

УДК-517.987

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСТРОЙЩИКА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ФОРМИРОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ ЭТАЛОНА

Л.А. Широков, О.Л. Широкова

В статье представлена методика формирования структур и параметров эталонных моделей для автоматических настройщиков. Она особенно актуальна для регулирования объектов высоких порядков, для которых синтез желаемой эталонной модели – важнейшая задача. Рассмотрен автоматический настройщик с использованием алгоритма Гаусса-Ньютона, для которого предложена модель смещенного эталона, изложена методика автоматического формирования его параметров для статических и астатических объектов. Пример моделирования показывает, как оптимизатор автоматически настраивает параметры системы управления, а полученные графики подтверждают эффективность функционирования автоматического настройщика. Важным достоинством изложенной методики является то, что используемое в эталоне запаздывание как аппроксимирующее звено модели системы регулирования эффективно фильтрует внешние воздействия с различными спектральными свойствами, поступающие на автоматизируемый объект. При этом главный параметр эталона – параметр смещения на суммарное запаздывание – определяется предложенной в статье процедурой автоматически.

Ключевые слова: моделирование, автоматическое регулирование, смещение, запаздывание, качество регулирования, оптимизация, эталонная модель, технологический процесс.

TUNER SIMULATION FOR CONTROL SYSTEMS WITH AUTOMATIC FORMATION OF REFERENCE MODEL PARAMETERS

L.A. Shirokov, O.L. Shirokova

In the article there is presented a method of forming structures and parameters of reference models for automatic tuners. It is especially important for controlling the high-order objects for which the synthesis of the desired reference model is the most important task. An automatic tuner has been analyzed with the Gauss – Newton algorithm, for which a model of the displaced reference was proposed, the technique of automatic creation of its parameters for the static and astatic objects was described. The simulation example shows how the optimizer is automatically adjusting the control system parameters, and the resulting graphs confirm the effectiveness of the automatic tuner functioning. An important advantage of the given method is that the delay, used for the standard as the approximating unit control system model, effectively filters the external influences of different spectral properties incoming on the automated object. At the same time the main standard parameter – the offset by the total delay – is automatically determined by the procedure proposed in the article.

Keywords: modeling, automatic control, offset, delay, quality of regulation, optimization, reference model, workflow

Введение

Проектирование систем автоматизации технологических процессов различных производств предусматривает оптимизацию параметров настройки синтезируемых систем регулирования [1–3]. Для ее решения эффективны методы автоматической оптимизации с использованием

эталонных моделей [4–7], к которым относятся и методы оптимизации с использованием анализа чувствительности [6, 8]. Важным преимуществом этих методов является то, что вектор-градиенты оптимизационных алгоритмов вычисляются непосредственно по функциям

чувствительности. В результате исключается необходимость введения пробных искусственных вариаций параметров настройки регуляторов, нарушающих нормальное течение технологического процесса, что является обязательным требованием поисковых алгоритмов оптимизации.

Одной из задач реализации оптимизационных алгоритмов с эталонными моделями является задача синтеза структур и параметров эталонных моделей [2]. Вопросы построения эталонных моделей рассматривались в работах [4, 5, 7]. Однако для моделей объектов высоких порядков синтез желаемой эталонной модели существенно усложняется, что связано с ростом количества выбираемых параметров и соответственно трудностями обеспечения адекватности выбора реальным структурно-параметрическим возможностям автоматической системы регулирования для конкретных свойств объекта, а также и спектральных свойств внешних возмущений. В указанных выше работах не было обобщенного решения задачи выбора эталонной модели и не рассматривалось ее решение для объектов высоких порядков с использованием автоматизированного подхода.

Целью работы является моделирование настройщика параметров автоматических регуляторов неминимально-фазовых объектов с применением методики автоматического формирования параметров смещенной во времени эталонной модели для статических и астатических линейных и нелинейных объектов регулирования.

