

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ С ПОДАВЛЕНИЕМ ОГРАНИЧЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНВАРИАНТНЫХ ЭЛЛИПСОИДОВ

В.Д. РОМАНЕНКО, Ю.Л. МИЛЯВСКИЙ

Аннотация. Исследовано применение метода инвариантных эллипсоидов для подавления ограниченных возмущений при частичном управлении динамическими процессами в сложных системах разной природы, представленными математическими моделями импульсных процессов в когнитивных картах (КК). При разработке алгоритма подавления ограниченных возмущений применен инструментальный линейных матричных неравенств. Модель динамики импульсных процессов КК разделяется на две взаимосвязанные системы разностных уравнений соответственно с измеряемыми и неизменяемыми координатами вершин КК. Изменения неизменяемых координат учтены в качестве ограниченных возмущений в первой системе уравнений модели КК для импульсных процессов с измеряемыми координатами.

Ключевые слова: когнитивная карта, линейные матричные неравенства, инвариантный эллипсоид, замкнутая система управления, регулятор состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Когнитивное моделирование применяется в тех случаях, когда объектом исследования является сложная система большой размерности с многочисленными перекрестными связями. К таким сложным системам можно отнести большинство реальных экономических, социальных, финансовых, политических, экологических, образовательных систем. В основе лежит понятие когнитивной карты (КК), которая согласно работе [1] представляет собой взвешенный ориентированный граф. Координаты вершин (узлов) этого графа отображают компоненты сложных систем, а ребра описывают связи между этими компонентами. Построение КК выполняется экспертами, что позволяет количественно и качественно описать причинно-следственные взаимосвязи между компонентами сложных систем. При воздействии на одну или несколько вершин КК внешних возмущений в виде импульсов в дискретные моменты времени модель КК переходит в динамический переходной режим, который в работе [1] получил название импульсного процесса. Правило изменения значений координат вершин КК при импульсном процессе принято формулировать в виде разностного уравнения первого порядка в приращениях переменных [1]:

$$\Delta z_i(k+1) = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \Delta z_j(k), \quad (1)$$

где $\Delta z_i(k) = z_i(k) - z_i(k-1)$, α_{ij} — весовой коэффициент дуги взвешенного ориентированного графа, которая соединяет j -ю вершину КК с i -й; n —

количество вершин КК. В векторно-матричной форме выражение (1) имеет вид

$$\Delta \bar{z}(k+1) = A \Delta \bar{z}(k), \quad (2)$$

где A — транспонированная весовая матрица смежности КК; $\Delta \bar{z}$ — вектор приращений координат z_i в вершинах КК.

Предположим, что на некоторые вершины КК z_i можно воздействовать извне путем варьирования ресурсами, связанными с координатами вершин. Тогда для разработки системы управления импульсным процессом КК необходимо дополнить модель свободного движения (2) воздействием внешних вынуждающих сил в виде вектора приращения управляющих воздействий, которые приложены непосредственно на изменение координат вершин КК. Тогда можно получить модель управляемого импульсного процесса КК в следующей форме:

$$\Delta \bar{z}(k+1) = A \Delta \bar{z}(k) + B \Delta \bar{u}(k), \quad (3)$$

где $\Delta \bar{u}(k) = \bar{u}(k) - \bar{u}(k-1)$, а матрица управления B формируется проектировщиком системы автоматизированного управления. В работах [2, 3] выполнено проектирование дискретных регуляторов для стабилизации импульсного процесса КК (3) на основе известных методов теории автоматического управления при отсутствии случайных возмущений. Однако предполагается, что координаты всех вершин КК являются измеряемыми в дискретные моменты времени согласно модели (1), (2).

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Координаты вершин КК для различных сложных систем не все измеряются. Например, невозможно точно измерить уровень здоровья населения, уровень демократизации общества, уровень коррупции и теневой экономики, уровень политической или экономической активности и т.д. В теории автоматического управления в дискретном времени [4, 5] неизменяемые переменные состояния многомерного объекта рекомендуется оценивать при помощи наблюдателя Льюэнбергера или фильтра Калмана соответственно при функционировании модели объекта в детерминированной или стохастической среде. Использование этого подхода для реализации систем управления импульсными процессами в КК сложных систем на практике не приемлемо, так как при оценке переменных состояния по фильтру Калмана необходимо иметь информацию о дисперсиях возмущений. Для сложных систем разной природы, модели которых представлены в виде КК, эту информацию получить невозможно. В то же время применение наблюдателя Льюэнбергера для оценки неизменяемых переменных состояния основано на предположении, что система функционирует в детерминированной среде, т.е. при отсутствии случайных возмущений. Однако на координаты сложных систем всегда воздействуют возмущения, которые нельзя не учитывать при оценке неизменяемых координат z_i в модели импульсного процесса КК (1).

