'' I_{n_1}'') + X_{m_1, n_1} (I_{m_1}'' I_{n_1}' - I_{m_1}' I_{n_1}'')] \right\} = 0; \\ F_{qm_1}(I_{n_1}, I_{n_1}'') = Q_{m_1} - \left\{ Q_{B_{m_1}} + \sum_{n_1} [X_{m_1, n_1} (I_{m_1}' I_{n_1}' + I_{m_1}'' I_{n_1}'') - R_{m_1, n_1} (I_{m_1}'' I_{n_1}' - I_{m_1}' I_{n_1}'')] \right\} = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} F_{pk_1}(U_{l_1}', U_{l_1}'') = P_{k_1} - \left\{ P_{B_{k_1}} + \sum_{l_1} [g_{k_1, l_1} (U_{k_1}' U_{l_1}' + U_{k_1}'' U_{l_1}'') + b_{k_1, l_1} (U_{k_1}'' U_{l_1}' - U_{k_1}' U_{l_1}'')] \right\} = 0; \\ F_{qk_1}(U_{l_1}', U_{l_1}'') = Q_{k_1} - \left\{ Q_{B_{k_1}} + \sum_{l_1} [g_{k_1, l_1} (U_{k_1}'' U_{l_1}' - U_{k_1}' U_{l_1}'') - b_{k_1, l_1} (U_{k_1}' U_{l_1}' + U_{k_1}'' U_{l_1}'')] \right\} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

- для последней  $N$ -й подсистемы:

$$\begin{cases} F_{pm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) = P_{m_N} - \left\{ P_{Бm_N} + \sum_{n_N} [R_{m_N, n_N}(I'_{m_N} I'_{n_N} + I''_{m_N} I''_{n_N}) + X_{m_N, n_N}(I''_{m_N} I'_{n_N} - I'_{m_N} I''_{n_N})] \right\} = 0; \\ F_{qm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) = Q_{m_N} - \left\{ Q_{Бm_N} + \sum_{n_N} [X_{m_N, n_N}(I'_{m_N} I'_{n_N} + I''_{m_N} I''_{n_N}) - R_{m_N, n_N}(I''_{m_N} I'_{n_N} - I'_{m_N} I''_{n_N})] \right\} = 0; \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} F_{pk_N}(U'_{l_N}, U''_{l_N}) = P_{k_N} - \left\{ P_{Бk_N} + \sum_{l_N} [g_{k_N, l_N}(U'_{k_N} U'_{l_N} + U''_{k_N} U''_{l_N}) + b_{k_N, l_N}(U''_{k_N} U'_{l_N} - U'_{k_N} U''_{l_N})] \right\} = 0; \\ F_{qk_N}(U'_{l_N}, U''_{l_N}) = Q_{k_N} - \left\{ Q_{Бk_N} + \sum_{l_N} [g_{k_N, l_N}(U''_{k_N} U'_{l_N} - U'_{k_N} U''_{l_N}) - b_{k_N, l_N}(U'_{k_N} U'_{l_N} + U''_{k_N} U''_{l_N})] \right\} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Выражения для величин  $P_{Бm}, Q_{Бm}; P_{Бk}, Q_{Бk}; \dots; P_{Бm_N}, Q_{Бm_N}; P_{Бk_N}, Q_{Бk_N}$  (8)–(11) приведены в [3].

Системы нелинейных алгебраических уравнений, определяющие диакоптическую математическую модель (7), решаются методом Ньютона – Рафсона, при котором соответствующие рекуррентные выражения имеют следующий вид:

- для первой подсистемы:

$$\begin{bmatrix} I'_{m_1} \\ \vdots \\ I''_{m_1} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} I'_{m_1} \\ \vdots \\ I''_{m_1} \end{bmatrix}^I + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pm_1}}{\partial I'_{n_1}} & \frac{\partial F_{pm_1}}{\partial I''_{n_1}} \\ \frac{\partial F_{qm_1}}{\partial I'_{n_1}} & \frac{\partial F_{qm_1}}{\partial I''_{n_1}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pm_1}(I'_{n_1}, I''_{n_1}) \\ \vdots \\ F_{qm_1}(I'_{n_1}, I''_{n_1}) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} U'_{k_1} \\ \vdots \\ U''_{k_1} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} U'_{k_1} \\ \vdots \\ U''_{k_1} \end{bmatrix}^I + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pk_1}}{\partial U'_{l_1}} & \frac{\partial F_{pk_1}}{\partial U''_{l_1}} \\ \frac{\partial F_{qk_1}}{\partial U'_{l_1}} & \frac{\partial F_{qk_1}}{\partial U''_{l_1}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pk_1}(U'_{l_1}, U''_{l_1}) \\ \vdots \\ F_{qk_1}(U'_{l_1}, U''_{l_1}) \end{bmatrix};$$

