

**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 ($U_i, U_j, \delta_i, \delta_j$), 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:

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

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:

$$\begin{aligned} \Delta E = & \kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{U_2} \Delta U_2 + \dots + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01} + \kappa_{\delta_1} \Delta \delta_1 + \dots \\ & + \kappa'_{U_1} p \Delta U_1 + \kappa'_{U_2} p \Delta U_2 + \dots + \kappa'_{\delta_{01}} p \Delta \delta_{01} + \kappa'_{\delta_1} p \Delta \delta_1 + \kappa'_{\delta_2} p \Delta \delta_2 + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \kappa''_{U_1} p^2 \Delta U_1 + \kappa''_{U_2} p^2 \Delta U_2 + \dots + \kappa''_{\delta_{01}} p^2 \Delta \delta_{01} + \kappa''_{\delta_1} p^2 \Delta \delta_1 + \kappa''_{\delta_2} p^2 \Delta \delta_2 = \\
& = \sum (\kappa_{U_i} + \kappa'_{U_i} p + \kappa''_{U_i} p^2) \Delta U_i + \sum (\kappa_{\delta_i} + \kappa'_{\delta_i} p + \kappa''_{\delta_i} p^2) \Delta \delta_i, \quad (2)
\end{aligned}$$

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

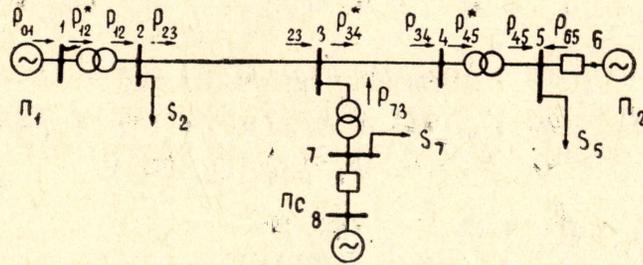


Рис. 1. Принципиальная схема дальней ЛЭП с промежуточной системой

С учетом запаздывания уравнение регулирования запишется так:

$$\begin{aligned}
\Delta E = & \left(\frac{\kappa_{U_1}}{1 + pT_{U_1}} \Delta U_1 + \frac{\kappa_{U_2}}{1 + pT_{U_2}} \Delta U_2 + \dots + \frac{\kappa_{\delta_{01}}}{1 + pT_{\delta_{01}}} \Delta \delta_{01} + \dots + \right. \\
& + \frac{\kappa'_{U_1}}{1 + pT_{U_1}} p \Delta U_1 + \dots + \frac{\kappa'_{\delta_{01}}}{1 + pT_{\delta_{01}}} p \Delta \delta_{01} + \frac{\kappa'_{\delta_1}}{1 + pT_{\delta_1}} p \Delta \delta_1 + \\
& + \frac{\kappa''_{U_1}}{1 + pT_{U_1}} p^2 \Delta U_1 + \dots + \frac{\kappa''_{\delta_{01}}}{1 + pT_{\delta_{01}}} p^2 \Delta \delta_{01} + \frac{\kappa''_{\delta_1}}{1 + pT_{\delta_1}} p^2 \Delta \delta_1 + \\
& \left. + \dots \right) \frac{1}{1 + pT_{\text{ВВ}}} \frac{1}{1 + pT_{\text{В}}} = \frac{1}{1 + pT_{\text{ВВ}}} \frac{1}{1 + pT_{\text{В}}} \times \\
& \times \left(\sum_i \left(\frac{\kappa_{U_i}}{1 + pT_{U_i}} + \frac{\kappa'_{U_i} p}{1 + pT_{U_i}} + \frac{\kappa''_{U_i} p^2}{1 + pT_{U_i}} \right) \Delta U_i + \right. \\
& \left. + \sum_i \left(\frac{\kappa_{\delta_i}}{1 + pT_{\delta_i}} + \frac{\kappa'_{\delta_i} p}{1 + pT_{\delta_i}} + \frac{\kappa''_{\delta_i} p^2}{1 + pT_{\delta_i}} \right) \Delta \delta_i \right), \quad (3)
\end{aligned}$$

где $T_{\text{В}}$ и $T_{\text{ВВ}}$, 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:

$$\Delta E = (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_{\text{В}}}. \quad (4)$$