Для решения этой проблемы в данной работе выполнена декомпозиция исходной КК (1) сложной системы на две взаимосвязанные КК. При этом n координат вершин z_i исходной КК разделены на p измеряемых вершин

x_i ($i = 1, \dots, p$) и $n - p$ неизмеряемых вершин y_l ($l = p + 1, \dots, n$). Тогда модель импульсного процесса (1) можно представить в виде двух взаимосвязанных импульсных процессов [6]:

$$\Delta x_i(k+1) = \sum_{j=1}^p a_{ij} \Delta x_j(k) + \sum_{j=p+1}^n d_{ij} \Delta y_j(k), \quad i = 1, \dots, p, \quad (4)$$

$$\Delta y_l(k+1) = \sum_{j=p+1}^n c_{lj} \Delta y_j(k) + \sum_{j=1}^p \psi_{lj} \Delta x_j(k), \quad l = p + 1, \dots, n. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) можно записать в векторно-матричной форме:

$$\Delta \bar{X}(k+1) = A_1 \Delta \bar{X}(k) + D \Delta \bar{Y}(k), \quad (6)$$

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = C \Delta \bar{Y}(k) + \Psi \Delta \bar{X}(k), \quad (7)$$

где \bar{X} — вектор измеряемых координат вершин КК; \bar{Y} — вектор неизмеряемых координат. Матрицы A_1 и C состояются соответственно из коэффициентов a_{ij} и c_{lj} , а матрицы D и Ψ — из коэффициентов d_{ij} и ψ_{lj} . При этом матрицы D и Ψ отображают взаимосвязи между первой (6) и второй (7) частями исходной КК (2).

Для первой части КК (6) влияние вершин $\Delta \bar{Y}(k)$ можно считать неизмеряемыми возмущениями с неизвестными вероятностными характеристиками. В дальнейшем предполагается, что возмущения $\Delta \bar{Y}(k)$ не являются ни случайными, ни гармоническими. Можно только ввести ограничения на величину этих возмущений.

В литературе [7, 8] разработаны методы теории робастного управления, в которых множество возможных состояний $\Delta \bar{Y}(k)$ как возмущений в модели (6) предлагается ограничить по норме L_∞ :

$$\|\Delta \bar{Y}(k)\|_\infty = \sup_{k \geq 0} [\Delta \bar{Y}^T(k) \Delta \bar{Y}(k)]^{1/2} \leq 1. \quad (8)$$

При этом для описания характеристики влияния возмущений типа (8) на траекторию движения динамической дискретной системы (6) в этих работах предложены инвариантные эллипсоиды по переменным состояния $\Delta \bar{X}(k)$ в следующем виде:

$$\varepsilon_{\Delta \bar{X}} = \{\Delta \bar{X}(k) \in \mathbb{R}^n : \Delta \bar{X}^T(k) P^{-1} \Delta \bar{X}(k) \leq 1\}, \quad P > 0, \quad (9)$$

если из условия $\Delta \bar{X}(0) \in \varepsilon_{\Delta \bar{X}}$ следует выполнение условия $\Delta \bar{X}(k) \in \varepsilon_{\Delta \bar{X}}$ для всех дискретных моментов времени $k = 1, 2, 3, \dots$. Матрица P называется матрицей эллипсоида $\varepsilon_{\Delta \bar{X}}$. В работе [8] доказано, что эллипсоид $\varepsilon_{\Delta \bar{X}}$ (9) будет инвариантным для динамической системы (6) с L_∞ -ограниченными возмущениями (8) тогда и только тогда, когда матрица удовлетворяет линейному матричному неравенству

$$\frac{1}{\alpha} A_1 P A_1^T - P + \frac{D D^T}{1 - \alpha} \leq 0, \quad P \geq P_0, \quad \alpha \in (0, 1). \quad (10)$$

В работе [8] рассмотрен синтез статической обратной связи по состоянию, которая минимизирует размер инвариантных эллипсоидов динамической системы. При этом задача синтеза сведена к эквивалентным условиям в виде линейных матричных неравенств, которые решаются численными методами.