Модель алгоритма автоматической оптимизации

Поведение системы регулирования неминимально-фазовым объектом опишем уравнениями

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t, \mathbf{q}) = G_p(\mathbf{e}(t, \tau, \mathbf{q})) \\ \mathbf{e}(t, \mathbf{q}) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{u}(t, \mathbf{q}) \\ \mathbf{u}(t, \mathbf{q}) = G_c(\mathbf{x}(t, \mathbf{q})) \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T,$$

где t – текущее время; $\mathbf{q}$ – вектор параметров настройки регулятора; G_p – интегро-дифференциальный оператор объекта регулирования; $\mathbf{x}$, $\mathbf{e}$, $\mathbf{r}$, $\mathbf{u}$ – n -мерные вектора соответственно координат регулируемого объекта, входного сигнала объекта регулирования, входного сигнала системы регулирования, управляющего

воздействия регулятора с оператором G_c ; τ – транспортное запаздывание объекта; τ – символ транспонирования.

В алгоритмах оптимизации с эталонной моделью для оптимизации настройки вектора параметров регулятора оптимизация выполняется из условия наилучшего выполнения системой требований, предъявляемых эталоном к качественным показателям переходных процессов регулирования технологических параметров. В таких алгоритмах качество переходного процесса регулирования можно оценить функционалом

$$V = \int_0^{t_f} F((t, \mathbf{q})) dt, \quad (2)$$

$$(t, \mathbf{q}) = \mathbf{x}(t, \mathbf{q}) - \mathbf{x}_r(t).$$

Здесь t_f – время регулирования; $\mathbf{x}_r(t)$ – n -мерный вектор выхода эталонной модели, задающей желаемое поведение вектора регулируемых выходных координат объекта.

Условие оптимальности для переходного процесса объекта регулирования представим в виде

$$V_{\min} = \min_{\mathbf{q} \in D_q} \int_0^{t_f} F(\mathbf{x}(t, \mathbf{q})) dt, \quad (3)$$

где F – выпуклая, положительно определенная скалярная функция; D_q – область определения параметров настройки регулятора.

Для параметрической оптимизации по критерию оптимальности (3) целесообразно применить беспойсковую оптимизацию [2]. Действительно, поисковые методы, с одной стороны, не требуют априорной информации о математической модели системы, но, с другой стороны, предусматривают реализацию сложной логики алгоритмов их функционирования и больших временных затрат для реализации поиска. Кроме того, возникает необходимость формирования специальных поисковых сигналов, что при оптимизации для технологических процессов на реальных объектах часто является неприемлемым. К беспойсковым методам, использующим в явном виде градиент критерия оптимизации, относятся собственно градиентные методы, методы переменной метрики, методы Ньютона, Гаусса – Ньютона и др. [1, 2].

Для рассматриваемой задачи (3) применим метод Гаусса – Ньютона. Алгоритм опти-

мизации по методу Гаусса – Ньютона представим в виде

$$\begin{cases} \mathbf{q}(n+1) = \mathbf{q}(n) + \Delta \mathbf{q}(n) \\ \Delta \mathbf{q}(n) = -\mathbf{\Gamma}(n) \mathbf{H}(n) \nabla V(\mathbf{x}(t, \mathbf{q})) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\mathbf{H}(n) = \left(\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \left(\mathbf{\Xi}^T(t) \frac{\partial \nabla_x F(\mathbf{\varepsilon}(t, \mathbf{q}))}{\partial \mathbf{q}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{\Xi}_i^{(2)}(t) \frac{\partial F(\mathbf{\varepsilon}(t, \mathbf{q}))}{\partial x_i} \right) dt \right)^{-1}, \quad (5)$$

$$\mathbf{\Xi} = \left\| \xi_{ij}(t) \right\|_{(n \times m)}, \quad (6)$$

$$\xi_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial q_j}, \quad \xi_{ijk}^{(2)} = \frac{\partial^2 x_i(t)}{\partial q_j \partial q_k}, \quad (7)$$

$$(i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; k = \overline{1, n}),$$

где $\mathbf{\Gamma}(n) = \text{diag}(\gamma_{jj}(n))_{(m \times m)}$ – диагональная матрица весовых коэффициентов; $\mathbf{H}(n)$ – матрица Гессе; $\mathbf{\Xi}_{(n \times m)}$ – матрица функций чувствительности первого порядка ξ_{ij} ; n – порядок дифференциального уравнения объекта регулирования; m – размерность вектора параметров настройки регулятора; $\mathbf{\Xi}_i^{(2)}$ – i -я матрица функций чувствительности второго порядка $\xi_{ijk}^{(2)}$.

