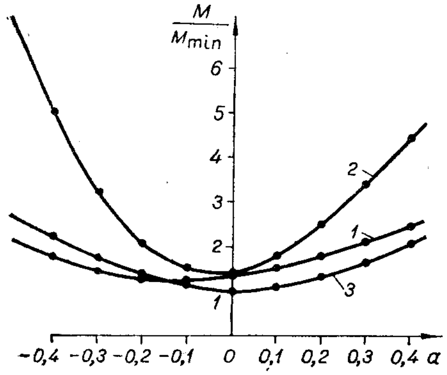

Рис. 2.

где $a=\sqrt[4]{M_{4\min}}$ — наименьший по абсолютной величине ненулевой корень уравнения $\mathrm{th}\,\frac{aT}{2} = -\mathrm{tg}\,\frac{aT}{2}$. Минимальное значение $M_{4\min}$ приблизительно равно $\left(\frac{3\pi}{2T}\right)^4$.

Аналогичным путем отыскиваются весовые функции с минимальным значением моментов $H^2(\omega)$ и более высокого порядка.

Отношения $\frac{M_2}{M_{2\min}}$ и $\frac{M_4}{M_{4\min}}$ для весовых функций $h(t)=1+(1+a)\cos\frac{2\pi t}{T}+a\cos\frac{4\pi t}{T}$ (кривые *1* и *2*) и $\frac{M_2}{M_{2\min}}$ для $h(t)=\cos\frac{\pi t}{T}+a\cos\frac{3\pi t}{T}$ (кривая *3*), рекомендованных в [3] для интерполяции и аподизации спектрограмм, приведены на рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Агизим, Я. Н. Гнатив, М. Ш. Розенблат. Повышение селективности и быстродействия цифрового спектроанализатора.— Отбор и передача информации, 27. Киев, «Наукова думка», 1971.
2. Ю. Л. Клоков, А. М. Цирлин. Центрирование реализаций случайных процессов при помощи цифровых вычислительных машин.— Автоматика и телемеханика, № 3, 1963, т. 24.
3. A. S. Filler. Apodization and Interpolation in Fourier-Transform Spectroscopy.— Journal of Optical Society of Amerika, 1964, v. 54, № 6.

Поступила в редакцию 6 октября 1972 г.

УДК 62-506

А. О. ЕГОРШИН, В. А. ИВАНОВ

(Новосибирск)

О РЕГУЛЯРИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Метод подстраивающейся модели является одним из самых перспективных (в смысле оперативности и простоты технической реализации) методов получения оценок параметров объектов в системах автоматического управления, оптимизации, диагностики динамического эксперимента. Результат идентификации в этом методе представляется непосредственно в виде аналоговой модели исследуемого объекта, которая может быть эффективно использована для решения задач автоматизации (прогнозирование, коррекции и т. д.).

Широкое применение для реализации систем с автоматической настройкой параметров получили градиентные методы [1] и тесно связанные с ними методы функций чувствительности [2, 3]. Однако эти методы эффективны лишь применительно к квазистационарным объектам и в случае достаточно медленных квазистационарных процессов настройки.

Одним из методов синтеза алгоритмов настройки параметров в самонастраивающейся системе (СНС) с моделью является прямой метод

Ляпунова, который обеспечивает асимптотическую устойчивость относительно координат ошибки [4, 5]. Весьма сложным, однако, является выбор функции Ляпунова, а при реализации алгоритмов возникают те же трудности, что и в градиентных системах. Для упомянутых подходов характерно то, что они предназначены для оптимизации только конечного состояния системы. В результате этого сам процесс настройки аналитически неконтролируем и практически недоступен анализу. Именно с этим связаны трудности обеспечения устойчивости процесса автоматической настройки и большая вероятность некорректного решения задачи идентификации или стабилизации параметров. Кроме того, методы, оптимизирующие только конечное состояние системы, не позволяют получать в процессе настройки текущие корректные оценки настраиваемых параметров, что существенно снижает возможности использования этих методов для идентификации и стабилизации нестационарных систем.

