

В настоящее время в ЗАО "Мелеузовский молочно-консервный комбинат" используются настройки системы автоматического регулирования, рассчитанные по математической модели. Это позволяет получать готовый продукт (сухое молоко и сухие молочные продукты) высокого качества и с заданной влажностью, так как процесс производства сухих молочных продуктов в данном случае происходит при оптимальных режимах, и соответственно, снижается потребление топливно-энергетических (газ – на 15%, электроэнергия – на 10%) и материальных ресурсов (потери готовой продукции – на 0,31%).

Шиянова Наталья Ивановна – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Системы управления»,

Валитова Елена Геннадьевна – старший преподаватель,

Хардина Алина Евгеньевна – ассистент МГУТУ (филиал в г. Мелеуз),

Мунасыпов Рустем Анварович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Техническая кибернетика» УГАТУ (г. Уфа),

Каяшев Александр Игнатьевич – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Автоматизированные технологические и информационные системы» УГНТУ (филиал в г. Стерлитамак).

Контактный телефон (34764) 3-17-52. E-mail: Shianova58@mail.ru

Список литературы

1. *Ивашкин Ю. А., Протопопов И. И., Бородин А. В., Копчиков А. В., Шутков С. А.* Моделирование производственных процессов мясной и молочной промышленности/Под редакцией Ю. А. Ивашкина. М.: ВО «Агропромиздат». 1987.
2. *Брусилковский Л. П., Вайнберг А. Я.* Автоматизация технологических процессов производства молочных консервов. М.: Пищевая промышленность. 1975.
3. *Технология концептуального проектирования/Под ред. С. Н. Никанорова.* 2-е стереотип. изд. М.: Концепт. 2008.
4. *Солдатов В. В., Шавров А. В., Громов А. С.* Робастное управление системами с неточно заданными параметрами объектов//Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 7.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ АДАПТИВНЫЕ СЛЕДЯЩИЕ ПИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТП

А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, В.Р. Ольшванг, В.А. Малахов (ИПУ РАН),

С.И. Кузнецов (ОАО «НИИТеплоприбор»)

Представлены быстродействующие самонастраивающиеся ПИ системы максимальной степени устойчивости с идентификатором параметров модели объекта. ПИ системы предназначены для построения высокоточных следящих систем управления, поведение которых с достаточно высокой точностью аппроксимируется моделью, представляющей n последовательно соединенных инерционных звеньев с постоянной времени T_1 и одно инерционное звено с постоянной времени T_2 , которая существенно больше T_1 .

Ключевые слова: быстродействие, самонастройка, ПИ-системы, регулятор, аппроксимация, постоянная времени, степень устойчивости.

Институтом проблем управления РАН совместно с ОАО «Ниитеплоприбор» разработаны адаптивные быстродействующие следящие пропорционально-интегральные (ПИ) системы максимальной степени устойчивости с идентификатором параметров модели объекта управления. Передаточная функция аппроксимирующей модели объекта управления имеет вид:

$$W(p) = k_0(T_1 p + 1)^{-n} (T_2 p + 1)^{-1}, T_2 > 10 T_1 \quad (1)$$

где k_0 – статический коэффициент передачи объекта, p – оператор дифференцирования.

Моделью с передаточной функцией (1) аппроксимирует поведение многих промышленных объектов, входящих в состав следящих систем, поэтому построение быстродействующих адаптивных следящих ПИ систем управления объектами с моделью (1) является актуальной научной и практической задачей.

Решение этой задачи, как и в работе [1], основано на том, что при синтезе систем максимальной

степени устойчивости, описанном в работах [2, 3, 4], известен крайний правый корень кратности 3 характеристического полинома замкнутой системы, который входным дифференцирующим фильтром может быть «уничтожен».

В связи с этим решение задачи построения адаптивных быстродействующих следящих ПИ систем управления аperiodическими объектами должно содержать:

1) идентификатор, осуществляющий текущее оценивание параметров n , T_1 , T_2 и k_0 в процессе эксплуатации следящей системы при скачкообразном изменении задающего воздействия;

2) блок пересчета найденных параметров n , T_1 , T_2 и k_0 в оптимальные по степени устойчивости настроечные параметры $k_{по}$ и $k_{ио}$ для ПИ регулятора, обеспечивая по критерию максимальной степени устойчивости непрерывный режим адаптации параметров регулятора и входного форсирующего фильтра к изменяющимся параметрам объекта управления;

3) дифференцирующий входной фильтр, передаточная функция которого может иметь, например, вид

$$W_d(p) = (I_0^{-1}p + 1)^3 (I_0^{-1}0,01p + 1)^{-3}, \quad (2)$$

где I_0 – значение максимальной степени устойчивости ПИ системы с моделью (1).

