УДК 62.50

СТАБИЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СОСТОЯНИЯ

В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский

Институт прикладного системного анализа Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»

Исследовано применение метода модального управления неустойчивыми импульсными процессами в когнитивных картах сложных систем разной природы. Рассмотрены модальные регуляторы состояния с одним и несколькими управляющими воздействиями для управления когнитивной картой, представленной посредством модели в пространстве состояний. Приведен практический пример, демонстрирующий применение модального управления в коммерческом банке, деятельность которого описана при помощи когнитивной карты.

Ключевые слова: когнитивная карта, модальное управление, стабилизация импульсных процессов, расположение полюсов замкнутой системы.

Досліджено застосування методу модального керування нестійкими імпульсними процесами в когнітивних картах складних систем різної природи. Розглянуто модальні регулятори стану з одним та декількома керуючими впливами при управлінні когнітивною картою, яка представлена моделлю у просторі станів. Наведено практичний приклад, що демонструє застосування модального керування у комерційному банку, діяльність якого описано за допомогою когнітивної карти.

Ключові слова: когнітивна карта, модальне керування, стабілізація імпульсних процесів, розташування полюсів замкненої системи.

Введение

Когнитивное моделирование [1–5] в настоящее время является одним из распространенных подходов для исследования проблем слабоструктурированных социально-экономических систем. Оно применяется в тех случаях, когда объектом исследования является сложная система большой размерности с многочисленными перекрестными связями. Такими является большинство реальных социальных, экономических, финансовых, экологических, политических систем. В основе когнитивного моделирования лежит понятие когнитивной карты (КК). Согласно [1, 2, 5], КК — это ориентированный граф, вершины (узлы) которого отражают компоненты сложных систем (координаты, факторы), а ребра — связи между этими факторами. Построение КК выполняется при участии экспертов, что позволяет количественно и качественно описать взаимосвязи между компонентами сложной системы при помощи меченого орграфа. При воздействии на одну или несколько вершин КК возмущений в виде импульсов модель КК переходит в динамический переходной режим, который получил название импульсного процесса [1, 2, 5].

Правило изменения значений координат вершин КК при импульсном процессе в свободном движении сформулировано в виде разностного уравнения первого порядка в приращениях [2, 3, 4, 5]:

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

где $\Delta y_i(k) = y_i(k) - y_i(k-1), i = 1,...,n, w_{ji}$ — весовой коэффициент ребра ориентированного графа, которое идет от j-ой вершины к i-ой, n — количество вершин КК. В векторной форме выражение (1) записывается следующим образом:

$$\Delta Y(k+1) = W^T \Delta Y(k), \tag{2}$$

где W — весовая матрица смежности КК, ΔY — вектор приращений значений y_i вершин КК.

Одной из задач анализа КК является исследование ее устойчивости в динамическом режиме. Часто оказывается, что в КК импульсный процесс (1) является неустойчивым. В других случаях получается, что процесс (1) является устойчивым, но слишком медленнодействующим либо, наоборот, с большими отклонениями. Если анализ КК показал, что импульсный процесс находится на границе устойчивости или является неустойчивым, то его необходимо стабилизировать путем формирования внешних управляющих воздействий.

В работе [6] исследована взаимосвязь динамики системы в пространстве состояний и модели импульсных процессов КК (1). При этом показано, что модель в пространстве состояний (в том числе с регулятором состояния в контуре обратной связи) может быть эквивалентно представлена как КК. В простейшем случае в уравнении (1) приращения $\Delta y_i(k)$ можно рассматривать как переменные состояния x_i ($\Delta Y = X$), а матрицу W^T — как матрицу состояния A в уравнении свободного движения системы в пространстве состояний:

$$X(k+1) = AX(k). \tag{3}$$

Для того, чтобы реализовать управление импульсным процессом КК на основе методов современной теории управления, необходимо иметь уравнение вынужденного движения системы. Возможны несколько вариантов получения этого уравнения в зависимости от физической природы исследуемой сложной системы.

