

**АДАПТИВНОЕ КООРДИНИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ  
СООТНОШЕНИЯМИ КООРДИНАТ ВЕРШИН  
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ  
В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**В.Д. РОМАНЕНКО, Ю.Л. МИЛЯВСКИЙ**

Рассмотрена проблема управления несколькими сложными системами, описываемыми когнитивными картами. В частности, особое внимание уделено координации между этими системами, то есть управлению соотношениями между координатами вершин двух сложных систем. Выведена модель динамики двух взаимосвязанных когнитивных карт. Предложен алгоритм стабилизации координат вершин когнитивных карт. Введен критерий оптимальности, включающий в себя заданное соотношение между координатами вершин двух карт, и разработан метод управления, обеспечивающий соблюдение этих соотношений в импульсном процессе. Разработаны методы стабилизирующего и координирующего управления двумя взаимосвязанными когнитивными картами в импульсном процессе при неизвестных или изменяющихся параметрах когнитивных карт. Результаты проверены на примере системы когнитивных карт двух банков, взаимодействующих между собой. Достигнуто значительное сокращение времени стабилизации координат вершин когнитивной карты и соотношений между ними.

**ВВЕДЕНИЕ**

Сложные системы разной природы содержат большое число координат, взаимодействующих друг с другом, так что каждая координата реагирует на изменение всех других координат. В качестве средства моделирования сложных систем используются когнитивные карты (КК), которые представляют собой ориентированные графы, вершины которых представлены совокупностью  $l_1, l_2, \dots, l_n$  и отображают координаты сложных систем, а ребра — связи между ними. КК лежит в основе когнитивного моделирования слабоструктурированных систем [1–5]. В процессе функционирования сложной системы под влиянием различных возмущений координаты вершин КК изменяются во времени. Согласно [1, 5] предполагается, что каждая вершина  $l_i$  принимает значение  $Y_i(k)$  в дискретные моменты времени  $k = 0, 1, 2, \dots$ . При этом в динамическом режиме значение  $Y_i(k+1)$  определяется величиной  $Y_i(k)$  и информацией о том, увеличили или уменьшили свои значения в момент времени  $k$  вершины  $l_j$ , смежные с  $l_i$ . При этом изменение координат

наты в вершине  $l_j$  в момент  $k$  изображается числом  $P_j(k) = Y_j(k) - Y_j(k-1)$ ,  $k > 0$ , которое согласно [1, 4, 5] принято называть импульсом. Таким образом, импульс  $P_j(k)$ , поступивший в одну из вершин  $l_j$ , будет распространяться по цепочкам КК на остальные вершины, усиливаясь или затухая. Процесс распространения возмущений по КК определяется правилом [1, 5]:

$$Y_i(k+1) = Y_i(k) + \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} P_j(k), \quad (1)$$

где  $\alpha_{ji}$  — весовой коэффициент ребра ориентированного графа, которое идет от вершины  $l_j$  к  $l_i$ . Если дуга между ними отсутствует, то соответствующий коэффициент  $\alpha_{ji} = 0$ .

Правило изменения значений координат вершин КК при импульсном процессе (1) принято формулировать в виде разностного уравнения первого порядка в приращениях переменных [1 – 5]:

$$\Delta Y_i(k+1) = \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \Delta Y_j(k), \quad (2)$$

где  $\Delta Y_i(k) = Y_i(k) - Y_i(k-1)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

В некоторых вершинах  $l_i$  по физическому смыслу необходимо учитывать предысторию изменения динамического состояния, которое задается импульсом  $P_i(k) = Y_i(k) - Y_i(k-1) = \Delta Y_i(k)$ . Это учтено в уравнениях (1), (2) при  $j = i$ . На ориентированном графе вес этого импульса изображается петлей с коэффициентом  $\alpha_{ii}$ .

В векторной форме выражение (2) записывается следующим образом:

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W^T \Delta \bar{Y}(k), \quad (3)$$

где  $W$  — весовая матрица смежности КК, а  $\Delta \bar{Y}$  — вектор приращений значений  $Y_i$  вершин КК при  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Уравнение (3) описывает динамику свободного движения системы в импульсном процессе, т.е. при отсутствии внешних воздействий. Однако обычно у лица, принимающего решения, имеется возможность воздействовать на систему извне. Например, банк может принять решение о выдаче большего объема кредитов, соответственно изменить порог отсечения скоринговой карты, и тогда значение в вершине «кредиты» КК банка возрастет. Это можно представить так, как если бы на эту вершину был подан импульс от дополнительной внешней «управляющей» вершины, действующей только на вершину «кредиты» с единичным весовым коэффициентом. Подобные дополнительные управляющие вершины могут действовать на все либо на некоторые из «основных» вершин КК. В зависимости от этого размерность введенного вектора управления будет равной или меньшей, чем размерность вектора координат вершин КК. Динамика вынужденного движения КК под воздействием внешних управлений будет описываться уравнением

