ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 210 1974

ОГРАНИЧЕНИЯ К ПАРАМЕТРАМ РЕЖИМА ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ПО УСЛОВИЯМ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Р. И. БОРИСОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и электрических систем и сетей)

Сетевые мощности (P_{ij} и Q_j) элементов схем и их совокупностей определяются через параметры режима (U_i, U_j, δ_i; δ_j), которые в свою очередь характеризуют состояния систем по статической и динамической устойчивости. Установление критериев устойчивости через параметры режима при помощи уравнений сетевых мощностей имеет свои положительные стороны, поскольку позволяет учитывать влияние особенностей каждой нагрузки или обобщенных статических характеристик узлов энергосистем и производить это в расчетах разными способами для разных узлов. Допустим, что все переменные параметры режима (U) и (δ) выражаются в виде неизвестных функций времени при малых и кратковременных возмущениях режима [1]. Тогда суждение о статической устойчивости можно производить по характеру изменения каждой переменной во времени. Если свободные колебания по каждой переменной во времени затухают, то соответствующий установившийся режим будет устойчивым, если не затухают — то неустойчивым. Поскольку решаются задачи по настройке режима с учетом требований по статической устойчивости, то параметры режима совместно с параметрами устройств в другой группе задач являются искомыми величинами. Вместе с тем желательно ограничения по статической устойчивости сформулировать по тем же искомым параметрам, которые входят в функционал цели, чтобы в формуле Лагранжа уменьшить число дополнительных переменных.

Для первой из генераторных станций (узлы 1, 6, 8) схемы на рис. 1 уравнения свободных колебаний ротора записываются так:

$$I_1 \frac{d^2 \Delta\delta_1}{dt^2} = -\Delta P_1 = -\Delta P_1 (\Delta E_1,\ \Delta U_1,\ \Delta\delta_{01},\ E_1,\ U_1,\ \delta_{01}), \qquad (1)$$

где δ_{01} — угол между векторами э.д.с. и напряжением на шинах данной станции.

Если не учитывать запаздывания в действии систем регулирования э. д. с., то приращение э. д. с. будет связываться с приращениями внешних параметров схемы (напряжений и углов) и их производных в виде такого соотношения:

$$\Delta E = \kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{U_2} \Delta U_2 + \ldots + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01} + \kappa_{\delta_1} \Delta\delta_1 \ \ \kappa_{\delta_1} \Delta\delta_1 + \ldots$$
$$+ \kappa'_{U_1} p\Delta U_1 + \kappa''_{U_2} p\Delta U_2 + \ldots + \kappa'_{\delta_{01}} p\Delta\delta_{01} + \kappa'_{\delta_1} p\Delta\delta_1 + \kappa'_{\delta_2} p\Delta\delta_2 + \ldots$$

$$+\kappa''_{U_1}p^2\Delta U_1+\kappa''_{U_2}p^2\Delta U_2+\ldots+\kappa''_{\delta_{01}}p^2\Delta\delta_{01}+\kappa''_{\delta_1}p^2\Delta\delta_1+\kappa''_{\delta_2}p^2\Delta\delta_2=$$
$$=\sum(\kappa_{U_i}+\kappa'_{U_i}p+\kappa''_{U_i}p^2)\Delta U_i+\sum(\kappa_{\delta_i}+\kappa'_{\delta_i}p+\kappa''_{\delta_i}p^2)\Delta\delta_i, \qquad (2)$$

где κ — коэффициенты усиления разных звеньев,
p — символ дифференцирования.

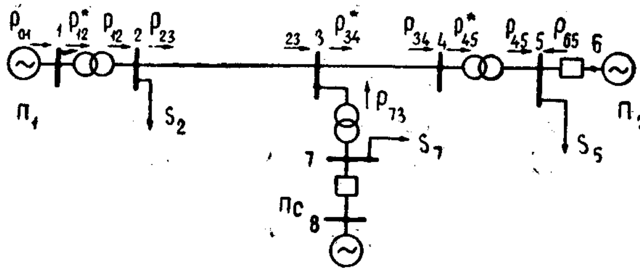

Рис. 1. Принципиальная схема дальней ЛЭП с промежуточной системой

С учетом запаздывания уравнение регулирования запишется так:

$$\Delta E=\left(\frac{\kappa_{U_1}}{1+pT_{U_1}}\Delta U_1+\frac{\kappa_{U_2}}{1+pT_2}\Delta U_2+\ldots+\frac{\kappa_{\delta_{01}}}{1+pT_{\delta_{01}}}\Delta\delta_{01}+\ldots+\right.$$
$$+\frac{\kappa'_{U_1}}{1+pT_{U_1}}p\Delta U_1+\ldots+\frac{\kappa'_{\delta_{01}}}{1+pT'_{\delta_{01}}}p\Delta\delta_{01}+\frac{\kappa'_{\delta_1}}{1+pT'_{\delta_1}}p\Delta\delta_1+$$
$$+\frac{\kappa''_{U_1}}{1+pT''_{U_1}}p^2\Delta U_1+\ldots+\frac{\kappa''_{\delta_{01}}}{1+pT''_{\delta_{01}}}p^2\Delta\delta_{01}+\frac{\kappa''_{\delta_1}}{1+pT''_{\delta_1}}p^2\Delta\delta_1+$$
$$\left.+\ldots\right)\frac{1}{1+pT_{вв}}\frac{1}{1+pT_в}=\frac{1}{1+pT_{вв}}\frac{1}{1+pT_в}\times$$
$$\times\left(\sum_i\left(\frac{\kappa_{U_i}}{1+pT_{U_i}}+\frac{\kappa'_{U_i}p}{1+pT'_{U_i}}+\frac{\kappa''_{U_i}p^2}{1+pT''_{U_i}}\right)\Delta U+\right.$$
$$\left.+\sum_i\left(\frac{\kappa_{\delta_i}}{1+pT_{\delta_i}}+\frac{\kappa'_{\delta_i}p}{1+pT'_{\delta_i}}+\frac{\kappa''_{\delta_i}p^2}{1+pT''_{\delta_i}}\right)\right), \qquad (3)$$

