УДК 681.5

С.В. Шидловский, В.И. Сырямкин, В.С. Шидловский

Синтез реконфигурируемых систем автоматического управления

Обсуждается применение перестраиваемых вычислительных сред для систем автоматического управления. Предложены перестраиваемые вычислительные среды для формирования высококачественного управляющего воздействия. Приводятся примеры расчета.
Ключевые слова: реконфигурируемость, системы автоматического управления, быстродействие, инвариантность, надежность.

Одними из эффективных систем для управления технологическими процессами в условиях неполной информации о параметрах объекта могут оказаться реконфигурируемые системы. Основная идея построения таких систем состоит в использовании переключающихся законов управления, соответствующих различным структурам замкнутой системы. Переключение происходит на основе текущей информации о состоянии объекта управления в соответствии с выбранной функцией переключения.

Использование перестраиваемого закона управления позволяет снизить чувствительность системы к параметрическим и координатным возмущениям, а также добиться инвариантности по отношению к заданному воздействию [1]. Это связано с тем, что «разрывной» характер управления сближает реконфигурируемые системы с системами, имеющими бесконечный коэффициент усиления (в то же время само управление в реконфигурируемых системах остается ограниченным) [2].

В данной статье обсуждается реализация регулятора с использованием перестраиваемой вычислительной среды для выбора наилучшего закона управления из заданного класса и оптимального использования логических структур в задачах регулирования, что позволяет наделить всю систему новыми динамическими свойствами.

1. Постановка задачи.

Рассматривается система, в которой требуется обеспечить управление выходной координатой на основании информации только о знаке ошибки регулирования и знаке ее производной, причем управляющее воздействие должно формироваться перестраиваемой вычислительной средой (ПВС) из двоичного множества {0, 1}.

Ключевой составляющей рассматриваемого устройства управления является ПВС. Под ПВС будем понимать набор (Z^k, V, Q), где Z^k – множество k-мерных векторов с целыми координатами, задающих узлы k-мерной целочисленной решетки [3]; $V = \{\upsilon_1, \upsilon_2, \ldots, \upsilon_{(m+p)}\}$ – перестраиваемый автомат, помещенный в каждый узел решетки, у которого $n + p$ входных каналов, $m + p$ выходных каналов (m основных, p боковых)

$$\begin{cases} \upsilon_1 = \bigvee\limits_{i=1}^{R} a_i f_i^1\left(x_1,\ldots,x_{(n+p)}\right), \\ \vdots \\ \upsilon_{(m+p)} = \bigvee\limits_{i=1}^{R} a_i f_i^{(m+p)}\left(x_1,\ldots,x_{(n+p)}\right). \end{cases}$$

Здесь $a_i = \bigwedge\limits_{j=1}^{t} z_j^{\sigma_{i,j}}$, где $\sigma_{i,j} \in \{0,1\}$ ($j = 1,\ldots,t$), $z_j^0 = \bar{z}_j$, $z_j^1 = z_j$, $t = \log_2 R$; f_i^j – i-я функция алгебры логики (i = 1, 2, ..., R), реализуемая на j-м выходе автомата (j = 1, 2, ..., $m + p$); $x_1,\ldots,x_{(n+p)}$ – информационные входы; $z_1,\ldots,z_t$ – дополнительные входы, используемые для настройки автомата на требуемую структуру; $Q = \{\upsilon_1, \upsilon_2, \ldots, \upsilon_p\}$, где $\upsilon_i \in Z^k$, i = 1, ..., p, – шаблон соседства: каждый вектор $\upsilon_i \in V$ для автомата с координатами υ определяет автомат с координатами $\upsilon + \upsilon_i$, с i-м боковым выходным каналом которого соединен i-й боковой вход автомата в узле υ, i = 1, ..., p.

2. Синтез системы управления. Для решения поставленной задачи рассмотрим систему, представленную на рис. 1.

