ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ
І МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

УДК 681.5
DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2016.4.01

СИНТЕЗ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

В.Д. РОМАНЕНКО, Ю.Л. МИЛЯВСКИЙ

Аннотация. Рассмотрена проблема следящего управления в когнитивных картах иерархических сложных систем. Динамика свободного движения определенного иерархического уровня системы описывается неустойчивым импульсным процессом в когнитивной карте. Задающее воздействие, формирующееся на высшем уровне иерархии, имеет скачкообразный характер. Введена эталонная модель характеристического полинома замкнутой системы по каналу «задающее воздействие — ошибка регулирования». Найден закон управления, позволяющий выходным координатам когнитивной карты отслеживать изменение задающего воздействия. В качестве примера рассматривается управление когнитивной картой коммерческого банка на определенном иерархическом уровне банковской системы. С помощью моделирования показана эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: когнитивная карта, иерархическая система, следящая система, неустойчивый импульсный процесс.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве средства моделирования сложных систем используются когнитивные карты (КК), которые представляют собой взвешенные ориентированные графы, вершины которых отражают координаты сложных систем, а ребра — связи между ними. В процессе функционирования сложной системы под влиянием различных возмущений координаты вершин КК изменяются во времени. Процесс распространения возмущений по вершинам КК называется импульсным процессом [1]. Правило изменения значений координат вершин КК при импульсном процессе принято формулировать в виде разностного уравнения первого порядка в приращениях переменных:

$$\Delta y_i(k+1) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \Delta y_j(k), \tag{1}$$

где $\Delta y_i(k) = y_i(k) - y_i(k-1)$, $i = 1, 2, \ldots, n$.

В векторной форме выражение (1) записывается следующим образом:

$$\Delta\bar{y}(k+1) = A\Delta\bar{y}(k), \tag{2}$$

где A — транспонированная весовая матрица смежности КК; $\Delta\bar{y}$ — вектор приращений значений y_i вершин КК при $i = 1, 2, \ldots, n$.

Модель импульсного процесса КК (2) в полных координатах вершин имеет вид [2]:

$$[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}]\bar{y}(k) = 0\,, \tag{3}$$

где q^{-1} — оператор обратного сдвига на один период дискретизации.

При этом корни $\det[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}] = 0$ по модулю могут быть больше единицы, что приводит к неустойчивости выражения (3). Для стабилизации координат процесса (3) формируется вектор внешних управлений, которые в замкнутой системе управления воздействуют непосредственно на вершины КК $y_i(k)$. Тогда математическая модель динамики вынужденного движения вершин КК при импульсном процессе под воздействием внешних управлений в работе [2] представлена как

$$[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}]\,\bar{y}(k) = Bq^{-1}\bar{u}(k)\,, \tag{4}$$

где диагональная матрица B выбирается проектировщиком системы управления и на начальном этапе проектирования $B = I$.

В работах [2, 3, 4] предложены методы стабилизации неустойчивых импульсных процессов, а также методом управления соотношениями координат вершин одной КК и взаимодействующих КК в режиме импульсных процессов на основе применения эталонных моделей динамики замкнутых систем управления и минимизации квадратичных критериев оптимальности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [5] рассмотрено теоретико-игровое моделирование взаимодействия сложных систем, представляемых иерархическими когнитивными моделями, на примере системы малого и среднего предпринимательства. Однако задача следящего управления координатами КК на заданном уровне иерархии до настоящего времени не рассматривалась. Актуальность этой задачи является очевидной, поскольку в иерархических когнитивных моделях сложных систем возникает необходимость немедленной реализации на заданном уровне иерархии командных сигналов, которые формируются на более высоком уровне иерархии. Предполагается, что исходная модель импульсного процесса (3), (4) в КК на заданном уровне иерархии является неустойчивой.

Цель работы — зная динамику неустойчивого импульсного процесса КК (3) на заданном уровне иерархии, разработать следящую систему управления, которая обеспечивает отслеживание координатами вершин y_i скачкообразных изменений задающих воздействий G_i, которые формируются на более высоком иерархическом уровне.

РАЗРАБОТКА СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Исходная математическая модель управляемого импульсного процесса КК на заданном уровне иерархии имеет вид (4). Эту модель можно представить через оператор прямого смещения q :

$$[Iq^2 - (I + A)q + A]\overline{y}(k) = qB\overline{u}(k)\,. \tag{5}$$

На основе модели (5) матричная дискретная передаточная функция КК в режиме импульсных процессов будет иметь вид

$$W(z) = [Iz^2 - (I + A)z + A]^{-1} zB\,. \tag{6}$$

Для реализации следящей системы управления необходимо выполнить синтез замкнутого контура управления координатами вершин на заданном уровне иерархии в виде структурной схемы (рис. 1).