В структуру входящего в систему идентификатора, так же как и в саму следящую систему, входит форсирующий фильтр, на вход которого подается ступенчатый сигнал. Такая структура идентификатора позволяет сравнительно быстро за время, составляющее 0,2 времени переходного процесса в объекте управления, оценить параметры n , T_1 и T_2 модели объекта.

Указанное решение задачи идентификации возможно при выполнении условия, что действующие на объект возмущения пренебрежимо малы и что выходной сигнал объекта $x(t)$ определяется только управляющим ПИ сигналом $u(t)$. В связи с этим:

$$k_0 = x_{уст}(t)(u_{уст}(t))^{-1}, \quad (3)$$

где $x_{уст}(t)$ и $u_{уст}(t)$ – значения входного и выходного сигналов объекта, когда переходной процесс в следящей системе при отработке ступенчатого задающего воздействия можно считать завершенным.

Оставшиеся n , T_1 и T_2 динамические параметры объекта определяются подачей на дифференцирующий фильтр с передаточной функцией

$$W_{дн}(p) = p^3 (I_0^{-1}0,01p + 1)^{-3} \quad (4)$$

ступенчатого воздействия, когда в законе ПИ управления с передаточной функцией

$$W_{пи}(p) = k_{пн} + k_{и}p^{-1} \quad (5)$$

параметр $k_{пн}(t) \equiv 0$. Время, в течение которого $k_{пн}(t) \neq 0$, сравнительно мало и составляет $\leq 0,2$ времени переходного процесса в объекте управления. Поэтому можно считать, что рассматриваемая следящая система постоянно работает в замкнутом ПИ законом управления режиме.

Задача оценивания параметров n , T_1 и T_2 решается в предположении, что динамика изменения выходного сигнала $x(t)$ на начальном участке переходного процесса достаточно точно описывается моделью вида:

$$W(p) = k_0 (T_1 p + 1)^{-n} (T_2 p)^{-1}. \quad (6)$$

Исходя из этого предположения с учетом динамики фильтра (4) и $k_{пн}(t) \equiv 0$ можно утверждать, что передаточная функция от входного идентифицирующего сигнала $u(t)$ фильтра (4) к выходному сигналу $x(t)$ объекта имеет вид:

$$W_{u-x}(p) = k_0 p (T_1 p + 1)^{-n} (T_2)^{-1}, \quad (7)$$

а соответствующий этой передаточной функции переходной процесс при ступенчатом воздействии и нулевых или близких к нулевым начальных условиях имеет вид:

$$x(t) = \Delta u k_0 t^{n-1} e^{-\alpha t} (T_2(n-1)T_1^n)^{-1}, \quad (8)$$

где $\alpha = T_1^{-1}$, $\Delta u > 0$ – величина ступенчатого воздействия, подаваемая на вход фильтра (4).

Сущность предлагаемого способа идентификации параметров n , T_1 и T_2 состоит в том, что, преобразуя с помощью дифференциаторов выходной сигнал объекта $x(t)$ и измеряя в определенных точках значения производных этого сигнала, можно получить все необходимые для нахождения n , T_1 и T_2 уравнения, путем дифференцирования выражения (8). Так первая производная (8):

$$x'(t) = \Delta u k_0 ((n-1)t^{n-2} - t^{n-1}T_1^{-1})e^{-\alpha t} (T_2(n-1)!T_1^n)^{-1} \quad (9)$$

устанавливает связь в каждый момент времени между ее значениями и искомыми параметрами.

Приравняв нулю вторую производную процесса $x(t)$, которая имеет вид:

$$x''(t) = \Delta u k_0 ((n-1)(n-2) - 2(n-1)tT_1^{-1} + t^2T_1^{-2})e^{-\alpha t} (T_2(n-1)!T_1^n)^{-1} \quad (10)$$

получаем связь между временем $t_{экт}$ экстремума производной (9) и параметрами n и T_1

$$t_{экт} = (n-1 - (n-1)^{0,5})T_1, \quad (11)$$

а само значение этого экстремума, как следует из (9):

$$A(t_{экт}) = \Delta u k_0 t_{экт}^{n-2} (n-1 - t_{экт}T_1^{-1})e^{-\alpha t_{экт}} \times (T_2(n-1)!T_1^n)^{-1}. \quad (12)$$