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W^T \Delta \bar{Y}(k) + B \Delta \bar{U}(k),$$

где  $\Delta \bar{U}$  — вектор приращений управляющих воздействий, действующих непосредственно на вершины КК (через диагональную матрицу  $B$ , состоящую из нулей и единиц).

В [6] на основе современной теории управления исследована взаимосвязь динамики системы в пространстве состояний и модели импульсного процесса (2). 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 (2) приращения  $\Delta Y_i(k)$  можно рассматривать как переменные состояния ( $\Delta \bar{Y} = \bar{X}$ ), а матрицу  $W^T$  как матрицу состояния  $A$  в уравнении свободного движения в пространстве состояний

$$\bar{X}(k+1) = A\bar{X}(k). \quad (4)$$

В [7] выполнены исследования возможности применения методов модального управления для стабилизации импульсных процессов в КК. Рассмотрен вопрос введения и синтеза внешних управляющих воздействий на основе модальных регуляторов состояния. Исследованы варианты модального управления импульсным процессом КК с одним и несколькими управляющими воздействиями, которые непосредственно влияют на вершины КК.

Все предыдущие исследования импульсных процессов касались только одной изолированной КК. На практике процессы разной природы, которые могут быть представлены разными КК, иногда необходимо поддерживать в определенных соотношениях. Задача обеспечения заданных соотношений между координатами динамических систем получила название «координирующего управления» и рассматривалась в [8, 9]. В [10] авторами разработана система управления соотношениями координат отдельно взятой КК при неустойчивом импульсном процессе на основе представления динамического режима КК (2) посредством дискретной модели типа «вход – выход» в полных значениях координат КК с последующим проектированием системы стабилизации указанных координат с применением эталонной модели замкнутой системы управления.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Задача управления соотношениями координат взаимодействующих КК в режиме импульсных процессов до настоящего времени не рассматривалась. Однако актуальность этой задачи является очевидной, поскольку в сложных системах разной природы (социальных, экономических, политических, административных, экологических, финансовых и др.) возникает необходимость координировать изменение некоторых важных координат, т.е. обеспечивать во время переходного процесса заданные соотношения между отдельными координатами, представленными в различных КК. Например, необходимо координировать соотношение между объемом выпуска промышленной продукции в заданном регионе, в котором развитие экономики описано первой КК, и загрязнением окружающей среды, представленным отдельной координатой в составе второй КК, в которой отражена экологическая система данного промышленного региона.

Для решения задачи управления соотношениями координат взаимодействующих КК необходимо разработать математические модели взаимодействующих сложных систем, динамика которых может быть представлена в режиме импульсных процессов КК, взаимодействующих между собой. Подразумевается, что системы достаточно автономны, и для каждой из них в отдельности были составлены соответствующие когнитивные модели. Однако между ними есть взаимосвязи, а именно — импульсы в отдельных вершинах одной КК влияют на отдельные вершины другой КК. Объединять две разнородные либо раздельно функционирующие системы в одну суперсистему обычно не является целесообразным. Тем не менее, невозможно и игнорировать взаимодействие между системами. В данной работе предложен подход, позволяющий управлять обеими системами по отдельности, но с учетом взаимного влияния.

Для разработки системы управления указанные когнитивные модели необходимо дополнить внешними управлениями, которые формируются на основе методов современной теории управления и реализуются лицом, принимающим решения, путем воздействия непосредственно на вершины КК.

**Цель работы.** Разработав соответствующие математические модели, выполнить синтез системы стабилизации координат вершин КК на основе квадратичных критериев оптимальности и реализовать адаптивное управление соотношениями между координатами вершин КК.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДВУХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Согласно модели (2), рассмотрим динамику двух КК, которые взаимосвязаны между собой. Импульсные процессы этих КК можно представить разностными уравнениями:

$$\Delta x_i(k+1) = \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \Delta x_j(k) + \sum_{j=1}^p \beta_{ji} \Delta y_j(k), \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

$$\Delta y_i(k+1) = \sum_{j=1}^p \varphi_{ji} \Delta y_j(k) + \sum_{j=1}^n \psi_{ji} \Delta x_j(k), \quad i = 1, \dots, p, \quad (6)$$

где координаты  $x_i$  относятся к первой КК, а  $y_i$  — ко второй. При этом  $\Delta x_i(k) = x_i(k) - x_i(k-1)$ ,  $\Delta y_i(k) = y_i(k) - y_i(k-1)$  — первые разности.