Для подавления ограниченных возмущений $\Delta\bar{Y}(k)$ в уравнении (6) с измеряемыми координатами состояния $\Delta\bar{X}(k)$ введем вектор управления $\Delta\bar{u}(k)$:

$$\Delta\bar{X}(k+1) = A_1\Delta\bar{X}(k) + B\Delta\bar{u}(k) + D\Delta\bar{Y}(k), \quad (11)$$

где $\dim \Delta\bar{u}(k) \leq p$. Тогда уравнение регулятора состояния, который реализует статическую обратную связь по состоянию, будет иметь вид

$$\Delta\bar{u}(k) = -K_p\Delta\bar{X}(k). \quad (12)$$

Необходимо отметить, что в модели импульсного процесса (6), как в уравнении состояния, составляющие вектора $\Delta\bar{X}(k)$ полностью измеряются. Поэтому для классической модели в пространстве состояний в данном случае нет необходимости применять уравнение измерения.

Регулятор состояния (12) должен реализовывать оптимальную зависимость скорости изменения вектора управления $\Delta\bar{u}(k)$ от скорости изменения измеряемых координат вершин КК $\Delta\bar{X}(k)$. Поэтому, если координаты $\bar{X}(k)$ не изменяются, то приращение $\Delta\bar{u}(k)$ будет равно нулю. Таким образом, управление $\Delta\bar{u}(k)$ предназначено для стабилизации переходного процесса в динамике сложной системы, представленной моделью импульсного процесса КК (11) при воздействии неизмеряемых возмущений $\Delta\bar{Y}(k)$ в ограниченном диапазоне (8).

Цель работы — разработка алгоритма реализации закона управления (12) импульсным процессом КК для измеряемых координат $\Delta\bar{X}(k)$ (11), обеспечивающего минимальный размер инвариантного эллипсоида (9) по критерию следа матрицы

$$\text{tr } P(\alpha) \rightarrow \min, \quad \alpha^* \leq \alpha < 1, \quad (13)$$

с максимальным подавлением возмущений $\Delta\bar{Y}(k)$ (различной природы), которые можем ограничить только максимальным диапазоном (8). Естественно, минимизация размера инвариантного эллипсоида эквивалентна задаче минимизации матрицы (13) при ограничении типа линейного матричного неравенства (10) согласно работам [7, 8].

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПРОЦЕССА В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ

На основе модели (11) и закона управления (12) уравнение замкнутой системы управления импульсным процессом КК будет иметь вид

$$\Delta\bar{X}(k+1) = (A_1 - BK_p)\Delta\bar{X}(k) + D\Delta\bar{Y}(k). \quad (14)$$

Предполагается, что пара (A_1, B) в модели (11) является управляемой. Тогда линейное матричное неравенство (10) для замкнутой системы (14) приобретает форму

$$\frac{1}{\alpha}(A_1 - BK_p)P(A_1 - BK_p)^T - P + \frac{DD^T}{1-\alpha} \leq 0, \quad (15)$$

и после перемножения членов:

$$\frac{1}{\alpha}(A_1PA_1^T - BK_pPA_1^T - A_1PK_p^TB^T + BK_pPK_p^TB^T) - P + \frac{DD^T}{1-\alpha} \leq 0. \quad (16)$$

Неравенство (16) является нелинейным относительно P и K_p . В работе [8] предложена замена $L = K_pP$, а также введение матрицы $R = R^T$, для которой выполняется дополнительное ограничение

$$\begin{bmatrix} R & L \\ L^T & P \end{bmatrix} \geq 0. \quad (17)$$

Поскольку по формуле Шура при $P > 0$ неравенство (17) эквивалентно $R \geq LP^{-1}L^T = K_pPK_p^T$, то для выполнения неравенства (16) достаточно, чтобы

$$\frac{1}{\alpha}(A_1PA_1^T - BLA_1^T - A_1L^TB^T + BRB^T) - P + \frac{DD^T}{1-\alpha} \leq 0. \quad (18)$$