где $T_в$ и $T_{вв}$, T_i — постоянные времени обмотки возбуждения, возбудителя и соответствующего звена.

Таким образом, при пропорциональном регулировании по напряжению и собственному углу без запаздывания уравнение регулирования запишется в следующем виде:

$$\Delta E=(-\kappa_{U_1}\Delta U_1+\kappa_{\delta_{01}}\Delta\delta_{01})\frac{1}{1+pT_в}. \qquad (4)$$

По первой форме расчетов число переменных функционала и ограничений снижается путем использования аппроксимирующих многочленов, а во второй форме решение организуется по всем переменным.

Если следовать первой форме записи, то:

$$I_1p^2\Delta\delta_1=-\left(\frac{\partial p}{\partial E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\Delta E_1+\frac{\partial P_1}{\partial U_1}(E_1,\ U_1,\delta_{01})\Delta U_1+\right.$$
$$\left.+\frac{\partial P_1}{\partial\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\Delta\delta_{01}\right)=-(P_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})(-\kappa_{U_1}\Delta U_1+\kappa_{\delta_{01}}\Delta\delta_{01})\times$$
$$\times\frac{1}{1+pT_в}+\bar{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\Delta U_1+\bar{P}_{1\delta_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\Delta\delta_{01}).$$

Подставим вместо E_1 и δ_{01} аппроксимирующие многочлены от отдаваемых мощностей, которые выражаются через параметры внешней части схемы.

$$I_1 p^2 \Delta\delta = -(\overline{P}_{1E_1}(v_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01};\ U_1;\ v_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} +$$

$$+ q_{\delta_{01}} Q_{01}) \times (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01}) \frac{1}{1+pT_{\text{в}}} + \overline{P}_{1U_1}(v_{E_1} U_1 +$$

$$+ \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01};\ U_1;$$

$$v_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} + q_{\delta_{01}} Q_{01}) \Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(v_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01};\ U_1;$$

$$v_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} + q_{\delta_{01}} Q_{01}) \Delta\delta_{01});$$

так как $P_{01} = P_{12}^*$ и $Q_{01} = -Q_{21}$, то

$$\overline{P}_{1E_1}(v_{E_1} U_1 + \pi_{E_1}(P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) + q_{E_1}(-Q_{21}(U_2, U_1, \delta_2; \delta_1));$$

$$U_1;\ v_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}}(P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) + q_{\delta_{01}}(-Q_{21}(U_2, U_1, \delta_2, \delta_1)) =$$

$$= \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2);$$

$$\overline{P}_{1U_1} = \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2);\quad P_{1\delta_{01}} = P_{1\delta_0}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2);$$

$$I_1 p^2 \Delta\delta_{01} = -(\overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01}) \frac{1}{1+pT_{\text{в}}} +$$

$$+ \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01});$$

$$I_1 p^2 \Delta\delta_{01}(1 + pT_{\text{в}}) = -(\overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01}) +$$

$$+ \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1\ \delta_2) \Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01});$$

$$(I_1 T_{\text{в}} p^3 + I_1 p^2) \Delta\delta_{01} = -(-\kappa_{U_1} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 +$$

$$+ \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01} + \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 +$$

$$+ T_{\text{в}} \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p\Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01} +$$

$$+ T_{\text{в}} P_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p\Delta\delta_{01};$$

$$(I_1 T_{\text{в}} p^3 + I_1 p^2 + T_{\text{в}} P_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$

$$+ \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta\delta_{01} + (T_{\text{в}} \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2,) p +$$

$$+ \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2,) - \kappa_{U_1} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 = 0.$$

Обозначим:

$$I T_{\text{в}} = \alpha_{11};\ I = \alpha_{12};\ T_{\text{в}} \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{13};$$

$$\overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{14};$$

$$T_{\text{в}} P_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{15};$$

$$\overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \overline{P}_{1F_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{16}.$$