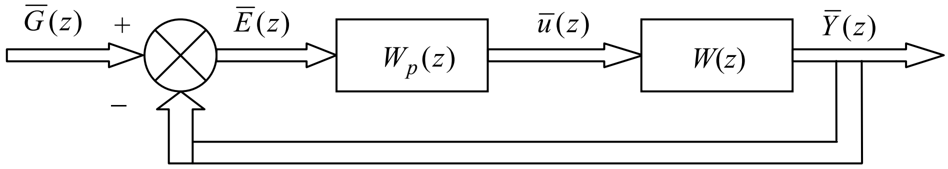

Рис. 1. Контур управления КК: $W_p(z)$ — дискретная передаточная функция синтезируемого следящего регулятора; $\overline{G}(z)$ — вектор задающих воздействий, формирующийся на более высоком уровне иерархической когнитивной модели

Составляющие вектора $\overline{G}(z)$ (рис. 1) изменяются скачкообразно, как командный сигнал. Это изменение задающих воздействий необходимо немедленно выполнять. Математическая модель скачкообразного изменения i-й составляющей вектора $\overline{G}(z)$ в форме z-преобразования имеет такой вид:

$$G_i(z) = \frac{\Delta G_i z}{z - 1}, \tag{7}$$

где ΔG_i — величина скачкообразного изменения G_i. Полюс передаточной функции $G_i(z)$ равен единице, что характеризует изменение функции $G_i(t)$ на границе устойчивости. Если учесть то обстоятельство, что импульсный процесс в КК на данном уровне является неустойчивым, то изменение командного сигнала $G_i(z)$ на границе устойчивости внесет дополнительную дестабилизацию в динамику управляемой системы импульсным процессом КК.

Матричная дискретная передаточная функция замкнутой системы управления по каналу $\overline{G}(z) \to \overline{E}(z)$ будет равна

$$W_E(z) = (I + W(z)W_p(z))^{-1}. \tag{8}$$

С учетом (6) функцию (8) можно записать так:

$$W_E(z) = (I + (Iz^2 - (I + A)z + A)^{-1} zBW_p(z))^{-1}. \tag{9}$$

Если принять во внимание, что матричный полином

$$Iz^2-(I+A)z+A=(z-1)(zI-A)\,, \tag{10}$$

выражение (9) после преобразований примет вид

$$W_E(z)=((z-1)(zI-A)+zBW_p(z))^{-1}(zI-A)(z-1). \tag{11}$$

Здесь $(z-1)(zI-A)+zBW_p(z)$ — характеристический матричный полином замкнутой системы управления.

Введем эталонную модель характеристического полинома

$$A_M(z)=(z-1)(zI-A)+zBW_p(z), \tag{12}$$

при этом корни $\det A_M(z)=0$ должны быть выбраны проектировщиком в пределах $|z_i|<1$. Тогда матричную дискретную передаточную функцию (11) можно записать как

$$W_E(z)=A_M^{-1}(z)(zI-A)(z-1). \tag{13}$$

Если учесть, что $\overline{E}(z)=W_E(z)\overline{G}(z)$, для модели (7) в замкнутой системе (13) будет нейтрализовано влияние корней $z_i=1$ составляющих скачкообразного изменения задающих воздействий.

Синтез дискретного регулятора выполняем на основе равенства (8):

$$W_p(z)=W^{-1}(z)W_E^{-1}(z)(I-W_E(z)). \tag{14}$$

Подставляем в равенство (14) выражения (6) и (13) при учете (10) и после преобразований получаем:

$$W_p(z)=z^{-1}B^{-1}(A_M(z)-(zI-A)(z-1)). \tag{15}$$

В соответствии со структурой характеристического полинома (12) формируем структуру эталонной модели:

$$A_M(z)=z^2I+A_{M_1}z+A_{M_2}\,.$$

Тогда закон управления дискретного регулятора (15) приобретает форму

$$\overline{u}(z)=z^{-1}B^{-1}(z^2I+A_{M_1}z+A_{M_2}-z^2I+(I+A)z-A)\overline{E}(z)=$$

$$=B^{-1}((A_{M_2}-A)z^{-1}+(I+A+A_{M_1}))\overline{E}(z).$$

При выборе $B=I$ закон управления в следящей системе примет окончательный вид:

$$\overline{u}(z)=((A_{M_2}-A)z^{-1}+(I+A+A_{M_1}))\overline{E}(z). \tag{16}$$

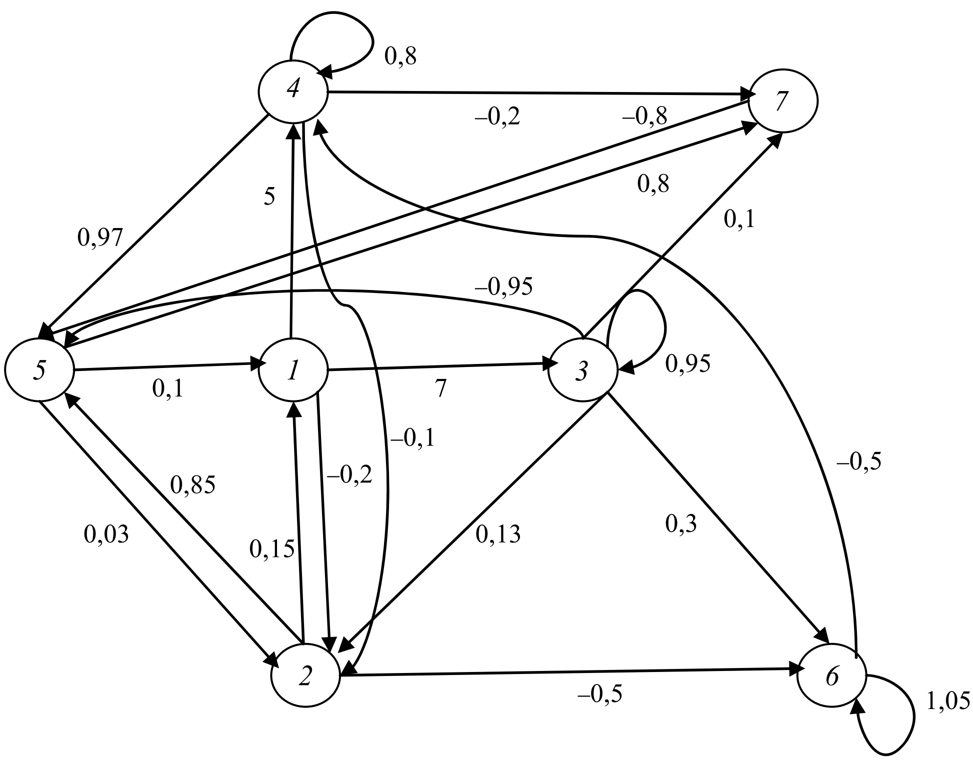

Рис. 2. Когнитивная карта для коммерческого банка: *1* — региональная сеть; *2* — капитал; *3* — кредиты; *4* — депозиты; *5* — ликвидные активы; *6* — мера риска стабильности; *7* — мера риска ликвидности

ПРИМЕР

Рассмотрим КК [3], описывающую в первом приближении работу коммерческого банка (рис. 2).

Весовая матрица смежности этой КК имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -0{,}2 & 7 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}15 & 0 & 0 & 0 & 0{,}85 & -0{,}5 & 0 \\ 0 & 0{,}13 & 0{,}95 & 0 & -0{,}95 & 0{,}3 & 0{,}1 \\ 0 & -0{,}2 & 0 & 0{,}8 & 0{,}9 & 0 & -0{,}2 \\ 0{,}1 & 0{,}03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}8 \\ 0 & 0 & 0 & -0{,}5 & 0 & 1{,}05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0{,}8 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Собственные числа этой матрицы равны $0{,}1127 \pm 0{,}7289i$; $-0{,}0873 \pm 0{,}1701i$; $0{,}6415$; $1{,}0538 \pm 0{,}3134i$ (по модулю больше единицы). Следовательно, система неустойчива. Примем начальные значения вектора координат вершин КК равными 100; 500; 1500; 1000; 200; 150; 250. Измеряемыми и управляемыми являются все вершины. В качестве эталонной модели замкнутой системы возьмем диагональный матричный полином с полиномами второго порядка на главной диагонали, имеющими следующие корни: 0,1; 0,1; 0,3; 0,4; 0,2; 0,2; 0,2; 0,3; 0,5; 0,6; 0,1; 0,1; 0,5; 0,6.

Предположим, что КК на рис. 2 описывает отдельный филиал банка или один банк в банковской группе. Тогда ее можно рассматривать как низший уровень иерархии в сложной иерархической системе. Пусть в качестве задающих воздействий, действующих с верхнего уровня иерархии (главного офиса банка или банковской группы) на эту КК, является серия скачкообразных изменений. Тогда можно применить закон управления (16). В итоге получим графики изменения координат вершин КК (рис. 3, сплошная линия) и задающих воздействий (рис. 3, пунктирная линия).