Запишем (5), (6) в матричной форме:

$$\Delta \bar{X}(k+1) = W_1^T \Delta \bar{X}(k) + V_1 \Delta \bar{Y}(k), \quad (7)$$

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W_2^T \Delta \bar{Y}(k) + V_2 \Delta \bar{X}(k), \quad (8)$$

где  $\bar{X}, \bar{Y}$  — векторы координат первой и второй КК соответственно, а  $W_1, W_2$  — их матрицы смежности. Матрицы  $V_1, V_2$  состояются соответственно из коэффициентов  $\beta_{ji}, \psi_{ji}$ , которые отображают взаимосвязи между двумя КК.

Введем обозначения:

$$\Delta \bar{v}(k) = V_1 \Delta \bar{Y}(k), \quad (9)$$

$$\Delta \bar{\xi}(k) = V_2 \Delta \bar{X}(k). \quad (10)$$

Тогда выражения (7), (8), представляющие собой уравнения динамики импульсных процессов в пространстве состояний, будут иметь вид:

$$\Delta \bar{X}(k+1) = W_1^T \Delta \bar{X}(k) + \Delta \bar{v}(k), \quad (11)$$

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W_2^T \Delta \bar{Y}(k) + \Delta \bar{\xi}(k). \quad (12)$$

При этом воздействие импульсов одной КК на другую  $V_1 \Delta \bar{Y}(k)$  и  $V_2 \Delta \bar{X}(k)$  представлены как векторы возмущений  $\Delta \bar{v}$  и  $\Delta \bar{\xi}$ .

Для дальнейшей реализации систем управления будем предполагать, что обе КК являются устойчивыми (то есть собственные числа матриц смежности  $W_1, W_2$  будут по модулю меньше единицы), а также, что перекрестные связи между КК не вносят неустойчивости. Для этого внесется дополнительное требование, чтобы и блочная матрица  $\begin{pmatrix} W_1^T & V_1 \\ V_2 & W_2^T \end{pmatrix}$  имела собственные числа по модулю меньше единицы. Векторы  $\Delta \bar{v}(k), \Delta \bar{\xi}(k)$  можно рассматривать как измеряемые возмущения с нулевым средним, через которые в моделях (11), (12) и осуществляется взаимосвязь между КК.

### **РАЗРАБОТКА ПОДСИТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ**

Модель импульсных процессов взаимодействующих КК (11), (12) описывает свободное движение координат вершин КК в пространстве состояний с точки зрения современной теории управления. Предположим, что на некоторые вершины КК (переменные состояния  $\Delta \bar{X}(k), \Delta \bar{Y}(k)$ ) лицо, принимающее решения, может воздействовать извне. Тогда для разработки системы управления импульсными процессами КК модели свободного движения (11), (12) следует дополнить воздействием внешних сил в форме векторов приращений управлений  $\Delta \bar{U}_1(k), \Delta \bar{U}_2(k)$ , которые воздействуют непосредственно на вершины КК. В результате модели (11), (12) примут вид:

$$\Delta \bar{X}(k+1) = W_1^T \Delta \bar{X}(k) + G_1 \Delta \bar{U}_1(k) + \Delta \bar{v}(k), \quad (13)$$

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W_2^T \Delta \bar{Y}(k) + G_2 \Delta \bar{U}_2(k) + \Delta \bar{\xi}(k). \quad (14)$$

Матрицы  $G_1, G_2$  формируются отдельно для каждой КК, они, как правило, диагональные и состояются из нулей и единиц.

Поскольку модели (13), (14) представляют собой уравнения состояния при воздействии измеряемых возмущений  $\Delta \bar{v}(k), \Delta \bar{\xi}(k)$  с нулевыми средними, то для стабилизации импульсных процессов КК можно использовать

метод синтеза регуляторов состояния на основе квадратичных критериев оптимальности в виде обобщенных дисперсий [11]:

$$J_1(k+1) = E\{\Delta\bar{X}^T(k+1)\Delta\bar{X}(k+1) + \Delta\bar{U}_1^T(k)R_1\Delta\bar{U}_1(k)\}, \quad (15)$$

$$J_2(k+1) = E\{\Delta\bar{Y}^T(k+1)\Delta\bar{Y}(k+1) + \Delta\bar{U}_2^T(k)R_2\Delta\bar{U}_2(k)\}, \quad (16)$$

