

Сравнивая (10) и (11), получим:

$$\left. \begin{aligned} k_{\phi x_2} &= \frac{d}{b_1 b_2 \cos \beta} \int_{-0,5b_1}^{0,5b_1} dx \int_{-0,5b_2}^{0,5b_2} \frac{(a+x-y)k_{\phi k} dy}{(a+x-y)^2 + c^2}; \\ k_{\phi y_2} &= \frac{d}{b_1 b_2 \sin \beta} \int_{0,5b_1}^{0,5b_1} dx \int_{-0,5b_2}^{0,5b_2} \frac{c k_{\phi y} dy}{(a+x-y)^2 + c^2}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Интегралы (12) берутся численным методом по формулам Симпсона. Время счета зависит от шага интегрирования, который в свою очередь зависит от необходимой точности. В среднем для стандартных сечений прямоугольных шин время счета на ЭЦВМ "Минск-22" составляет 30 с.

#### Л и т е р а т у р а

1. Смуров А.А. Электротехника высокого напряжения и передачи энергии. М., 1935.

Я.И. Онацкий, М.Н. Леках

### УСТОЙЧИВОСТЬ СВЯЗАННЫХ АСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для осуществления высокоточного автоматического регулирования напряжения на шинах генераторов современных теплоэлектроцентралей все большее распространение получают астатические системы автоматического регулирования (САР). Такие САР напряжения практически реализуются посредством дополнения типовой САР возбуждения турбогенератора [1] астатическим регулятором. При автоматизации регулирования напряжения на многоагрегатной ТЭЦ регулирование на каждой

секции будет осуществляться отдельным астатическим регулятором, воздействующим на генератор, питающий эту секцию.

В настоящей работе выполнено исследование совместной работы двух астатических САР напряжения генераторов применительно к типовой схеме (рис. 1).

Рассматривая единую связанную систему регулирования при исследовании устойчивости, необходимо учитывать взаимосвязь координат и регуляторов напряжения на работающих генераторах. Обобщенная структурная схема, соответствующая функциональной схеме, приведена на рис. 2. Эта динамическая система описывается следующей системой операторных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 & a'_{11}(P) \Delta U_{r1}(P) + 0 - a_{13}(P) \Delta U_{r2}(P) + 0 + \\
 & + 0 - a_{16}(P) \Delta U_{P1}(P) + 0 + 0 = 0; \\
 & a_{21}(P) \Delta U_{r1}(P) + a_{22}(P) \Delta U_{y1}(P) + 0 + 0 + \\
 & + 0 + 0 + 0 + 0 = \Delta U_{01}(P); \\
 & - a_{31}(P) \Delta U_{r1}(P) + 0 + a'_{33}(P) \Delta U_{r2}(P) + 0 + 0 + \\
 & + 0 + 0 - a_{38}(P) \Delta U_{P2}(P) = 0; \\
 & 0 + 0 + a_{43}(P) \Delta U_{r2}(P) + a_{44}(P) \Delta U_{y2}(P) + 0 + 0 + \\
 & + 0 + 0 = \Delta U_{02}(P); \\
 & a_{51}(P) \Delta U_{r1}(P) - a_{52}(P) \Delta U_{y1}(P) + 0 + 0 + \\
 & + a_{55}(P) \Delta U_{B1}(P) + a_{56}(P) \Delta U_{P1}(P) + 0 + 0 = 0; \\
 & 0 + 0 + 0 + 0 - a_{65}(P) \Delta U_{B1}(P) + a_{66}(P) \Delta U_{P1}(P) + \\
 & + 0 + 0 = 0; \\
 & 0 + 0 + a_{73}(P) \Delta U_{r2}(P) - a_{74}(P) \Delta U_{y2}(P) + 0 + 0 + \\
 & + a_{77}(P) \Delta U_{B2}(P) + a_{78}(P) \Delta U_{P2}(P) = 0; \\
 & 0 + 0 + 0 + 0 + 0 - a_{87}(P) \Delta U_{B2}(P) + a_{88}(P) \Delta U_{P2}(P) = 0
 \end{aligned} \right\} (1)$$