Исследуемый подход. Устойчивое решение рассматриваемой обратной задачи будет получено с помощью динамической регуляризации, обеспечивающей корректное решение задачи идентификации равномерно в течение всего процесса настройки [6]. Суть динамической регуляризации заключается в данном случае в том, что используемая для регуляризации априорная информация о настраиваемых (оцениваемых с помощью настройки) параметрах является функцией текущей измерительной информации. В качестве текущего априорного значения параметров используется апостериорная оценка, получаемая соответствующим сглаживанием реализованного с этим априорным значением процесса настройки, минимизирующего принятый критерий качества (в данном случае интеграл от квадрата разности между выходными сигналами объекта и модели). Процессом настройки мы называем здесь изменение настраиваемых параметров в функции времени. Таким образом, динамическая регуляризация означает введение в процесс минимизации используемого критерия обратной связи по текущей апостериорной оценке настраиваемых параметров. В структурном отношении такая регуляризация означает введение в контур настройки обратных связей по производной текущей апостериорной оценки.

Синтез параметрических управляющих воздействий осуществляется на основе метода динамического программирования [7, 8]. Использование этого метода оптимизации в случае возможности аналитического решения снимает вопрос об исследовании устойчивости системы. Функция Беллмана является оптимальной функцией Ляпунова системы, а уравнение Беллмана обеспечивает выполнение условий устойчивости [9]. Синтез оптимального управления снимает также проблему начальных условий модели.

Простота реализации рассматриваемой системы обеспечивается использованием соответствующих ограничений на параметрические управляющие воздействия (это приводит к сигнатурным алгоритмам настройки), а также линейной аппроксимацией поверхностей переключения управляющих функций, определяемых из уравнения Беллмана или принципа максимума. Излагаемые результаты приложимы как к системам с подстраивающейся, так и к системам с эталонной моделью. Для определенности изложение ведется в терминах системы с подстраивающейся моделью.

Постановка задачи. Объект и модель описываются уравнениями:

$$\dot{Y} = A_o Y + B_o \eta(t); \tag{1}$$

$$\dot{Z} = A_{\tilde{m}}(t) Z + B_{\tilde{m}}(t) \eta(t), \tag{2}$$

где $\eta(t)$ — общий входной сигнал объекта и модели; A_o, B_o и $A_{\tilde{m}}$, $B_{\tilde{m}}$ — матрицы объекта и модели соответственно. Примем каноническое описание системы [10] с одним входом: тогда матрицы A_o, B_o будут определяться векторами параметров a_o, b_o:

$$A_o = \begin{vmatrix} 0 \vdots & & E \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 \vdots & & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix} a_o^{\tau} \triangleq I + ea_o^{\tau}; \tag{3}$$

$$B_o = \begin{vmatrix} 0 \\ \cdots \\ 1 \end{vmatrix} b_o^{\tau} \triangleq eb_o^{\tau}, \tag{4}$$

где τ — символ транспонирования. Такую же структуру будут иметь матрицы $A_{\widetilde{m}}$, $B_{\widetilde{m}}$, определяемые векторами параметров $a_{\widetilde{m}}$, $b_{\widetilde{m}}$. Будем рассматривать общий случай, когда все параметры объекта (компоненты векторов a_o и b_o) неизвестны. С учетом введенных обозначений уравнения объекта и модели (1), (2) можно переписать следующим образом:

$$\dot{Y} = IY + ea_o^{\tau}Y + eb_o^{\tau}\eta; \tag{5}$$

$$\dot{Z} = IZ + ea_{\widetilde{m}}^{\tau}Z + eb_{\widetilde{m}}^{\tau}\eta. \tag{6}$$

Сигнал рассогласования между объектом и моделью $X \triangleq Z - Y$ описывается уравнением

$$\dot{X} = A_oX + (A_{\widetilde{m}} - A_o)Z + (B_{\widetilde{m}} - B_o)\eta \tag{7}$$

или с учетом канонического описания

$$\dot{X} = IX + ea_o^{\tau}X + e(a_{\widetilde{m}} - a_o)^{\tau}Z + e(b_m - b_o)\eta. \tag{8}$$