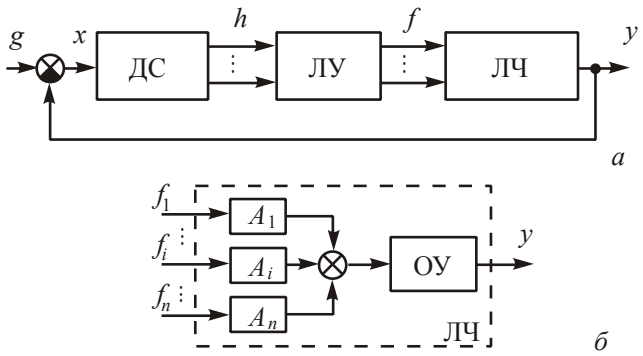

Рис. 1. Структурная схема: ЛЧ – линейная часть; ЛУ – логическое устройство (перестраиваемая вычислительная среда); ДС – детектор состояния; ОУ – объект управления; A_i – заданный класс динамических корректирующих звеньев (i = 1, 2, ..., n)

Пусть передаточная функция ОУ представлена в виде

$$W_{об}(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{k}{Tp+1}, \tag{1}$$

где T – постоянная времени объекта управления. Примерами реальных объектов с таким динамическим характером могут быть взаимное расположение самолетов, угол поворота электропривода и т.п. [4].

Динамику рассматриваемого класса систем (см. рис. 1) относительно ошибки регулирования, когда n = 2, можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= x_2(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -a_2 x_2(t) - a_1 \Psi, \end{aligned}\right\} \; a_i > 0, (i = 1,2), \tag{2}$$

$$\Psi = \alpha g_1 + \beta g_2, \quad g_j \in \{0,1\}, (j = 1,2),$$

где x_1, x_2 – фазовые координаты; a_i, α, β – постоянные коэффициенты; Ψ – разрывной коэффициент.

Величины g_j могут принимать значения либо «0», либо «1», и формируются ПВС (см. рис. 4) на основе информации о знаке $x_1(t)$ и о знаке линейной комбинации $x_1(t)$ и $x_2(t)$ по формулам:

– при $h_2 h_4 = 0$ (см. рис. 4, *а*)

$$\begin{cases} g_1 = h_1 h_3 \vee h_2 h_4, \\ g_2 = h_2 h_3 \vee h_1 h_4; \end{cases}$$

– при $h_2 h_4 = 1$ (см. рис. 4, *б*)

$$\begin{cases} g_1 = h_2 h_3 \vee h_1 h_4, \\ g_2 = h_1 h_3 \vee h_2 h_4. \end{cases}$$

Здесь $\bar{h}_1 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(x_1) - 1)$, $\bar{h}_2 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(x_1) + 1)$;

$$\bar{h}_3 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(s) - 1), \quad \bar{h}_4 = \mathrm{sgn}(\mathrm{sgn}(s) + 1);$$

$$s = x_2(t) + c\, x_1(t), \tag{3}$$

где h_k (k = 1, 2, ..., 4) – входные переменные ПВС; s – прямая переключения; sgn(A) – функция от аргумента A, принимающая следующие значения:

$$\mathrm{sgn}(A) = \begin{cases} 1 \text{ при } A > 0, \\ 0 \text{ при } A = 0, \\ -1 \text{ при } A < 0. \end{cases}$$

Для удобства дальнейших выводов величину Ψ можно представить в виде

$$\Psi = \begin{cases} \alpha \text{ при } s > 0, x_1 > 0, \\ \beta \text{ при } s < 0. \end{cases} \tag{4}$$