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:

$$\begin{aligned}
I_1 p^2 \Delta \delta_1 = & - \left(\frac{\partial p}{\partial E_1} (E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta E_1 + \frac{\partial P_1}{\partial U_1} (E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \right. \\
& + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{01}} (E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01} \left. \right) = - (P_{1E_1} (E_1, U_1, \delta_{01}) (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) \times \\
& \times \frac{1}{1 + pT_{\text{В}}} + \bar{P}_{1U_1} (E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_1} (E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01}).
\end{aligned}$$

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

$$I_1 p^2 \Delta \delta = -(\bar{P}_{1E_1}(\mathbf{v}_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01}; U_1; \mathbf{v}_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} + q_{\delta_{01}} Q_{01}) \times (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_B} + \bar{P}_{1U_1}(\mathbf{v}_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01}; U_1; \mathbf{v}_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} + q_{\delta_{01}} Q_{01}) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(\mathbf{v}_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} P_{01} + q_{E_1} Q_{01}; U_1; \mathbf{v}_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} P_{01} + q_{\delta_{01}} Q_{01}) \Delta \delta_{01});$$

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

$$\bar{P}_{1E_1}(\mathbf{v}_{E_1} U_1 + \pi_{E_1} (P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) + q_{E_1} (-Q_{21}(U_2, U_1, \delta_2; \delta_1)); U_1; \mathbf{v}_{\delta_{01}} U_1 + \pi_{\delta_{01}} (P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) + q_{\delta_{01}} (-Q_{21}(U_2, U_1, \delta_2, \delta_1))) = \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2);$$

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

$$I_1 p^2 \Delta \delta_{01} = -(\bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_B} + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01});$$

$$I_1 p^2 \Delta \delta_{01} (1 + pT_B) = -(\bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01});$$

$$(I_1 T_B p^3 + I_1 p^2) \Delta \delta_{01} = -(-\kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01} + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + T_B \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01} + T_B \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p \Delta \delta_{01});$$

$$(I_1 T_B p^3 + I_1 p^2 + T_B \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta \delta_{01} + (T_B \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) p + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1) = 0.$$

Обозначим:

$$IT_B = \alpha_{11}; \quad I = \alpha_{12}; \quad T_B \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{13};$$

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

$$T_B \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{15};$$

$$\bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \alpha_{16}.$$

Параметры режима $U_1, U_2, \delta_1, \delta_2$ являются неизвестными, подлежащими определению

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

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

Для генерирующих узлов 6 и 8 можно записать аналогично

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

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

$$(\alpha_{31} p^3 + \alpha_{32} p^2 + \alpha_{33} p + \alpha_{34}) \Delta \delta_{08} + (\alpha_{35} p + \alpha_{36}) \Delta U_8 = 0, \quad (5-3)$$

$$\alpha_3 = \alpha_3(U_8, U_7, \delta_8, \delta_7).$$

Постоянные инерции и постоянные времени в относительных единицах записываются так:

$$I_{*i} = I_{ceki} \frac{S_{ni}}{S_{\delta}} \frac{1}{\omega_0}; \quad (6)$$

$$T_{B_i} = T_{B_i} \frac{1}{\omega_0}. \quad (7)$$

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

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

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{1F_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_B} + \\ & + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01} = \\ & = \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 + \\ & + \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_1 + \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_2; \\ & \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(1 + \\ & + pT_B) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)(1 + pT_B) \Delta \delta_{01} = (\bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_1 + \\ & + \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 + \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_1 + \\ & + \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_2)(1 + pT_B); \\ & (1 + pT_B)(\bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \\ & - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1F_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta U_1 + (1 + pT_B)(\bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01} - (1 + pT_B) \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 - \\ & - (1 + pT_B) \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_1 - (1 + pT_B) \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_2 = 0; \\ & pT_B(\bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \\ & - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1F_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2)) \Delta U_1 + \\ & + pT_B \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \bar{P}_{1\delta_{01}}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_{01} - (pT_B \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta U_2 - (pT_B \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_1 - (pT_B \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) \Delta \delta_2) = 0. \end{aligned}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{11}; \\ & \bar{P}_{1U_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{12}; \\ & T_B \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{15}; \quad \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{16}; \\ & T_B \bar{P}_{1\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{13}; \quad \bar{P}_{1\delta_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + \\ & + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{14}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_B \bar{P}_{12\delta_1}^* (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) &= \beta_{17}; \quad P_{12\delta_1}^* (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{18}; \\
T_B \bar{P}_{12\delta_2}^* (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) &= \beta_{19}; \quad \bar{P}_{12\delta_2}^* (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) = \beta_{1-10}; \\
(p\beta_{11} + \beta_{12}) \Delta U_1 + (p\beta_{13} + \beta_{14}) \Delta \delta_{01} - (p\beta_{15} + \beta_{16}) \Delta U_2 - (p\beta_{17} + \beta_{18}) \Delta \delta_1 - \\
&\quad - (p\beta_{19} + \beta_{1-10}) \Delta \delta_2 = 0; \quad (5-4) \\
\beta_1 &= \beta_1 (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2).
\end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
P_{12} (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) &= P_2 (U_2) + P_{23}^* (U_2, U_3, \delta_2, \delta_3); \\
P_{нб10} (U_1, U_2, U_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3) &= 0; \quad (5-10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{23} (U_2, U_3, \delta_2, \delta_3) &= P_{34}^* (U_3, U_4, \delta_3, \delta_4); \quad P_{нб11} (U_2, U_3, U_4, \delta_2, \delta_3, \delta_4) = 0; \\
&\quad (5-11)
\end{aligned}$$

