

режиму работы установки. Однако известно, что при нагреве ферромагнитных материалов параметры индукционного нагревателя изменяются в значительной степени [3], а следовательно, будут изменяться коэффициенты  $k_3$  и  $d_0$ . Это в свою очередь приведет к изменению токов и напряжений на тиристорах. Поэтому при выборе тиристорного инвертора для определения наиболее тяжелых условий целесообразно рассчитать индукционный нагреватель проводя для трех режимов: холодного, промежуточного, горячего [3]. Выбор тиристорного инвертора необходимо осуществлять по худшему из них.

Экспериментальная проверка данной методики показала, что она может быть рекомендована для установок мощностью более 20 кВт, так как при меньшей мощности возрастает погрешность расчетов из-за потерь энергии в элементах схемы инвертора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиристорные преобразователи высокой частоты /Е.И. Беркович, Г.В. Ивенок и др., Ю.С. Иоффе и др. — Л.: Энергия, 1973, с. 87—95. 2. Высокочастотный стабилизированный тиристорный инвертор/ В.Г. Черномащенко, В.А. Пачкевич, Ю.М. Зинин, А.М. Уржумсков. — В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Высшая школа, 1979, вып. 6, с. 110—114. 3. Слюхоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974, с. 47—48; 65—68; 86—90.

УДК 621.3.078.001

А.Г. КОСТЮКОВСКИЙ, инженер  
(БелЭНИИ)

### ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕЛИОСТАТОМ

Автоматическая система управления гелиостатом (АСУ ГС) находит широкое применение при строительстве солнечных электростанций башенного типа. Ансамбль АСУ ГС, объединенный целевой функцией по стабилизации заданного направления отраженного потока солнечной радиации при видимом перемещении Солнца по небосводу, образует концентратор солнечной энергии. В состав АСУ ГС входят следующие структурные единицы: двухкоординатный электропривод, плоский гелиостат, двухкоординатный оптический датчик, регулятор. Схема перемещения гелиостата — азимутально-зенитальная. В данной работе рассматриваются области устойчивости АСУ ГС в параметрах регулятора с использованием метода Гурвица.

Показано [1], что плоский гелиостат описывается двумя взаимосвязанными динамическими звеньями, которые (при условии  $(\frac{B_1}{a})^2 \frac{1}{mK} < 0,02$ , где  $B_1$  — демпфирование плоского отражателя, Нмс/рад;  $a = \frac{P}{2}$ , м;  $P$  — полупериметр отражателя;  $m$  — масса отражателя, кг;  $K$  — жесткость отражателя, Нм/рад) представляют собой два взаимосвязанных инерционных звена второго порядка. Поскольку постоянные времени отдельно взятого динами-

ческого звена гелиостата имеют разный порядок [1], то представляется целесообразным рассматривать канал гелиостата как инерционное звено. Учитывая незначительные скорости перемещения, упрощаем задачу до рассмотрения одного канала управления гелиостатом. Наиболее интересным представляется исследование азимутального канала, поскольку постоянная времени гелиостата в этом случае зависит от перемещения по зенитальной оси, т.е. является параметром азимутального канала управления. Передаточная функция плоского гелиостата по зенитальному каналу управления является частным случаем передаточной функции гелиостата по азимутальному каналу управления [1]. Следовательно, устойчивость азимутального канала является необходимым и достаточным условием устойчивости зенитального канала, что в целом гарантирует устойчивость АСУ ГС. В качестве второго упрощения задачи понимаем непрерывность и дифференцируемость функции выходной величины оптического датчика (оптической обратной связи). Такое упрощение справедливо, если гелиостат не располагается в особых точках поля гелиостатов – точках противотени [2], обусловленных спецификой разложения на составляющие траектории перемещения Солнца по небосводу в плоскостях азимутально-зенитального перемещения гелиостата. Это также сопряжено с рассмотрением редуктора как безлюфтового устройства и принимается нами в силу незначительной скорости и монотонности перемещения гелиостата.