Поскольку на ЛЧ значение ошибки регулирования не поступает, а подается только сигнал известной формы, который можно представить как последовательность единичных скачков, то решение системы (2) при фиксированной структуре имеет вид

$$x_1(\Psi,t)=x_1(\Psi,0)+$$
$$+\frac{-a_1\Psi t-\exp(-a_2t)x_2(\Psi,0)+x_2(\Psi,0)}{a_2}+\frac{(-\exp(-a_2t)\Psi+\Psi)a_1}{a_2^2}; \quad (5)$$

$$x_2(\Psi,t)=\exp(-a_2t)x_2(\Psi,0)+\frac{(\exp(-a_2t)\Psi-\Psi)a_1}{a_2}. \quad (6)$$

Используя полученные решения (5) и (6), можно построить фазовые портреты в фиксированных структурах рассматриваемого класса систем при $\Psi=\beta$, $\beta<0$ (рис. 2, *а*) и $\Psi=\alpha$, $\alpha>0$ (рис. 2, *б*).

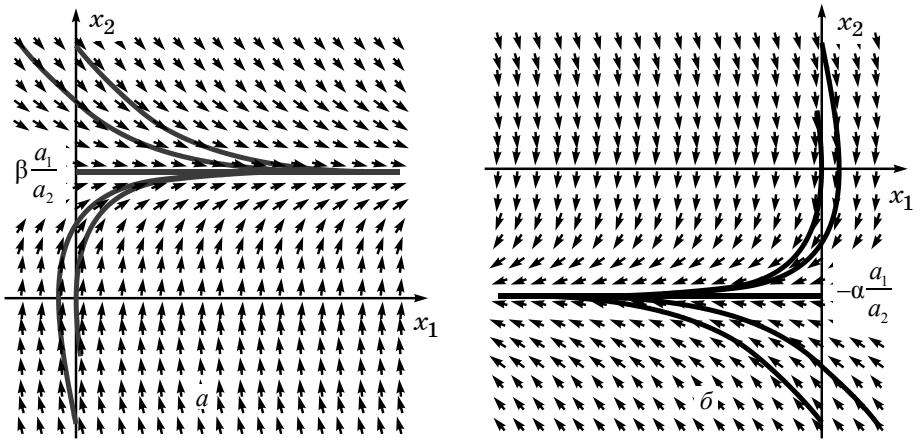

Рис. 2. Фазовый портрет в фиксированных структурах

В результате «сшивания» части фазовых траекторий по линии разрыва (3), а части – по $x_1=0$ получаем геометрическую интерпретацию правила перестройки структуры в процессе функционирования системы (рис. 3), выраженного в формальной записи g_j.

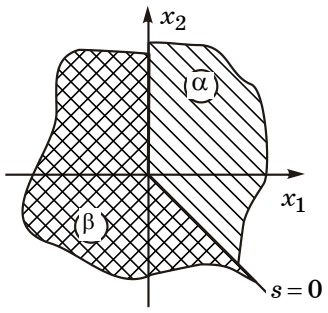

Рис. 3. Геометрическая интерпретация правила перестройки структуры в фазовом пространстве

При такой организации фазовых траекторий в фиксированных структурах и описании системы выражениями (1)–(3) в ней выполняется условие возникновения скользящего режима, т.е. найдется такое конечное значение времени, начиная с которого S станет гиперплоскостью скольжения.

3. Синтез вычислительной среды. Построение ПВС осуществляется на основе одного из существующих или специально разрабатываемого для определенных целей перестраиваемого автомата. Рассматриваемый автомат (M-автомат) [5, 6] описывается системой формул:

$$\begin{cases} f_1=y_1(\bar z_1z_2\vee z_3)(z_1\vee\bar z_2\vee\bar z_3)\vee(y_1\vee z_1\vee z_2)x\bar z_3\vee y_2\bar z_1z_2z_3,\\ f_2=(y_1z_1\vee x\bar z_1z_3)z_2(z_1\vee\bar z_2\vee\bar z_3)\vee\\ \quad\vee[y_1\vee(\bar z_1\vee z_2)(z_1\vee\bar z_2\vee\bar z_3)](y_1\vee\bar z_1z_2z_3). \end{cases}$$

Здесь f_1, f_2 – выходы автомата; y_1, y_2 – информационные входы; x – вход; z_1, z_2, z_3 – входы настройки.