Входящий в уравнения (4) вектор-градиент функционала (2) представим в виде

$$\nabla V(\mathbf{x}(t, \mathbf{q})) = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \mathbf{\Xi}^T(t, \mathbf{q}) \nabla_x F(\mathbf{\varepsilon}(t, \mathbf{q})) dt,$$

$$\nabla_x F(\mathbf{\varepsilon}(t, \mathbf{q})) = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \right)^T.$$

Методика формирования параметров смещенного эталона

Как было отмечено выше, важным аспектом формирования алгоритмов оптимизации является эталонная модель [2, 3], определяющая желаемые характеристики переходного процесса x_r в системе регулирования. Часто эталонная модель предполагается соответствующей по структуре оптимизируемой системе. Однако в случае сложных объектов регулирования высоких порядков, многомерных систем автоматического регулирования такой подход к выбору эталона становится затруднительным. В этих условиях весьма проблематичен

как синтез структуры, так и формирование параметров эталонной модели, так как посредством и тех, и других должны быть созданы возможности для достижения наилучших искомым динамическим свойствам в оптимизируемой системе автоматического регулирования. Такое положение часто приводит к необходимости поиска способов упрощения эталонной модели, что представляет собой достаточно сложную самостоятельную задачу. Для ее упрощения, например, применяется эталон второго порядка в виде колебательного звена [6], для которого несложно задать требуемые показатели качества по динамической ошибке, степени колебательности и времени затухания переходного процесса. Однако такой подход жестко ограничен видом исходно принятого внешнего входного воздействия на объект, так как переходные процессы эталона весьма чувствительны к спектральным свойствам этого воздействия. При вариациях спектральных свойств внешнего входного воздействия существенно ухудшаются результирующие показатели качества оптимизируемых систем. Для их корректировок проводятся различные дополнительные работы. Все это требует поиска новых подходов к решению.

Для объектов, описываемых линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями высоких порядков, рассмотрим вопрос аппроксимации эталонных моделей, при которой сохраняется адекватность их динамических свойств при различных спектрах входных сигналов. В качестве нелинейностей будем рассматривать случаи дифференцируемых нелинейностей. При этом для некоторой окрестности рабочей точки системы регулирования нелинейность будем представлять рядом Тейлора [1] с дальнейшим применением его линейной части.

Без ограничения общности с целью упрощения записей будем рассматривать одномерные неминимально-фазовые объекты либо с самовывравниванием, либо астатического типа, описываемые линейными дифференциальными уравнениями произвольного порядка с чистым запаздыванием, стационарными или квазистационарными параметрами с монотонными переходными характеристиками в виде

$$\sum_{i=0}^{n_p} a_i \frac{d^i x(t)}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m_p} b_i \frac{d^i z(t-\tau)}{dt^i} \quad (8)$$

с нулевыми начальными условиями:

$$\left. \frac{d^i x(t)}{dt^i} \right|_{t=0} = 0, i = \overline{0, n_{p-1}}, \quad (9)$$

где a_i – коэффициенты уравнения объекта регулирования; $z(t - \tau)$ – внешнее входное воздействие на объект регулирования – функция $z(t)$, смещенная на величину чистого запаздывания $\tau \geq 0$ и равная нулю при $t < \tau$, такая, что для уравнения (8) удовлетворяются условия непрерывности в некоторой открытой области D и условия Липшица [7]; b_i – фиксированные параметры системы; m_p и n_p – соответственно порядки правой и левой частей дифференциального уравнения.