Минимизация критерия (13) при ограничениях (17) и (18) выполняется по переменным P, L, R методом полуопределенного программирования, например, путем использования SeDuMi Toolbox на базе MatLab. Пусть $\hat{\alpha}, \hat{P}, \hat{L}, \hat{R}$ обеспечивают минимум (13) при ограничениях (17), (18). Тогда матрица \hat{K}_p оптимального регулятора (12) находится как

$$\hat{K}_p = \hat{L}\hat{P}^{-1}. \quad (19)$$

В этом алгоритме для синтеза матрицы \hat{K}_p не введено ограничения на величину синтезируемого вектора управления $\Delta\bar{u}(k)$. В этом случае можно достичь минимальных значений критерия (13), при которых согласно формулам (12), (19) будут формироваться очень большие, физически нереализуемые составляющие вектора управления $\Delta\bar{u}(k)$. Поэтому необходимо при синтезе регулятора (12) ввести ограничение на управление

$$\|\Delta\bar{u}(k)\| \leq \gamma, \quad \gamma > 0, \quad (20)$$

где $\|\cdot\|$ — евклидова норма. Согласно методике [8] обеспечение этого ограничения можно свести к выполнению для матриц P, L линейного матричного неравенства

$$\begin{pmatrix} P & L^T \\ L & \gamma^2 I \end{pmatrix} \geq 0. \quad (21)$$

Таким образом, в этом случае для синтеза оптимальной матрицы регулятора (19) минимизация критерия (13) по переменным P, L, R проводится при совместных ограничениях (17), (18) и (21).

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ПРОЦЕССОМ В КОГНИТИВНОЙ КАРТЕ IT - КОМПАНИИ

В работе [9] построена КК (рис. 1) для исследования сценариев развития IT-компании, на основе которой рассмотрены различные сценарии разработки информационных технологий с точки зрения взаимодействия интеллектуальных активов и финансовых средств для обеспечения высокого качества и конкурентоспособности проекта, минимизации продолжительности его выполнения и получения максимальной прибыли.

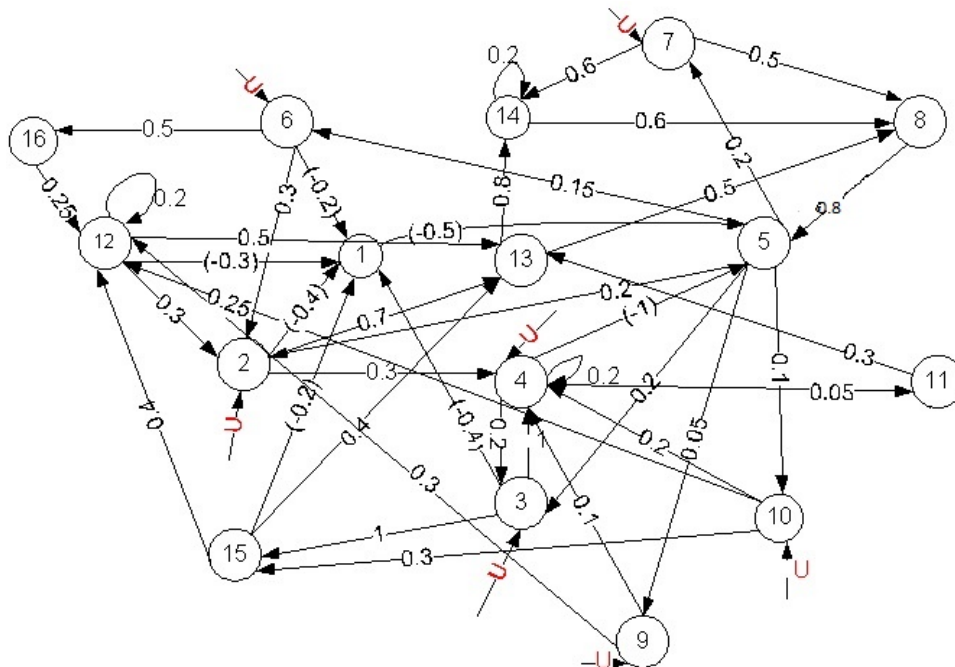


Рис. 1. Когнитивная карта IT-компании

В данной КК есть измеряемые и неизменяемые координаты вершин. Выполним декомпозицию этой КК на две взаимосвязанные части КК. Первая часть КК включает следующие измеряемые координаты вершин: 1 — длительность разработки проекта; 2 — затраты на инновации; 3 — зарплату, премии, бонусы; 4 — бюджет проекта; 5 — прибыль; 6 — затраты на функционирование группы менеджеров; 7 — затраты на маркетинг; 8 — продажу однотипных проектов; 9 — затраты на проведение переподготовки; 10 — затраты на повышение квалификации.

