УДК 62.50

В.Д. Романенко, Ю.Л. Мілявський
Національний технічний університет України “КПІ”, Київ, Україна

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ІМПУЛЬСНИМИ ПРОЦЕСАМИ КОГНІТИВНИХ КАРТ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМИ

Background. The paper deals with the problem of cognitive modelling, namely control of complex systems with dynamics in impulse process presented by cognitive maps. It is assumed that the systems operate with delays that may occur either between vertices coordinates of a cognitive map or during transmission of control signals.
Objective. Build models of cognitive maps with different delays and to apply these models to control impulse processes in cognitive maps.
Methods. The article discusses two approaches for delays – control delays and delays during interaction between the vertices of a cognitive map. For the first case, a control algorithm based on reference model of a closed system was proposed, for the second case it is based on quadratic optimality criterion. Obtained results were verified using cognitive maps of commercial bank and health care system. Different delays were included into these systems and control laws were developed.
Results. Simulation results have confirmed that proposed methods reach the objective, i.e. they allow stabilising system with delays in impulse mode.
Conclusions. Research provided in the paper extended the class of controlled cognitive maps by systems with delays.
Keywords: cognitive map; impulse process; system with delays; control algorithm.

Вступ

Когнітивне моделювання є одним із найбільш актуальних напрямів наукових досліджень. В основі лежить поняття когнітивної карти (КК) як інструмента формального представлення й аналізу економічних, соціальних, екологічних, політичних та інших процесів. Це зважений орієнтований граф, вершини якого відображають деякі поняття предметної області, а ребра – зв’язки між ними. Численні дослідження присвячені побудові й аналізу КК, а також різним модифікаціям КК залежно від того, які саме взаємозв’язки необхідно відобразити [1–5]. У той же час порівняно малодослідженим залишається питання керування в імпульсному процесі складною системою, зображеною за допомогою КК [4–6], де під імпульсним процесом розуміють динамічний перехідний процес у системі, спричинений початковою зміною координати однієї чи декількох вершин КК. Більшість авторів, що займаються цією проблематикою, пропонують змінювати структуру КК для досягнення бажаних властивостей системи (стійкості, швидкодії тощо). Але зміна структури не завжди є можливою. У своїх попередніх роботах [9–11] автори досліджували питання керування КК за допомогою методів теорії автоматичного керування. У випадках, коли це можливо, це дає змогу застосовувати широко відомий і добре досліджений апарат керування у принципово новій сфері.

Але в усіх попередніх дослідженнях припускалось, що всі взаємодії у КК відбуваються без затримок, тобто що імпульс, поданий на одну вершину КК, спричиняє імпульс у сусідній вершині вже у наступному періоді дискретизації. На практиці це, як правило, не так, тому що в реальних системах існують запізнення. В низці досліджень у галузі когнітивного моделювання розглядались КК із запізненнями [3, 7, 8], але питання керування КК із запізненнями досі залишається невирішеним.

Постановка задачі

У роботі ставиться задача розробки методів керування імпульсними процесами складних систем, представлених у вигляді КК із запізненнями. Необхідно розглянути два види запізнень – запізнення по керуванню та запізнення, що виникають при взаємодії між вершинами КК. Потрібно розробити алгоритми керування динамічними системами, представленими у формі КК із запізненнями в обох варіантах. Результати будуть перевірені на практичних прикладах.

Керування імпульсними процесами КК з різними запізненнями по керуванню

Нехай імпульсний процес КК описується різницевим рівнянням першого порядку у приростах змінних [1, 5, 7]:

$$\Delta\mathbf{y}(k+1) = W^T \Delta\mathbf{y}(k), \qquad (1)$$

де W — вагова матриця суміжності КК, $\Delta\mathbf{y}(k) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{y}(k-1)$ — вектор приростів координат вершин КК. Для зручності введемо позначення $A = W^T$.

Запишемо (1) у повних значеннях координат вершин:

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

де q^{-1} — оператор зворотного зсуву на один період дискретизації.

Нехай на вершини КК можна діяти безпосередньо за допомогою зовнішніх керувань. У [11] було введено модель вимушеного руху системи в імпульсному процесі у вигляді такої моделі типу "вхід—вихід":

$$[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}]\mathbf{y}(k) = Bq^{-1}\mathbf{u}(k), \qquad (3)$$

де матриця B вибирається особою, що приймає рішення, і зазвичай є одиничною: $B = I$.

Введемо у модель (3) запізнення по керуванню:

$$[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}]\mathbf{y}(k) = Bq^{-1}\mathrm{diag}\{q^{-d_j}\}\mathbf{u}(k), \qquad (4)$$

де $\mathrm{diag}\{q^{-d_j}\} = \begin{pmatrix} q^{-d_1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & q^{-d_n} \end{pmatrix}$, $0 \le d_j \le d_{\max}$, $j = 1, \dots, n,$ — відомі запізнення по керуванню, $d_{\max}$ — максимальне запізнення. Модель (4) відображає той факт, що керування спричиняють зміни у вершинах КК не миттєво, а з деякою (можливо, різною для різних вершин) затримкою.

В [11] закон керування регулятора для моделі (3) було вибрано у формі

$$\upsilon(k) = (P_1 + P_2 q^{-1})[\mathbf{G} - \mathbf{y}(k)], \qquad (5)$$

де $\mathbf{G}$ — вектор бажаних значень, на яких мають стабілізуватись координати вершин КК, P_1, P_2 — матриці, що проектуються, виходячи із заданої еталонної моделі динаміки замкненої системи.

Для системи із запізненнями (4) пропонується задати закон керування у такій формі:

$$\mathrm{diag}\{q^{d_{\max} - d_j}\}\mathbf{u}(k) = (P_1 + P_2 q^{-1})[\mathbf{G} - \mathbf{y}(k + d_{\max})], \qquad (6)$$

тобто у момент часу k обчислювати вектор майбутніх керувань $\begin{pmatrix} u_1(k + d_{\max} - d_1) \\ \dots \\ u_n(k + d_{\max} - d_n) \end{pmatrix}$.

Для того щоб отримати рівняння динаміки замкненої системи керування, помножимо ліву і праву частини (6) на $q^{-d_{\max}}$:

$$\mathrm{diag}\{q^{-d_j}\}\mathbf{u}(k) = (P_1 + P_2 q^{-1})[\mathbf{G} - \mathbf{y}(k)],$$

і підставимо в (4):

$$[I - (I + A)q^{-1} + Aq^{-2}]\mathbf{y}(k) = Bq^{-1}(P_1 + P_2 q^{-1})[\mathbf{G} - \mathbf{y}(k)].$$

Зведемо подібні члени і спростимо:

$$[I + (BP_1 - I - A)q^{-1} + (BP_2 + A)q^{-2}]\mathbf{y}(k) = Bq^{-1}(P_1 + P_2 q^{-1})\mathbf{G}. \qquad (7)$$

Оскільки (7) описує динаміку замкненої системи, то її характеристичне рівняння має вигляд

$$\det[I + (BP_1 - I - A)q^{-1} + (BP_2 + A)q^{-2}] = 0. \qquad (8)$$

Задамо еталонну модель — бажане характеристичне рівняння замкненої системи:

$$\det(I + A_{M_1}q^{-1} + A_{M_2}q^{-2}) = 0. \qquad (9)$$

Для того щоб характеристичне рівняння (8) дорівнювало еталонному рівнянню (9), достатньо вибрати P_1, P_2 так, щоб

$$I + A_{M_1}q^{-1} + A_{M_2}q^{-2} = I + (BP_1 - I - A)q^{-1} + (BP_2 + A)q^{-2}.$$

Звідси отримаємо

$$P_1 = B^{-1}(I + A + A_{M_1}), \quad P_2 = B^{-1}(A_{M_2} - A). \qquad (10)$$

Для застосування керування (6) в момент k необхідно знати, крім коефіцієнтів (10), прогнозоване значення вектора майбутніх координат вершин $\bar{y}(k + d_{\max})$. Оскільки система є детермінованою, це можливо. Дійсно, запишемо (4) у вигляді

$$\mathbf{y}(k + d_{\max}) = (I + A)\mathbf{y}(k + d_{\max} - 1) - A\mathbf{y}(k + d_{\max} - 2) + B\,\mathrm{diag}\{q^{d_{\max} - d_j}\}\mathbf{u}(k - 1), \qquad (11)$$

де $\mathbf{y}(k+d_{\max}-1)$, $\mathbf{y}(k+d_{\max}-2)$, $\operatorname{diag}\{q^{d_{\max}-d_j}\}\times$ $\times\,\mathbf{u}(k-1)$ були аналогічно обчислені на попередніх кроках за формулами (6), (11). Початкові значення керувань для цієї рекурентної процедури нульові, тоді початкові значення для координат вершин КК знаходяться на основі (1) або (2), зокрема $\Delta\mathbf{y}(d_{\max}+1)=A^{d_{\max}}\Delta\mathbf{y}(1)$.

Розглянемо для прикладу КК комерційного банку (рис. 1) [10].

На рис. 1 вершини КК мають такий сенс: 1 — регіональна мережа, 2 — капітал, 3 — кредити, 4 — депозити, 5 — ліквідні активи, 6 — міра ризику стабільності, 7 — міра ризику ліквідності. Матриця суміжності має вигляд

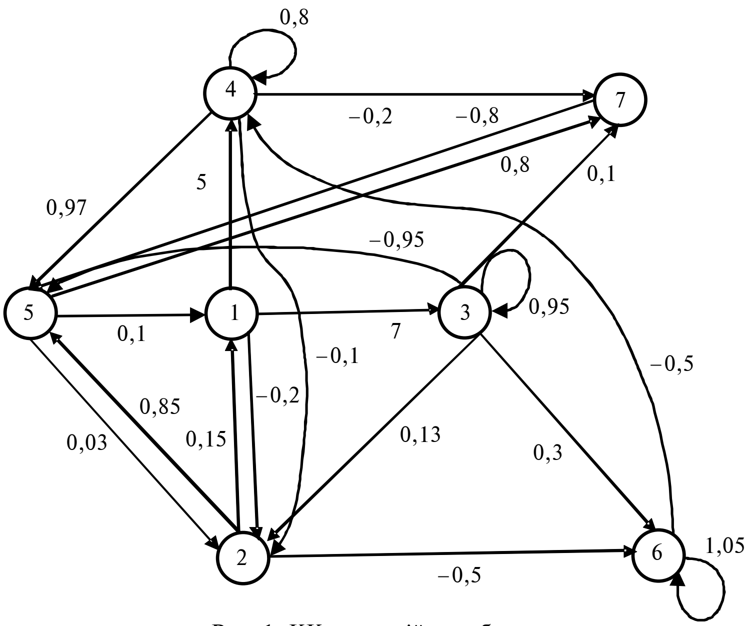

Рис. 1. КК комерційного банку

$$W=\begin{pmatrix} 0 & -0,2 & 7 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0,15 & 0 & 0 & 0 & 0,85 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0,95 & 0 & -0,95 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & -0,2 & 0 & 0,8 & 0.9 & 0 & -0,2 \\ 0,1 & 0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 1,05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,8 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Зауважимо, що система нестійка, тому що серед власних чисел W є такі, що за модулем перевищують одиницю. На усі вершини КК можна впливати зовні, але очевидно, що ці впливи діють із різними запізненнями. Якщо, наприклад, капітал можна змінити одразу (якщо це взагалі можливо), то для нарощування кредитного чи депозитного портфеля до заданого обсягу від моменту прийняття рішення має пройти певний час. Тому будемо описувати динаміку банку в імпульсному процесі за допомогою моделі (4), де

$$d_1=d_2=0,\ d_3=d_4=2,$$
$$d_5=1,\ d_6=d_7=3.$$

Нехай початкові значення вершин $\mathbf{y}(0)=(100,500,1500,1000,200,150,250)$, а початкові прирости $\Delta\mathbf{y}(1)=(-2,0,-20,-18,2,0,0)$. Задамо діагональні матриці A_{M_1},A_{M_2} так, щоб усі коре-

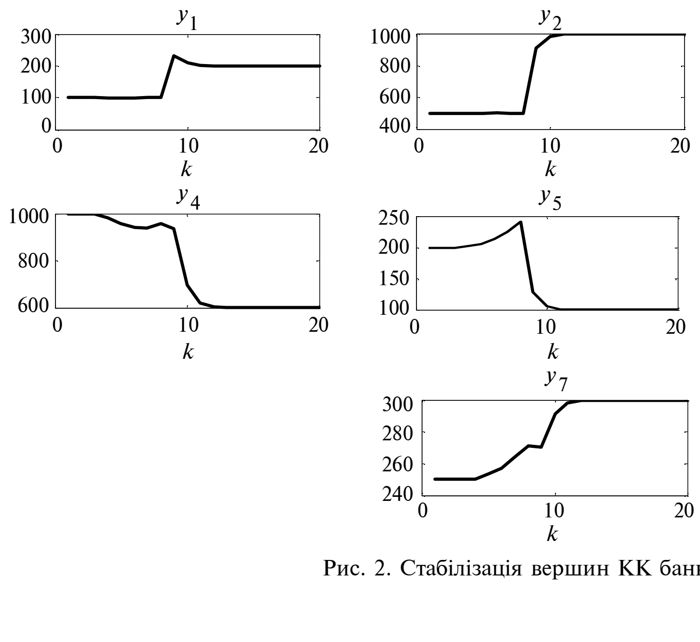

Рис. 2. Стабілізація вершин КК банку

ні характеристичного рівняння дорівнювали 0,1 і 0,2, тоді $A_{M_1} = -0,3I$, $A_{M_2} = 0,02I$. Задамо бажані значення вершин КК $\mathbf{G} = (200,1000,1500,600,100,100,300)$. На рис. 2 показано результати моделювання за формулами (4), (6), (10), (11). Можна бачити, що вершини стабілізуються на заданих рівнях.

Керування імпульсними процесами КК із запізненнями при взаємодії вершин КК між собою

Розглянемо суттєво іншу ситуацію, коли запізнення виникають не по керуванню, як часто буває в задачах теорії керування, а між самими вершинами КК. Тобто йдеться про випадок, коли зміна значення в одній вершині спричиняє зміну значення в сусідній не одразу, а через певний час, різний для різних вершин. Для математичного опису такої когнітивної моделі пропонується замінити модель (1) на модель

$$\Delta\mathbf{y}(k+1) = A(q^{-1})\Delta\mathbf{y}(k), \qquad (12)$$

де $A(q^{-1})$ — це матриця суміжності КК $A = W^T$, в елементах якої враховуються запізнення в передачі інформації між i-ю та j-ю вершинами завдяки введенню оператора запізнення $q^{-d_{ji}}$.

Покажемо це на прикладі. Розглянемо КК системи охорони здоров'я у місті, вперше наведену у [12] і розширену у [8] (рис. 3). Вершини тут мають такий сенс: 1 — чисельність населення в місті, 2 — міграція, 3 — модернізація, 4 — сміття на одиницю площі, 5 — санітарні споруди, 6 — кількість захворювань на 1000 жителів, 7 — кількість бактерій на одиницю площі.

Будемо розглядати цю модель не як нечітку КК, а у сенсі моделі (1). Вагова матриця суміжності має вигляд

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0,6 & 0,9 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,9 & -0,9 \\ -0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 \end{pmatrix}.$$

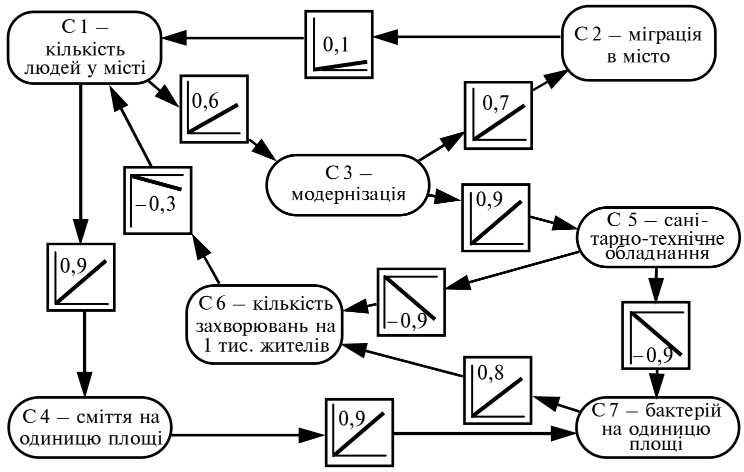

Рис. 3. КК системи охорони здоров'я

Автор [8] вважає, що необхідно ввести запізнення між вершинами 5 і 6. Погоджуючись із цим, ми пропонуємо ввести також деякі інші, причому різні, запізнення. А саме, введемо запізнення на 3 періоди дискретизації між вершинами 1 і 3, запізнення на 2 періоди дискретизації між вершинами 3 і 2 та запізнення на 1 період дискретизації між вершинами 5 і 6 та 6 і 1. Всі інші зв'язки будемо вважати такими, що діють без запізнень. Отже, динаміку імпульсного процесу можна записати у формі (12) так:

$$\Delta\mathbf{y}(k+1) = $$

$$= \begin{pmatrix} 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & -0,3q^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0,7q^{-2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,6q^{-3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,9q^{-1} & 0 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & -0,9 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \Delta\mathbf{y}(k).$$

Далі розглядатимемо тільки стійкі КК, тобто такі, що корені рівняння $\det(I - A(q^{-1})q^{-1}) = 0$ за модулем менші від одиниці. Тривалість стабілізації при вільному русі в імпульсному процесі може бути незадовільною з практичної точки зору, тому введемо вектор керування $\mathbf{u}$ і розглянемо модель вимушеного руху в імпульсному процесі:

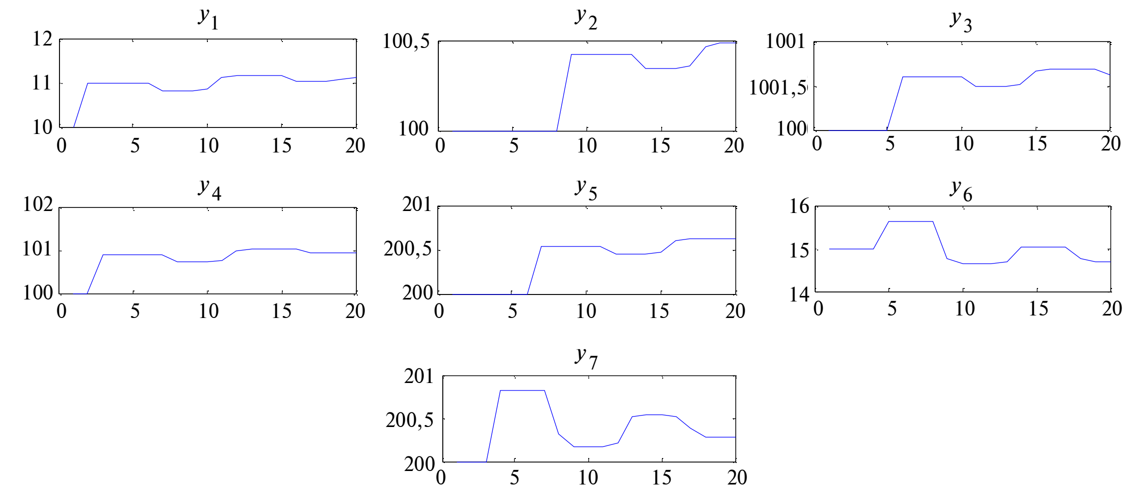

Рис. 4. Динаміка координат КК системи охорони здоров'я без керування

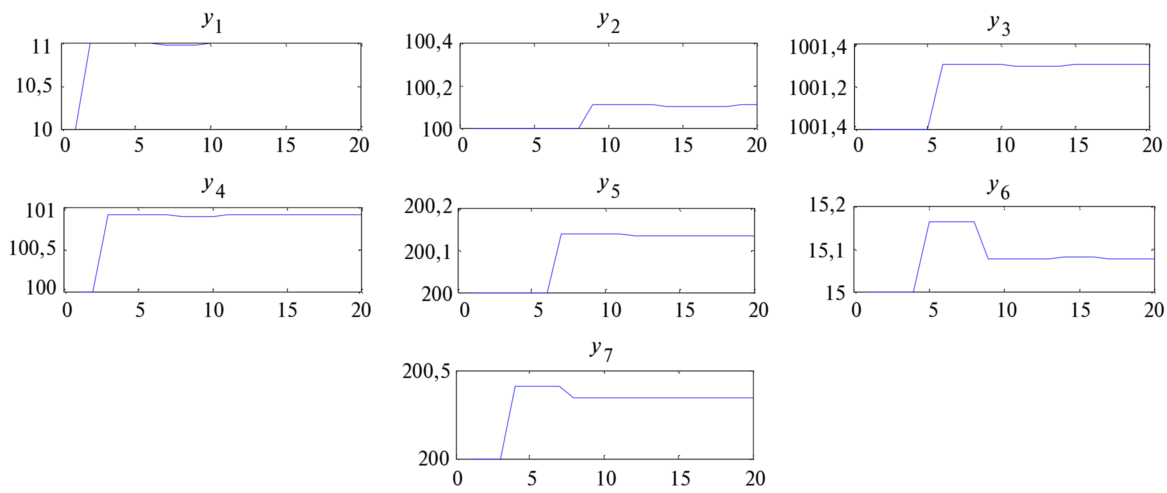

Рис. 5. Динаміка координат КК системи охорони здоров'я з керуванням

$$\Delta \mathbf{y}(k+1) = A(q^{-1})\Delta \mathbf{y}(k) + B\mathbf{u}(k). \qquad (13)$$

За аналогією з критерієм узагальненої дисперсії [13] введемо такий критерій для стабілізації КК:

$$J(k+1) = \Delta \mathbf{y}^T(k+1)\Delta \mathbf{y}(k+1) + \mathbf{u}^T(k)R\mathbf{u}(k), \quad (14)$$

де R — додатно визначена матриця, що вибирається особою, яка приймає рішення.

У результаті мінімізації критерію (14) для моделі (13) отримаємо такий закон керування:

$$\mathbf{u}(k) = -(B^T B + R)^{-1} B^T A(q^{-1})\Delta \mathbf{y}(k). \qquad (15)$$

Виконаємо моделювання для демонстрації ефективності закону (15) для КК системи охорони здоров'я із запізненнями. Можна перевірити, що система є стійкою. Після подання одиничного імпульсу на вершину 1 система (12) без керування поводитиметься, як показано на рис. 4. Після подання керування (15) система стабілізується значно швидше (рис. 5).

Висновки

Запропоновані в роботі математичні моделі дали змогу описати КК з урахуванням запізнень. При цьому отримані моделі характеризують як системи із запізненнями по керуванню, так і моделі із запізненнями при взаємодії між вершинами КК. Отриманий у роботі закон керування для КК із різними запізненнями по керуванню дав змогу обчислювати майбутні керуючі впливи, що забезпечують стабілізацію вершин КК на заданих рівнях, причому динаміка перехідного процесу замкненої системи задається особою, яка приймає рішення, у вигляді еталонної моделі. Інший закон керування, розроблений для стійких систем із запізненнями між окремими вершинами КК, дав можливість прискорити стабілізацію таких систем в імпульсному процесі (на основі квадратичного критерію оптимальності). Результати роботи було використано для стабілізації імпульсних процесів у комерційному банку та в системі охорони здоров'я, представлених у вигляді КК із запізненнями.

У подальшому автори планують продовжувати дослідження когнітивних моделей різних типів та методів керування ними з метою охоплення якнайширшого класу імпульсних процесів у складних системах, що описуються за допомогою когнітивних карт.

Список літератури

1. *Roberts F.* Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems. – Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976. – 559 p.
2. *Kosko B.* Fuzzy cognitive maps // Int. J. Man-Machine Stud. – 1986. – **24**. – P. 65–75.
3. *Aguilar J.* A Survey about fuzzy cognitive maps papers // Int. J. Computational Cognition. – 2005. – **3**, № 2. – P. 27–33.
4. *Максимов В.И.* Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. – 2005. – № 3. – С. 30–38.
5. *Когнитивный* подход в управлении / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов // Проблемы управления. – 2002. – № 3. – С. 2–8.
6. *Chun-Mei L.* Using fuzzy cognitive map for system control // WSEAS Trans. Systems. – 2008. – **7**. – P. 1504–1515.
7. *Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.А.* Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем. Когнитивный подход. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2006. – 332 с.
8. *Hagiwara M.* Extended fuzzy cognitive maps // Proc. 1st IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, March 8–12, San Diego, CA. – San Diego, 1992. – P. 795–801.
9. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.* Обеспечение устойчивости импульсных процессов в когнитивных картах на основе моделей в пространстве состояний // Системні дослідження та інформ. технології. – 2014. – № 1. – С. 26–42.
10. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л., Реутов А.А.* Метод адаптивного управления неустойчивыми импульсными процессами в когнитивных картах на основе эталонных моделей // Проблемы информатики и управления. – 2015. – № 2. – С. 35–45.
11. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.* Управление соотношениями координат когнитивной модели сложной системы при неустойчивом импульсном процессе // Системні дослідження та інформ. технології. – 2015. – № 1. – С. 121–129.
12. *Zhang W., Chen S.* A logical architecture for cognitive maps // Proc. 2nd Int. Conf. Neural Networks. – Boumemouth, 1988. – **1**. – P. 231–238.
13. *Isermann R.* Digital Control Systems. – Springer-Verlag, 1981. – 566 p.

References

1. F. Roberts, *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems.* Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976, 559 p.
2. B. Kosko, "Fuzzy cognitive maps", *Int. J. Man-Machine Stud.*, vol. 24, pp. 65–75, 1986. Doi: 10.1016/s0020-7373(86)80040-2.
3. J. Aguilar, "A Survey about fuzzy cognitive maps papers", *Int. J. Computational Cognition*, vol. 3, pp. 27–33, 2005.
4. V. Maksimov, "Structural–target analysis of socio-economic situations development", *Problemy Upravleniya*, no. 3, pp. 30–38, 2005 (in Russian).
5. Z. Avdeeva *et al.*, "Cognitive approach in control", *Problemy Upravleniya*, no. 3, pp. 2–8, 2002 (in Russian).
6. L. Chun-Me, "Using fuzzy cognitive map for system control", *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 7, pp. 1504–1515, 2008.
7. G. Gorelova *et al.*, *Research of Semi-Structured Problems in Socio-Economic Systems. Cognitive Approach.* Rostov-on-Don, Russia: Izdatelstvo RGU, 2006, 332 p. (in Russian).
8. M. Hagiwara, "Extended fuzzy cognitive maps", in *Proc. 1st IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, March 8–12, San Diego, CA, 1992, pp. 795–801. Doi: 10.1109/fuzzy.1992.258761.
9. V. Romanenko and Y. Milyavskiy, "Stabilizing of impulse processes in cognitive maps based on state-space models", *Systemni Doslidzhennya ta Inform. Technologiyi*, no. 1, pp. 26–42, 2014 (in Russian).
10. V. Romanenko *et al.*, "Adaptive control method for unstable impulse processes in cognitive maps based on reference models", *Problemy Informatiki i Upravleniya*, no. 2, pp. 35–45, 2015 (in Russian).

11. V. Romanenko and Y. Milyavskiy, "Coordinates ratio control for cognitive model of a complex system under unstable impulse process", *Systemni Doslidzhennya ta Inform. Technologiyi*, no. 1, pp. 121–129, 2015 (in Russian).

12. W. Zhang and S. Chen, "A logical architecture for cognitive maps", in *Proc. 2nd Int. Conf. Neural Networks*, vol. 1, Boumemouth, UK, 1988, pp. 231–238. Doi: 10.1109/icnn.1988.23852.

13. R. Isermann, *Digital Control Systems.* Springer-Verlag, 1981, 566 p. Doi: 10.1007/978-3-662-02319-8.

В.Д. Романенко, Ю.Л. Мілявський

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ІМПУЛЬСНИМИ ПРОЦЕСАМИ КОГНІТИВНИХ КАРТ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМИ

Проблематика. У статті розглядаються задачі когнітивного моделювання, а саме – керування складними системами, динаміка яких в імпульсному процесі представлена когнітивними картами. При цьому припускається, що системи функціонують із запізненнями, які можуть виникати як між координатами вершин когнітивної карти, так і при передачі керуючих сигналів.

Мета дослідження. Мета роботи –побудова моделей когнітивних карт із різними запізненнями та використання цих моделей для керування імпульсними процесами у когнітивних картах.

Методика реалізації. У статті розглянуто два підходи до врахування запізнень – запізнення по керуванню та запізнення при взаємодії між вершинами когнітивної карти. Для першого випадку запропоновано алгоритм керування на основі еталонної моделі замкненої системи, для другого – на основі квадратичного критерію оптимальності. Отримані результати було перевірено на когнітивних картах комерційного банку та системи охорони здоров'я. У ці когнітивні карти було введено різні запізнення, також розроблено закони керування.

Результати дослідження. Моделювання підтвердило, що запропоновані в статті методи забезпечують досягнення мети, тобто дають змогу стабілізувати систему із запізненнями в імпульсному режимі.

Висновки. Проведені у статті дослідження розширили клас керованих когнітивних карт на системи із запізненнями.

Ключові слова: когнітивна карта; імпульсний процес; система із запізненнями; алгоритм керування.

В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ КОГНИТИВНЫХ КАРТ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ

Проблематика. В статье рассматриваются задачи когнитивного моделирования, а именно управления сложными системами, динамика которых в импульсном процессе представлена когнитивными картами. При этом предполагается, что системы функционируют с запаздываниями, которые могут возникать как между координатами вершин когнитивной карты, так и при передаче управляющих сигналов.

Цель исследования. Цель работы – построение моделей когнитивных карт с различными запаздываниями и применение этих моделей для управления импульсными процессами в когнитивных картах.

Методика реализации. В статье рассмотрены два подхода к учету запаздываний – запаздывания по управлению и запаздывания при взаимодействии между вершинами когнитивной карты. Для первого случая предложен алгоритм управления на основе эталонной модели замкнутой системы, для второго – на основе квадратичного критерия оптимальности. Полученные результаты были проверены на когнитивных картах коммерческого банка и системы здравоохранения. В эти когнитивные карты были введены различные запаздывания, также разработаны законы управления.

Результаты исследования. Моделирование подтвердило, что предложенные в статье методы обеспечивают достижения цели, то есть позволяют стабилизировать систему с запаздываниями в импульсном режиме.

Выводы. Проведенные в статье исследования расширили класс управляемых когнитивных карт на системы с запаздываниями.

Ключевые слова: когнитивная карта; импульсный процесс; система с запаздываниями; алгоритм управления.

Рекомендована Радою
Навчально-наукового комплексу
"Інститут прикладного системного
аналізу" НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
16 лютого 2015 року