В зависимости от порядка уравнения (8) и значений коэффициентов можно рассматривать четыре типа математических моделей неминимально-фазовых частей объектов регулирования, т.е. без запаздывающего аргумента, параметры которых приведены в таблице.

Задача формирования эталонной модели актуальна для математических моделей объектов, представленных в таблице вариантами 2 и 4. В практических задачах автоматического регулирования именно объекты, описываемые такими математическими моделями, являются наиболее распространенными.

С целью формирования эталонных моделей на первом этапе проведем аппроксимацию дифференциальных уравнений высокого порядка уравнениями первого порядка в виде:

$$T_p \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = z(t - \tau), \quad (10)$$

$$\tau = \tau + \tau_a, \quad (11)$$

где T_p – постоянная времени, определяющая инерционность объекта регулирования; τ – обобщенное запаздывание, определяемое суммой исходного чистого запаздывания τ и τ_a – запаздывания, аппроксимирующего емкостные свойства объекта регулирования.

Для аппроксимации сформируем следующую процедуру. На модель объекта регулирования в рассматриваемом классе объектов, описываемых уравнениями типа (8) с начальными условиями (9), будем подавать внешнее входное воздействие наиболее сложного вида – скачкообразное, описываемое уравнением

$$z(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

Полученные переходные характеристики показаны на рис. 1. К переходной характеристике 1 статического объекта через точку перегиба S проведем касательную (рис. 1, а). Отрезок BD , представляющий проекцию касательной BC на ось абсцисс t , определяет постоянную времени T_p объекта регулирования. На рис. 1, а отрезок OA определяет время чистого запаздывания τ в уравнении (8); а отрезок AB определяет время аппроксимирующего запаздывания τ_a для переходной характеристики объекта регулирования; угол α определяет наклон подкасательной BC к оси абсцисс t .

Примем во внимание, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \left. \frac{dx(t)}{dt} \right|_{t=t_s}, \quad (13)$$

где значение первой производной для $x(t)$ определяется при решении дифференциального уравнения (8). Для вычисления постоянной времени T_p используем выражение

$$T_p = x(\infty) / \operatorname{tg} \alpha. \quad (14)$$

Тогда аппроксимирующее выражение для рассматриваемого объекта описывается уравнением (10).

Для астатического объекта, как показано на рис. 1, б, в точке S объекта, где скорость изменения переменной $x(t)$ достигает максимального значения, проведем касательную, которая пересекает ось абсцисс в точке B . От-

Таблица

Варианты параметров различных типов математических моделей объектов

№ варианта	Порядок левой части, n_p	Коэффициенты левой части	Тип модели
1	1	$a_i > 0; i = \overline{0, 1}$	статический
2	> 1	$a_i > 0; i = \overline{0, 1, \dots, n_p}$	статический высокого порядка
3	1	$a_0 = 0; a_1 > 0$	астатический
4	> 1	$a_0 = 0; a_i > 0; i = \overline{1, 2, \dots, n_p}$	астатический высокого порядка