Параметры режима U_1, U_2, δ_1, δ_2 являются неизвестными, подлежащими определению

$$(\alpha_{11} p^3 + \alpha_{12} p^2 + \alpha_{13} p + \alpha_{14}) \Delta\delta_{01} + (\alpha_{15} p + \alpha_{16}) \Delta U_1 = 0, \tag{5-1}$$

$$\alpha_1 = \alpha_1(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2).$$

Для генерирующих узлов 6 и 8 можно записать аналогично

$$(\alpha_{21} p^3 + \alpha_{22} p^2 + \alpha_{23} p + \alpha_{24}) \Delta\delta_{06} + (\alpha_{25} p + \alpha_{26}) \Delta U_6 = 0, \tag{5-2}$$

$$\alpha_2 = \alpha_2(U_6, U_5, \delta_6, \delta_5),$$

$$(\alpha_{31} p^3 + \alpha_{32} p^2 + \alpha_{33} p + \alpha_{34}) \Delta\delta_{08} + (\alpha_{35} p + \alpha_{36}) \Delta U_8 = 0, \qquad (5\text{-}3)$$
$$\alpha_3 = \alpha_3 (U_8, U_7, \delta_8, \delta_7).$$

Постоянные инерции и постоянные времени в относительных единицах записываются так:

$$I_{*i} = I_{сек\,i} \frac{S_{нi}}{S_\delta} \frac{1}{\omega_0}; \qquad (6)$$

$$T_{в_i} = T_{в_i} \frac{1}{\omega_0}. \qquad (7)$$

Для узловых точек схемы (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) рис. 1 уравнения свободных колебаний по переменным параметрам режима могут быть записаны из известных условий баланса активных и реактивных мощностей

$$\Delta P_{01} (\Delta E_1;\ \Delta U_1;\ \Delta\delta_{01};\ E_1:\ U_1;\ \delta_{01}) = \Delta P^*_{12} (\Delta U_1;\ \Delta U_2;\ \Delta\delta_1;\ \Delta\delta_2;\ U_1;\ U_2;\ \delta_1;\ \delta_2);$$

$$\overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_в} +$$
$$+ \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01} =$$
$$= \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_1 + \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_2;$$

$$\overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta\delta_{01}) + \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(1 +$$
$$+ pT_в) \Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(1 + pT_в) \Delta\delta_{01} = (\overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 +$$
$$+ P^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 + \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_1 +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_2)(1 + pT_в);$$

$$(1 + pT_в)(\overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - P^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) -$$
$$- \kappa_{U_1} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta U_1 + (1 + pT_в)(\overline{P}_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_{01} - (1 + pT_в) \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 -$$
$$- (1 + pT_в) \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_1 - (1 + pT_в) \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta\delta_2 = 0;$$

$$pT_в(\overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - P^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) -$$
$$- \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta U_1 +$$
$$+ pT_в \overline{P}_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \overline{P}_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta\delta_{01} - (pT_в \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta U_2 - (pT_в \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta\delta_1 - (pT_в \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\delta_2} U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta\delta_2 = 0.$$

Обозначим:

$$\overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - P^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{11};$$
$$\overline{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - P^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{12};$$
$$T_в \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{15}; \quad \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{16};$$
$$T_в \overline{P}_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{13}; \quad P_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) +$$
$$+ \kappa_{\delta_{01}} \overline{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{14};$$

$$T_в \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) = \beta_{17};\ \ \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) = \beta_{18};$$

$$T_в \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) = \beta_{19};\ \ \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) = \beta_{1-19};$$

$$(p\beta_{11} + \beta_{12})\,\Delta U_1 + (p\beta_{13} + \beta_{14})\,\Delta\delta_{01} - (p\beta_{15} + \beta_{16})\ \ \Delta U_2 - (p\beta_{17} + \beta_{18})\,\Delta\delta_1 -$$
$$- (p\beta_{19} + \beta_{1-10})\,\Delta\delta_2 = 0; \tag{5-4}$$
$$\beta_1 = \beta_1(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2).$$

Аналогично могут быть записаны уравнения для 6-го и 8-го узлов.

$$(p\beta_{21} + \beta_{22})\,\Delta U_6 + (p\beta_{23} + \beta_{24})\,\Delta\delta_{06} - (p\,\beta_{25} + \beta_{26})\,\Delta U_5 - (p\,\beta_{27} + \beta_{28})\,\Delta\delta_6) -$$
$$- (p\beta_{29} + \beta_{2-10}) = 0; \tag{5-5}$$
$$\beta_2 = \beta_2(U_6,\ U_5,\ \delta_6,\ \delta_5);$$

$$(p\beta_{31} + \beta_{32})\,\Delta U_8 + (p\,\beta_{33} + \beta_{34})\,\Delta\delta_{08} - (p\beta_{35} + \beta_{36})\,\Delta U_7 - (p\,\beta_{37} + \beta_{38})\,\Delta\delta_8 -$$
$$- (p\beta_{39} + \beta_{3-10}) = 0; \tag{5-6}$$
$$(\beta_3 = \beta_3(U_8,\ U_7,\ \delta_8,\ \delta_7).$$