Вычислительная среда представляет собой матрицу размером $m\times n$ ($m=6$ – количество строк, $n=7$ – количество столбцов), образованную коллективом вычислителей на основе M-автоматов (рис. 4). На рис. 5 для каждого M-автомата ПВС в нижнем левом углу приведен код настройки автомата на текущее автоматное отображение. Так, для ав-

томата с координатами (1,1) приведен код 001, что соответствует $z_1 = 0$, $z_2 = 0$, $z_3 = 1$. ПВС построена из таких требований, что на нее должна одновременно поступать требуемая информация о параметрах процесса (h_k, k =1, 2, ..., 4), а также в зависимости от состояния всей системы управления ПВС должна обеспечить изменение алгоритма управления в процессе работы системы (без ее остановки – динамическая реконфигурация).

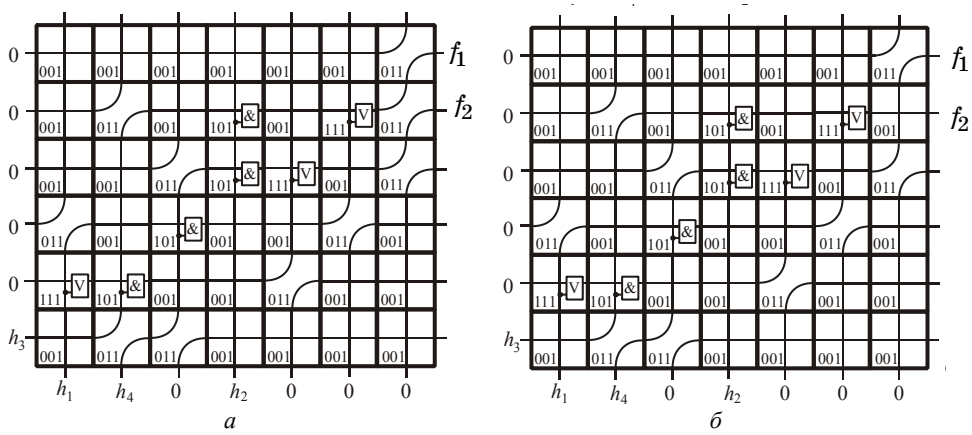

Рис. 4. Реконфигурируемая вычислительная среда на базе M-автомата

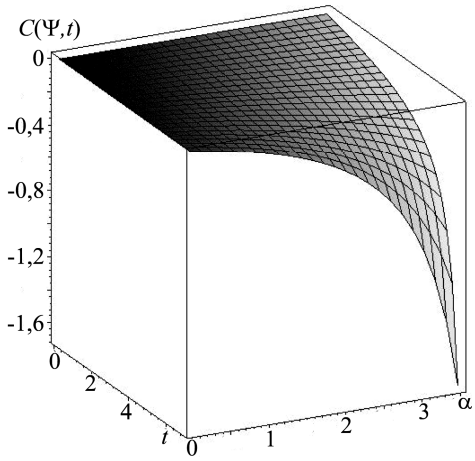

Рис. 5. График зависимости $c(\Psi,\ t)$

Динамическая реконфигурация алгоритма управления обеспечивается путем подачи на настроечные входы M-автомата с координатами (2,7) в матрице вычислительной среды кода $z_1 = 0, z_2 = \overline{h_2 h_4}, z_3 = 1$.

4. Пример расчета. Пусть значение постоянной времени в выражении (1) T = 97,7 с, коэффициент передачи k = 1. Тогда $a_1 = a_2 = 1/97{,}7$. При нулевых начальных условиях на вход системы поступает задающее воздействие g = 1. Необходимо, чтобы при c = 0,7 в момент времени $t_{\text{пер}}$ = 7 с в системе начался скользящий режим.

При начальных условиях (x_1 = 1, x_2 = 0, $\Psi = \alpha$) выбираем такое α, чтобы система за промежуток времени 7 с попала на гиперплоскость S, расположенную под углом tg(c) к оси абсцисс. Для этого строим зависимость $c(\Psi,t)|_{\Psi=\alpha}$, $t \in [0...7]$ по формуле

$$c(\Psi,t) = \frac{x_2(t)}{x_1(t)} = \frac{-(\exp(-a_2 t)a_2 x_2(\Psi,0) + [\exp(-a_2 t)\Psi - \Psi]a_1)a_2}{-x_1(\Psi,0)a_2^2 + [a_1\Psi t + \exp(-a_2 t)x_2(\Psi,0) - x_2(\Psi,0)]a_2 + [\exp(-a_2 t)\Psi - \Psi]a_1}$$

Из полученной поверхности (рис. 5) определяем, что при c = 0,7 и $t_{\text{пер}}$ = 7 величина α = 2,91.

Из формулы (6) определим $x_2(\Psi,\ t_{\text{пер}})|_{\Psi=\alpha} = -0{,}201$. Фиксируя значение $x_2(\Psi,\ 0)|_{\Psi=\beta} = = x_2(\Psi,\ t_{\text{пер}})|_{\Psi=\alpha}$, определяем величину β:

$$\beta < \frac{(c - a_2)x_2(\Psi,\ 0)|_{\Psi=\beta}}{a_1}, \text{ т.е. } \beta < -13{,}55.$$

Из полученного неравенства выбираем значение β = –13,6.

Таким образом, для того чтобы в рассматриваемой системе возник скользящий режим в момент времени $t_{\text{пер}}$ = 7 с при c= 0,7, разрывные коэффициенты должны удовлетворять следующим требованиям: α = 2,91, β = –13,6. Результаты моделирования работы рассчитанной системы представлены на рис. 6.

Из результатов моделирования видно, что в рассматриваемой системе удалось получить скользящий режим при первом попадании на гиперплоскость S, тем самым обеспечить апериодический характер движения регулируемой величины и достичь за фикси-

рованное время (заданное на этапе расчета – $t_{пер}$ = 7 с) инвариантности системы к параметрическим и координатным возмущениям.