$$P_{73} (U_7, U_3, \delta_7, \delta_3) = 0; \quad P_{орг12} (U_7, U_3, \delta_7, \delta_3) = 0; \quad (5-12)$$

$$\begin{aligned}
P_{34} (U_3, U_4, \delta_3, \delta_4) &= P_{45}^* (U_4, U_5, \delta_4, \delta_5); \\
P_{нб11} (U_3, U_4, U_5, \delta_3, \delta_4, \delta_5) &= 0; \quad (5-13)
\end{aligned}$$

$$P_{45} (U_4, U_5, \delta_4, \delta_5) = P_{45}; \quad P_{орг14} (U_4, U_5, \delta_4, \delta_5) = 0; \quad (5-14)$$

$$\begin{aligned}
P_{45} (U_4, U_5, \delta_4, \delta_5) + P_{65} (U_6, U_5, \delta_6, \delta_5) &= P_5 (U_5); \\
P_{нб15} (U_4, U_5, U_6, \delta_4, \delta_5, \delta_6) &= 0; \quad (5-15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{87} (U_8, U_7, \delta_8, \delta_7) &= P_{73}^* (U_7, U_3, \delta_7, \delta_3) + P_7 (U_7); \\
P_{нб16} (U_3, U_7, U_8, \delta_3, \delta_7, \delta_8) &= 0. \quad (5-16)
\end{aligned}$$

Уравнения по реактивной мощности:

$$\begin{aligned}
Q_{12} (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2) + Q_{32} (U_3, U_2, \delta_3, \delta_2) &= Q_2 (U_2); \\
Q_{нб17} (U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \delta_3) &= 0; \quad (5-17)
\end{aligned}$$

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

$$Q_{н5,8} = 0; \quad (5-18)$$

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

$$Q_{н6,9}(U_3, U_4, U_5, \delta_3, \delta_4, \delta_5) = 0; \quad (5-19)$$

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

$$Q_{н6,10}(U_4, U_5, U_6, \delta_4, \delta_5, \delta_6) = 0; \quad (5-20)$$

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

$$Q_{н6,11}(U_3, U_7, U_8, \delta_3, \delta_7, \delta_8) = 0. \quad (5-21)$$

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 ($U_1 \div U_8; \delta_1 \div \delta_8; \delta_{01}; \delta_{06}; \delta_{08}$). Эти уравнения относительно приращений переменных с правой частью, отличной от нуля. Из них можно найти выражения для приращений напряжений $\Delta U_1, \Delta U_6, \Delta U_8$ 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.