Аналогично (5-4; 5-5; и 5-6) могут быть записаны уравнения из балансов реактивных мощностей для тех же узлов:

$$(p\gamma_{11} + \gamma_{12})\,\Delta U_1 + (p\gamma_{13} + \gamma_{14})\,\Delta\delta_{01} - (p\gamma_{15} + \gamma_{16})\,\Delta U_2 - (p\gamma_{17} + \gamma_{18})\,\Delta\delta_1 -$$
$$- (p\gamma_{19} + \gamma_{1-10})\,\Delta\delta_2 = 0; \tag{5-7}$$
$$\gamma_1 = \gamma_1(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2);$$

$$p\gamma_{21} + \gamma_{21})\,\Delta U_6 + (p\,\gamma_{23} + \gamma_{24})\,\Delta\delta_{06} - (p\,\gamma_{25} + \gamma_{26})\,\Delta U_5 - (p\,\gamma_{27} + \gamma_{28})\,\Delta\delta_6 -$$
$$- (p\gamma_{29} + \gamma_{2-10})\,\Delta\delta_5 = 0; \tag{5-8}$$
$$\gamma_2 = \gamma_2(U_6,\ U_5,\ \delta_6,\ \delta_5);$$

$$p\gamma_{31} + \gamma_{32})\,\Delta U_8 + (p\gamma_{33} + \gamma_{34})\,\Delta\delta_{08} - (p\gamma_{35} + \gamma_{36})\,\Delta U_7 - (p\gamma_{37} + \gamma_{38})\ \Delta\delta_8 -$$
$$- (p\gamma_{39} + \gamma_{3-10})\,\Delta\delta_7 = 0; \tag{5-9}$$
$$\gamma_3 = \gamma_3(U_8,\ U_7,\ \delta_8,\ \delta_7).$$

Уравнения 2, 3, 4, 5 и 7-го узлов будут иной структуры. Запишем сначала уравнения по активной мощности:

$$P_{12}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) = P_2(U_2) + P^*_{23}(U_2,\ U_3,\ \delta_2,\ \delta_3);$$
$$P_{нб10}(U_1,\ U_2,\ U_3,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \delta_3) = 0; \tag{5-10}$$

$$P_{23}(U_2,\ U_3,\ \delta_2,\ \delta_3) = P^*_{34}(U_3,\ U_4,\ \delta_3,\ \delta_4);\ P_{нб_{11}}(U_2,\ U_3,\ U_4,\ \delta_2,\ \delta_3\ \delta_4) = 0; \tag{5-11}$$

$$P_{73}(U_7,\ U_3,\ \delta_7,\ \delta_3) = 0;\ P_{огр_{12}}(U_7,\ U_3,\ \delta_7,\ \delta_3) = 0; \tag{5-12}$$

$$P_{34}(U_3,\ U_4,\ \delta_3,\ \delta_4) = P^{**}_{45}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5);$$
$$P_{нб_{13}}(U_3,\ U_4,\ U_5,\ \delta_3,\ \delta_4,\ \delta_5) = 0; \tag{5-13}$$

$$P_{45}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5) = P_{45};\ \ P_{огр_{14}}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5) = 0; \tag{5-14}$$

$$P_{45}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5) + P_{65}(U_6,\ U_5,\ \delta_6,\ \delta_5) = P_5(U_5);$$
$$P_{нб_{15}}(U_4,\ U_5,\ U_6,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \delta_6) = 0; \tag{5-15}$$

$$P_{87}(U_8,\ U_7,\ \delta_8,\ \delta_7) = P^{**}_{73}(U_7,\ U_3,\ \delta_7,\ \delta_3) + P_7(U_7);$$
$$P_{нб_{16}}(U_3,\ U_7,\ U_8,\ \delta_3\ \delta_7\ \delta_8) = 0. \tag{5-16}$$

Уравнения по реактивной мощности:

$$Q_{12}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2) + Q_{32}(U_3,\ U_2,\ \delta_3,\ \delta_2) = Q_2(U_2);$$
$$Q_{нб_{17}}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \delta_3) = 0; \tag{5-17}$$

$$Q_{23}(U_2,\ U_3,\ \delta_2\ \delta_3)+Q_{73}(U_7,\ U_3,\ \delta_7,\ \delta_3)+Q_{43}(U_4,\ U_3,\ \delta_4,\ \delta_3)=0;$$

$$Q_{\text{нб}_{18}}=0; \qquad (5\text{-}18)$$

$$Q_{34}(U_3,\ U_4,\ \delta_3,\ \delta_4)+Q_{54}(U_5,\ U_4,\ \delta_5,\ \delta_4)=0;$$

$$Q_{\text{нб}_{19}}(U_3,\ U_4,\ U_5,\ \delta_3,\ \delta_4,\ \delta_5)=0; \qquad (5\text{-}19)$$

$$Q_{45}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5)+Q_{65}(U_6,\ U_5,\ \delta_6,\ \delta_5)=Q_5(U_5);$$

$$Q_{\text{нб}_{20}}(U_4,\ U_5,\ U_6,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \delta_6)=0; \qquad (5\text{-}20)$$

$$Q_{37}(U_3,\ U_7,\ \delta_3\ \delta_7)+Q_{87}(U_8,\ U_7,\ \delta_8,\ \delta_7)=Q_7(U_7);$$

$$Q_{\text{нб}_{21}}(U_3,\ U_7,\ U_8,\ \delta_3,\ \delta_7,\ \delta_8)=0. \qquad (5\text{-}21)$$

При малых отклонениях напряжения от любого стационарного значения учитываются зависимости мощностей нагрузки данного узла от напряжения, поскольку при малых отклонениях напряжений не следует учитывать действия устройств регулирования напряжения в узлах подключения нагрузок в силу их нечувствительности. Нагрузки учитываются как безынерционные с регулирующим эффектом по активной мощности 1, 6, а по реактивной — равной двум.