При исследовании областей устойчивости АСУ ГС удобно использовать регулятор с обобщенной передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{c_0 p^2 + c_1 p + c_2}{d_1 p + d_2},$$

которая включает передаточные функции наиболее распространенных типов простейших регуляторов [3]. Тогда, если в качестве задающего воздействия принять угловое перемещение Солнца в проекции на азимутальную плоскость перемещения гелиостата, а в качестве регулируемой величины – отклонение от заданного направления азимутальной проекции отраженного от гелиостата потока солнечной радиации, передаточная функция азимутального канала АСУ ГС запишется следующим образом:

$$W_{\text{сист}}(p) = \frac{l_1 k_{\text{од}} p (T_1 p + 1) (T_{\text{дв}} p + 1) \left( \frac{d_1}{d_2} p + 1 \right)}{p (T_1 p + 1) (T_{\text{дв}} p + 1) \left( \frac{d_1}{d_2} p + 1 \right) + l_1 k_{\text{од}} k_{\text{дв}} \frac{c_0}{d_2} \left( \frac{c_0}{c_2} p^2 + \frac{c_1}{c_2} p + 1 \right)},$$

где  $T_1$  – постоянная времени гелиостата по азимутальному каналу перемещения;  $T_{\text{дв}}$  – приведенная постоянная времени электродвигателя;  $l_1$  – расстояние от центра отражателя до оптического датчика, м;  $k_{\text{од}}$  – коэффициент передачи оптического датчика, В/рад·м;  $k_{\text{дв}}$  – коэффициент двигателя по скорости с учетом передаточного числа редуктора, внешнего и внутреннего скоростного трения соответственно на выходной оси гелиостата и двигателя, рад/В·с;  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2$  – параметры регулятора.

Характеристическое уравнение АСУ ГС по азимутальному каналу запишем в виде следующего алгебраического уравнения:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } a_0 &= T_1 T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}; \\ a_1 &= T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}; \\ a_2 &= T_1 + T_{\text{дв}} + \frac{d_1}{d_2} + k_0 \frac{c_0}{d_2}; \\ a_3 &= k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1; \quad a_4 = k_0 \frac{c_2}{d_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $k_0 = l_1 k_{\text{од}} k_{\text{дв}}$ .

АСУ ГС устойчива в смысле Гурвица, если

$$\left. \begin{aligned} a_i &> 0 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n); \\ \Delta_j &> 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \right\}$$

где  $\Delta_j$  — определители Гурвица.

Для устойчивости автоматической системы управления четвертого порядка (1), кроме положительности всех коэффициентов (2), необходимо соблюдение условия [4]:  $\Delta_3 > 0$  или

$$a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_4 a_1^2 > 0. \quad (3)$$

Выполняя условие (3) для характеристического уравнения (1), получим

$$\begin{aligned} & (k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1) \left[ (T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}) (T_1 + T_{\text{дв}} + \frac{d_1}{d_2} + k_0 \frac{c_0}{d_2}) - \right. \\ & \left. - T_1 T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2} (k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1) \right] - k_0 \frac{c_2}{d_2} (T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2})^2 > 0, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $d_1 > 0, d_2 > 0, c_0 > 0, c_1 > 0, c_2 > 0$ .

Неравенство (4) представляет собой границу колебательной устойчивости системы. Рассмотрим условия устойчивости АСУ ГС при использовании различных типов регуляторов.

**Пропорциональный регулятор.** Положив в выражение (4)  $c_0 = c_1 = d_1 = 0$ , получим условие устойчивости системы с пропорциональным регулятором:

$$0 < \frac{c_2}{d_2} < \left(\frac{c_2}{d_2}\right)_{гр}, \quad (5)$$

где  $\left(\frac{c_2}{d_2}\right)_{гр} = \frac{T_1 + T_{дв}}{k_0 T_1 T_{дв}}$ .

Из условия устойчивости (5) следует, что при изменении постоянной времени объекта регулирования  $T_1$  область устойчивости системы видоизменяется. Если значение  $T_1$  велико, то коэффициент усиления П-регулятора становится близким к величине  $\frac{1}{k_0 T_{дв}}$ , а при уменьшении значения  $T_1$  — значительным по величине.