Ставится задача: используя параметрические управляющие входы модели $a_{\widetilde{m}}$, $b_{\widetilde{m}}$, построить процесс подстройки модели «под объект», обеспечивающий минимум функционала

$$I = \int_0^T F(X)\,dt, \tag{9}$$

где $F(X)$ — положительно определенная функция. Например,

$$F(X) = \sum X_i^2. \tag{10}$$

Динамическая регуляризация. В любом практическом случае имеется некоторая априорная информация о неизвестных параметрах объекта. Наличие ее — ситуация весьма обычная; ее использование представляет собой основу для регуляризации обратной задачи. Естественно поэтому изменение настраиваемых параметров модели осуществлять в виде отклонений от заданного априорного значения параметров. Запишем уравнение модели (6) в следующем виде:

$$\dot{Z} = IZ + e(a_{\widetilde{m}} - a_m + a_m)^{\tau}Z + e(b_{\widetilde{m}} - b_m + b_m)^{\tau}\eta. \tag{11}$$

Здесь a_m, b_m — априорные значения параметров; векторы $a \triangleq a_{\widetilde{m}} - a_m$, $b \triangleq b_{\widetilde{m}} - b_m$ — настраиваемые параметры. Для краткости будем использовать следующие векторы для обозначения совокупностей величин: $d^T \triangleq |a^{\tau} \vdots b^{\tau}|$ — совокупность управляющих переменных; $m^{\tau} \triangleq |a_m^{\tau} \vdots b_m^{\tau}|$ — совокупность априорных значений настраиваемых параметров; $\widetilde{m}^{\tau} \triangleq |a_{\widetilde{m}}^{\tau} \vdots b_{\widetilde{m}}^{\tau}|$ — совокупность значений параметров модели; $G^{\tau} \triangleq |Z^{\tau} \vdots \eta^{\tau}|$ —

совокупность функций чувствительности или коэффициентов усиления параметрических управляющих входов. Таким образом,

$$\dot{Z} = IZ + e(d + m)^{\mathrm{T}} G. \tag{12}$$

Уравнение для сигнала ошибки (8) запишем так:

$$\dot{X} = A_o X + e(\widetilde{m} - m_0) G = A_o X + e(d + m - m_o)^{\mathrm{T}} G, \tag{13}$$

где $m_o^{\mathrm{T}} \triangleq |a_o^{\mathrm{T}} \vdots b_o^{\mathrm{T}}|$ — вектор истинных неизвестных параметров объекта.

Процесс настройки — функция $\widetilde{m}(t) = d(t) + m(t)$ $(0 \leqslant t \leqslant T)$, минимизирующая в интервале $[0, T]$ критерий $J(T)$, определяемый формулой (9),— содержит в себе информацию о значениях неизвестных параметров. Эту информацию можно использовать для уточнения неизвестных параметров. Для данного набора априорных значений параметров m реализуется соответствующий процесс настройки $\widetilde{m}(t)$, минимизирующий функционал $J(T)$, т. е.

$$\widetilde{m}(t) = \widetilde{m}(t, m). \tag{14}$$

На основе реализованного в текущем интервале $[0, T]$ процесса настройки $\widetilde{m}(t)$ можно построить апостериорную оценку $m(T)$ неизвестных параметров. Эта оценка будет некоторым функционалом от функции $\widetilde{m}(t)$:

$$m(T) = f(\widetilde{m}(t)), \quad 0 \leqslant t \leqslant T. \tag{15}$$

Идея предлагаемого метода регуляризации, названного динамической регуляризацией, заключается во введении «обратной связи» по апостериорной оценке, т. е. ставится задача реализовать процесс настройки, использующий в качестве априорного значения параметров апостериорную оценку, определяемую этим процессом настройки. Используя выражения (14) и (15), получим следующее соотношение, формулирующее поставленную задачу:

$$\widetilde{m}(t) = \widetilde{m}(t, f(\widetilde{m}(t))), \quad 0 \leqslant t \leqslant T. \tag{16}$$

Соотношение (16) должно выполняться равномерно по t, т. е. функционал f должен быть определен для функций $\widetilde{m}(t)$ в интервале $[0, T_{\max}]$, где $T_{\max}$ — максимально возможная длительность процесса настройки. Таким образом, априорные значения настраиваемых параметров являются функцией времени и представляют собой вводимую с помощью обратной связи текущую апостериорную оценку. Можно так сформулировать решаемую задачу регуляризации процесса настройки: равномерно по T минимизируется по $m(T)$ функционал

$$J_m(T) = \int_0^T F(\widetilde{m}(t) - m(T))\, dt,$$

где $\widetilde{m}(t)$ — функция, минимизирующая функционал (9). По окончании процесса настройки, когда сигнал ошибки $X(T)$ при T, большем некоторого T_1, станет равномерно близким нулю, а функционал J, следовательно, практически перестанет увеличиваться с ростом T при $T > T_1$, текущая апостериорная оценка $m(T)$ должна стать равномерно близкой к некоторому стационарному значению, которое представляет собой окончательную оценку настраиваемых параметров. В противном случае можно утверждать, что нам не удалось построить алгоритма корректного решения обратной задачи.