Вторая часть КК включает неизменяемые координаты вершин: 11 — технический контроль; 12 — интеллектуальные активы; 13 — качество проекта; 14 — конкурентоспособность; 15 — удовлетворенность работой; 16 — обмен опытом, информационное взаимодействие.

Ребра между вершинами КК установлены на основе причинно-следственных связей, а весовые коэффициенты для каждого ребра определены экспертами согласно уровню влияния одной вершины на другую.

Для уравнения импульсного процесса первой части КК с измеряемыми координатами вершин $\Delta\bar{X}$ (11) векторы координат будут иметь составляющие: $\Delta\bar{X} = (\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta x_7, \Delta x_8, \Delta x_9, \Delta x_{10})^T$, $\Delta\bar{Y} = (\Delta y_{11}, \Delta y_{12}, \Delta y_{13}, \Delta y_{14}, \Delta y_{15}, \Delta y_{16})^T$. Вектор управления $\Delta\bar{u}$ имеет такие составляющие: $\Delta\bar{u} = (\Delta u_2, \Delta u_3, \Delta u_4, \Delta u_6, \Delta u_7, \Delta u_9, \Delta u_{10})^T$, в котором Δu_i воздействует непосредственно на i -ю вершину КК путем изменения ресурсов этой вершины.

Уравнение второй части КК (7) с неизменяемыми координатами вершин $\Delta\bar{Y}$ имеет тот состав векторов $\Delta\bar{X}$ и $\Delta\bar{Y}$, что и в первой части КК. При этом вектор $\Delta\bar{Y}$ представляет внешние неконтролируемые ограниченные по амплитуде возмущения для модели (11). Согласно КК (рис. 1) матрицы A_1, B, D в модели (11) будут равны:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & -0,4 & -0,4 & 0 & 0 & -0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 1 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0,2 \\ -0,5 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 & -0,3 & 0 & 0 & -0,2 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для модели второй части КК (7) матрицы C, Ψ равны:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0,4 & 0,25 \\ 0,3 & 0,5 & 0 & 0 & 0,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0,25 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Матрица управляемости $R_c = (B \ A_1 B \ A_1^2 B \dots A_1^9 B)$ имеет ранг, равный 10, поэтому система (11) управляема. Моделирование замкнутой системы управления (14) проведено при подаче возмущения на вершину 12 (интеллектуальные активы) и на вершину 14 (конкурентоспособность).

Графики переходных процессов координат вершин КК x_i и y_i при подаче возмущения на вершину 12 в сторону уменьшения координаты, что соответствует утечке интеллектуальных активов, показаны на рис. 2. Пунктиром обозначены переходные процессы при отсутствии управлений согласно модели (6), а сплошными линиями — координаты вершин согласно модели (12) при подаче ограниченных (согласно неравенствам (20), (21)) синтезированных управлений $\Delta \bar{u}(k)$, графики которых показаны на рис. 3.

