УДК 681.5

Ткачев Р. Ю.
к.т.н., доцент,
Денищик С. С.
к.т.н., доцент
Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Для большинства экологически опасных объектов (объектов металлургической, химической, углеобогатительной промышленности) в целях предотвращения экологических катастроф, уменьшения выбросов и экономических потерь ставится задача создания высокоэффективных автоматических систем управления, которые бы сводили к минимуму недостатки эксплуатируемых до настоящего времени систем регулирования (управление связано с большими перерегулированиями и длительными процессами при отработке внешних возмущений) [1, 2].

Достаточно высокое качество регулирования обеспечивается применением методов оптимального управления при синтезе замкнутых систем управления [2, 3]. Однако данные методы предполагают возможность измерения всех фазовых координат объекта. Реально же, как правило, в таких промышленных объектах, доступна измерению лишь выходная координата. В этом случае вместо неизмеряемых координат в управлении используют производные регулируемой величины. А поскольку в технике невозможно получать идеальные производные, возникает необходимость синтеза закона управления на базе реальных производных.

Эта задача решается введением в качестве критерия оптимальности квадратичного функционала и его экстремали по выходной координате. Для формирования реальных производных, используя опыт введения в квадратичный функционал производной от управления [2], дополнительно вводятся также старшие производные до (n–1) включительно, где n — порядок объекта. Это позволяет решить задачу параметрической и структурной оптимизации из условия обеспечения заданного качества регулирования. Упрощение процедуры синтеза достигается разделением проблемы оптимизации на две задачи. Первая задача — это синтез оптимального управления, реализующего движение объекта управления по заданной экстремали. Вторая заключается в синтезе реального дифференциатора, параметры которого всегда могут быть выбраны из условия технической реализуемости.

Рассмотрим в качестве примера задачу синтеза закона управления тепловым режимом промышленного объекта (трубчатая печь), используемого на химических и нефтехимических производствах [4].

Технология получения сырого бензола, одного из основных высокорентабельных продуктов химических цехов, основана на строгом соблюдении температурных режимов, одним из которых является нагрев в трубчатых печах насыщенного бензолом поглотителя (каменноугольной смолы).

Математическая модель трубчатой печи (с пламенными горелками) по прямому каналу, выходной величиной которого является температура каменноугольного масла после печи, представлена в виде передаточной функции

$$W_{об}(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)^2}, \qquad (1)$$

с коэффициентом усиления $k = 1$ и постоянными времени $T_1 = 165$ с, $T_2 = 70$ с. И по малоинерционному каналу (вводится с целью увеличения быстродействия создаваемой системы при парировании внешних возмущений), выходной величиной которого является температура уходящих газов, в виде передаточной функции

$$W_{мин}(p) = \frac{k}{T_3 p + 1},$$

где $k = 1$, $T_3 = 30$ с.

С целью увеличения быстродействия системы вначале необходимо осуществить синтез системы управления объектом по малоинерционному каналу.

Движение объекта описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{y}_1^* &= -b_{11} y_1^* + b_{12} y_2^*, \\ \dot{y}_2^* &= \frac{1}{T_и} U, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $b_{11} = b_{12} = 1/T_3$, при этом к объекту отнесен исполнительный механизм постоянной скорости.

Требуется найти закон управления такой, чтобы на движениях замкнутой этим управлением системы минимизировался квадратичный функционал

$$I = \int_0^\infty \left(a_1 y_1^{*2} + a_2 y_2^{*2} + U^2 \right) dt, \qquad (3)$$

на желаемой экстремали $y_1^*(t)$ по выходной координате малоинерционного контура.

Используя метод динамического программирования, находится управление

$$U^* = -n_1 y_1^* - n_2 y_2^*, \qquad (4)$$

решающее задачу структурной оптимизации.

Для решения задачи параметрической оптимизации, то есть отыскания коэффициентов n_1, n_2 управления (4), используются уравнения замкнутой системы (2), (4) и уравнение экстремали квадратичного функционала (3).