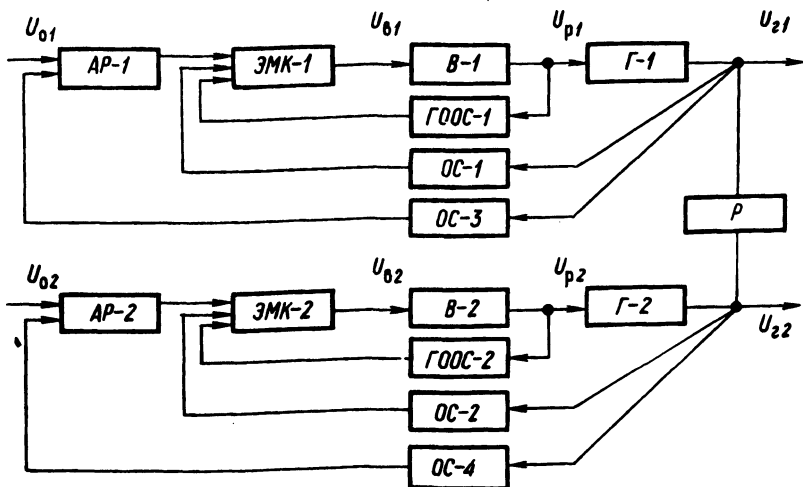


Рис. 1. Функциональная схема астатической связанной системы автоматического регулирования напряжения на шинах генераторов: Г-1, Г-2 — синхронные генераторы; В-1, В-2 — машинные возбудители; Р — секционный реактор; ЗМК-1, ЗМК-2 — электромагнитные корректоры напряжения; ОС-1, ОС-2, ГООС-1, ГООС-2 — жесткие и гибкие внутренние отрицательные обратные связи; АР-1, АР-2 — астатические регуляторы.

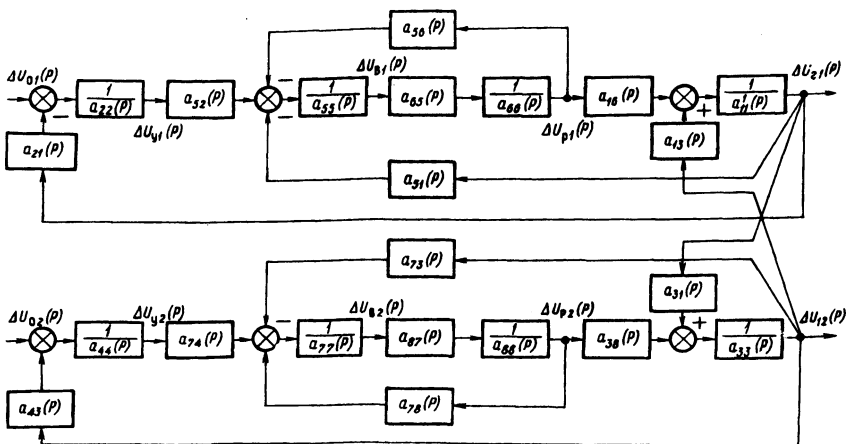


Рис. 2. Обобщенная структурная схема астатической системы автоматического регулирования генераторных напряжений.

Характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$\begin{vmatrix}
 a'_{11}(P) & 0 & -a_{13}(P) & 0 & 0 & -a_{16}(P) & 0 & 0 \\
 a_{21}(P) & a_{22}(P) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -a_{31}(P) & 0 & a_{33}(P) & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{38}(P) \\
 0 & 0 & a_{43}(P) & a_{44}(P) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 a_{51}(P) & -a_{52}(P) & 0 & 0 & a_{55}(P) & a_{56}(P) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{65}(P) & a_{66}(P) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & a_{73}(P) & -a_{74}(P) & 0 & 0 & a_{77}(P) & a_{87}(P) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{87}(P) & a_{88}(P)
 \end{vmatrix} = 0$$

(2)

Операторы  $a_{ij}(P)$  имеют следующие значения:

$$\left. \begin{aligned}
 a_{16}(P) &= K_{r1} & ; & & a_{38}(P) &= K_{r2} & ; \\
 a_{66}(P) &= T_{b1}^{P+1} & ; & & a_{88}(P) &= T_{b2}^{P+1} & ; \\
 a_{65}(P) &= K_{b1} & ; & & a_{87}(P) &= K_{b2} & ; \\
 a_{55}(P) &= T_{k1}^{P+1} & ; & & a_{77}(P) &= T_{k2}^{P+1} & ; \\
 a_{52}(P) &= K_{k1} & ; & & a_{74}(P) &= K_{k2} & ; \\
 a_{22}(P) &= \frac{P}{K_{p1}} & ; & & a_{44}(P) &= \frac{P}{K_{p2}} & ; \\
 a_{21}(P) &= K_{oc3} & ; & & a_{43}(P) &= K_{oc4} & ; \\
 a_{51}(P) &= K_{oc1} & ; & & a_{73}(P) &= K_{oc2} & ; \\
 a_{56}(P) &= \frac{K_1 P}{T_1^{P+1}} & ; & & a_{78}(P) &= \frac{K_2 P}{T_2^{P+1}} & ;
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 a_{13}(P) &= K_p a'_{11}(P); & a_{31}(P) &= K_p a'_{33}(P); \\
 a'_{11}(P) &= \frac{a_{44}^{(1)}(P) [a_{11}^{(1)}(P) + b_1^{(1)}(P) b_4^{(1)}(P)] + a_{41}^{(1)}(P) a_{14}^{(1)}(P)}{a_{44}^{(1)}(P)}; \\
 a'_{33}(P) &= \frac{a_{44}^{(2)}(P) [a_{33}^{(2)}(P) + b_1^{(2)}(P) b_4^{(2)}(P)] + a_{41}^{(2)}(P) a_{14}^{(2)}(P)}{a_{44}^{(2)}(P)}; \\
 a_{11}^{(1)}(P) &= T_{P1} P^{+1}; & a_{33}^{(2)}(P) &= T_{P2} P^{+1}; \\
 a_{44}^{(1)}(P) &= S_{\delta}^{(1)}(T'_{J(1)} P^{2+1}); & a_{44}^{(2)}(P) &= S_{\delta}^{(2)}(T'_{J(2)} P^{2+1}); \\
 a_{41}^{(1)}(P) &= -S_{ИГ}^{(1)}; & a_{41}^{(2)}(P) &= -S_{ИГ}^{(2)}; \\
 a_{14}^{(1)}(P) &= -K_{r2}^{(1)}(A_2^{(1)} + A_1^{(1)} P); & a_{14}^{(2)}(P) &= -K_{r2}^{(2)}(A_2^{(2)} + A_1^{(2)} P); \\
 b_1^{(1)}(P) &= (T_{P1} P^{+1}); & b_1^{(2)}(P) &= (T_{P2} P^{+1}); \\
 b_4^{(1)}(P) &= \frac{x d_1}{x c_1}; & b_4^{(2)}(P) &= \frac{x d_2}{x c_2};
 \end{aligned} \tag{3}$$

Выражения операторов  $a_{ij}(P)$ , приведенные в (3), получены на базе структурной схемы регулируемого синхронного генератора [2,3]. Индексы "1" и "2" в выражениях  $a_{ij}(P)$  относятся соответственно к первой и второй сепаратным САР.