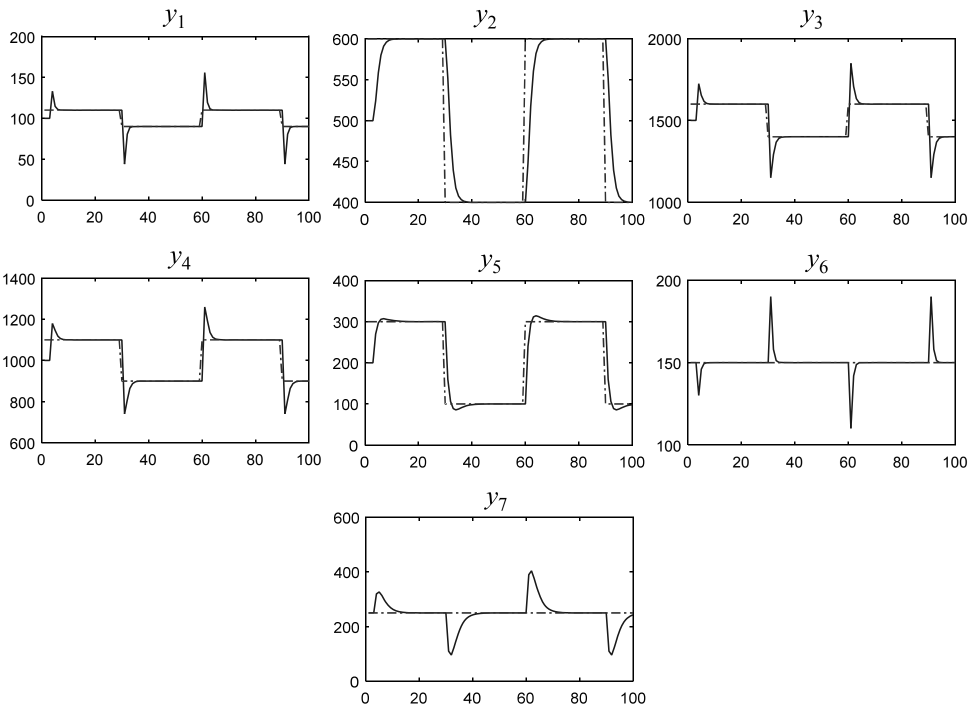

Рис. 3. Графики изменения координат вершин КК

Можно видеть, что все изменения отслеживаются достаточно быстро и точно. Колебания вершин y_6 и y_7, несмотря на отсутствие изменений задающего воздействия, являются неизбежными ввиду природы этих вершин, поскольку риски стабильности и ликвидности не могут не колебаться при изменении остальных вершин. Однако и они в итоге остаются на исходных стабильных уровнях.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены вопросы следящего управления неустойчивыми импульсными процессами на определенном уровне иерархии в КК сложных систем, когда вектор задающих воздействий для замкнутой системы управления изменяется скачкообразно. Основная цель синтеза системы управления состоит в формировании закона управления, который обеспечивает высокое качество отслеживания вектором выходных координат замкнутого контура скачкообразных изменений вектора задающих воздействий. Для решения этой задачи динамика импульсного процесса КК представлена в форме модели типа «вход – выход» в полных значениях координат вершин КК. Для обеспечения устойчивости замкнутой системы управления, которая представлена матричной дискретной передаточной функцией по каналу «вектор задающих воздействий – вектор ошибок регулирования», сформирована эталонная модель характеристического матричного полинома с наперед заданными значениями корней (полюсов) замкнутой системы. На основе данной эталонной модели выполнен синтез цифрового регулятора. Рассмотрен практический пример КК функционирования коммерческого банка на определенном иерархическом уровне банковской системы. На основе цифрового моделирования проведено исследование следящей замкнутой системы управления при неустойчивом импульсном процессе в КК путем формирования скачкообразных изменений вектора задающих воздействий на более высоких уровнях иерархии многоуровневой иерархической КК.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Робертс Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф.С. Робертс; пер. с англ. — М.: Наука, 1986. — 496 с.
2. *Романенко В.Д.* Управление соотношениями координат когнитивной модели сложной системы при неустойчивом импульсном процессе / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 121–129.
3. *Романенко В.Д.* Метод адаптивного управления неустойчивыми импульсными процессами в когнитивных картах на основе эталонных моделей / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский, А.А. Реутов // Проблемы управления и информатики. — 2015. — № 2. — С. 35–45.
4. *Романенко В.Д.* Адаптивное координирующее управление соотношениями координат вершин взаимодействующих когнитивных карт в режиме импульсных процессов / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 3. — С. 109–120.
5. *Горелова Г.В.* Теоретико-игровое моделирование взаимодействия сложных систем, представляемых иерархическими когнитивными картами / Г.В. Горелова, И.С. Горелова, Е.Н. Захарова // Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования. — К.: Наук. думка, 2015. — С. 122–131.

Поступила 07.10.2016