Получение апостериорной оценки параметров. Функцию $\widetilde{m}(t)$ в интервале $[0, T]$ можно рассматривать как совокупность осуществленных с помощью подстраивающейся модели косвенных измерений неизвестных параметров объекта. Эксперименты показывают, что во многих случаях можно обойтись довольно простой статистической моделью для этой совокупности косвенных измерений, даваемых функцией $\widetilde{m}(t)$.

Будем считать значения функции $\tilde{m}(t)$ независимыми измерениями некоторой неизвестной постоянной величины m_0. Ошибки измерений будем предполагать распределенными по нормальному закону. Необходимо получить оценку m измеряемой таким образом постоянной. Оценка будет зависеть от длины интервала наблюдения, т. е. $m = m(T)$. Минимизацию критерия качества оценки необходимо осуществить равномерно по T. Именно такая задача применительно к методу идентификации с помощью разомкнутой модели, т. е. путем решения текущей системы алгебраических уравнений, рассматривалась в [6].

В качестве оценки m_0 на интервале $[0, T]$ выбирается величина $m(T)$, минимизирующая функционал

$$J_m = \int_0^T \left(\tilde{m}(t) - m(T)\right)^2 dP, \tag{17}$$

где $P(t)$ — так называемая информационная функция [6], имеющая смысл относительного количества информации, накопленного системой обработки к моменту времени t. Получение корректной оценки возможно, если информационное количество Фишера [11]

$$\frac{\partial^2 J_m}{\partial m^2} = P(T) - P(0) \geqslant c > 0, \tag{18}$$

где c — параметр регуляризации — некоторая постоянная, имеющая смысл априорного относительного количества информации. Условие (18) утверждает, что c не может быть равным нулю. Неравенство (18) означает также, что функция $P(t)$ должна иметь «скачок» при $t=0$. Представим эту функцию в виде

$$P(t) = \mathbf{1}(t)\, c + \int_0^t \varphi(\tau)\, d\tau, \tag{19}$$

где $\varphi(\tau)$ — неотрицательная функция; $\mathbf{1}(t)$ — так называемая единичная функция

$$\mathbf{1}(t) = \begin{cases} 1 & t > 0; \\ 0 & t \leqslant 0. \end{cases} \tag{20}$$

Подставляя формулу (19) в выражение для функционала (17), находим

$$J_m(T) = \int_0^T \left(\tilde{m}(t) - m(T)\right)^2 \varphi(t)\, dt + c\,(m(T) - m(0))^2, \tag{21}$$

где $m(0)$ — априорное значение параметра. Выражение (21) имеет обычный вид наиболее часто используемого регуляризующего функционала [12] для рассматриваемой простейшей параметрической обратной задачи.

Дифференцируя (21) по $m(T)$ и приравнивая производную нулю, будем иметь

$$m(T) = \frac{\int_0^T \tilde{m}(t)\,\varphi(t)\, dt + c\,m(0)}{\int_0^T \varphi(t)\, dt + c}. \tag{22}$$

Необходимо равномерно минимизировать функционал J_m по T. Дифференцируя уравнение для $m(T)$ по T, получаем дифференциальное уравнение для функции m, обеспечивающей минимум функционала J_m для любого t:

$$\dot{m} = \frac{\varphi(t)}{\int_0^t \varphi(\tau)\, d\tau + c}\left(\tilde{m}(t) - m(t)\right). \tag{23}$$