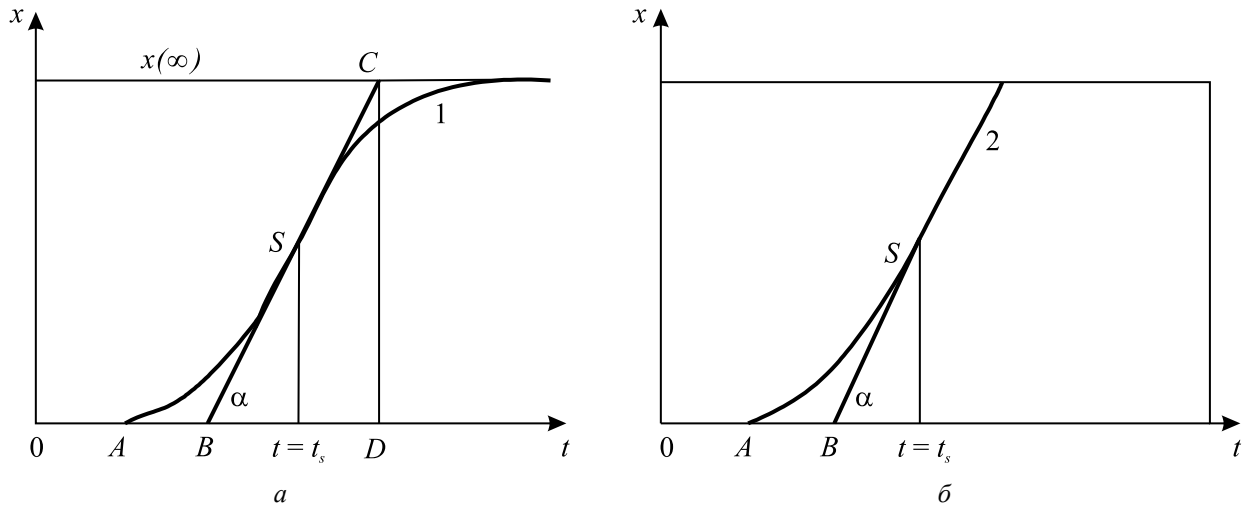


Рис. 1. Переходные процессы объектов автоматического регулирования для моделей статического (а, кривая 1) и астатического типа (б, кривая 2)

резок AB по оси времени определяет время аппроксимирующего запаздывания τ_a для переходной характеристики. Угол α , определяющий угол наклона касательной BS , характеризует максимальную скорость нарастания переходной характеристики в точке t_s и определяется первой производной при решении дифференциального уравнения высокого порядка, описывающего объект регулирования. В соответствии с рассмотренным выше, аппроксимирующее выражение для астатического объекта примет вид

$$\frac{dx(t)}{dt} = k z(t - \tau), \quad (15)$$

$$k = \operatorname{tg} \alpha,$$

где τ – сумма исходного значения запаздывания объекта τ и аппроксимирующего запаздывания τ_a ; k – коэффициент передачи объекта.

Аппроксимирующие модели (10) и (15), соответственно, статического и астатического объектов высокого порядка, существенно упрощают окончательное построение эталонов алгоритмов оптимизации, так как имеют минимальные количества параметров для настройки на требуемые показатели качества переходных процессов регулирования. Действительно, для эталонной модели необходимы колебательное звено и звено чистого запаздывания, определяющего важнейшую характеристику эталона – смещение, параметры которого вычисляются по вышеизложенной методике. Коэффициенты колебательного звена подбираются по следующей методике. По технологическим требованиям к качеству регулирования устанавливаются значения первой амплитуды,

собственной частоты и степени затухания. Эти значения задаются непосредственно как параметры колебательного звена.

Весьма важным достоинством изложенного подхода является то, что, во-первых, запаздывание как аппроксимирующее звено модели объекта регулирования эффективно фильтрует различные спектральные свойства внешних входных воздействий на автоматизируемый объект. Во-вторых, главный параметр эталона – параметр смещения на суммарное запаздывание – определяется автоматически реализуемой процедурой по изложенной выше методике.

Пример

В качестве примера проведем моделирование параметрической оптимизации системы регулирования, которая включает неминимально-фазовый объект, описываемой уравнением пятого порядка с чистым запаздыванием

$$\sum_{i=0}^5 a_i \frac{d^i x(t)}{dt^i} = z(t - \tau) \quad (16)$$

при нулевых начальных условиях, в обратной связи которого пропорционально-интегральный регулятор, описываемый уравнением

$$u(t, \mathbf{q}) = q_1 x(t, \mathbf{q}) + q_2 \int_0^t x(t, \mathbf{q}) dt, \quad (17)$$

где q_1 и q_2 – настраиваемые параметры регулятора.