Для определения с учетом (11) n и T_1 достаточно воспользоваться, например зависимостью:

$$t_{0,5экт} t_{экт}^{-1} = \alpha_t = f(n). \quad (13)$$

Можно показать, что отношение значений времени $t_{0,5экт} t_{экт}^{-1}$ является монотонно возрастающей функцией n , стремящейся к 1 при $n \rightarrow \infty$. В функции (13) $t_{0,5экт} < t_{экт}$ – момент времени, в который модуль второй производной $x''(t)$ первый раз становится равным $0,5A(t_{экт})$, то есть

$$A_{0,5} = 0,5A(t_{экт}) = \Delta u k_0 t_{0,5экт}^{n-2} (n-1 - t_{0,5экт}T_1^{-1}) \times e^{-\alpha t_{0,5экт}} (T_2(n-1)!T_1^n)^{-1}. \quad (14)$$

Таблица

n	3	4	6	8	16	24
α_t	0,469	0,431	0,657	0,639	0,767	0,817

Поэтому функция (13) может быть построена для различных значений n путем моделирования переходных процессов в модели (7) при ступенчатом входном воздействии с последующей обработкой реакции на это воздействие в соответствии с выражениями (13) и (14) (таблица). Из таблицы видно, что зависимость $\alpha_i=f(n)$ монотонно растет с ростом n .

Для решения задачи идентификации параметров n, T_1, T_2 и k_0 модели (1) достаточно использовать значения функции $x''(t)$ и равенство (3). Оценку n можно получить, воспользовавшись функциями $x''(t)$ (12), (14), определив соответствующее ей значение α_i (13). Значение α_i в силу монотонности функции $\alpha_i=f(n)$ позволяет однозначно оценить n , если будет известна обратная функция $n=f_{\text{обр}}(\alpha_i)$. Используя значения таблицы, такая функция может быть построена с помощью какой-либо аппроксимирующей функции.

Если взять точки таблицы, то искомая обратная функция $n=f_{\text{обр}}(\alpha_i)$, аппроксимируемая, например, с помощью полинома 5 степени, имеет вид:

$$n(\alpha_i) = -2,115 \times 10^4 \alpha_i^5 + 7,045 \times 10^4 \alpha_i^4 - 9,19 \times 10^4 \alpha_i^3 + 5,87 \times 10^4 \alpha_i^2 - 1,84 \times 10^4 \alpha_i + 0,227. \quad (15)$$

Но $n(\alpha_i)$ в (15) не является, вообще говоря, целым числом, поэтому в качестве оценки порядка n следует брать ближайшее к $n(\alpha_i)$ целое число, то есть

$$n_{\text{оц}} = \begin{cases} n_1, & \text{если } 0 \leq n(\alpha_i) - n_1 < 0,5, \\ n_2, & \text{если } 0,5 \leq n_2 - n(\alpha_i) < 0. \end{cases} \quad (16)$$

При известном значении $n_{\text{оц}}$ (16) оценку T_1 можно получить из (11)

$$T_{\text{оц1}} = t_{\text{экт}} (n_{\text{оц}} - 1 - (n_{\text{оц}} - 1)^{0,5})^{-1}. \quad (17)$$

Оставшееся неизвестным значение T_2 можно определить из (12):

$$T_{\text{оц2}} = \Delta u k_0 t_{\text{экт}}^{n-2} (n-1 - t_{\text{экт}} T_{\text{оц1}}^{-1}) e^{-t_{\text{экт}} \times} \times (A(t_{\text{экт}}) (n-1)! T_{\text{оц1}}^{n-1}). \quad (18)$$

Таким образом, с помощью второй производной $x''(t)$ (10) и выражений (3), (15–18) можно оценить за сравнительно короткое время все параметры модели (1), аппроксимирующей поведение реального аperiodического объекта, в описании которого постоянная времени одного инерционного звена существенно преобладает над остальными.

Проиллюстрируем возможности построения быстродействующих адаптивных следящих систем максимальной степени устойчивости с рассмотренным идентификатором параметров n, T_1, T_2 и k_0 (1).