Пропорциональный регулятор с воздействием по второй производной. Положив в выражение (4)  $c_1 = d_1 = 0$ , получим условие устойчивости системы с пропорциональным регулятором с воздействием по второй производной:

$$0 < \frac{c_2}{d_2} < \frac{T_1 + T_{дв}}{k_0 T_1 T_{дв}} + \frac{c_0}{T_1 T_{дв} d_2}.$$

Граничное значение коэффициента усиления пропорционального регулятора с воздействием по второй производной отличается от коэффициента усиления П-регулятора на  $\frac{c_0}{T_1 T_{дв} d_2}$  единиц. Очевидно, что с ростом постоянной времени  $T_1$  значение указанной добавки уменьшается. При значительных величинах постоянной времени  $T_1$  воздействие по второй производной стано-

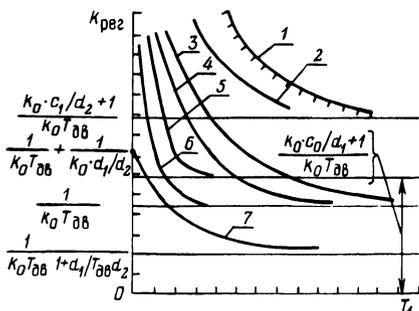


Рис. 1. Качественные оценки областей устойчивости системы при использовании различных типов регуляторов: 1 — П-регулятор с воздействием по первой и второй производным; 2 — ПД-регулятор; 3 — П-регулятор с воздействием по второй производной; 4 — П-регулятор; 5 — ПИД-регулятор; 6 — ПИ-регулятор; 7 — реальный И-регулятор.

вится не определяющим, а введение П-регулятора с воздействием по второй производной представляется нецелесообразным ввиду сложности его реализации при незначительном положительном эффекте.

Последовательно приравнивая коэффициенты регулятора нулю, можно получить еще тринадцать типов регуляторов и соответственно одиннадцать областей устойчивости в плоскости значений коэффициента усиления регулятора  $K_{рег}$  как функции постоянной времени  $T_1$  объекта регулирования

АСУ ГС. Идеальный И-регулятор и ИД-регулятор делают АСУ ГС структурно неустойчивой. Качественные оценки областей устойчивости системы представлены на рис. 1.

Оценка областей устойчивости выполнена при условии

$$c_1 > \frac{T_{дв}}{k_o d_1} d_2^2 .$$

Очевидно, что при уменьшении параметра  $c_1$  ПД-регулятора предельное значение  $k_{рег}$  с ростом  $T_1$  стремится к значению  $\frac{1}{k_o T_{дв}}$ , а область устойчивости, ограниченная кривой 2, вырождается в область, ограниченную кривой 4. При уменьшении параметра  $d_1$  реального И-регулятора область устойчивости системы расширяется до области, ограниченной кривой 4. Указанная закономерность обусловлена вырождением регулятора в П-регулятор.

Качественные оценки при заданном изменении  $T_1$  и значении  $k_{рег}$  позволяют осуществить предварительный выбор типа регулятора АСУ ГС. При этом очерчивается область устойчивости системы в параметрах настройки выбранного типа регулятора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д у б и л о в и ч В.М., К о с т ю к о в с к и й А.Г. О передаточной функции плоского гелиостата для солнечной электростанции. — Гелиотехника, 1981, № 5, с. 43–48. 2. Т е п л я к о в Д.И. Концентрирующая способность зеркальных систем СЭС класса ЭНИНа. — В сб.: Солнечные энергетические установки. М.: ЭНИН, 1974. — 135 с. 3. Д у б и л о в и ч В.М. Области устойчивости систем автоматического регулирования. — Минск: Вышэйшая школа, 1971. — 141 с. 4. Б е с е к е р с к и й В.А., П о п о в Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 768 с.

УДК 621.314.26

Б.И. ФИРАГО, канд.техн.наук,

В.Г. СИДОРОВ, ассистент,

С.Ю. ДОЛЖНИКОВ, мл.науч.сотр. (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ТИРИСТОРНОГО ЦИКЛОКОНВЕРТОРА

В связи с нелинейностью уравнений электромагнитных процессов в асинхронных двигателях (АД) строгий их анализ связан со значительными математическими трудностями.

Поэтому широкое распространение получили приближенные методы расчета электромагнитных процессов при линеаризации дифференциальных уравнений [1]. Несмотря на возрастающее использование вычислительной техники, "приближенные аналитические методы не потеряли своего значения, а остаются весьма полезными для практики" [2].

Один из методов приближенного учета электромагнитных процессов в АД основан на динамической характеристике [1]: