Н.В. Кван, Н.П. Семичевская

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

In article algorithms of discrete management by nonlinear objects with the is obvious-implicit reference model which working capacity is confirmed by imitating modelling are offered.

Введение

Моделирование и управление гибридными системами является одним из наиболее активно развиваемых направлений в современной теории автоматического управления. К теоретическим проблемам, связанным с изучением гибридных систем, относят: исследование устойчивости импульсных систем переменной структуры; построение инвариантных множеств для гибридных систем с ограниченными возмущениями; исследование свойств управляемости, локальной управляемости и наблюдаемости систем с переменной структурой; конструирование асимптотических наблюдателей переменной структуры; оптимальную стабилизацию; оптимальное программное управление и задачи синтеза управлений в гибридных системах.

Но несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последнее время в разработке общих подходов к исследованию гибридных систем и систем с дискретным пространством состояний, интеграция соответствующих теорий и создание универсальной модели для таких систем требует значительных усилий и остается актуальной. При всех успехах в развитии теории ощущается недостаток практических инструментов для разработки систем управления в гибридных системах.

Под гибридной системой управления будем понимать такую систему, в которой объект управления функционирует непрерывно во времени, а измерение выходных координат и подача управляющих воздействий происходят в дискретные моменты. Присутствие в системе управления цифрового регулятора приводит к необходимости использовать в ней цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) [1].

К преимуществам цифровых регуляторов можно отнести их большую гибкость по сравнению с аналоговыми, так как программа цифрового регулятора может быть изменена в соответствии с требованиями проектировщиков или приспособлена к характеристикам объекта управления без каких-либо изменений в аппаратном обеспечении.

Построение дискретных законов управления для непрерывных объектов обеспечивается преимущественно одним из двух способов:

1) для исследуемой системы синтезируется непрерывный закон управления, который затем заменяется дискретной аппроксимацией в соответствии с выбранной схемой численного интегрирования;

2) дискретный закон управления находится по дискретной модели объекта, однако ее невозможно построить, например, в случае, когда внешнее возмущение приложено к непрерывным элементам системы.

Одним из эффективных методов построения и анализа гибридных и дискретных систем управления (разработан М.Н. Боголюбовым и Ю.А. Митропольским) является метод непрерывных моделей (метод усреднения), позволяющий использовать для решения указанных задач теорию непрерывных систем [2].

Суть этого метода состоит в следующем: во-первых, записываются уравнения математической модели исходной системы, включающие дифференциальные уравнения динамики объекта и разностные уравнения искомого алгоритма управления; во-вторых, осуществляется построение непрерывного алгоритма управления одним из известных методов; в-третьих, после того как определены структура и параметры алгоритма управления, следует вернуться в дискретное время – записать соответствующий дискретный алгоритм на этапе имитационного моделирования и выбрать шаг дискретизации. Шаг дискретизации не должен «испортить» непрерывную систему, в частности сохранить ее асимптотические свойства – такие как устойчивость, диссипативность.

К недостаткам данного метода можно отнести относительно малый шаг дискретизации алгоритмов управления [1].

Гибридная система робастного управления нелинейным объектом с явно-неявной эталонной моделью

Динамика нелинейного скалярного объекта управления в пространстве состояний, действующего в условиях априорной параметрической неопределенности, описывается системой дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме:

$$\begin{gathered}\frac{dx(t)}{dt}=A_{\xi}(x,t)+bu(t)+f_{\xi}(t),\\ y(t)=L^{T}x(t)=x(t),\quad z(t)=g^{T}y,\quad \xi\in\Xi,\end{gathered}\tag{1}$$

где $x^T(t) = [x_1(t), \ldots, x_n(t)]$ – вектор состояния; $y(t)$ – вектор выхода; $z(t)$ – обобщенный выход; $L^T = E_n$ – матрица выхода; $u(t)$ – скалярное управление; $f_{\xi}^{T}=[0,\ldots,0,f_n(t)]$ – постоянно действующее возмущение, удовлетворяющее условию $|f_n(t)|\le f_0^2=const;\ b^T=[0,\ldots,0,1]$ – вектор при управляющем воздействии; ξ – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству Ξ. Предполагается, что нелинейная векторная функция $A_{\xi}(x,t)$ представима в виде:

$$A_{\xi}(x,t)=\left(A_{\xi}+b\sigma_{\xi}^{T}(x)\right)x(t),\tag{2}$$

где $A_{\xi} = A$ – стационарная матрица, имеющая следующее представление:

$$A=A_M+b\chi_0^T,\tag{3}$$

при этом A_M – желаемая матрица; χ_0 – некоторый стационарный вектор; $\sigma^T(x)=(\sigma_1(x_{k_1}(t)),\ldots,\sigma_n(x_{k_n}(t)))$ – векторная функция.