Первый вариант возможен в том случае, когда существует некоторое подмножество вершин КК, которые, во-первых, не имеют входных ребер (в том числе петель), а во-вторых, которыми физически можно варьировать в некоторых пределах. Будем называть эти вершины управляющими. Упорядочим вектор состояния таким образом, чтобы сначала шли «обычные» вершины, а потом управляющие. Тогда матрицу смежности КК можно представить в блочном виде как $W^T = \begin{pmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, а вектор приращений координат вершин — как вектор $\begin{pmatrix} X \\ U \end{pmatrix}$, где U — вектор приращений значений управляющих вершин КК. Тогда уравнение (3) можно записать в форме стандартного уравнения состояния в дискретном времени

$$X(k+1) = AX(k) + BU(k). \tag{4}$$

Второй вариант получения уравнения (4) можно применить тогда, когда существует реальная возможность введения новых дополнительных вершин КК, значения которых могут формироваться и устанавливаться в дискретные моменты времени лицом, принимающим решения, и которые можно использовать как управления, воздействующие на конкретные переменные состояния (вершины КК). Тогда в уравнении (4) матрица управления B будет содержать, скорее всего, единицы и нули, причем диагональные элементы, соответствующие управлениям в векторе U, будут равны единице. При этом ранг матрицы B должен быть полным.

Цель работы — исследование возможности применения метода модального управления для синтеза регуляторов состояния (5) при скалярном и векторном управлении для стабилизации неустойчивых импульсных процессов в когнитивных картах сложных систем.

Постановка задачи

В работе [6] проведены исследования основных свойств моделей (2) и (4), в частности, показано, что если КК (2) является устойчивой, то система (4) будет асимптотически устойчивой, а собственные числа матрицы смежности КК W являются модами системы в пространстве состояний. Также показано, что управляемость системы (4) означает возможность сформировать вектор управления

$$U(k) = -KX(k), \tag{5}$$

который приводит соответствующую КК в устойчивое статическое состояние.

Также в работе [6] было выполнено моделирование синтезированного регулятора состояния (5) для стабилизации неустойчивого импульсного процесса в КК, составленной для анализа кадровой политики в морском флоте. Синтез регулятора состояния был выполнен на основе заданного характеристического уравнения замкнутой системы [7] при скалярном управляющем воздействии. При этом была достигнута стабилизация импульсного процесса КК, однако были отмечены очень большие колебания синтезированного управляющего воздействия при переходном процессе.

Большой уровень управляющих воздействий для указанного метода был также отмечен в [8].

Реализация модального управления в когнитивных картах

Рассмотрим вначале простейший случай, когда на систему действует только одно управляющее воздействие. Это может означать, что лицо, принимающее решение, имеет возможность осуществлять непосредственное влияние только на одну из вершин КК, то есть B является вектором-столбцом, только одна из координат которого равна единице, а остальные — нулю. Если система (4) неустойчива, но управляема, то даже с помощью только одного управляющего воздействия, непосредственно действующего только на одну вершину, ее возможно стабилизировать.

Когда система управляема и имеет скалярное управление, задача модального управления решается однозначно. Для этого необходимо решить относительно коэффициентов вектора-строки $K = (k_n \; k_{n-1} \ldots k_1)$ уравнение

$$\det(zI - A + BK) = z^n + M_1 z^{n-1} + \ldots + M_{n-1} z + M_n, \qquad (6)$$

где $z^n + M_1 z^{n-1} + \ldots + M_{n-1} z + M_n = 0$ — желаемый характеристический полином замкнутой системы. Это можно сделать путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях z, в результате чего получим систему n уравнений с n неизвестными, которая однозначно решается.

Также известен способ вычисления K, базирующийся на приведении уравнения (4) к канонической форме [7]. Он позволяет в явном виде найти коэффициенты обратной связи, зная коэффициенты желаемого характеристического полинома системы. В канонической форме управляемости для системы с одним входом уравнение (4) принимает вид:

$$X(k+1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \ldots & -a_1 \end{pmatrix} X(k) + \begin{pmatrix} 0 \\ \ldots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(k). \qquad (7)$$

Подставляя (5) в (7), получим уравнение

$$X(k+1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & 1 \\ -a_n - k_n & -a_{n-1} - k_{n-1} & \ldots & -a_1 - k_1 \end{pmatrix} X(k).$$

Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы примет вид:

$$(a_n + k_n) + (a_{n-1} + k_{n-1})z + ... + (a_1 + k_1)z^{n-1} + z^n = 0. \tag{8}$$

Приравнивая (6) и (8), получим в явном виде коэффициенты вектора обратной связи $k_i = M_i - a_i,\ i = 1,...,n.$ Далее необходимо вернуться к исходному базису (до преобразования к каноническому виду), умножив полученный вышеописанным образом вектор K на матрицу перехода $S = \widetilde{M}M^{-1}$, где $\widetilde{M}$, M^{-1} — матрицы управляемости системы (7) и исходной системы (4), соответственно [8]. Эти преобразования приводят к известной формуле Аккермана [9].

В случае, если на систему действуют несколько управляющих воздействий, задача не имеет однозначного решения. В теории управления предложено ряд способов нахождения матрицы обратной связи в этом случае (например, [10]). Рассмотрим простейший случай, описанный в [8].

Зададим желаемый спектр замкнутой системы $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$, где все значения по модулю меньше единицы, различны между собой и среди λ_j нет собственных чисел матрицы A. Для простоты зададим действительный спектр. Пусть имеется m управляющих воздействий, $m \le n$. Введем в рассмотрение $\overline{R}_j$, $j = 1,...,n$, — собственные вектора матрицы состояния замкнутой системы $A - BK$, т. е. вектора, для которых выполняются соотношения $(A - BK)\overline{R}_j = \lambda_j \overline{R}_j$. Последнее равенство можно иначе записать так:

$$(A - \lambda_j I)\overline{R}_j = BK\overline{R}_j = B\overline{P}_j, \tag{9}$$

где вектора-столбцы $\overline{P}_j = K\overline{R}_j$, $j = 1,...,n$, имеют размерность m.

Зададим произвольную матрицу P размерности $m \times n$ так, чтобы она имела полный ранг и не имела нулевых столбцов, $P = (\overline{P}_1\ \overline{P}_2\ ...\ \overline{P}_n)$. Тогда из (9) можно найти n векторов $\overline{R}_j = (A - \lambda_j I)^{-1} B\overline{P}_j,\ j = 1,...,n,$ и сформировать из них матрицу $R = (\overline{R}_1\ \overline{R}_2\ ...\ \overline{R}_n)$ размерности $n \times n$, которая будет невырожденной. Тогда, поскольку $\overline{P}_j = K\overline{R}_j$, $j = 1,...,n$, матрицу обратной связи можно найти как $K = PR^{-1}$, которая, по построению, обеспечивает желаемый набор мод замкнутой системы. Выбор матрицы P влияет на характер управляющих воздействий, но спектр системы остается инвариантным относительно P.

Данный подход возможен, если $(A - \lambda_j I)^{-1}$ существует, т. е. если среди λ_j нет собственных чисел матрицы A. Если для некоторой моды λ_j это не так, то, как показано в [8], в качестве $\overline{R}_j$ можно брать собственный вектор матрицы A, соответствующий собственному числу λ_j, а вместо $\overline{P}_j$ можно брать нулевой вектор. В любом случае матрица обратной связи находится по формуле

$$K = PR^{-1}.$$

Отметим также, что в случае $m = n$, т. е. если количество управляющих воздействий равно количеству переменных состояния, можно применить еще один метод модального управления, основанный на приведении матрицы A к диагональному виду. Но этот случай представляет меньший интерес, поскольку он является не таким распространенным для КК, и для него уже разработаны другие методы управления [11].

Полученное любым способом управление (5) непосредственно подается на вершины КК. В случае необходимости его можно отразить в графе КК, для этого (5) следует представить разностным уравнением $U(k+1) = -KFX(k) - KGU(k)$, как описано в [6]. Отметим, что U — это вектор приращений управлений (так же как и X — вектор приращений координат).

До сих пор предполагалось, что значения в вершинах КК измеряемы, то есть все переменные состояния наблюдаются или вычисляются непосредственно. Потому не было необходимости в уравнении измерения, и модель в пространстве состояний состояла только из уравнения состояния. К сожалению, это не всегда соответствует действительности. Если есть подмножество неизмеряемых вершин, целесообразно ввести уравнение измерения

$$Z(k) = CX(k), \tag{10}$$

где матрица C имеет вид $C = \begin{pmatrix} I & 0 \end{pmatrix}$, если вершины КК перенумерованы так, чтобы вначале шли наблюдаемые, а потом ненаблюдаемые вершины. Вектор измерений Z является вектором приращений измеряемых координат Δy_i.

Тогда уравнение управления (5) превращается в уравнение

$$U(k) = -K\widehat{X}(k), \tag{11}$$

где $\widehat{X}(k)$ — оценка вектора состояния $X(k)$. Если система наблюдаема, оценивание можно выполнять при помощи наблюдателя Люенбергера [6, 7]:

$$\hat{X}(k+1) = A\hat{X}(k) + BU(k) + L(Z(k) - C\hat{X}(k)), \tag{12}$$

где L выбирается из условия, чтобы собственные числа матрицы $A - LC$ были по модулю меньше единицы.

Построение когнитивной карты работы коммерческого банка

Рассмотрим КК [11], отражающую работу коммерческого банка (рис. 1).

На рис. 1 введены следующие обозначения вершин КК: 1 — региональная сеть, 2 — капитал, 3 — кредиты, 4 — депозиты, 5 — ликвидные активы, 6 — мера риска стабильности, 7 — мера риска ликвидности. Весовая матрица смежности имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -0.2 & 7 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0.85 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0.13 & 0.95 & 0 & -0.95 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & -0.2 & 0 & 0.8 & 0.9 & 0 & -0.2 \\ 0.1 & 0.03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 & 1.05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.8 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (13)$$

Легко убедиться, что данная система является неустойчивой, ее моды равны 0.1127 $\pm$ 0.7289i, -0.0873 $\pm$ 0.1701i, 0.6415, 1.0538 $\pm$ 0.3134i (последние два значения по модулю больше единицы).

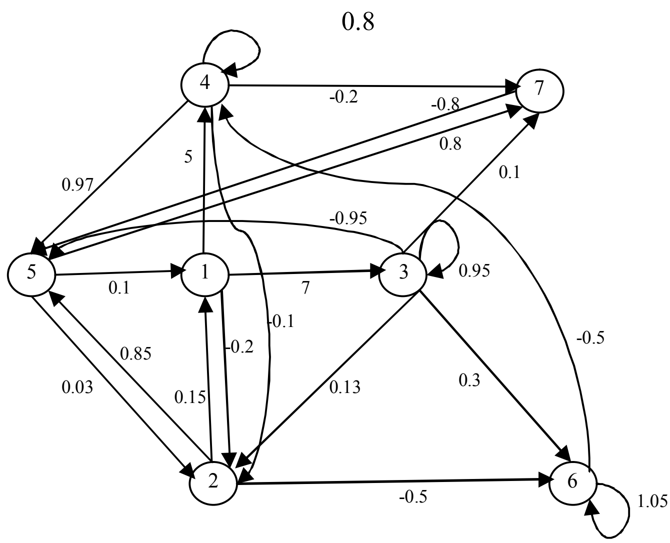

Рис. 1. Когнитивная карта коммерческого банка

Динамику этой системы можно описать в виде уравнения (4), где $A = W^T$, а матрицу B будем формировать в зависимости от количества управляющих воздействий. Поскольку все вершины имеют входящие ребра, управления будем формировать извне.

Рассмотрим и сравним два случая. Пусть вначале управляющие воздействия можно подавать только на одну вершину, а именно на вершину 3 — кредиты. То есть, предположим, что единственным управляющим воздействием является изменение объема кредитного портфеля. Тогда $B = (0\,0\,1\,0\,0\,0\,0)^T$. Зададим следующий вектор желаемых мод замкнутой системы:

$$\lambda_1 = 0.5,\ \lambda_2 = 0.4,\ \lambda_3 = 0.3,\ \lambda_4 = 0.2,\ \lambda_5 = -0.3,\ \lambda_6 = -0.5,\ \lambda_7 = -0.7.$$

Найдем соответствующий вектор управления:

$$K = (2.5973\ \ 4.4349\ -2.8500\ \ 2.4876\ \ 0.7215\ -4.0154\ -1.2946).$$

Результаты моделирования КК при таком управлении показаны на рис. 2. Динамика управления показана на рис. 3.

Рассмотрим другой случай, когда управлению подвергаются три вершины КК: 3 — кредиты, 4 — депозиты, 5 — ликвидные активы. Тогда пусть

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

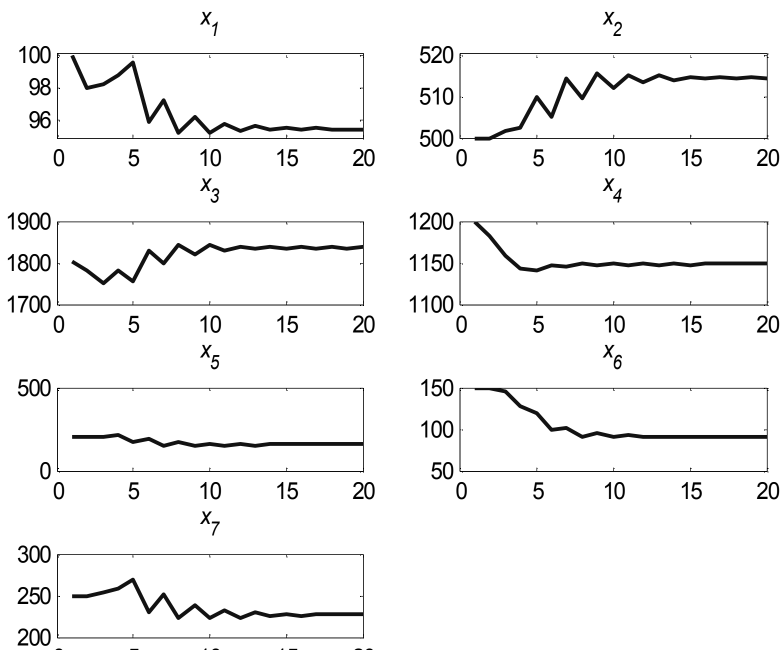

Рис. 2. Динамика изменений значений вершин КК при одном управляющем воздействии

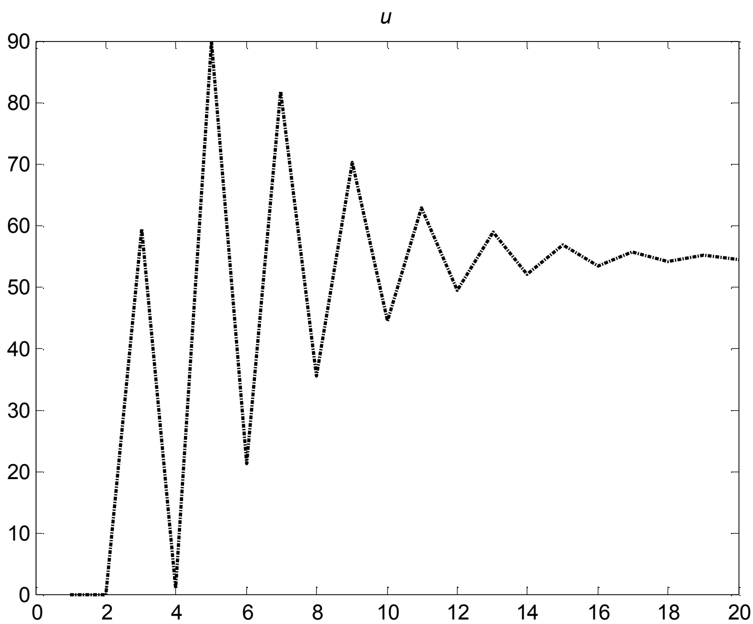

Рис. 3. Динамика одного управляющего воздействия

Для корректного сравнения зададим тот же самый желаемый спектр замкнутой системы. Поскольку задача решается неоднозначно, зададим вспомогательную матрицу

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда по вышеописанному алгоритму получим следующую матрицу обратной связи:

$$K = \begin{pmatrix} -5.8598 & 0.1261 & -0.8622 & -0.2778 & -0.1907 & -1.3266 & 0.1016 \\ -2.2380 & -0.6768 & 0.0947 & -0.6815 & -0.0780 & 0.1143 & 0.0293 \\ 1.1015 & -1.4347 & 0.1766 & 0.3720 & -1.3063 & 1.2721 & 0.0877 \end{pmatrix}.$$

Результаты моделирования КК при таком управлении показаны на рис. 4.

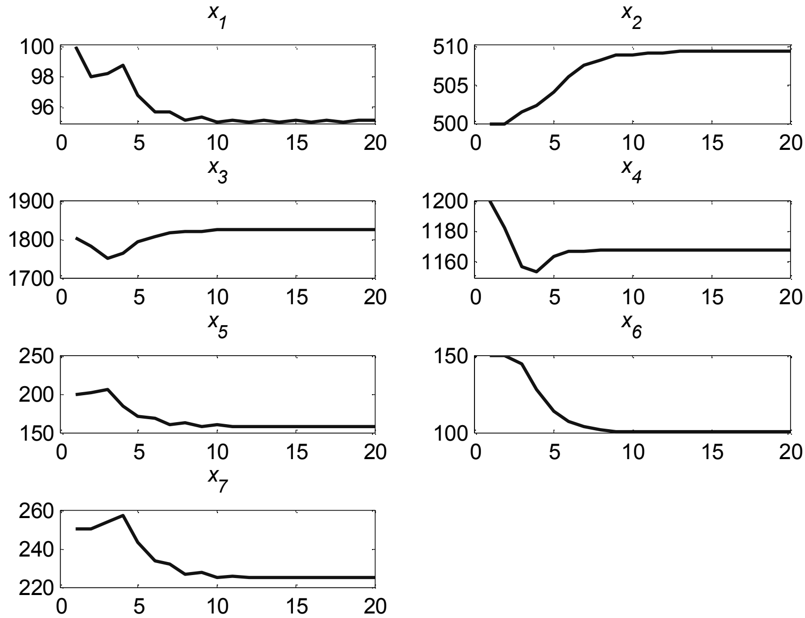

Рис. 4. Динамика изменений значений вершин КК при трех управляющих воздействиях

Динамика управления показана на рис. 5.

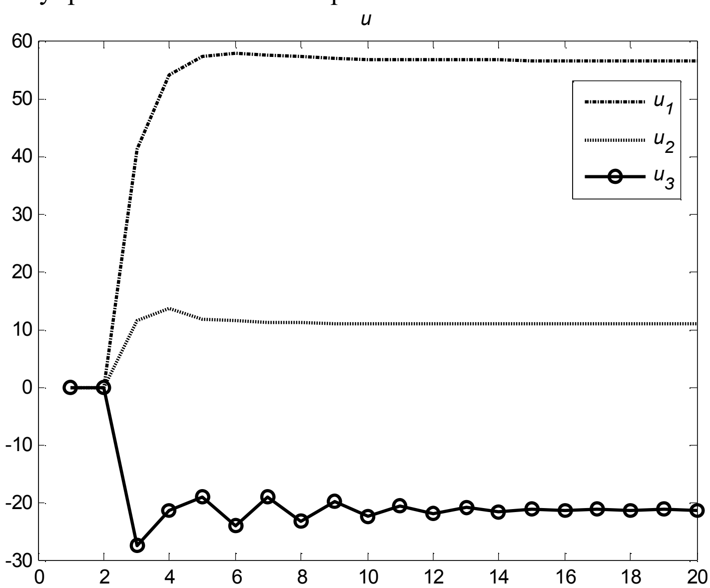

Рис. 5. Динамика трех управляющих воздействий

Таким образом, на основании проведенного моделирования можно утверждать, что методы модального управления являются применимыми для стабилизации неустойчивых процессов когнитивных карт и обеспечивают удовлетворительный результат управления. Несмотря на то, что собственные числа замкнутой системы при одном и при нескольких управляющих воздействиях одинаковы, при трех управляющих воздействиях амплитуда и время стабилизации этих воздействий меньше, а переходные процессы координат вершин КК становятся более гладкими, чем при одномерном управлении. То есть, увеличивая количество управляющих воздействий, можно улучшить качество управления. Это имеет большое значение, так как в большинстве случаев, в том числе при управлении банком, невозможно подавать управляющие воздействия большой амплитуды и частоты, и сами управляемые переменные часто также не могут резко изменяться.

Выводы

Проведенное исследование возможности применения методов модального управления в когнитивных моделях показало, что эти методы позволяют стабилизировать импульсные процессы и обеспечить желаемые характеристики в переходном режиме. В когнитивную модель введены внешние управляющие воздействия на основе регуляторов состояния для стабилизации импульсных процессов в когнитивных картах. В отличие от методов, основывающихся на моделях типа «вход — выход» [8], при предложенном подходе количество управляющих воздействий может быть меньше, чем количество вершин когнитивной карты.

Исследованы случаи модального управления с одним и с несколькими управляющими воздействиями. Проведено моделирование реальной системы модального управления коммерческим банком, динамика которого задана в виде когнитивной модели. В результате получен вывод, что при управлении с несколькими воздействиями легче обеспечить необходимое быстродействие и одновременно гладкость переходного процесса, а также реализуемость самих управляющих воздействий, чем при управлении с помощью одного внешнего воздействия.

1. Axelrod R. The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites / R. Axelrod. — Princeton University Press, 1976. — 404 p.
2. Roberts F. Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems / F. Roberts. — Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976. — 559 p.
3. Авдеева З.К. Когнитивный подход в управлении / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов // Проблемы управления. — 2002. — № 3. — С. 2–8.
4. Максимов В.И. Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций / В.И. Максимов // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 30–38.
5. Горелова Г.В. Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем. Когнитивный подход / Г.В. Горелова, Е.Н. Захарова, С.А. Радченко. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2006. — 332 с.
6. Романенко В.Д. Обеспечение устойчивости импульсных процессов в когнитивных картах на основе моделей в пространстве состояний / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2014. — № 1. — С. 26–42.
7. Isermann R. Digital control systems / R. Isermann. — Springer-Verlag, 1981. — 566 p.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3 томах. — Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 736 с.

9. Ackermann J. Sampled-Data Control Systems / J. Ackermann. — Berlin, Springer-Verlag, 1985. — 596 p.
10. Valasek M. Efficient Eigenvalue Assignments for General Linear MIMO Systems / M. Valasek, N. Olgac // Automatica. — 1995. — 31. — P. 1605–1617.
11. 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.

UDC 62.50

IMPULSE PROCESSES STABILISATION IN COGNITIVE MAPS OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON MODAL STATE REGULATORS

V.D. Romanenko, Y.L. Milyavskiy

ESC «Institute for applied systems analysis» «National technical university of Ukraine»

Introduction. Cognitive modelling is one of the most widespread approaches for ill-structured socio-economic systems research nowadays. It is usually used when subject of enquiry is a complex high-dimensional system; in fact, most of financial, economical, social, political systems belong to this category. Cognitive map (CM) is a directed graph, where vertices represent concepts, directed edges represent the causal effect relationships between concepts, and the weights of edges represent the degree of the causal effect. When CM switches to transition process as a result of external or internal impulse, so called «impulse process» is described by difference first-order equation for increments. It was previously shown by the authors that impulse process can also be equivalently expressed by state-space model. One of the most important questions is how to stabilise unstable CM. For this purpose control inputs should be added to the system. Then the problem of regulators design arises.

Purpose of the paper is to investigate possibility of applying modal control methods for state regulators design (with single and multiple controls) to stabilise unstable impulse process in CM.

Results. Different methods of modal control were investigated and applied for CM impulse process stabilisation. CM dynamics was presented by state space model. Problem of external control inputs for CM was discussed. It was demonstrated that as opposed to «input — output» models, state space models allow to use smaller number of controls for stabilisation (if the system is controllable). Cases with single and multiple inputs were discussed. Impulse process in the CM for commercial bank was simulated, and different approaches to modal regulators design were applied for this cognitive model. Simulation results demonstrated efficiency of the proposed approach to CM stabilisation. It was also shown that modal control with multiple inputs is preferable where possible because it allows to get quicker response and smoother transition process with lower amplitude of control inputs.

Conclusion. Applying of modal control methods allows effective stabilising of CM. Using multiple control inputs helps to increase performance and make transition process smoother and easier to implement.

Keywords: cognitive map, modal control, impulse process stabilisation, closed loop pole placement.

1. Axelrod R. *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton University Press. 1976. 404 p.
2. Roberts F. *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. 1976. 559 p.
3. Avdeeva Z.K., Kovriga S.V., Makarenko D.I., Maksimov V.I. Cognitive approach in control. *Control problems*, 2002, no. 3, pp. 2–8 (in Russian).
4. Maksimov V.I. Structural–target analysis of socio-economic situations development. *Control problems*, 2005, no. 3, pp. 30–38 (in Russian).
5. Gorelova G.V., Zakharova E.N., Radchenko S.A. *Research of semi-structured problems in socio-economic systems*. Cognitive approach. Rostov-na-Donu: Publisher RSU, 2006, 332 p. (in Russian).
6. Romanenko V.D., Milyavskiy Y.L. Stabilizing of impulse processes in cognitive maps based on state-space models. *System research & information technologies*, 2014, no. 1, pp. 26–42 (in Russian).
7. Isermann R. *Digital control systems*. Springer-Verlag. 1981. 566 p.
8. Yegupov N.D., ed. *Methods of classic and modern automatic control theory. Handbook*. Vol. 2: Regulators design and optimisation theory of automated control systems. M.: MSTU, 2000. 736 p. (in Russian).
9. Ackermann J. *Sampled-Data Control Systems*. Berlin, Springer-Verlag. 1985. 596 p.
10. Valasek M., Olgac N. Efficient Eigenvalue Assignments for General Linear MIMO Systems. *Automatica*, 1995, vol. 31, pp. 1605–1617.
11. Romanenko V.D., Milyavskiy Y.L., Reutov A.A. Adaptive Control Method for Unstable Impulse Processes in Cognitive Maps Based on Reference Models. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, no. 2, pp. 35–45 (in Russian).

Получено 30.11.2014