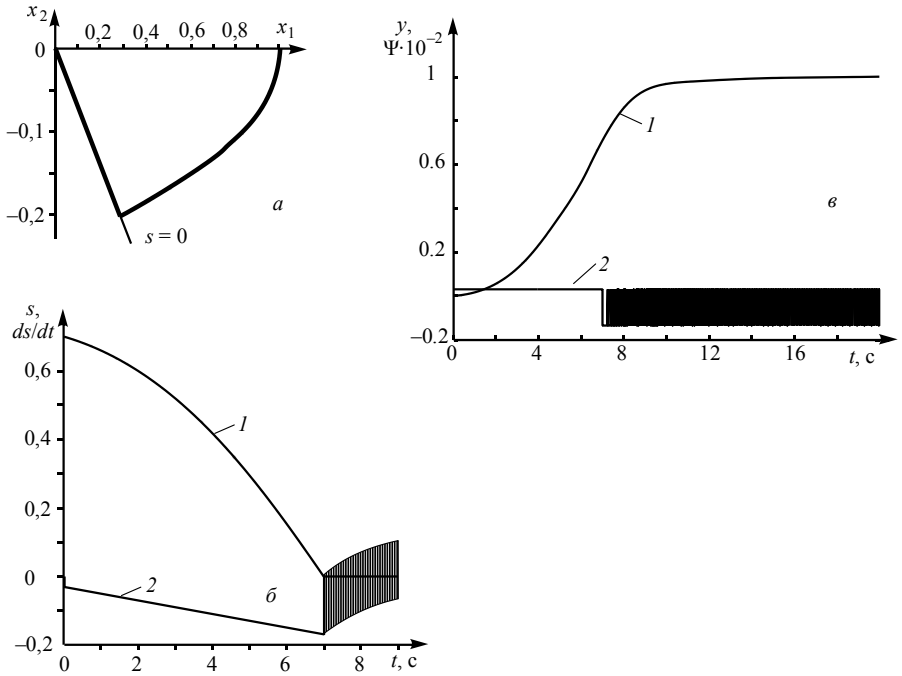

Рис. 6. Результаты моделирования работы системы: *а* – фазовая траектория; *б* – динамические характеристики (кр. *1* – *s*, кр. *2* – *ds/dt*); *в* – динамические характеристики (кр. *1* – переходный процесс, кр. *2* – значения разрывного коэффициента)

Заключение

В статье описаны разработанные перестраиваемый автомат и вычислительные среды, позволяющие синтезировать высококачественные реконфигурируемые системы автоматического управления. Ключевой особенностью построенной системы, в отличие от приведенных, например в [1, 5], является то, что при формировании управляющего воздействия не используется точное значение сигнала ошибки и ее производных, а только информация о их знаках, кроме того, сигнал самого управляющего воздействия может принимать значения из двоичного множества {0, 1}. В рассматриваемом классе систем всегда можно обеспечить скользящий режим на гиперплоскости S. После попадания изображающей точки на гиперплоскость скольжения в системе возникает устойчивое движение, описываемое линейным однородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Следовательно, условия попадания изображающей точки на гиперплоскость скольжения одновременно являются и условиями устойчивости системы при произвольных начальных условиях и внешних воздействиях, принадлежащих классу допустимых функций. После попадания изображающей точки на гиперплоскость S рассматриваемый класс систем обеспечивает устойчивое движение, полную воспроизводимость управляемой координатой задающего воздействия и инвариантность как к внешним параметрическим, так и к координатным воздействиям.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.2/3265 – «Разработка принципов построения и функционирования реконфигурируемых высокопроизводительных систем управления».

Литература

1. Шидловский С.В. Логическое управление в автоматических системах с перестраиваемой структурой // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2006. – № 2. – С. 123–127.

2. Теория систем с переменной структурой / Под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 592 с.

3. Кудрявцев В.Б. Основы теории однородных структур / В.Б. Кудрявцев, А.С. Подколзин, А.А. Болотов. – М.: Наука, 1990. – 296 с.

4. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. – М.: Наука, 1977. – 560 с.

5. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры в системах с распределенными параметрами. – Томск: Томский госуниверситет, 2007. – 192 с.

6. Пат. 2 307 387 РФ, МПК G 06 F/57. Ячейка однородной среды / С.В. Шидловский (РФ). – № 2 006 105 835/09; заявл. 26.02.2006; опубл. 27.09.2007. – Бюл. № 27. – 11 с.

Шидловский Станислав Викторович
Д-р техн. наук, профессор каф. электронных средств автоматизации и управления ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-48-35
Эл. почта: shidlovskiysv@mail.ru

Сырямкин Владимир Иванович
Д-р техн. наук, профессор, директор МУНПЦ «Технологический менеджмент» ТГУ
Тел.: (382-2) 56-50-20
Эл. почта: seg@post.tomica.ru

Шидловский Виктор Станиславович
Канд. техн. наук, доцент кафедры электронных средств автоматизации и управления ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-48-35
Эл. почта: v.shidlovskiy@gmail.com

Shidlovskiy S.V., Siryamkin V.I., Shidlovskiy V.S.
Reconfigurable control system synthesis

In the paper there are discussed the application of reconfigurable computing environments for control systems. Reconfigurable computing environments for formation of high-quality operating influence are offered. Calculation examples are resulted.
Keywords: reconfigurable; control systems; speed; invariancy; reliability.