Пусть передаточная функция объекта имеет вид:

$$W_0(p) = [(6p+1)(9p+1)(12p+1) \times (15p+1)(500p+1)]^{-1}. \quad (19)$$

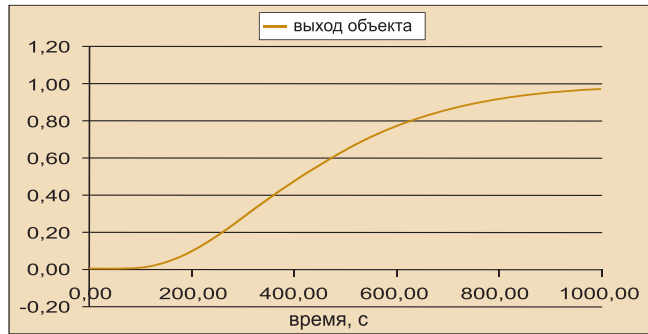


Рис. 1

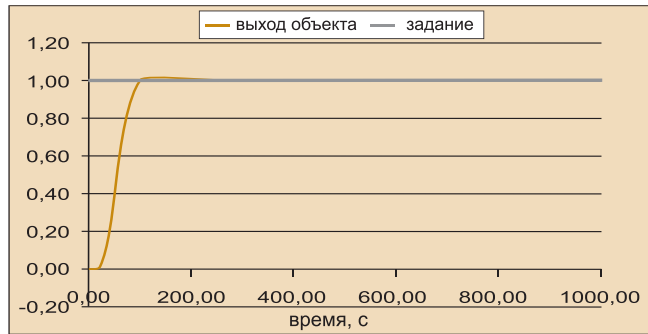


Рис. 2

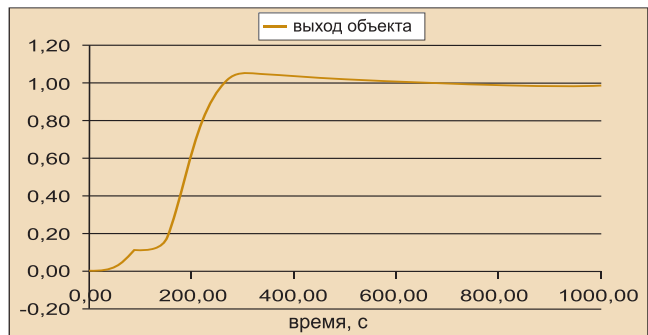


Рис. 3

Тогда передаточная функция модели, определенная по формулам (3), (14–17), примет вид:

$$W_{\text{ом}}(p) = [(10,263p+1)^8 (498,75p+1)]^{-1}. \quad (20)$$

Для модели (20) способом, описанном в работах [1,2], находим значения максимальной степени устойчивости $L_{\text{оп}}$ и настроечных параметров $k_{\text{ио}}$ и $k_{\text{по}}$ в ПИ-регуляторе (4), которые равны:

$$L_{\text{оп}} = 0,0074, k_{\text{ио}} = 2,2452 \text{ и } k_{\text{по}} = 0,0076. \quad (21)$$

На рис. 1 показан процесс обработки ступенчатого задающего воздействия ПИ системой управления с объектом (19) и настройками (21) регулятора (4).

На рис. 2 показан процесс обработки ступенчатого задающего воздействия ПИ системой управления с объектом (19), настройками (21) регулятора (4) и входным форсирующим фильтром (2), который компенсирует влияние трех крайних правых корней характеристического уравнения. Передаточная функция форсирующего фильтра взята равной

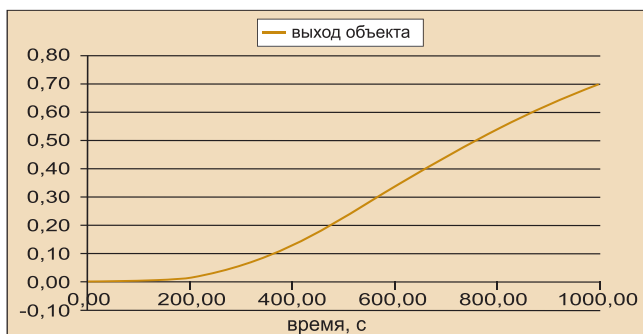


Рис. 4

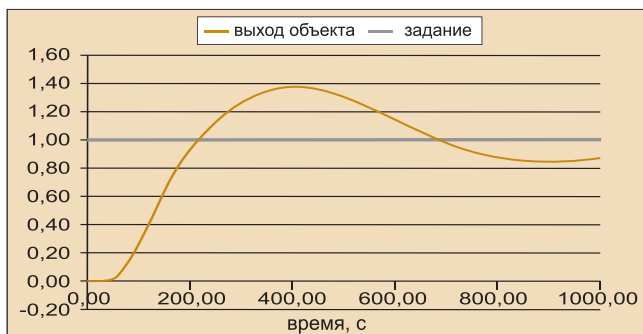


Рис. 5

$$W_{\text{фд}} = A_{\text{д}}(p)B_{\text{д}}(p)^{-1}, A_{\text{д}}(p) = 2,46 \times 10^6 p^4 + 5,47 \times 10^3 p^2 + 10^4 p^2 + 1, \quad (22)$$

$$B_{\text{д}}(p) = 0,3075 p^3 + 1,37 p^2 + 2,025 p + 1.$$

Из рис. 1 и рис. 2 следует, что время отработки скачкообразного задающего воздействия в системе с входным фильтром на порядок меньше, чем в обычной ПИ системе.