Число переменных в уравнениях (5-4—5-21) равно 19, число переменных тоже 19 ($U_1 \div U_8$; $\delta_1 \div \delta_8$; δ_{01}; δ_{06}; δ_{08}). Эти уравнения относительно приращений переменных с правой частью, отличной от нуля. Из них можно найти выражения для приращений напряжений ΔU_1, ΔU_6, ΔU_8 и подставить в 5-1; 5-2 и 5-3 соответственно.

$$\Delta U_1=\frac{f_{11}(p)}{F_{11}(p)}\Delta\delta_{01}+\frac{f_{12}(p)}{F_{12}(p)}\Delta\delta_{06}+\frac{f_{13}(p)}{F_{13}(p)}\Delta\delta_{08};$$

$$\Delta U_6=\frac{f_{21}(p)}{F_{21}(p)}\Delta\delta_{01}+\frac{f_{22}(p)}{F_{22}(p)}\Delta\delta_{06}+\frac{f_{23}(p)}{F_{23}(p)}\Delta\delta_{08};$$

$$\Delta U_8=\frac{f_{31}(p)}{F_{31}(p)}\Delta\delta_{01}+\frac{f_{32}(p)}{F_{32}(p)}\Delta\delta_{06}+\frac{f_{33}(p)}{F_{33}(p)}\Delta\delta_{08}.$$

Тогда получатся три уравнения по изменениям собственных углов каждой станции; в каждое уравнение войдут все 16 искомых переменных параметров режима.

$$(\alpha_{11}p^3+\alpha_{12}p^2+\alpha_{13}p+\alpha_{14})+(\alpha_{15}p+\alpha_{16})\frac{f_{11}(p)}{F_{11}(p)}\Delta\delta_{01}+(\alpha_{15}p+\alpha_{16})\times$$

$$\times\frac{f_{12}(p)}{F_{12}(p)}\Delta\delta_{06}+(\alpha_{15}p+\alpha_{16})\frac{f_{13}(p)}{F_{13}(p)}\Delta\delta_{08}=0;$$

$$\left(\alpha_{21}p^3+\alpha_{22}p^2+\alpha_{23}p+\alpha_{24}+(\alpha_{25}p+\alpha_{26})\frac{f_{21}(p)}{F_{21}(p)}\right)\Delta\delta_{01}+(\alpha_{25}p+\alpha_{26})\times$$

$$\times\frac{f_{22}(p)}{F_{22}(p)}\Delta\delta_{06}+(\alpha_{25}p+\alpha_{26})\frac{f_{23}(p)}{F_{23}(p)}\Delta\delta_{08}=0;$$

$$(\alpha_{31}p^3+\alpha_{32}p^2+\alpha_{33}p+\alpha_{34}+(\alpha_{35}p+\alpha_{36})\frac{f_{31}(p)}{F_{31}(p)}\Delta\delta_{01}+(\alpha_{35}+\alpha_{36})\times$$

$$\times\frac{f_{22}(p)}{F_{22}(p)}\Delta\delta_{06}+(\alpha_{35}p+\alpha_{36})\frac{f_{33}(p)}{F_{33}(p)}\Delta\delta_{08}=0.$$

Критерии апериодической устойчивости могут быть сформулированы в виде одностороннего неравенства по знаку свободного члена характеристического уравнения или в виде неравенств Гурвица при работе генераторов с недовозбуждением, если возможна колебательная неустойчивость. Условия статической устойчивости в таком виде входят в расчеты в виде подпрограммы.

Во второй форме записи условий ограничений по статической устойчивости аппроксимирующие многочлены для э.д.с., внутренних углов генераторов и коэффициентов трансформаций силовых трансформаторов не используются и эти переменные тоже выступают в качестве неизвестных. Кроме того, неизвестными могут быть и параметры некоторых элементов схем или участков. Уравнения малых колебаний электромеханического переходного процесса запишутся в виде соотношения (1).

Поскольку

$$\Delta E = (-\kappa_{U_1}\Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}}\cdot\Delta\delta_{01})\,\frac{1}{1+pT_{\text{в}_1}},$$

тогда

$$I_1\frac{d^2\Delta\delta_{01}}{dt^2} = -(\overline{P}_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})(-\kappa_{U_1}\Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}}\cdot\Delta\delta_{01})\,\frac{1}{1+pT_{\text{в}_1}} +$$
$$+\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \Delta\delta_{01})\,\Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\,\Delta\delta_{01});$$

$$I_1(1+pT_{\text{в}_1})p^2\Delta\delta_{01} = -(P_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})(-\kappa_{U_1}\cdot\Delta U_1 + \kappa\delta_{01}\cdot\Delta\delta_{01}) +$$
$$+(1+pT_{\text{в}_1})(\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01})\,\Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1\ \delta_{01})\,\Delta\delta_{01});$$

$$I_1(1+pT_{\text{в}_1})p^2\Delta\delta_{01} = -(pT_{\text{в}_1}P_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) + \overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) -$$
$$-\kappa_{U_1}\overline{P}_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}))\,\Delta U_1 + (pT_{\text{в}}\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) + \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) +$$
$$+\kappa_{\delta_{01}}P_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}))\,\Delta\delta_{01};$$

$$(I_1T_{\text{в}}p^3 + I_1P^2 + pT_{\text{в}}P_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) + \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) +$$
$$+\kappa_{\delta_{01}}\cdot\overline{P}_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}))\,\Delta\delta_{01} + (pT_{\text{в}}\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) + P_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) -$$
$$-\kappa_{U_1}\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}))\,\Delta U_1 = 0.$$

Обозначим:

$$IT_{\text{в}} = \alpha_{11};\quad I_1 = \alpha_{12};\quad T_{\text{в}_1}\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) = \alpha_{13};$$
$$\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) + \kappa\delta_{01}\overline{P}_{1E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) = \alpha_{14};\quad T_{\text{в}}\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) = \alpha_{15};$$
$$\overline{P}_{1U_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) - \kappa_{U_1}\overline{P^1}_{E_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}) = \alpha_{16}.$$

Таким образом,

$$(\alpha_{11}p^3 + \alpha_{12}p^2 + \alpha_{13}p + \alpha_{14})\,\Delta\delta_{01} + (\alpha_{15}p + \alpha_{16})\,\Delta U_1 = 0, \tag{9-1}$$

где

$$\alpha_1 = \alpha_1(E_1,\ U_1,\ \delta_{01}).$$

Для роторов станций в узлах 6 и 8 можно записать аналогичные соотношения:

$$(\alpha_{21}p^3 + \alpha_{22}p^2 + \alpha_{23}p + \alpha_{24})\,\Delta\delta_{06} + (\alpha_{25}p + \alpha_{26})\,\Delta U_6 = 0 \tag{9-2}$$

при

$$\alpha_2 = \alpha_2(E_6,\ U_6,\ \delta_{06});$$

$$(\alpha_{31}p^3 + \alpha_{32}p^2 + \alpha_{33}p + \alpha_{34})\,\Delta\delta_{08} + (\alpha_{35}p + \alpha_{36})\,\Delta U_8 = 0 \tag{9-3}$$

при

$$\alpha_3 = \alpha_3(E_8;\ U_8;\ \delta_{08}).$$

Для узлов подключения генераторных станций 1, 6, 8 уравнения малых колебаний параметров режима записываются из условий балансов активных и реактивных мощностей

$$(\Delta P_{01}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01},\ \Delta E_1,\ \Delta U_1,\ \Delta\delta_{01}) = \Delta P^*_{12}(U_1,\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \kappa_{12},\ \Delta U_1,\ \Delta U_2,$$
$$\Delta\delta_1,\ \delta\Delta_2,\ \Delta\kappa_{12}), \tag{9-4}$$

где κ_{12} — коэффициент трансформации трансформатора.

$$\overline{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta E_1 + P_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta U_1 + \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta\delta_{01} =$$
$$= \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta U_1 + \overline{P}^*_{12U_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta U_2 +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\delta_1 + \overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\delta_2 +$$
$$+ \overline{P}^*_{12\kappa_{12}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\kappa_{12}.$$

Подставим ΔE_1 из уравнения (4) в (9-4) и сделаем необходимые преобразования

$$\overline{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})(-\kappa_{U_1}\Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}}\Delta\delta_{01})\frac{1}{1+pT_{\text{в}_1}}\overline{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta U_1 +$$
$$+ \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta\delta_{01} = \Delta P^*_{12}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \Delta\kappa_{12});$$
$$\overline{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})(-\kappa_{U_1}\Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}}\Delta\delta_{01}) + (\overline{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta U_1 +$$
$$+ \overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta\delta_{01}(1+pT_{\text{в}}) = (1+pT_{\text{в}})\cdot\Delta P^*_{12}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12},$$
$$\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \Delta\kappa_{12});$$
$$((1+pT_{\text{в}})\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \kappa_{\delta_{01}}\overline{P}_{1F_1}(E_1, U_1, \delta_{01})\Delta\delta_{01} + ((1+$$
$$+pT_{\text{в}})(\overline{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) -$$
$$- \kappa_{U_1}\cdot\overline{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}))\Delta U_1 - (1+pT_{\text{в}_1})\overline{P}^*_{12U_2}(U_1\ U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta U_2 -$$
$$-(1+pT_{\text{в}_1})\overline{P}^*_{12\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\delta_1 - (1+pT_{\text{в}_1})\cdot\overline{P}^*_{12\delta_2}(U_1, U_2,$$
$$\delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\delta_2 - (1+pT_{\text{в}_1})\overline{P}^*_{12\kappa_{12}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})\Delta\kappa_{12} = 0.$$

Обозначим

$$T_{\text{в}_1}(\overline{P}_{1U_1}(E_1\ U_1, \delta_{01}) - \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})) = \beta_{11}(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12});$$
$$\overline{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \overline{P}^*_{12U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) - \kappa_{U_1}\overline{P}_{1F_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) =$$
$$= \beta_{12}(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12});$$
$$T_{\text{в}_1}\cdot\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \beta_{13};$$
$$\overline{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \kappa_{\delta_{01}}\overline{P}_{1F_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \beta_{14};$$
$$T_{\text{в}_1}\overline{P}^*_{12U_2} = \beta_{15};\quad \overline{P}^*_{12U_2} = \beta_{16};\quad T_{\text{в}_1}\overline{P}^*_{12\delta_1} = \beta_{17};$$
$$\overline{P}^*_{12\delta_1} = \beta_{18};\quad T_{\text{в}_1}\cdot\overline{P}^*_{12\delta_2} = \beta_{19};\quad \overline{P}^*_{12\delta_2} = \beta_{110}.$$