Однако, желая сохранить интегрирующие свойства исполнительного механизма для малоинерционного контура, необходимо исключить координату $y_2^*(t)$ из закона управления (4). В результате управление примет вид

$$U_1^* = -(m_1 + m_2 p) y_1^*,$$

где $m_1 = n_1 + n_2 b_{11} / b_{12}$, $m_2 = n_2 / b_{12}$.

Так как внутренний контур имеет второй порядок, то допустимо значительное увеличение коэффициента k_p регулятора, а потому передаточную функцию внутреннего малоинерционного контура можно принять равной единице. Подобные структурные преобразования дают возможность рассматривать теперь объект третьего порядка с передаточной функцией (1). Но, даже понизив порядок объекта до третьего, при формировании реальных производных системы управления возникнут трудности с параметрической оптимизацией.

Эта проблема разрешается разделением задачи параметрической оптимизации на две самостоятельные: задачу оптимизации в пространстве идеальных производных и задачу оптимизации реального дифференциатора.

Движение рассматриваемого объекта третьего порядка описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= y_3; \\ \dot{y}_3 &= c_4 U - c_3 y_3 - c_2 y_2 - c_1 y_1. \end{aligned} \qquad (5)$$

Задаваясь квадратичным функционалом вида

$$I=\int_0^\infty\left(a_1y_1^2+a_2y_2^2+a_3y_3^2+U^2\right)dt \tag{6}$$

как критерием оптимальности, находится оптимальное управление

$$U=-n_1y_1-n_2y_2-n_3y_3, \tag{7}$$

обеспечивающее минимум функционала.

Составляя характеристический определитель по (5), (7) и, раскрывая его, определяется характеристическое уравнение замкнутой системы

$$p^3+p^2\left(c_4n_3+c_3\right)+p\left(c_4n_2+c_2\right)+\left(c_4n_1+c_1\right)=0,$$

обеспечивающее желаемый переходный процесс при условии воспроизведения заданной экстремали квадратичного функционала (6).

В результате искомые коэффициенты управления (7) определяются как

$$n_1=\left(\gamma_1-c_1\right)\frac{1}{c_4};\ n_2=\left(\gamma_2-c_2\right)\frac{1}{c_4};\ n_3=\left(\gamma_3-c_3\right)\frac{1}{c_4}.$$

Для решения второй задачи (реализации реальных производных) в качестве объекта рассматривается последовательное соединение идеальных интеграторов, движение которых определяется уравнением

$$\dot{y}_1=y_2;\ \dot{y}_2=y_3;\ \dot{y}_3=U. \tag{8}$$

Вводя квадратичный функционал (6) и его экстремаль $y_1(t)$, обеспечивающую желаемый вид переходного процесса, методом динамического программирования определяется оптимальное управление

$$U_1=-A_{13}y_1-A_{23}y_2-A_{33}y_3. \tag{9}$$

Используя уравнение (9) в системе (8), получается характеристическое уравнение

$$p^3+A_{33}p^2+A_{23}p+A_{13}=0,$$

определяющее переходный процесс в системе, и находятся искомые коэффициенты оптимального управления (9) $A_{i3}=\gamma_i,\left(i=\overline{1\div3}\right)$.

Можно видеть, что разделение задачи параметрической оптимизации на две самостоятельные позволило упростить процедуру параметрического синтеза.

Выводы. Введение реальных производных регулируемой величины при доступности измерения лишь выходной координаты в решении задачи аналитического синтеза закона управления тепловым режимом промышленного объекта позволяет решить задачу параметрической и структурной оптимизации из условия обеспечения заданного качества регулирования.

Список литературы

1. Дрючин, В. Г. Использование симметрии в автоматических системах управления экологически опасными объектами / В. Г. Дрючин, В. И. Жиляков // Вестник МАНЭБ. — 1992. — № 3. — С. 28–30.

2. Жиляков, В. И. Синтез систем управления режимами электроэнергетических систем / В. И. Жиляков, В. Г. Дрючин // Изв. ВУЗов. Электричество. — 1992. — № 12. — С. 6–10.

3. Андреев, Ю. Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю. Н. Андреев. — М. : Наука, 1976. —424 с.

4. Технология коксохимического производства / Лейбович Р. Е. и др. — М. : Металлургия, 1982. — 360 с.