На рис. 3 показан процесс идентификации параметров модели объекта, совмещенный с последующей обработкой ступенчатого задающего воздействия, когда передаточная функция объекта (19) стала равной

$$W_0(p) = [(12p+1)^2(18p+1)^2(24p+1)^2 \times (30p+1)^2(500p+1)]^{-1}. \quad (23)$$

Из рис. 3 следует, что время идентификации параметров модели объекта (23) закончилось примерно на 90 с, а сам процесс отработки — к 500 с. На рис. 4 показан процесс отработки ступенчатого задающего воздействия ПИ системой управления с объектом (23) и настройками (21) без входного фильтра. Из рис. 4 следует, что без перенастройки параметров входного фильтра система с объектом (23) фактически потеряла работоспособность. На рис. 5 та же система, но с входным фильтром (22), параметры которого не соответствуют крайним правым корням характеристического полинома системы. Из сравнения рис. 4 и рис. 5 следует, что процесс отработки задающего воздействия в системе с фильтром несколько быстрее, чем без фильтра,

Шубладзе А. М. - д-р техн. наук, зав. лабораторией, *Гуляев С. В.* — канд. техн. наук, *Ольшванг В. Р.* - канд. техн. наук, *Малахов В. А.* — канд. физ.-мат. наук, ст. научные сотрудники ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, *Кузнецов С. И.* - ген. директор ОАО «НИИТеплоприбор». Контактный телефон (495) 334-88-81.

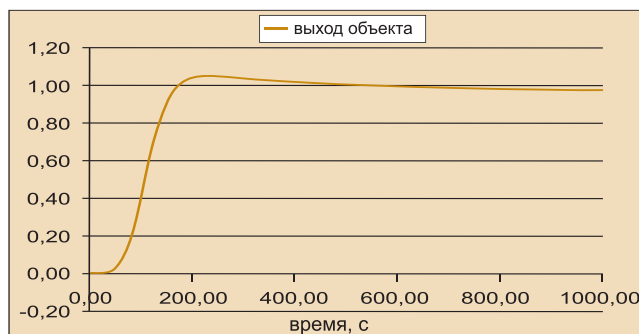


Рис. 6

но в любом случае качество работы системы управления крайне низкое.

На рис. 6 показан процесс отработки ступенчатого задающего воздействия ПИ системой управления с объектом (23), в которой оптимальные настройки регулятора

$$I_{\text{оп}} = 0,004, k_{\text{по}} = 1,234 \text{ и } k_{\text{ио}} = 0,0026 \quad (24)$$

и передаточная функция входного форсирующего фильтра

$$W_{\text{фд}} = A_{\text{д}}(p)B_{\text{д}}(p)^{-1}, A_{\text{д}}(p) = 1,06 \times 10^7 p^3 + 1,83 \times 10^5 p^2 + 740 p + 1, \quad (25)$$

$$B_{\text{д}}(p) = 1,88 p^3 + 4,58 p^2 + 3,705 p + 1.$$

Из рис. 6 следует, что процесс отработки ступенчатого задающего оптимальной ПИ системой с соответствующим входным фильтром закончился к 200 с.

Из приведенных графиков видно, что быстродействующая адаптивная следящая система с идентификатором решает рассматриваемую задачу управления при изменении в достаточно широких диапазонах параметров апериодического объекта, причем время идентификации параметров модели объекта и соответственно параметров системы управления составляет лишь малую часть времени переходного процесса в объекте управления.

Список литературы

1. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Ольшванг В.Р. и др. Быстродействующие самонастраивающиеся следящие ПИ системы управления технологическими процессами // Приборы и системы Управление, контроль, диагностика. 2011. № 4.
2. Гуляев С.В., Черепова Т.И., Шубладзе А.А., Шубладзе А.М. Оптимальные по степени устойчивости системы управления динамическими объектами // Проблемы управления. 2003. №3.
3. Черепова Т.И., Шубладзе А.М. Оптимальные по степени устойчивости системы управления апериодическими объектами // Автоматика и телемеханика. 2004. №1.
4. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы // Приборы и системы. 2002. №10.