Тогда

$$(p\beta_{11} + \beta_{12})\Delta U_1 + (p\beta_{13} + \beta_{14})\Delta\delta_{01} - (\beta_{15}\cdot p + \beta_{16})\Delta U_2 - (\beta_{17}\cdot p + \beta_{18})\Delta\delta_1 -$$
$$-(p\beta_{19} + \beta_{110})\Delta\delta_2 - (p\beta_{111} + \beta_{112})\Delta\kappa_{12} = 0,$$

где

$$\beta_1 = \beta(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}),$$

для 6-го узла:

$$(p\beta_{21} + \beta_{22})\Delta U_6 + (p\beta_{23} + \beta_{24})\Delta\delta_{06} - (p\beta_{25} + \beta_{26})\Delta U_5 - (p\beta_{27} + \beta_{28})\Delta\delta_6 -$$
$$-(p\beta_{29} + \beta_{210})\Delta\delta_5 = 0, \tag{9-5}$$

где $\beta_2 = \beta(E_6;\ U_6;\ \delta_{06};\ U_5;\ \delta_5;\ \delta_6).$

Для восьмого узла

$$(p\beta_{31} + \beta_{32})\Delta U_8 + (p\beta_{33} + \beta_{34})\Delta\delta_{08} - (p\beta_{35} + \beta_{36})\Delta U_7 - (p\beta_{37} + \beta_{38})\Delta\delta_{08} -$$
$$-(p\beta_{39} + \beta_{310})\Delta\delta_7 = 0, \tag{9-6}$$

где $\beta_3 = \beta(E_8;\ \delta_{08};\ U_8;\ U_7;\ \delta_7;\ \delta_8).$

Аналогично (5-7; 5-8; 5-9) записываются уравнения по балансам реактивных мощностей для тех же узлов, коэффициенты которых обозначены через γ.

Для первого узла:

$$(p\gamma_{11}+\gamma_{12})\Delta U_1+(p\gamma_{13}+\gamma_{14})\Delta\delta_{01}-(p\gamma_{15}+\gamma_{16})\Delta U_2-(p\gamma_{17}+\gamma_{18})\Delta\delta_1-$$
$$-(p\gamma_{19}+\gamma_{110})\Delta\delta_2-(p\gamma_{111}+\gamma_{112})\Delta\kappa_{12}=0,$$

где $\gamma_1=\gamma_1(E_1,\ U_1,\ \delta_{01},\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \kappa_{12})$.

Или более кратко:

$$\Delta\gamma_{\text{нб}_1}=\Delta\gamma_{\text{нб}_1}(E_1,\ U_1,\ \delta_{01},\ U_2,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \kappa_{12},\ \Delta U_1,\ \Delta U_2,\ \Delta\delta_1,\ \Delta\delta_2,\ \Delta\kappa_{12})=0. \quad (9\text{-}7)$$

Для шестого узла

$$\Delta\gamma_{\text{нб}_6}=\Delta\gamma_{\text{нб}_6}(E_6,\ U_6,\ \delta_{06},\ U_5(\ \delta_5,\ \delta_5,\ \Delta U_{56},\ \Delta\delta_{06},\ \Delta U_5\Delta\delta_5,\ \Delta\delta_5)=0. \quad (9\text{-}8)$$

Для восьмого узла

$$\Delta\gamma_{\text{нб}_8}=\Delta\gamma_{\text{нб}_8}(E_8,\ U_8,\ \delta_{08},\ U_7,\ \delta_8,\delta_7;\ \Delta U_8,\ \Delta\delta_{08},\ \Delta U_7,\ \Delta\delta_8,\ \Delta\delta_7)=0. \quad (9\text{-}9)$$

Как видно из сравнения систем уравнений (5-7; 7-8; 5-9) и (9-7; 9-8; 9-9), они являются одинаковыми по форме (система уравнений (9-7) содержит дополнительное слагаемое по приращению дополнительной переменной от изменений коэффициента трансформации), но с разным содержанием переменных в коэффициентах этих уравнений.

Для узлов 2, 3, 4, 5 и 7 и режимных условий по передаваемой мощности могут быть записаны уравнения по малым приращениям параметров режима в виде системы уравнений (5-7 — 5-2), в которую дополнительно войдут коэффициенты трансформаций на участках 1-2; 4-5; 7-3.