Для исходного переходного процесса объекта регулирования, для которого должен быть оптимально настроен регулятор (рис. 2, а, кривая 1), был задан желаемый переходный

процесс проектируемой системы регулирования. Этот желаемый переходный процесс (рис. 2, а, кривая 2) был описан эталонной моделью второго порядка. После оптимизации настроек регулятора в соответствии с рассмотренной выше заданной эталонной моделью по алгоритму Гаусса – Ньютона получен переходный процесс, изображенный на рис. 2, а кривой 3. Рисунок 2 свидетельствует о том, что процесс 3 имеет весьма существенную колебательность и, вследствие этого, явно большее время регулирования. Завышенная колебательность существенно ухудшает качественные показатели получаемого процесса. Действительно, надо иметь в виду, что при представленном моделировании работы автоматического настройщика рассматривалось лишь одноразовое скачкообразное возмущающее воздействие на технологический объект. В реальной ситуации возмущения поступают на объект многократно, поэтому нестабильность качественных показателей будет существенно выше.

Полученный результат является следствием наличия, как видно из графика, некомпенсируемой области R . Эта область возникла в результате стремления упростить модель эталона до простого колебательного звена. Однако возникающая за счет упрощения математической модели эталона относительно объекта высокого порядка область R физически некомпенсируется в рамках структуры оптимизируемой автоматической системы регулирования.

Автоматический настройщик, все же пытаясь предпринять определенные компенсирующие действия, находит решение в максимальном уменьшении первой амплитуды

переходного процесса регулирования. Формально это, в определенной степени, логично. Однако при решении задачи компенсации области R за счет формально логичного действия оптимизатора – максимально возможного уменьшения первой амплитуды переходного процесса регулирования – получается завышенная колебательность дальнейшего хода процесса регулирования. Такой результат является следствием математически жесткой взаимосвязанности параметров системы. Вследствие этого невозможно достичь одновременно минимизации первой амплитуды процесса регулирования и исключения его высокой колебательности. Завышенная же колебательность процесса регулирования – это, как отмечено выше, длительное нарушение заданных технологических регламентов производства.

Улучшение результата предусматривает увеличение порядка эталона, так как в этом случае ликвидируется некомпенсируемая область R . Однако для эталона высокого порядка усложняется и становится проблемной задача выбора параметров самой этой эталонной модели высокого порядка, поскольку в ней увеличивается количество параметров, которые необходимо настраивать проектировщикам.

Для решения проблемы, в соответствии с предложенной в статье методикой, проведена аппроксимация переходной характеристики объекта (см. рис. 2, а, кривая 1) и применено смещение эталона на величину τ , которая вычисляется как сумма исходного значения запаздывания объекта τ и аппроксимирующего запаздывания τ_a , полученного по ранее изложенной методике. Полученный эталонный

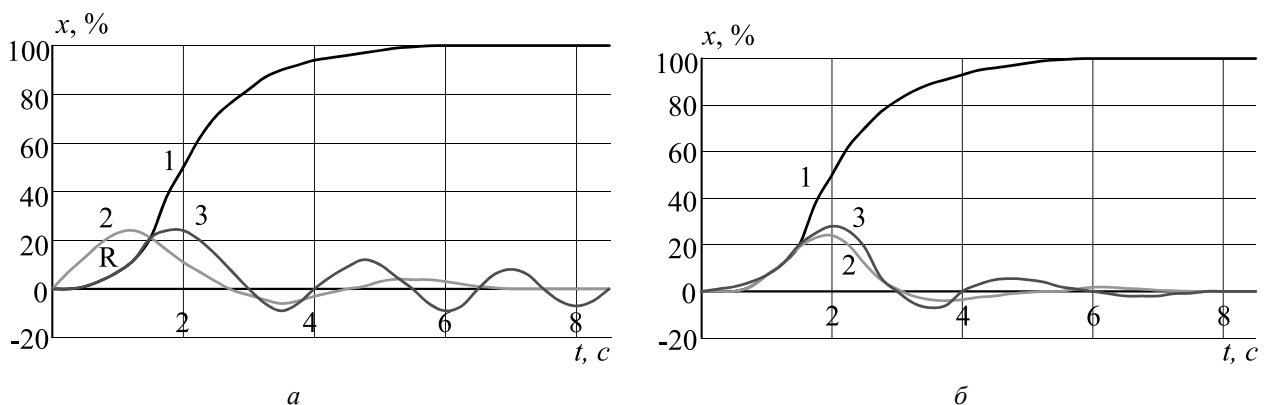


Рис. 2. Переходные процессы в системе при эталонной модели без смещения (а) и со смещением (б):