Уравнение (23) — скалярный частный случай так называемого фильтра Калмана [10]. Весовая функция $\varphi(t)$ может быть представлена в виде

$$\varphi(t) = r(t)\,\varphi_p(t), \tag{24}$$

где $r(t)$ — величины весов отдельных «измерений», даваемых значениями функций $\tilde{m}(t)$, а $\varphi_p(t)$ — функция, характеризующая собой отнесенный к весу априорного значения вес апостериорной оценки, получаемой в интервале $[0, t]$. Выражение (24) представляет собой аналог формулы Байеса. Пусть $r(t) = \text{const} = 1$. Положим [6],

$$\varphi_p(t) = \frac{P(t)}{c}. \tag{25}$$

Подставляя (25) в (23) и учитывая (19), будем иметь следующее уравнение для простейшей текущей апостериорной оценки:

$$\dot{m} = \frac{1}{c}\left(\tilde{m} - m\right) = \frac{1}{c}d, \quad m|_{t=0} = m(0), \tag{26}$$

где $m(0)$ — априорное значение параметров, задаваемое в начале настройки. Вопрос о выборе параметра регуляризации c — веса начального априорного значения параметров — будет обсужден ниже.

Решение уравнения (26) определяет функционал в выражении (15). Подставляя это решение в уравнение (12), получим уравнение для ошибки системы X с учетом обратной связи в процессе оптимизации критерия (9), введенной описанной выше регуляризацией. Система уравнений, описывающая процесс настройки параметров модели, может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{X} = A_o X + e\,(c\dot{m} + m - m_0)^{\text{т}}\,G; \\ \dot{m} = \dfrac{1}{c}\,d\,(X, m), \end{cases} \tag{27}$$

где d — управляющие воздействия, зависящие от состояния системы. Система уравнений (27) иллюстрирует тот факт, что используемая динамическая регуляризация процесса настройки означает введение в контур настройки обратной связи по производной получаемых апостериорных оценок параметров.

Синтез оптимальных управляющих воздействий. В качестве управляющего воздействия естественно использовать $\dot{m}$. На управляющее воздействие наложим ограничение (как обычно бывает на практике)

$$|\dot{m}| \leqslant M. \tag{28}$$

Нетрудно видеть, что в этом случае для оптимизации критерия (9) достаточно одного уравнения системы (27). Синтез оптимальных управляющих воздействий для полученной структуры настраиваемых параметров можно осуществить на основе прямого метода Ляпунова [9], принципа максимума [13, 14] или метода динамического программирования [7, 8]. В данной работе синтез оптимальных управляющих воздействий осуществляется на основе метода динамического программирования, формализм которого излагается весьма кратко, так как он хорошо освещен в литературе [7, 8]. Введем функцию Беллмана

$$S(X) \min_{\dot{m}} \int_t^{\infty} F(X)\,d\tau \tag{29}$$

и запишем для нее уравнение Беллмана

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 0 = -\min_{\dot{m}}\left\{\frac{\partial S^{\text{т}}}{\partial X}\,[A_o X + e\,(c\dot{m} + m - m_o)\,G] + F(X)\right\}. \tag{30}$$

Нетрудно видеть, что минимум выражения в фигурных скобках достигается при

$$\dot{m} = -M\,\mathrm{sign}\left(\frac{\partial S}{\partial X_n} G\right), \tag{31}$$

и, следовательно, $\tilde{m}(t)$ — параметры модели — изменяются по закону

$$\tilde{m}(t) = M\left[c\,\mathrm{sign}\left(\frac{\partial S}{\partial X_n} G\right) + \int_0^t \mathrm{sign}\left(\frac{\partial S}{\partial X_n} G\right) d\tau + m(0)\right],$$

где $\frac{\partial S}{\partial x_n}$ — частная производная функции Беллмана по последней координате вектора состояний системы. Уравнение для вектора $\frac{\partial S}{\partial X}$ будет иметь вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial S}{\partial X}\right) + A_m^{\mathrm{T}} \frac{\partial S}{\partial X} = -\frac{\partial F}{\partial X}. \tag{32}$$

Уравнение (32) получено дифференцированием уравнения (30) по X после подстановки в него оптимального управления (31) и вектора G. Функциональная схема системы представлена на рис. 1. Предполагая интервал настройки бесконечным $[t_0, \infty]$, получаем, что начальные условия для вектора $\frac{\partial S}{\partial X}\Big|_{t=0} = 0$, так как $X(\infty) = 0$ [8].