Требуемая динамика быстрой явно-неявной эталонной модели (БЭМ) задана системой уравнений

$$\frac{dz_M(t)}{dt}=a_0z_M(t)+a_0r(t),\quad y_M(t)=z_M(t),\tag{4}$$

где $x_M(t)$, $z_M(t)$, $r(t)\in R$ – соответственно эталонная переменная состояния, обобщенный выход эталона и задающее воздействие; $a_0 = const > 0$ – достаточно большое число.

Робастный регулятор системы управления синтезирован на основе критерия гиперустойчивости в виде [3]:

$$u(t)=(\gamma_1|r(t)|+\sum_{i=1}^{n}\gamma_{2i}|x_i(t)|+\sum_{i=1}^{n}\gamma_{3i}(|x_{j_i}(t)||x_i(t)|+\gamma_4)\nu(t).\tag{5}$$

Требуется осуществить моделирование гибридной (непрерывно- дискретной) системы для соответствующей системы (1) – (5), с сохранением свойств гиперустойчивости и диссипативности в заданном классе Ξ.

В моделируемой системе непрерывная часть должна быть представлена объектом управления, а дискретная часть – дискретным аналогом БЭМ и дискретным робастным регулятором.

Уравнения, описывающие дискретное представление БЭМ и робастного регулятора, соответственно имеют вид:

$$z_M(t_{k+1}) = p_M z_M(t_k) + p_M r(t_k), \tag{6}$$

$$u(t_k) = (\gamma_1 |r(t_k)| + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{2i} |x_i(t_k)| + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{3i}(|x_{j_i}(t_k)||x_i(t)| + \gamma_4)\nu(t_k$$

,

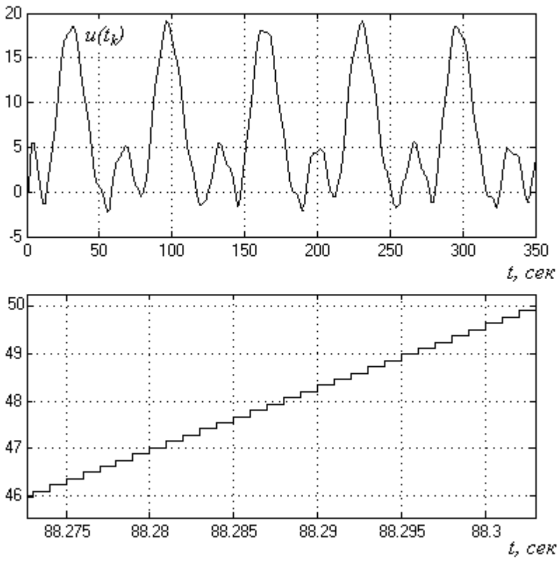

Рис. 1. Динамика дискретного управляющего воздействия.

где p_M – числовой параметр дискретизированной БЭМ; $\gamma_i = const > 0$; $r(t_k)$ – дискретные значения задающего воздействия, взятые в отдельные промежутки времени t_k; t_k – дискретный аналог времени; k – номер шага; $\gamma_t = const > 0$ – шаг дискретизации алгоритма, который подлежит выбору на этапе имитационного моделирования.

Имитационное моделирование гибридной системы управления осуществлялось в пакете прикладных программ MATLAB/Simulink.

На этапе имитационного моделирования был подобран шаг дискретизации для модели гибридной системы управления с БЭМ γ_t =0.001.

Гибридная система робастного управления нелинейным объектом с неполным измерением состояния и БЭМ

Динамика непрерывной робастной системы управления нелинейным скалярным объектом с неполным измерением вектора состояния, желаемое поведение которого задается БЭМ, описывается уравнениями

$$\begin{aligned} &\frac{dx(t)}{dt} = A_\xi(x,t) + bu(t) + f_\xi(t), \\ &y(t) = L^T x(t) = x_1(t), \quad z(t) = g^T y, \quad \xi \in \Xi, \end{aligned} \tag{8}$$

где $x^T(t) = [x_1(t), \ldots, x_n(t)]$ – вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ – скалярные управление и выход; $f_\xi^{\,T}(t) = [0, \ldots, 0, f_n(t)]$ – возмущение, такое, что $|f_n(t)| \le f_0^2 = const$; $b^T = [0, \ldots, 0, 1]$ – матрица управления; $L^T = [1,0,\ldots,0]$ – матрица выхода; ξ – набор неизвестных параметров, принадлежащих известному множеству Ξ. Предполагается, что:

$$\begin{aligned} &A_\xi(x,t) = A(\xi)x(t) + b\delta_\xi(x_1(t)), \\ &A(\xi) = A = A_M + b\chi_0^T(\xi), \ \ \chi_0(\xi) = \chi_0, \\ &\delta_\xi(x_1(t)) = \delta(y(t)) = |x_1(t)|^{\alpha(\xi)} sign(x_1(t)), \ \ \alpha(\xi) = \alpha, \ \ \xi \in \Xi, \end{aligned} \tag{9}$$

где A_M – желаемая (гурвицева) матрица; A; χ_0 и α – соответственно некоторые стационарные матрица, вектор и скаляр.