- для последней  $N$ -й подсистемы:

$$\begin{bmatrix} I'_{m_N} \\ \vdots \\ I''_{m_N} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} I'_{m_N} \\ \vdots \\ I''_{m_N} \end{bmatrix}^I + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pm_N}}{\partial I'_{n_N}} & \frac{\partial F_{pm_N}}{\partial I''_{n_N}} \\ \frac{\partial F_{qm_N}}{\partial I'_{n_N}} & \frac{\partial F_{qm_N}}{\partial I''_{n_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) \\ \vdots \\ F_{qm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} U'_{k_N} \\ \vdots \\ U''_{k_N} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} U'_{k_N} \\ \vdots \\ U''_{k_N} \end{bmatrix}^I + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{pk_N}}{\partial U'_{l_N}} & \frac{\partial F_{pk_N}}{\partial U''_{l_N}} \\ \frac{\partial F_{qk_N}}{\partial U'_{l_N}} & \frac{\partial F_{qk_N}}{\partial U''_{l_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{pk_N}(U'_{l_N}, U''_{l_N}) \\ \vdots \\ F_{qk_N}(U'_{l_N}, U''_{l_N}) \end{bmatrix}.$$

Если пользоваться понятиями векторов состояния ( $\mathbf{X}$ ), управления ( $\mathbf{U}$ ) и возмущения ( $\mathbf{W}$ ) [3–5], то можно записать:

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\};$$

$$\mathbf{U} = \{U_1, U_2, \dots, U_N\};$$

$$\mathbf{W} = \{W_1, W_2, \dots, W_N\}.$$

Векторы состояния, управления и возмущения будут иметь следующие структуры:

- для первой подсистемы:

$$[\mathbf{X}_1] = \left[ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} P_0 \\ Q_0 \end{array} \right\} \text{ – для базисного (балансирующего) стационарного узла} \\ \hspace{10em} \text{типа } U - \Psi_u; \\ \left. \begin{array}{l} I_1 \\ I_1' \end{array} \right\} \text{ – для стационарных узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{array}{l} U_1' \\ U_1'' \end{array} \right\} \text{ – для нагрузочных узлов типа } P - Q; \end{array} \right]$$

$$[\mathbf{U}_1] = \left[ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} U_0 \\ \Psi_{u_0} \end{array} \right\} \text{ – для базисного (балансирующего) стационарного узла} \\ \hspace{10em} \text{типа } U - \Psi_u; \\ \left. \begin{array}{l} P_1 \\ Q_1 \end{array} \right\} \text{ – для стационарных узлов типа } P - Q; \end{array} \right]$$

$$[\mathbf{W}_1] = \left[ \begin{array}{l} P_1 \\ Q_1 \end{array} \right] \text{ – для нагрузочных узлов типа } P - Q;$$

- для  $N$ -й подсистемы:

$$[\mathbf{X}_N] = \left[ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} I_N \\ I_N' \end{array} \right\} \text{ – для стационарных узлов типа } P - Q; \\ \left. \begin{array}{l} U_N' \\ U_N'' \end{array} \right\} \text{ – для нагрузочных узлов типа } P - Q; \end{array} \right]$$

$$[\mathbf{U}_N] = \left[ \begin{array}{l} P_N \\ Q_N \end{array} \right] \text{ – для стационарных узлов типа } P - Q;$$

$$[\mathbf{W}_N] = \left[ \begin{array}{l} P_N \\ Q_N \end{array} \right] \text{ – для нагрузочных узлов типа } P - Q.$$

Таким образом, диакоптическая математическая модель для БЭЭС (7) примет вид

$F_{z_1(x)}(X_1, U_1, W_1) = 0,$	
	$F_{x_1(z_1)}(X_1, U_1, W_1) = 0;$
	$\vdots$
	$F_{z_N(x_N)}(X_N, U_N, W_N) = 0,$
	$F_{x_N(z_N)}(X_N, U_N, W_N) = 0.$

Если вектор состояния  $\mathbf{X}_1$  получит приращение  $\Delta\mathbf{X}_1$ , то соответствующие приращения  $\Delta\mathbf{U}_1$  и  $\Delta\mathbf{W}_1$  получат векторы управления  $\mathbf{U}_1$  и возмущения  $\mathbf{W}_1$ , и тогда для первой подсистемы можем написать выражения:

$$\mathbf{F}_{z_1(x)}(\mathbf{X}_1^P + \Delta\mathbf{X}_1; \mathbf{U}_1^0 + \Delta\mathbf{U}_1; \mathbf{W}_1^0 + \Delta\mathbf{W}_1) = 0; \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{x_1(z_1)}(\mathbf{X}_1^P + \Delta\mathbf{X}_1; \mathbf{U}_1^0 + \Delta\mathbf{U}_1; \mathbf{W}_1^0 + \Delta\mathbf{W}_1) = 0. \quad (13)$$