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

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

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

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

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

$$\times \frac{f_{32}(p)}{F_{32}(p)} \Delta \delta_{06} + (\alpha_{35}p + \alpha_{36}) \frac{f_{33}(p)}{F_{33}(p)} \Delta \delta_{08} = 0.$$

Критерии аperiodической устойчивости могут быть сформулированы в виде одностороннего неравенства по знаку свободного члена характеристического уравнения или в виде неравенств Гурвица при ра-

боте 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

$$\Delta E = (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \cdot \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_{B_1}},$$

тогда

$$\begin{aligned} I_1 \frac{d^2 \Delta \delta_{01}}{dt^2} = & -(\bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \cdot \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_{B_1}} + \\ & + \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \Delta \delta_{01}) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01}); \\ I_1 (1 + pT_{B_1}) p^2 \Delta \delta_{01} = & -(\bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) (-\kappa_{U_1} \cdot \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \cdot \Delta \delta_{01}) + \\ & + (1 + pT_{B_1}) (\bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01}); \\ I_1 (1 + pT_{B_1}) p^2 \Delta \delta_{01} = & - (pT_{B_1} \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \\ & - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})) \Delta U_1 + (pT_{B_1} \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \\ & + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})) \Delta \delta_{01}; \\ (I_1 T_{B_1} p^3 + I_1 p^2 + pT_{B_1} \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \\ & + \kappa_{\delta_{01}} \cdot \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})) \Delta \delta_{01} + (pT_{B_1} \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \\ & - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})) \Delta U_1 = 0. \end{aligned}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned} IT_{B_1} = \alpha_{11}; \quad I_1 = \alpha_{12}; \quad T_{B_1} \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \alpha_{13}; \\ \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \alpha_{14}; \quad T_{B_1} \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \alpha_{15}; \\ \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) = \alpha_{16}. \end{aligned}$$

Таким образом,

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

где

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

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

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

при

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

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

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

$$\begin{aligned} (\Delta P_{01}(E_1, U_1, \delta_{01}, \Delta E_1, \Delta U_1, \Delta \delta_{01}) = \Delta P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \\ \Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \kappa_{12}), \end{aligned} \quad (9-4)$$

где κ_{12} — коэффициент трансформации трансформатора.

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta E_1 + \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01} = \\ & = \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta U_1 + \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta U_2 + \\ & + \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \delta_1 + \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \delta_2 + \\ & + \bar{P}_{12\kappa_{12}}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \kappa_{12}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) \frac{1}{1 + pT_{B_1}} \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \\ & + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01} = \Delta P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \kappa_{12}); \\ & \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) (-\kappa_{U_1} \Delta U_1 + \kappa_{\delta_{01}} \Delta \delta_{01}) + (\bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta U_1 + \\ & + \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01} (1 + pT_{B_1})) = (1 + pT_{B_1}) \cdot \Delta P_{12}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}, \\ & \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \kappa_{12}); \\ & ((1 + pT_{B_1}) \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) \Delta \delta_{01} + ((1 + \\ & + pT_{B_1}) (\bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) - \\ & - \kappa_{U_1} \cdot \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01})) \Delta U_1 - (1 + pT_{F_1}) \bar{P}_{12U_2}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta U_2 - \\ & - (1 + pT_{B_1}) \bar{P}_{12\delta_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \delta_1 - (1 + pT_{F_1}) \cdot \bar{P}_{12\delta_2}^*(U_1, U_2, \\ & \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \delta_2 - (1 + pT_{F_1}) \bar{P}_{12\kappa_{12}}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) \Delta \kappa_{12} = 0. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\begin{aligned} T_{B_1} (\bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12})) &= \beta_{11}(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}); \\ \bar{P}_{1U_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) - \bar{P}_{12U_1}^*(U_1, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}) - \kappa_{U_1} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) &= \\ = \beta_{12}(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}); \\ T_{B_1} \cdot \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) &= \beta_{13}; \\ \bar{P}_{1\delta_{01}}(E_1, U_1, \delta_{01}) + \kappa_{\delta_{01}} \bar{P}_{1E_1}(E_1, U_1, \delta_{01}) &= \beta_{14}; \\ T_{B_1} \bar{P}_{12U_2}^* &= \beta_{15}; \quad \bar{P}_{12U_2}^* = \beta_{16}; \quad T_{B_1} \bar{P}_{12\delta_1}^* = \beta_{17}; \\ \bar{P}_{12\delta_1}^* &= \beta_{18}; \quad T_{F_1} \cdot \bar{P}_{12\delta_2}^* = \beta_{19}; \quad \bar{P}_{12\delta_2}^* = \beta_{110}. \end{aligned}$$

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:

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

где

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

Для восьмого узла

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

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:

$$\Delta\gamma_{нб_1} = \Delta\gamma_{нб_1}(E_1, U_1, \delta_{01}, U_2, \delta_1, \delta_2, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \Delta\kappa_{12}) = 0. \quad (9-7)$$