$$\Delta P_{\text{нб}_2}(U_1,\ U_2,\ U_3,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \delta_3,\ \kappa_{12},\ \Delta U_1,\ \Delta U_2,\ \Delta U_3,\ \Delta\delta_1,\ \Delta\delta_2,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\kappa_{12})=0. \quad (9\text{-}10)$$

$$\Delta P_{\text{нб}_3}(U_2,\ U_3,\ U_4,\ \delta_2,\ \delta_3,\ \delta_4,\ \Delta U_2,\ \Delta U_3,\ \Delta U_4,\ \Delta\delta_2,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_4)=0; \quad (9\text{-}11)$$

$$\Delta P_{\text{нб}_4}(U_3,\ U_4,\ U_5,\ \delta_3,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \kappa_{45},\ \Delta U_3,\ \Delta U_4,\ \Delta U_5,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_4,\ \Delta\delta_5,\ \Delta\kappa_{45})=0; \quad (9\text{-}12)$$

$$\Delta P_{\text{нб}_5}(U_4,\ U_5,\ U_6,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \delta_6,\ \kappa_{45},\ \Delta U_4,\ \Delta U_5,\ \Delta U_6,\ \Delta\delta_4,\ \Delta\delta_5,\ \Delta\delta_6,\ \Delta\kappa_{45})=0; \quad (9\text{-}13)$$

$$\Delta P_{\text{огр}_1}(U_4,\ U_5,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \kappa_{45},\ \Delta U_4,\ \Delta U_5\ \Delta\delta_4,\ \Delta\delta_5,\ \Delta\kappa_{45})=0; \quad (9\text{-}14)$$

$$\Delta P_{\text{огр}_2}(U_3,\ U_7,\ \delta_3,\ \delta_7,\ \kappa_{37},\ \Delta U_3,\ \Delta U_7,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_7,\ \Delta\kappa_{37})=0; \quad (9\text{-}15)$$

$$\Delta P_{\text{нб}_7}(U_3,\ U_7,\ U_8,\ \delta_3,\ \delta_7,\ \delta_8,\ \kappa_{37},\ \Delta U_3,\ \Delta U_7,\ \Delta U_8,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_7,\ \Delta\delta_8,\ \Delta\kappa_{37})=0; \quad (9\text{-}16)$$

$$\Delta Q_{\text{нб}_2}(U_1,\ U_2,\ U_3,\ \delta_1,\ \delta_2,\ \delta_3,\ \kappa_{12},\ \Delta U_1,\ \Delta U_2,\ \Delta U_3,\ \Delta\delta_{32},\ \Delta\delta_2,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\kappa_{12})=0, \quad (9\text{-}17)$$

$$\Delta Q_{\text{нб}_3}(U_2,\ U_3,\ U_4,\ \delta_2,\ \delta_3,\ \delta_4,\ \Delta U_2,\ \Delta U_3,\ \Delta U_4,\ \Delta\delta_2,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_4)=0; \quad (9\text{-}18)$$

$$\Delta Q_{\text{нб}_4}(U_3,\ \Delta U_4,\ U_5\ \delta_3,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \kappa_{45},\ \Delta U_3,\ \Delta U_4,\ \Delta U_5,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_4,\ \Delta\delta_5,\ \Delta\kappa_{45}=0; \quad (9\text{-}19)$$

$$\Delta Q_{\text{нб}_5}(U_4,\ U_5,\ U_6,\ \delta_4,\ \delta_5,\ \delta_6,\ \kappa_{45},\ \Delta U_4,\ \Delta U_5,\ \Delta U_6,\ \Delta\delta_4,\ \Delta\delta_5\ \Delta\delta_6,\ \Delta\kappa_{45})=0; \quad (9\text{-}20)$$

$$\Delta Q_{\text{нб}_7}(U_3,\ U_7,\ U_8,\ \delta_3,\ \delta_7,\ \delta_8,\ \kappa_{37},\ \Delta U_3,\ \Delta U_7,\ \Delta U_8,\ \Delta\delta_3,\ \Delta\delta_7,\ \Delta\delta_8,\ \Delta\kappa_{37})=0; \quad (9\text{-}21)$$

Число уравнений небалансов мощностей 21, а число искомых переменных в этих уравнениях 25

$$(E_1;\ E_6;\ E_8;\ \delta_{01};\ \delta_{06};\ \delta_{08};$$
$$\kappa_{12};\ \kappa_{45};\ \kappa_{73},\ U_1;\ U_2;\ U_3;\ U_4;\ U_5;\ U_6;\ U_7;\ U_8;\ \delta_1;\ \delta_2;\ \delta_3;\ \delta_4;\ \delta_5;\ \delta_6;\ \delta_7;\ \delta_8).$$

Для оценки влияния и исключения части переменных из уравнений небалансов (8-4—8-21) может быть применен многофакторный анализ в виде математического аппарата планирования эксперимента. Положим K_{12}, K_{45} и K_{73}) и одно из напряжений известными. Тогда условия статической устойчивости сводятся в соответствии (7) к определенному соотношению по всем переменным параметрам режима (25 П) в виде неравенства

$$a_n (25\,\Pi) > 0. \tag{10}$$

Более просто для ориентировочных расчетов условия статической устойчивости могут быть записаны в виде односторонних неравенств по относительным углам всех концевых устройств.

$$0 < \delta_{01} - \delta_{06} \leqslant \bar{\delta}_{16}; \tag{11-1}$$

$$0 < \delta_{01} - \delta_{08} \leqslant \bar{\delta}; \tag{11-2}$$

$$0 < \delta_{06} - \delta_{08} \leqslant \bar{\delta}_{68}; \tag{11-3}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Pechon and other. Sensitivity in Power Systems IEEE, Transations of PAS, vol. 87, pp. 1367—1374.