Разлагая (12) и (13) в ряд Тейлора и оставляя только члены, имеющие частные производные первого порядка, получим:

$$\Delta\mathbf{X}_{z_1(x)} = \mathbf{S}_{z_1(x)}^U \Delta\mathbf{U}_{z_1(x)} + \mathbf{S}_{z_1(x)}^W \Delta\mathbf{W}_{z_1(x)};$$

$$\Delta\mathbf{X}_{x_1(z_1)} = \mathbf{S}_{x_1(z_1)}^U \Delta\mathbf{U}_{x_1(z_1)} + \mathbf{S}_{x_1(z_1)}^W \Delta\mathbf{W}_{x_1(z_1)},$$

в которых приняты следующие обозначения:

$$\mathbf{S}_{z_1(x)}^U = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{z_1(x)}}{\partial \mathbf{X}_1} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z_1(x)}}{\partial \mathbf{U}_1}; \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_{z_1(x)}^W = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{z_1(x)}}{\partial \mathbf{X}_1} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{z_1(x)}}{\partial \mathbf{W}_1}; \quad (15)$$

$$\mathbf{S}_{x_1(z_1)}^U = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{x_1(z_1)}}{\partial \mathbf{X}_1} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{x_1(z_1)}}{\partial \mathbf{U}_1}; \quad (16)$$

$$\mathbf{S}_{x_1(z_1)}^W = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{x_1(z_1)}}{\partial \mathbf{X}_1} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{x_1(z_1)}}{\partial \mathbf{W}_1}. \quad (17)$$

Здесь выражения (14)–(17) являются матрицами чувствительности.

Скорректированные векторы состояния для первой подсистемы будут:

$$\mathbf{X}_{z_1(x)}^H = \mathbf{X}_{z_1(x)}^\Phi + \Delta\mathbf{X}_{z_1(x)}; \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_{x_1(z_1)}^H = \mathbf{X}_{x_1(z_1)}^\Phi + \Delta\mathbf{X}_{x_1(z_1)}, \quad (19)$$

где Н – новый; Ф – функционирующие (установившиеся) режимы.

В развернутом виде уравнения (18) и (19) можно записать следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_i} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_i} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_i} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_i} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{I}'_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{I}''_{n_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{I}'_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{I}''_{n_i}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{P}_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{Q}_{n_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{P}_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{Q}_{n_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{n_i} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{n_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_{l_i} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{U}''_{l_i} \end{bmatrix}; \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_i} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_i} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_i} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_i} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{I}'_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{I}''_{n_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{I}'_{n_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{I}''_{n_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}'_{n_i} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{I}''_{n_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{P}_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{Q}_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{P}_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{Q}_{l_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{k_i} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{k_i} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Аналогичным образом можем записать соответствующие выражения для других подсистем, следовательно, и для  $N$ -й подсистемы:

$$\mathbf{F}_{Z_N(Y_N)}(\mathbf{X}_N^P + \Delta \mathbf{X}_N; \mathbf{U}_N^0 + \Delta \mathbf{U}_N; \mathbf{W}_N^0 + \Delta \mathbf{W}_N) = 0;$$

$$\mathbf{F}_{Y_N(Z_N)}(\mathbf{X}_N^P + \Delta \mathbf{X}_N; \mathbf{U}_N^0 + \Delta \mathbf{U}_N; \mathbf{W}_N^0 + \Delta \mathbf{W}_N) = 0,$$

из которых следует:

$$\Delta \mathbf{X}_{Z_N(Y_N)} = \mathbf{S}_{Z_N(Y_N)}^U \Delta \mathbf{U}_{Z_N(Y_N)} + \mathbf{S}_{Z_N(Y_N)}^W \Delta \mathbf{W}_{Z_N(Y_N)}; \quad (22)$$

$$\Delta \mathbf{X}_{Y_N(Z_N)} = \mathbf{S}_{Y_N(Z_N)}^U \Delta \mathbf{U}_{Y_N(Z_N)} + \mathbf{S}_{Y_N(Z_N)}^W \Delta \mathbf{W}_{Y_N(Z_N)}. \quad (23)$$

В (22), (23) приняты следующие обозначения:

$$\mathbf{S}_{Z_N(Y_N)}^U = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{Z_N(Y_N)}}{\partial \mathbf{X}_N} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{Z_N(Y_N)}}{\partial \mathbf{U}_N};$$

$$\mathbf{S}_{Z_N(Y_N)}^W = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{Z_N(Y_N)}}{\partial \mathbf{X}_N} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{Z_N(Y_N)}}{\partial \mathbf{W}_N};$$

$$\mathbf{S}_{Y_N(Z_N)}^U = - \left( \frac{\partial \mathbf{F}_{Y_N(Z_N)}}{\partial \mathbf{X}_N} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{F}_{Y_N(Z_N)}}{\partial \mathbf{U}_N};$$

$$\mathbf{S}_{Y_N(Z_N)}^W = - \left( \frac{\partial F_{Y_N(Z_N)}}{\partial X_N} \right)^{-1} \frac{\partial F_{Y_N(Z_N)}}{\partial W_N}.$$