Для шестого узла

$$\Delta\gamma_{нб_6} = \Delta\gamma_{нб_6}(E_6, U_6, \delta_{06}, U_5, \delta_5, \delta_6, \Delta U_{56}, \Delta\delta_{06}, \Delta U_5, \Delta\delta_5, \Delta\delta_6) = 0. \quad (9-8)$$

Для восьмого узла

$$\Delta\gamma_{нб_8} = \Delta\gamma_{нб_8}(E_8, U_8, \delta_{08}, U_7, \delta_7, \delta_8, \Delta U_8, \Delta\delta_{08}, \Delta U_7, \Delta\delta_7, \Delta\delta_8) = 0. \quad (9-9)$$

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.

$$\Delta P_{нб_2}(U_1, U_2, U_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \Delta\delta_3, \Delta\kappa_{12}) = 0. \quad (9-10)$$

$$\Delta P_{нб_3}(U_2, U_3, U_4, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta\delta_2, \Delta\delta_3, \Delta\delta_4) = 0; \quad (9-11)$$

$$\Delta P_{нб_4}(U_3, U_4, U_5, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \kappa_{45}, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta\delta_3, \Delta\delta_4, \Delta\delta_5, \Delta\kappa_{45}) = 0; \quad (9-12)$$

$$\Delta P_{нб_5}(U_4, U_5, U_6, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \kappa_{45}, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta U_6, \Delta\delta_4, \Delta\delta_5, \Delta\delta_6, \Delta\kappa_{45}) = 0; \quad (9-13)$$

$$\Delta P_{огр_1}(U_4, U_5, \delta_4, \delta_5, \kappa_{45}, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta\delta_4, \Delta\delta_5, \Delta\kappa_{45}) = 0; \quad (9-14)$$

$$\Delta P_{огр_2}(U_3, U_7, \delta_3, \delta_7, \kappa_{37}, \Delta U_3, \Delta U_7, \Delta\delta_3, \Delta\delta_7, \Delta\kappa_{37}) = 0; \quad (9-15)$$

$$\Delta P_{нб_7}(U_3, U_7, U_8, \delta_3, \delta_7, \delta_8, \kappa_{37}, \Delta U_3, \Delta U_7, \Delta U_8, \Delta\delta_3, \Delta\delta_7, \Delta\delta_8, \Delta\kappa_{37}) = 0; \quad (9-16)$$

$$\Delta Q_{нб_2}(U_1, U_2, U_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \kappa_{12}, \Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta\delta_{32}, \Delta\delta_2, \Delta\delta_3, \Delta\kappa_{12}) = 0, \quad (9-17)$$

$$\Delta Q_{нб_3}(U_2, U_3, U_4, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \Delta U_2, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta\delta_2, \Delta\delta_3, \Delta\delta_4) = 0; \quad (9-18)$$

$$\Delta Q_{нб_4}(U_3, \Delta U_4, U_5, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \kappa_{45}, \Delta U_3, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta\delta_3, \Delta\delta_4, \Delta\delta_5, \Delta\kappa_{45}) = 0; \quad (9-19)$$

$$\Delta Q_{нб_5}(U_4, U_5, U_6, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \kappa_{45}, \Delta U_4, \Delta U_5, \Delta U_6, \Delta\delta_4, \Delta\delta_5, \Delta\delta_6, \Delta\kappa_{45}) = 0; \quad (9-20)$$

$$\Delta Q_{нб_7}(U_3, U_7, U_8, \delta_3, \delta_7, \delta_8, \kappa_{37}, \Delta U_3, \Delta U_7, \Delta U_8, \Delta\delta_3, \Delta\delta_7, \Delta\delta_8, \Delta\kappa_{37}) = 0; \quad (9-21)$$

Число уравнений небалансов мощностей 21, а число искомым 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 κ_{12} , κ_{45} и κ_{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

$$a_n(25 \text{ П}) > 0. \quad (10)$$

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

$$0 < \delta_{01} - \delta_{06} \leq \bar{\delta}_{16}; \quad (11-1)$$

$$0 < \delta_{01} - \delta_{08} \leq \bar{\delta}; \quad (11-2)$$

$$0 < \delta_{06} - \delta_{08} \leq \bar{\delta}_{68}; \quad (11-3)$$

ЛИТЕРАТУРА

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