1 – переходные процессы в объекте регулирования; 2 – переходные процессы в эталонной модели;

3 – переходные процессы в системе регулирования после оптимизации;

R – область, некомпенсируемая переходным процессом регулирования

процесс иллюстрирует кривая 2 на рис. 2, б. В результате проведенного моделирования функционирования настройщика автоматической параметрической оптимизации регулятора получен переходный процесс, показанный на рис. 2, б в виде кривой 3. Оптимальный процесс автоматического регулирования имеет весьма удовлетворительные показатели качества. Действительно, колебательность переходного процесса резко снижена, что в несколько раз сократило время регулирования технологического параметра и соответственно повысило эффективность производственного процесса.

Заключение

Рассмотренная методика применения для беспоисковой автоматической параметрической оптимизации смещенной эталонной модели и изложенный подход к автоматическому формированию ее параметров позволяют существенно упростить процедуру построения систем для структурно-параметрической оптимизации настроек систем регулирования технологических процессов различных производств. Проведенное моделирование настройщика систем регулирования с применением алгоритма оптимизации со смещенной эталонной моделью позволяет сделать вывод, что рассмотренная методика применения модели со смещением, параметры смещения которой определяются автоматически, позволяет, во-первых, упростить процедуру реализации алгоритмов беспоисковой параметрической оптимизации систем регулирования технологических процессов, а во-вторых, обеспечить выполнение требований к качественным показателям результирующего оптимального переходного процесса в системах автоматического регулирования. Приведенный пример моделирования настройщика для оптимизации системы регулирования

статического объекта, описываемой уравнением пятого порядка с запаздыванием, подтвердил эффективность рассмотренной методики.

Список литературы

1. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления. СПб.: Питер. 2004. – 256 с.
2. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
3. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. СПб.: Питер, 2006. – 272 с.
4. Александров А.Г. Адаптивное управление с эталонной моделью при внешних возмущениях // Автоматика и телемеханика. 2004. № 5. С. 77–90.
5. Бронников А.М., Буков В.Н. Условия точного слежения выхода линейной системы за эталонной моделью пониженного порядка // Автоматика и телемеханика. 2008. № 3. С. 60–69.
6. Kokotovic P., Bingulac S., Medanic J. Some approaches to the reduction of control system sensitivity // Proc. of the IIIrd Allerton Conf. Illinois. Oct. 1965. P. 212–224.
7. Пугачев В.И. Оптимизация параметров управляющего устройства в адаптивной системе управления с эталонной моделью // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. Вып. № 1. С. 17–23.
8. Широков Л.А. Синтез компактов чувствительности для автоматизации параметрического проектирования линейных систем регулирования // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 22–29.
9. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Курс высшей математики и математической физики. Дифференциальные уравнения. М.: Физматлит, 2005. – 256 с.

Материал поступил в редакцию 29.03.2016

ШИРОКОВ Лев Алексеевич

E-mail: eduarlev@gmail.com
Тел.: (962) 964-36-48

Доктор технических наук, профессор НИУ МГСУ. Академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, Изобретатель СССР. Сфера научных интересов – теория систем и системный анализ, оптимальное управление, САПР, информационные технологии, интегрированные АСУ. Автор более 150 научных трудов.

ШИРОКОВА Ольга Львовна

E-mail: ol.shirokova@gmail.com
Тел.: (903) 135-47-61

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики НИУ МГСУ. Сфера научных интересов – информационные технологии и системы, методы оптимизации, математические методы в экономике, автоматические системы контроля и управления. Автор 30 научных трудов.