Выбор параметра регуляризации. Известно, что использование релейных управляющих воздействий приводит к автоколебаниям или скользящим режимам из-за неидеальности реле или неточной реализации управляющих функций. В рассматриваемой системе эти явления допустимы, так как оценки m неизвестных параметров m_0, определяющие вместе с вектором X состояние системы (27), представляют собой результат сглаживания процесса настройки $\tilde{m}$. Допустимость автоколебаний расширяет область устойчивости по неизвестным параметрам объекта и накладывает менее жесткие ограничения на выбираемые параметры модели. Настройка прекращается в случае, когда оценка параметров становится после некоторого T_1 равномерно близкой к некоторому стационарному значению, ошибка X близка к нулю, а функция $J(t)$ перестает расти. Эти условия вытекают из самой постановки задачи, и они могут быть выполнены, несмотря на наличие автоколебаний.

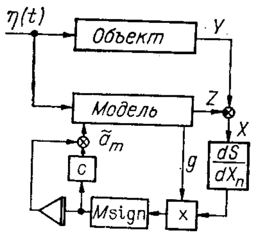

Рис. 1.

Динамические свойства оценки параметров зависят от величины параметра регуляризации c. Диапазон его возможных значений может быть определен из следующих соображений. Пусть в системе существует режим автоколебаний. Равномерная близость нулю ошибки X и отклонения оценки обеспечиваются, если частота автоколебаний $f_{\text{а.к}}$ будет больше или равна частоте среза объекта и больше частоты среза регуляризующего фильтра $f_{\text{р.ф}}$. Учитывая, что $f_{\text{р.ф}} \approx \frac{1}{c}$, можно утверждать необходимость условия $c \geqslant \frac{1}{f_{\text{ср}}}$. С другой стороны, желательно, чтобы быстродействие регуляризующего фильтра было не хуже, чем быстродействие системы, определяемой в данной случае максимальной собственной частотой f_c для колебательного объекта или максимальной постоянной времени $T_{o\max}$ для апериодического. Таким образом, желательно также, чтобы параметр регуляризации c удовлетворял условию $c \leqslant \frac{1}{f_c}$ или $c \leqslant T_{o\max}$.

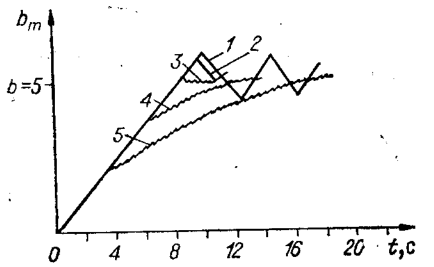

Рис. 2.

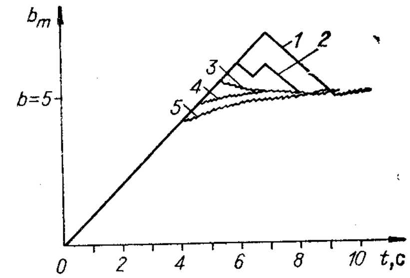

Рис. 3.

В отсутствие помех в системе параметр c лучше выбирать меньше, т. е. $c \geqslant \frac{1}{f_{\text{ср}}}$, что обеспечит более высокое быстродействие при получении оценок. Если же в сигналах имеются помехи в полосе пропускания объекта, то параметр регуляризации следует выбирать, учитывая нижнюю частоту $f_{\text{п}}$ спектра помех, чтобы обеспечить требуемое качество фильтрации последних $\left(c \approx \frac{1}{f_{\text{п}}}\right)$. Естественно, это приводит к соответствующей потере быстродействия.

Моделирование. Для проверки предложенного алгоритма настройки параметров и полученных оценок для параметра регуляризации было проведено моделирование системы идентификации объекта второго порядка с одним настраиваемым коэффициентом, которая описывается уравнениями с линейной управляющей функцией:

$$\begin{gathered}\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_0 y = b\eta; \\ \ddot{z} + a_{1\widetilde{m}}\dot{z} + a_{0\widetilde{m}} z = b_{\widetilde{m}}\eta; \\ b_{\widetilde{m}} = c\dot{b}_m + \int_0^t \dot{b}_m d\tau + b_m(0); \\ \dot{b}_m = M\,\mathrm{sign}\,(\eta\,(x_1 + e x_2)),\end{gathered} \tag{33}$$

где $x_1 = y - z$, $x_2 = \dot{x}_1$.