где  $E$  — оператор математического ожидания, а  $R_1, R_2$  — положительно определенные матрицы. В результате минимизации критериев (15), (16) получим:

$$\frac{\partial J_1(k+1)}{\partial \Delta\bar{U}_1(k)} = 2G_1^T(W_1^T\Delta\bar{X}(k) + G_1\Delta\bar{U}_1(k) + \Delta\bar{v}(k)) + 2R_1\Delta\bar{U}_1(k) = 0,$$

$$\frac{\partial J_2(k+1)}{\partial \Delta\bar{U}_2(k)} = 2G_2^T(W_2^T\Delta\bar{Y}(k) + G_2\Delta\bar{U}_2(k) + \Delta\bar{\xi}(k)) + 2R_2\Delta\bar{U}_2(k) = 0.$$

Тогда законы управления многомерных регуляторов состояния с минимальной обобщенной дисперсией для первой и второй КК соответственно будут иметь вид

$$\Delta\bar{U}_1(k) = -(G_1^T G_1 + R_1)^{-1} G_1^T (W_1^T \Delta\bar{X}(k) + \Delta\bar{v}(k)), \quad (17)$$

$$\Delta\bar{U}_2(k) = -(G_2^T G_2 + R_2)^{-1} G_2^T (W_2^T \Delta\bar{Y}(k) + \Delta\bar{\xi}(k)). \quad (18)$$

При помощи матриц  $R_1, R_2$  можно регулировать допустимые значения изменений приращений векторов управлений  $\Delta\bar{U}_1(k), \Delta\bar{U}_2(k)$ , что обеспечит их физическую реализацию при стабилизации импульсных процессов КК.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЯМИ МЕЖДУ КООРДИНАТАМИ ВЕРШИН КОГНИТИВНЫХ КАРТ

Соотношения между координатами вершин первой и второй КК задается в следующей форме:

$$S\Delta\bar{X}(k) = f(\Delta\bar{Y}(k)), \quad (19)$$

где  $S$  — заданная матрица размерности  $s \times n, s < n, f: R^p \rightarrow R^s$  — некоторая вектор-функция от вектора приращений координат второй КК. Задача координирующего управления заключается в том, чтобы обеспечить максимальное быстродействие выполнения системы соотношений (19) во время импульсного процесса двух взаимодействующих КК.

Предположим, что вторая КК находится в режиме свободного движения. Тогда синтез регулятора состояния для первой КК, которая описывается уравнением (13), производится на основе минимизации следующего квадратичного критерия оптимальности:

$$J(k+1) = E\{(S\Delta\bar{X}(k+1) - f(\Delta\bar{Y}(k)))^T (S\Delta\bar{X}(k+1) - f(\Delta\bar{Y}(k))) + \Delta\bar{U}_1^T(k)R\Delta\bar{U}_1(k)\}. \quad (20)$$

Применяя (13), находим первую производную по вектору управления и приравниваем ее к нулю:

$$\frac{\partial J(k+1)}{\partial \Delta \bar{U}_1(k)} = 2G_1^T S^T (SW_1^T \Delta \bar{X}(k) + SG_1 \Delta \bar{U}_1(k) + S \Delta \bar{v}(k) - f(\Delta \bar{Y}(k))) + 2R \Delta \bar{U}_1(k) = 0,$$

откуда определяется закон координирующего управления для достижения (19):

$$\Delta \bar{U}_1(k) = -(G_1^T S^T SG_1 + R)^{-1} G_1^T S^T (SW_1^T \Delta \bar{X}(k) + S \Delta \bar{v}(k) - f(\Delta \bar{Y}(k))). \quad (21)$$

Благодаря выбору ненулевой матрицы  $R$  решение задачи минимизации критерия (20) будет однозначным. Поскольку данная система (13), (14) записана в приращениях переменных, задача координации не противоречит задаче стабилизации, потому что в установившемся состоянии приращения переменных равны нулю, и соотношение (19) выполняется.

## РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОГО КООРДИНИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В процессе функционирования сложных систем точные значения элементов матриц  $W_1, W_2, V_1, V_2$  моделей импульсных процессов взаимодействующих КК (7), (8) часто неизвестны и изменяются во времени. Допустим, что изменяются все коэффициенты  $\alpha_{ji}, \beta_{ji}, \varphi_{ji}, \psi_{ji}$  в (5), (6). Необходимо на каждом периоде дискретизации осуществлять переоценивание элементов  $n$  строк матриц  $W_1, V_1$  и  $p$  строк матриц  $W_2, V_2$ . Рассмотрим оценивание коэффициентов модели для первой КК (5), так как для второй КК (6) все действия выполняются аналогично.

Обозначим вектор измерений

$$Z_i(k) = [\Delta x_1(k-1), \dots, \Delta x_n(k-1), \Delta y_1(k-1), \dots, \Delta y_p(k-1)]^T$$

и вектор оцениваемых коэффициентов

$$\Theta_i = [\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{ni}, \beta_{1i}, \dots, \beta_{pi}], \quad i = 1, \dots, n.$$

Тогда, если  $g_{1ii}$  — диагональные элементы матрицы  $G_1$  (при нулевых недиагональных), уравнения состояния для каждой координаты первой управляемой КК (13) можно записать следующим образом:

$$\Delta x_i(k) - g_{1ii} \Delta u_i(k-1) = Z_i^T(k) \Theta_i. \quad (22)$$

Так как средние значения приращений координат КК в импульсном процессе равны нулю, то для оценивания вектора  $\Theta_i$  можно применить рекуррентный метод наименьших квадратов:

$$\hat{\Theta}_i(k) = \hat{\Theta}_i(k-1) + K_i(k)(\Delta x_i(k) - g_{1ii} \Delta u_i(k-1) - Z_i^T(k) \hat{\Theta}_i(k-1));$$

$$K_i(k) = \frac{1}{1 + Z_i^T(k) P_i(k-1) Z_i(k)} P_i(k-1) Z_i(k);$$

$$P_i(k) = P_i(k-1) - P_i(k-1)Z_i(k)(1 + Z_i^T(k)P_i(k-1)Z_i(k))^{-1}Z_i^T(k)P_i(k-1). \quad (23)$$

Рекуррентная процедура (23) метода наименьших квадратов повторяется на каждом периоде дискретизации  $n$  раз для каждой координаты вектора  $\Delta\bar{X}$  и соответственно для каждой строки матриц  $W_1, V_1$ . При этом следует учитывать, что часть коэффициентов  $\alpha_{ji}, \beta_{ji}$  в (5) равны нулю в случае, когда между соответствующими вершинами КК нет ребер или когда вершины одной КК не влияют на другую, соответственно размерность векторов  $Z_i, \Theta_i$  уменьшается. Полученные по методу (23) оценки  $\hat{\Theta}_i(k)$  для первой и второй КК можно использовать вместо истинных значений на текущем периоде дискретизации в законах управления (17), (18), а также в законе координирующего управления (21).

### ПРИМЕР КООРДИНИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУМЯ КОГНИТИВНЫМИ КАРТАМИ

Рассмотрим когнитивную модель деятельности банка [7]. Предположим, что КК устойчива, и ее матрица смежности имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -0,2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0,15 & 0 & 0 & 0 & 0,85 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0,13 & 0,75 & 0 & -0,95 & 0,3 & 0,1 \\ 0 & -0,2 & 0 & 0,8 & 0,9 & 0 & -0,2 \\ 0,1 & 0,03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0 & 0,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,7 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

При этом вершины КК упорядочены следующим образом: 1 — региональная сеть, 2 — капитал, 3 — кредиты, 4 — депозиты, 5 — ликвидные активы, 6 — мера риска стабильности, 7 — мера риска ликвидности.

Пусть взаимодействуют два похожих банка (в рамках одной группы) с одинаковыми КК, имеющими матрицы смежности  $W_1 = W_2 = W$ . Предположим, что объемы кредитного и депозитного портфелей взаимосвязаны так, что увеличение портфеля одного банка приводит к уменьшению соответствующего другого банка. Например, пусть

$$V_1 = V_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$



Легко убедиться, что собственные числа матрицы  $\begin{pmatrix} W_1^T & V_1 \\ V_2 & W_2^T \end{pmatrix}$  по модулю меньше единицы.

Пусть начальное значение вектора координат вершин первой КК равно  $(100 \ 500 \ 1500 \ 1200 \ 200 \ 150 \ 250)^T$ , а начальный импульс равен  $(-2 \ 0 \ -20 \ -18 \ 2 \ 0 \ 0)^T$ . Для второй КК положим начальные значения равными  $(120 \ 550 \ 1400 \ 1000 \ 240 \ 150 \ 250)^T$  и  $(-5 \ 0 \ -25 \ -10 \ 3 \ 0 \ 0)^T$  соответственно. На рис. 1 показана динамика импульсного процесса первого банка при отсутствии управления.

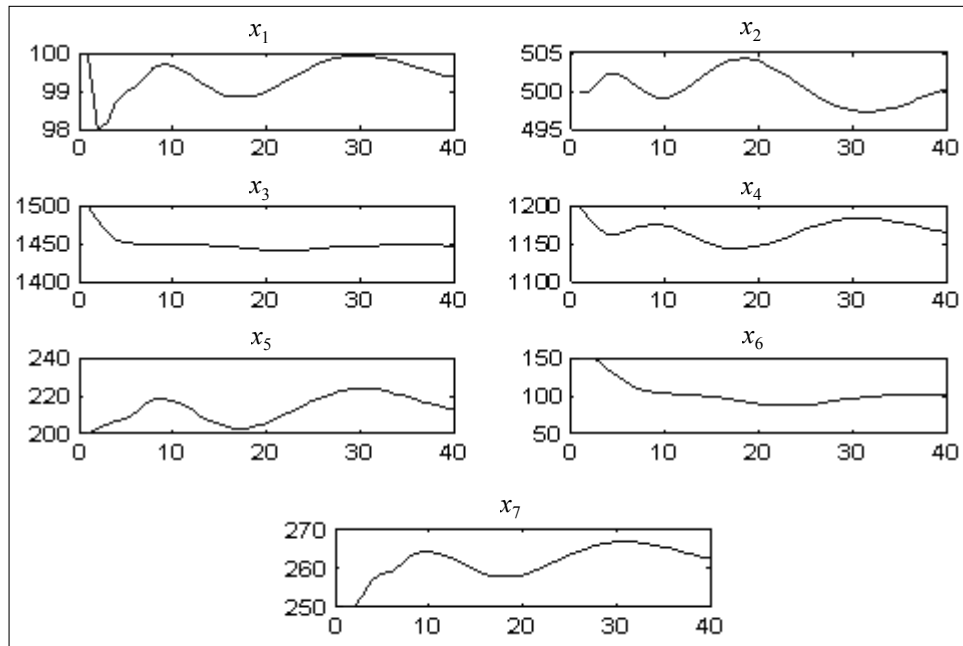


Рис. 1. Динамика координат КК банка без управления

Рассмотрим задачу стабилизации импульсного процесса первого банка с адаптивным оцениванием всех ненулевых параметров. Второй банк пребывает в режиме свободного движения, и по предположению мы не можем на него влиять. Положим в (13)  $G_1 = I$  — единичная квадратная матрица. Можно убедиться, что в этом случае система управляема. Положим также  $R_1 = I$  в критерии (15). С помощью закона управления (17) и алгоритма оценивания (23) получим следующие результаты (рис. 2). Можно видеть, что стабилизация происходит быстрее, чем на рис. 1, и амплитуда колебаний меньше.

Рассмотрим задачу координации. Пусть заданы следующие соотношения, которые должны соблюдаться между двумя рассматриваемыми банками группы:

$$\Delta x_1 = \frac{1}{2} \Delta y_1, \quad \Delta x_3 - \Delta x_4 = -\Delta y_7.$$

Эти соотношения можно представить в форме (19), где

$$S = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad f(\Delta\bar{Y}) = \begin{pmatrix} \Delta y_2 \\ -\Delta y_7 \end{pmatrix}.$$

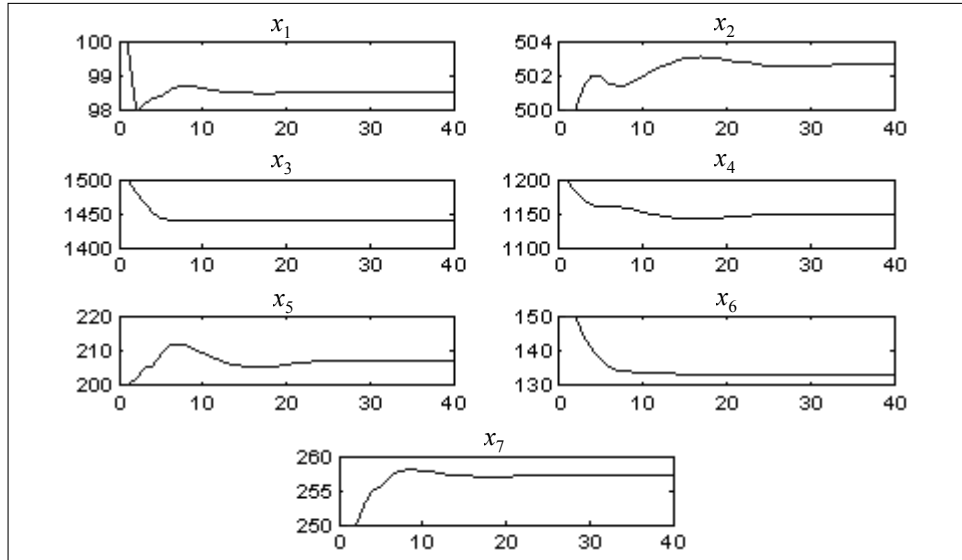


Рис. 2. Динамика координат КК банка при стабилизации с адаптивным оцениванием

Цель координации — невязки соотношений  $\bar{e} = f(\Delta\bar{Y}(k)) - S\Delta\bar{X}(k)$  должны сходиться к нулю. Динамика невязок соотношений при стабилизирующем (но не координирующем) управлении (17) показана на рис. 3.

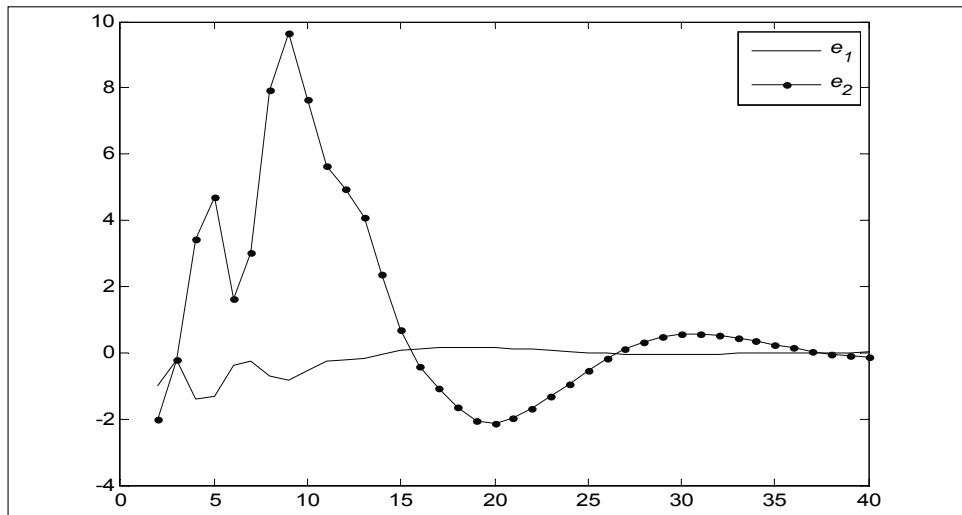


Рис. 3. Динамика невязок соотношений при адаптивном стабилизирующем управлении

Если вместо (17) применять координирующий закон управления (21) и алгоритм оценивания (23), невязки соотношений сходятся к нулю значительно быстрее (рис. 4). При этом динамика координат КК практически не изменяется (рис. 5).

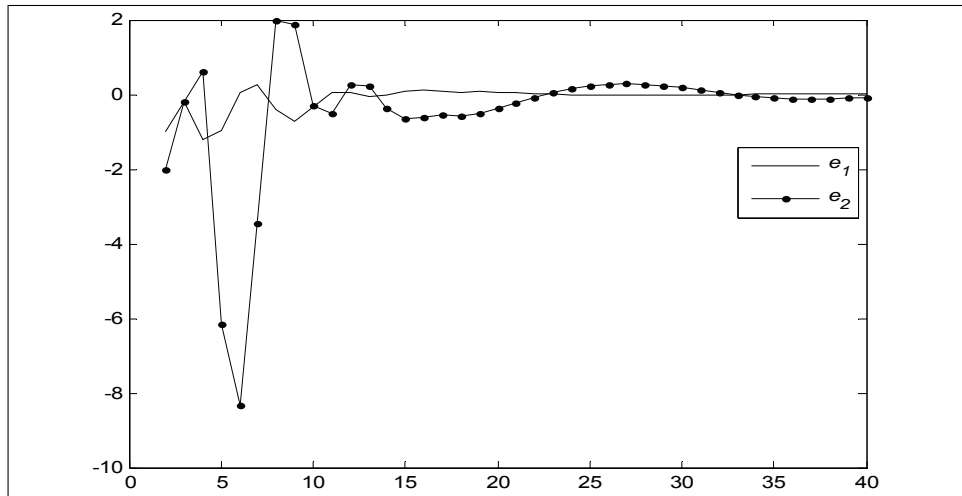


Рис. 4. Динамика невязок соотношения при адаптивном координирующем управлении

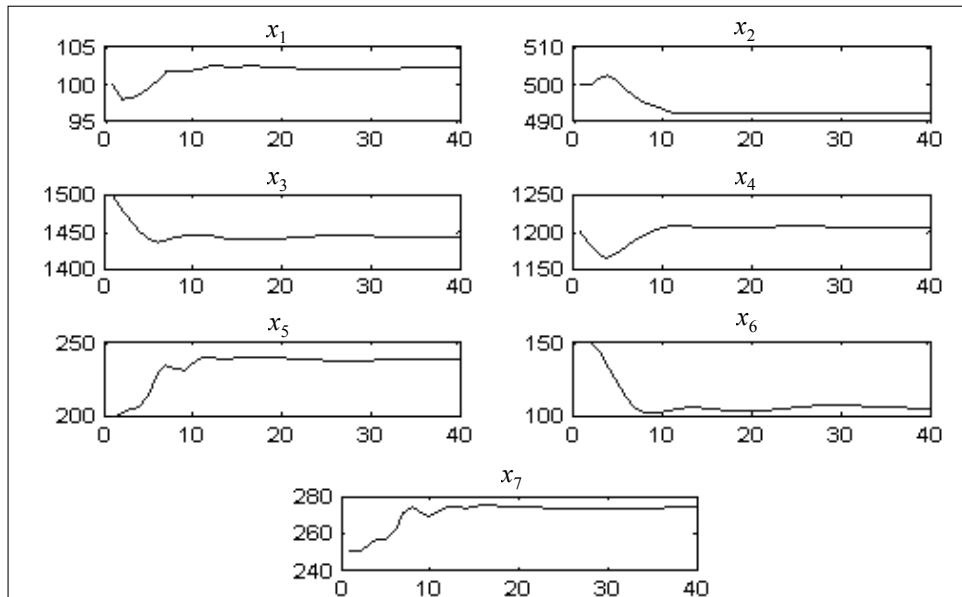


Рис. 5. Динамика координат КК банка при адаптивном координирующем управлении

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании проведенных исследований можно утверждать, что методы адаптивной стабилизации и координации двух взаимосвязанных КК, предложенные в данной работе, позволяют значительно увеличить скорость установления координат КК и желаемых соотношений между ними. Таким образом, если заданы две взаимосвязанные устойчивые КК с неизвестными или изменяющимися параметрами, а также ряд соотношений между координатами этих КК, то можно сказать, что с помощью разработанных законов управления достигнута возможность соблюдения этих соотношений в импульсном процессе.

## ВЫВОДЫ

Предложенные в работе методы решают задачу стабилизирующего и координирующего адаптивного управления устойчивыми КК, взаимодействующими между собой. Предложенная математическая модель взаимодействия двух КК позволила отобразить взаимодействие двух систем при импульсном процессе. С помощью управления КК на основе алгоритма, минимизирующего квадратичный критерий оптимальности, удалось существенно уменьшить время и амплитуду стабилизации координат вершин КК. Разработанный координирующий закон управления, в свою очередь, позволил значительно ускорить процесс установления заданных соотношений между вершинами взаимодействующих КК в импульсном процессе. Результаты были использованы для стабилизации и координации переходных процессов в двух взаимодействующих коммерческих банках.

## ЛИТЕРАТУРА

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 // International Journal of Man-Machine Studies. — 1986. — 24. — P. 65–75.
3. *Максимов В.И.* Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 30–38.
4. *Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И., Максимов В.И.* Когнитивный подход в управлении // Проблемы управления. — 2002. — № 3. — С. 2–8.
5. *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.
6. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.* Обеспечение устойчивости импульсных процессов в когнитивных картах на основе моделей в пространстве состояний // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2014. — № 1. — С. 26–42.
7. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.* Стабилизация импульсных процессов в когнитивных картах сложных систем на основе модальных регуляторов состояния // Кибернетика и вычислительная техника. — 2015. — Вып. 179. — С. 43–55.
8. *Бойчук Л.М.* Синтез координирующих систем автоматического управления. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 160 с.
9. *Мирошник И.В.* Согласованное управление многоканальными системами. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 129 с.
10. *Романенко В.Д., Милявский Ю.Л.* Управление соотношениями координат когнитивной модели сложной системы при неустойчивом импульсном процессе // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 121–129.
11. *Изерман Р.* Цифровые системы управления. — М.: Мир, 1984. — 541 с.

Поступила 06.10.2014