Обобщенное характеристическое уравнение (2) может быть использовано для решения конкретных задач. В качестве примера рассмотрим работу синхронных генераторов на симметричную пассивную нагрузку, т.е. без связи с энергосистемой. Структурная схема такой системы регулирования выполнена на рис. 3. Из (2) следует, что этой САР напряжений соответствует характеристическое уравнение

$$\frac{1}{K_{pl}} \left[ P(T_{pl} P^{+1})(T_{b1} P^{+1})(T_{k1} P^{+1}) + \frac{K_{b1} K_{k1} K_1 P^2 (T_{pl} P^{+1})}{(T_1 P^{+1})} + \dots \right]$$

$$\begin{aligned}
& +PK_{r1}K_{v1}K_{k1}K_{oc1} + K_{r1}K_{v1}K_{k1}K_{p1}K_{oc3} \left] \frac{1}{K_{p2}} \left[ P(T_{p2}^{P+1}) x \right. \right. \\
& x(T_{B2}^{P+1})(T_{k2}^{P+1}) + \frac{K_{B2}K_{k2}K_{p2}P^2(T_{p2}^{P+1})}{(T_2^{P+1})} + PK_{r2}K_{B2} x \\
& xK_{k2}K_{oc2} + K_{r2}K_{B2}K_{k2}K_{p2}K_{oc4} \left. \right] - \frac{K^2P^2}{K_{p1}K_{p2}} \left[ (T_{p2}^{P+1}) x \right. \\
& x(T_{B1}^{P+1})(T_{k1}^{P+1}) + \frac{PK_{v1}K_{k1}K_1(T_{p2}^{P+1})}{(T_1^{P+1})} \left. \right] x \\
& x \left[ (T_{p1}^{P+1})(T_{B2}^{P+1})(T_{k2}^{P+1}) + \frac{PK_{B2} - K_{k2}K_2(T_{p2}^{P+1})}{(T_{p2}^{P+1})} \right] = 0,
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $T_{p1}$ ,  $T_{v1}$ ,  $T_{k1}$ ,  $T_1$  — постоянные времени генератора, возбуждателя, электромагнитного корректора и гибкой отрицательной обратной связи первой сепаратной САР;  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$  — коэффициенты передачи астатических регуляторов;  $K_P$  — коэффициент передачи секционного реактора.

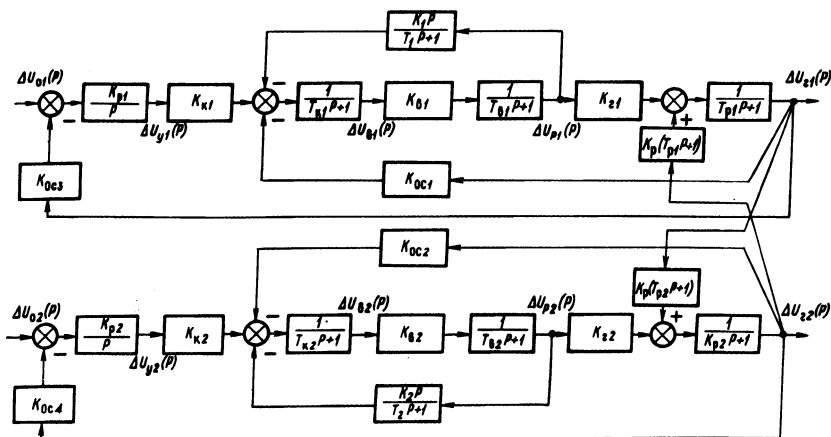


Рис. 3. Структурная схема астатической системы регулирования напряжений на шинах генераторов.

При идентичных генераторах, возбуждателях и регуляторах характеристическое уравнение упрощается и имеет вид

$$-\frac{1}{K_{рег}^2} \left[ P(T_P^{P+1})(T_B^{P+1})(T_K^{P+1}) + \frac{K_B K_K K_1 P^2 (T_P^{P+1})}{(T_1^{P+1})} + \right. \\ \left. + PK_{Г} K_{В} K_{К} K_{ос1} + K_{Г} K_{В} K_{К} K_{рег} K_{ос3} \right]^2 - \frac{K_P^2 P^2}{K_{рег}^2} x \quad (5) \\ x \left[ (T_P^{P+1})(T_B^{P+1})(T_K^{P+1}) + \frac{K_B K_K K_1 P^2 (T_P^{P+1})}{(T_1^{P+1})} \right]^2 = 0.$$

Исследуем уравнение (5) при различных значениях передаточной функции секционного реактора.

1. Секционный выключатель отключен (генераторы работают раздельно), при этом  $K_P = 0$  и характеристическое уравнение (5) принимает вид

$$\left[ P(T_P^{P+1})(T_B^{P+1})(T_K^{P+1}) + \frac{K_B K_K K_1 P^2 (T_P^{P+1})}{(T_1^{P+1})} + \right. \\ \left. + PK_{Г} K_{В} K_{К} K_{ос1} + K_{Г} K_{В} K_{К} K_{рег} K_{ос3} \right]^2 = 0. \quad (6)$$

Вид характеристического уравнения (6) свидетельствует о структурной устойчивости системы.

2. Секционный реактор зашунтирован (генераторы работают на общие шины),  $K_P = 1$ . В этом случае, как следует из (5), связанная САР становится структурно неустойчивой.

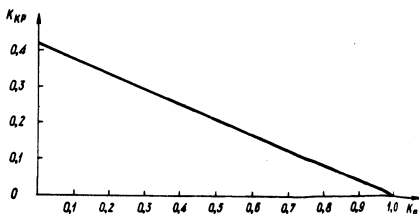


Рис. 4. График зависимости величины критического коэффициента усиления связанной астатической САР от коэффициента передачи секционного реактора.

3. Секционный реактор включен в работу. При этом  $0 < K_P < 1$ . Последнему случаю соответствует характеристическое уравнение (5). САР структурно устойчивая и при правильном выборе параметров может быть обеспечен необходимый запас ус-

тойчивости. Рассчитанный график зависимости  $K_{кр} = f(K_p)$ , где  $K_{кр} = K_{г} K_{в} K_{к} K_{рег.кр} K_{ос3}$ , приведен на рис. 4. В расчетах было принято:  $T_p = 6C$ ;  $T_v = 1C$ ;  $T_k = 2C$ ;  $K_{ос1} = 0$ ;  $K_1 = 0$ ;  $K_{ос3} = 1$ . Выполненный расчет показал, что в высокоточной астатической САР напряжений генераторов ТВФ-60-2 (возбудители ВТ-450-3000, электромагнитные корректоры типа ЭПА-306, статизм 0,5%), разделенных секционным реактором РБА-3000-12%, при использовании в индивидуальных астатических регуляторах в качестве интегратора реверсивного двигателя РД-09 с редуктором 1/137 необходимо установить дополнительный редуктор с коэффициентом передачи 1/76. Экспериментальная проверка подтвердила правильность результатов расчетов.

### Л и т е р а т у р а

1. Беркович М.А., Семенов В.А. Основы автоматики энергосистем. М., 1968.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., 1970.
3. Лекаж М.Н. Об устойчивости комбинированных систем автоматического регулирования электрических машин. — "Электротехника", 1974, № 11.

Л.П. Падалко, А.И. Баранников, А.И. Баранова,  
Н.Н. Никольская

### О ПРИНЦИПАХ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ КАК ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ

В настоящее время для решения задач оптимального управления сложными системами применяются различные математические модели (математическое программирование, принцип максимума Понтрягина и др.). Однако из-за огромных размеров реальных задач применение указанных методов для прямой оптимизации сложных систем оказывается затруднительным. Поэтому представляется перспективным использование для решения этих задач недавно разработанного математического метода оптимизации многоуровневых иерархических систем, математической теории координации [1]. В этой связи в данной