Аналогично можем записать:

$$\mathbf{X}_{Z_N(Y_N)}^H = \mathbf{X}_{Z_N(Y_N)}^\Phi + \Delta \mathbf{X}_{Z_N(Y_N)};$$

$$\mathbf{X}_{Y_N(Z_N)}^H = \mathbf{X}_{Y_N(Z_N)}^\Phi + \Delta \mathbf{X}_{Y_N(Z_N)},$$

и, следовательно:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_N} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_N} \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_N} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_N} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{P}_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{Q}_{n_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{P}_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{Q}_{n_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{n_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{n_N} \end{bmatrix} - \\ & \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_{l_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{U}''_{l_N} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_N} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_N} \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_N} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_N} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}'_{n_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{I}''_{n_N} \end{bmatrix} - \\ & \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{P}_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{Q}_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{P}_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{Q}_{l_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{k_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{k_N} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (25)$$

Необходимо отметить, что матричные выражения (20), (21) и (24), (25) получены для самого общего случая, когда одновременно изменяются как вектор управления  $\mathbf{U}$ , так и вектор возмущения  $\mathbf{W}$ . На практике чаще изменяются активные и реактивные мощности нагрузочных узлов, т. е. компоненты вектора возмущения  $\mathbf{W}$ .

При этом матричные выражения (20), (21) и (24), (25) соответственно принимают вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_l} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_l} \end{bmatrix}^H &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_l} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_l} \end{bmatrix}^\Phi - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_l}}{\partial \mathbf{I}'_{n_l}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_l}}{\partial \mathbf{I}''_{n_l}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_l}}{\partial \mathbf{I}'_{n_l}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_l}}{\partial \mathbf{I}''_{n_l}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_l}}{\partial \mathbf{U}'_{l_l}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_l}}{\partial \mathbf{U}''_{l_l}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_l}}{\partial \mathbf{U}'_{l_l}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_l}}{\partial \mathbf{U}''_{l_l}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_{l_l} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{U}''_{l_l} \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_i} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_i} \end{bmatrix}^{\text{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_i} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_i} \end{bmatrix}^{\Phi} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}'_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{U}''_{l_i}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{P}_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_i}}{\partial \mathbf{Q}_{l_i}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{P}_{l_i}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_i}}{\partial \mathbf{Q}_{l_i}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{k_i} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{k_i} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_N} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_N} \end{bmatrix}^{\text{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{m_N} \\ \vdots \\ \mathbf{I}''_{m_N} \end{bmatrix}^{\Phi} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}'_{n_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{I}''_{n_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pm_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qm_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}'_{l_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{U}''_{l_N} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_N} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_N} \end{bmatrix}^{\text{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_{k_N} \\ \vdots \\ \mathbf{U}''_{k_N} \end{bmatrix}^{\Phi} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}'_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{U}''_{l_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{P}_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{pk_N}}{\partial \mathbf{Q}_{l_N}} \\ \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{P}_{l_N}} & \frac{\partial \mathbf{F}_{qk_N}}{\partial \mathbf{Q}_{l_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_{k_N} \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{Q}_{k_N} \end{bmatrix}.$$

Частные производные, входящие в матрицы Якоби, приведены в [3]. Другие частные производные определяются на основании соответствующих аналитических выражений установившегося режима БЭЭС.

#### ВЫВОД

Полученные аналитические выражения для коррекции параметров установившегося режима БЭЭС в гибридной Z-Y-форме позволяют оперативно корректировать значения мощностей контролируемых узлов в БЭЭС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Х а ч а т р я н, В. С. К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем / В. С. Хачатрян // Электричество. – 1964. – № 10. – С. 47–57.
2. Н а р р, Н. Н. Z-diakoptics, torn subdivisions radially attached / Н. Н. Napp // IEEE Transactions. – 1967. – V. PAS-86. – No. 6. – P.751–769.
3. Х а ч а т р я н, К. В. Метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы / К. В. Хачатрян // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 8–11.
4. Х а ч а т р я н, К. В. Новая диакоптическая обобщенная математическая модель коррекции установившегося режима сложной электроэнергетической системы / К. В. Хачатрян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2005. – № 1. – С. 76–88.
5. Х а ч а т р я н, В. С. Новый метод коррекции установившегося режима сложной электроэнергетической системы / В. С. Хачатрян, К. В. Хачатрян // Вестник инженерной Академии Армении. – 2005. – № 1. – С. 19–26.

Поступила 17.10.2005