Результаты моделирования такой системы для случая трех настраиваемых параметров приведены в [14]. На рис. 2 показаны переходные реакции оценки b_m для различных параметров регуляризации $c = \{2;\ 1;\ 0{,}5;\ 0{,}25\}$, которым соответствуют кривые *1*, *2*, *3*, *4*. Остальные параметры приняты следующие: $a_0 = a_{0\widetilde{m}} = 2{,}5$, $a_1 = a_{1\widetilde{m}} = 5$, $M=1$, $b=1$, $l=0{,}2$. Из этого рисунка видно, что близкой к оптимальной будет переходная реакция при $c=0{,}5$ (кривая *3*). Увеличение параметра c (кривые *1*, *2*) приводит к затягиванию процесса получения оценки. Эмпирически было найдено, что оценки будут близкими к оптимальным, если c выбрать согласно выражению

$$c \approx \frac{T_0}{2 \div 3} \approx \frac{1}{2 \div 3}\frac{a_1}{a_0}.$$

На рис. 3 приведены переходные реакции оценки при фиксированных значениях параметра регуляризации $c=1$ и величины $M=1$ и различных значениях постоянной времени объекта $T_0 \approx \frac{a_1}{a_0} = \{10;\ 5;\ 2;\ 1;\ 0{,}5\}$, которым соответствуют кривые *1*, *2*, *3*, *4*, *5*. Из этого рисунка следует, что для получения необходимого быстродействия и качества переходного процесса получаемой оценки целесообразно выбирать параметр c в середине диапазона наиболее вероятного изменения параметров объекта.

Выводы

Введение динамической регуляризации позволило синтезировать структуру контуров настройки параметров модели, которая обеспечивает равномерную оптимальность и высокое быстродействие решения задачи идентификации в реальном времени.

Полученные оптимальные управляющие воздействия с помощью уравнения Беллмана дают возможность строить релейные алгоритмы автоматической настройки параметров, обеспечивающие высокое быстродействие получения оценок и простую техническую реализацию после соответствующей аппроксимации управляющих функций.

Моделирование системы идентификации объекта второго порядка подтвердило правильность качественных оценок для оптимального параметра регуляризации.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Т. Леондес, М. Марголис. О теории самонастраивающейся системы регулирования; метод обучающейся модели.— Труды I конгресса ИФАК. М., «Наука», 1961.
2. Р. С. Рутман, Н. В. Кокотович. Чувствительность системы автоматического управления (обзор).— Автоматика и телемеханика, 1965, № 4.
3. В. И. Костюк. Беспоисковые градиентные самонастраивающиеся системы. Киев, «Техника», 1969.
4. С. Д. Земляков, В. Ю. Рутковский. Обобщенные алгоритмы адаптации одного класса СНС с моделью.— Автоматика и телемеханика, 1967, № 6.
5. B. Shackloth. Design of Model Reference Control Systems Using a Lyapunov Synthesis Tecknique.— Pros. Inst. Electr. Engrs., 1967, 114, № 2.
6. А. О. Егоршин, В. П. Будянов. Получение корректных текущих оценок параметров линейных объектов.— В сб. «Оптимальные и самонастраивающиеся системы». Новосибирск, ИАЭ СО АН СССР, 1971.
7. Р. Беллман. Процессы регулирования с адаптацией. М., «Наука», 1964.
8. Ю. Ту. Современная теория управления. М., «Машиностроение», 1971.
9. И. Г. Малкин. Теория устойчивости движения. М., «Наука», 1966.
10. Р. Ли. Оптимальные оценки, определение характеристик и управления. М., «Наука», 1966.
11. Д. Дюге. Теоретическая и прикладная статистика. М., «Наука», 1972.
12. А. Н. Тихонов. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации.— Докл. АН СССР, 1963, т. 151, № 3.
13. В. М. Александров, В. А. Иванов. Синтез алгоритмов настройки параметров в адаптивных моделях на основе теории оптимальных процессов.— Автометрия, 1963, № 4.
14. Л. С. Понтрягин, Р. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1961.

Поступила в редакцию 18 мая 1973 г.