Динамика БЭМ задана уравнениями

$$\frac{dx_M(t)}{dt} = A_M x_M(t) + br(t),\ v_M(t) = y_M(t) = g^T x_M(t), \tag{10}$$

где $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния эталона; $\nu_M(t) \in R$ – обобщенный выход эталона; g^T – вектор свертки.

Оценку вектора $x(t)$ будем проводить по наблюдениям за текущим изменением выхода объекта $y(t)$, используя наблюдатель полного порядка [4].

При этом математическое описание системы наблюдения будет иметь вид

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A_* \bar{x}(t) + bu(t) + Ny(t),\ \bar{y}(t) = \bar{x}(t),$$
$$\bar{\nu}(t) = \bar{g}^T \bar{x}(t), \tag{11}$$

где $\bar{x}(t) \in R^n$ – вектор состояния наблюдателя; $\bar{\nu}(t) \in R$ – обобщенный выход наблюдателя; $A_* = (A_M - NL^T)$ – матрица состояния наблюдателя.

Заменив вектор состояния $x(t)$ его оценкой $\bar{x}(t)$, получим технически реализуемые уравнения обобщенного выхода и видоизмененного управления

$$\nu(t) \cong g^T \bar{e}(t) = g^T(x_M(t) - \bar{x}(t)),$$
$$\mu(t) \cong r(t) - u(t) - \chi_0^T \bar{x}(t) - \delta(\bar{y}(t)) - f_n(t). \tag{12}$$

Робастный регулятор системы управления синтезирован на основе критерия гиперустойчивости в виде [4]

$$u(t) = (\gamma_1 |r(t)| + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{2i} |\bar{x}_i| + \gamma_3(|\bar{x}_1|^{\alpha+1} + 1) + \gamma_4)\nu(t). \tag{13}$$

Требуется осуществить моделирование гибридной (непрерывно- дискретной) системы для соответствующей системы (8) – (13) с сохранением свойств гиперустойчивости и диссипативности в заданном классе Ξ.

$$z_M(t_{k+1}) = p_M z_M(t_k) + p_M r(t_k)$$
$$\hat{x}(t_{k+1}) = P_M \cdot \hat{x}(t_k) + Q_M \cdot \mu(t_k) + R \cdot (y(t_k) - \hat{y}(t_k)),$$
$$\hat{y}(t_k) = L^T \hat{x}(t_k),\ \hat{z}(t_k) = g^T \hat{y}(t_k),$$
$$u(t_k) = (\gamma_1 |r(t_k)| + \sum_{i=1}^{n} \gamma_{2i} |\bar{x}_i(t_k)| + \gamma_3(|\bar{x}_1(t_k)|^{\alpha+1} + 1) + \gamma_4)\nu(t_k), \tag{14}$$

где p_M – числовой параметр дискретизированной БЭМ; $\gamma_i = const > 0$; $r(t_k)$ – дискретные значения задающего воздействия, взятые в отдельные промежутки времени t_k; t_k – дискретный аналог времени, k – номер шага; $\gamma_t = const > 0$ – шаг дискретизации алгоритма, который подлежит выбору на этапе имитационного моделирования.

Имитационное моделирование гибридной системы управления осуществлялось в пакете MATLAB/Simulink.

На этапе имитационного моделирования был подобран шаг дискретизации для модели гибридной системы управления с ЯНЭМ γ_t =0.05.

Динамика дискретного регулятора гибридной системы управления представлена на рис. 2.

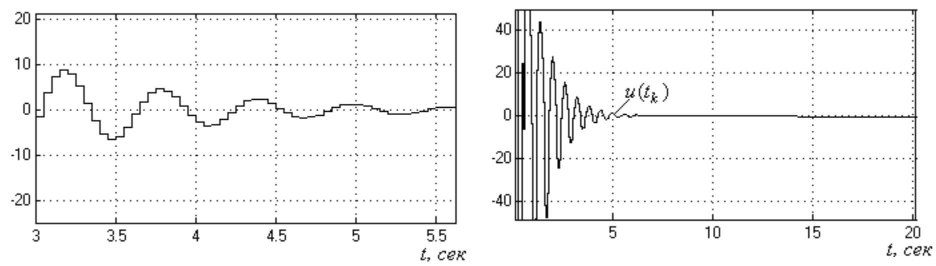

Рис. 2. Динамика дискретного управления системы.

1. Еремин, Е.Л., Еремина, В.В., Семичевская, Н.П., Шевко, Д.Г. Алгоритмы и S-модели гибридных систем адаптивного управления. – Благовещенск, 2005. – 205 с.

2. Боголюбов, Н.Н., Митропольский, Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974. – 407 с.

3. Кван, Н.В. Синтез робастной системы управления нелинейным объектом на основе критерия гиперустойчивости // Материалы VI Всесибирского конгресса женщин-математиков. – Красноярск. 2010. – С.178-182.

4. Еремин, Е.Л., Кван, Н.В., Семичевская, Н.П. Робастное управление нелинейными объектами с наблюдателем полного порядка и быстродействующей эталонной моделью // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 5. – С. 2-6.