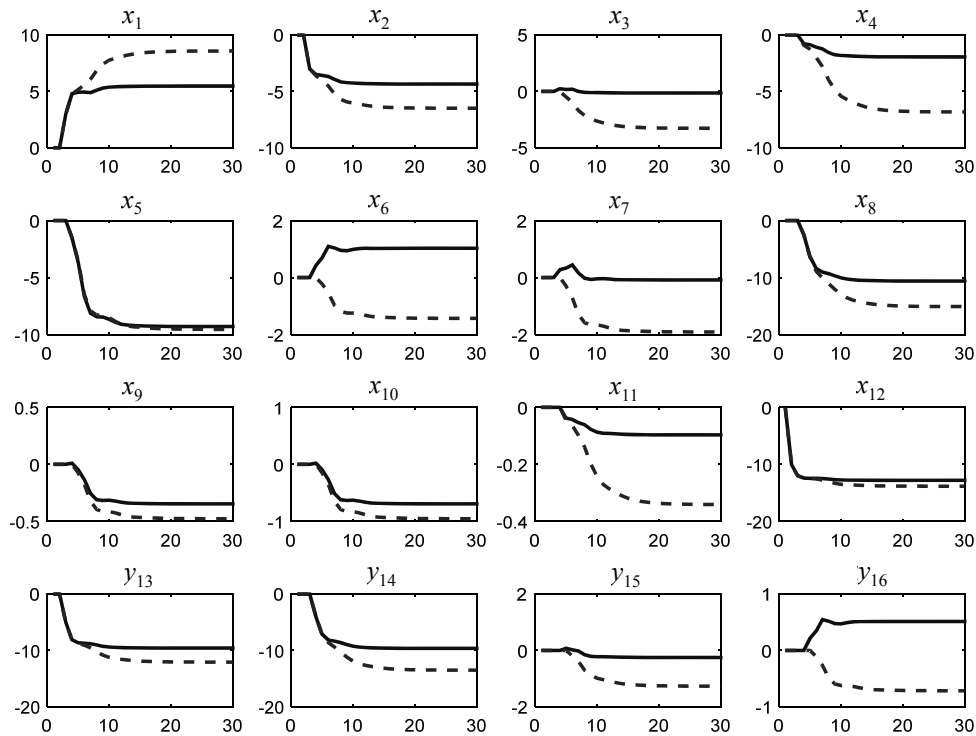


Рис. 2. Управляемый импульсный процесс при возмущении в вершине 12

На рис. 4 показаны графики переходных процессов при подаче возмущения на вершину 14 (конкурентоспособность) в сторону уменьшения. При этом на синтезированные управляющие воздействия также введены

ограничения согласно неравенствам (20), (21). Графики синтезированных ограниченных по амплитуде управляющих воздействий показаны на рис. 5.

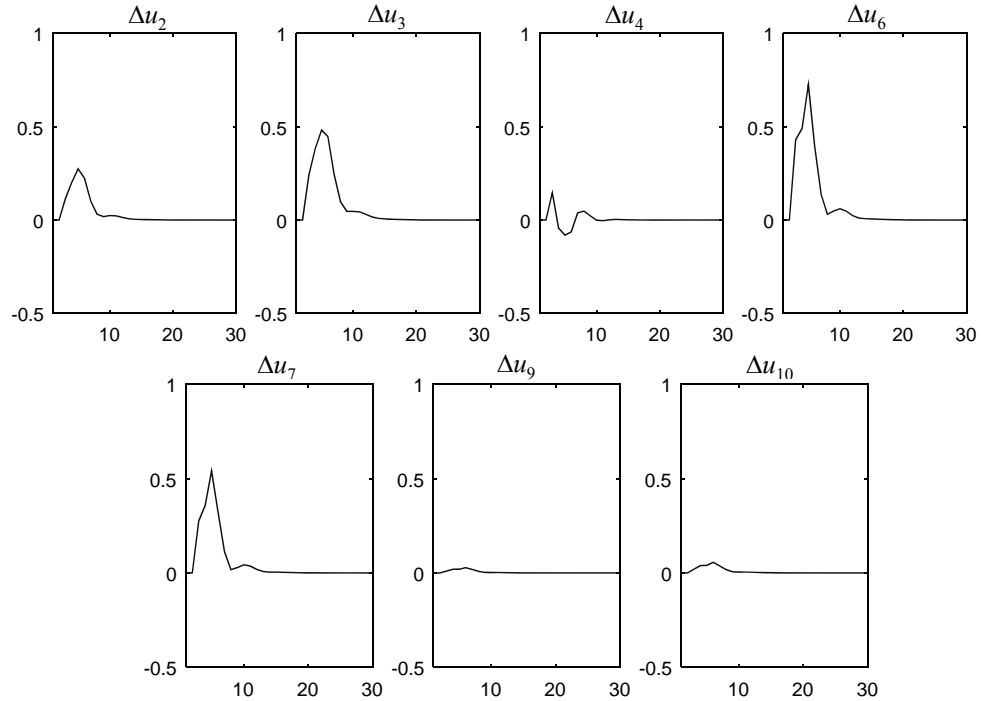


Рис. 3. Управляющие воздействия при возмущении в вершине 12

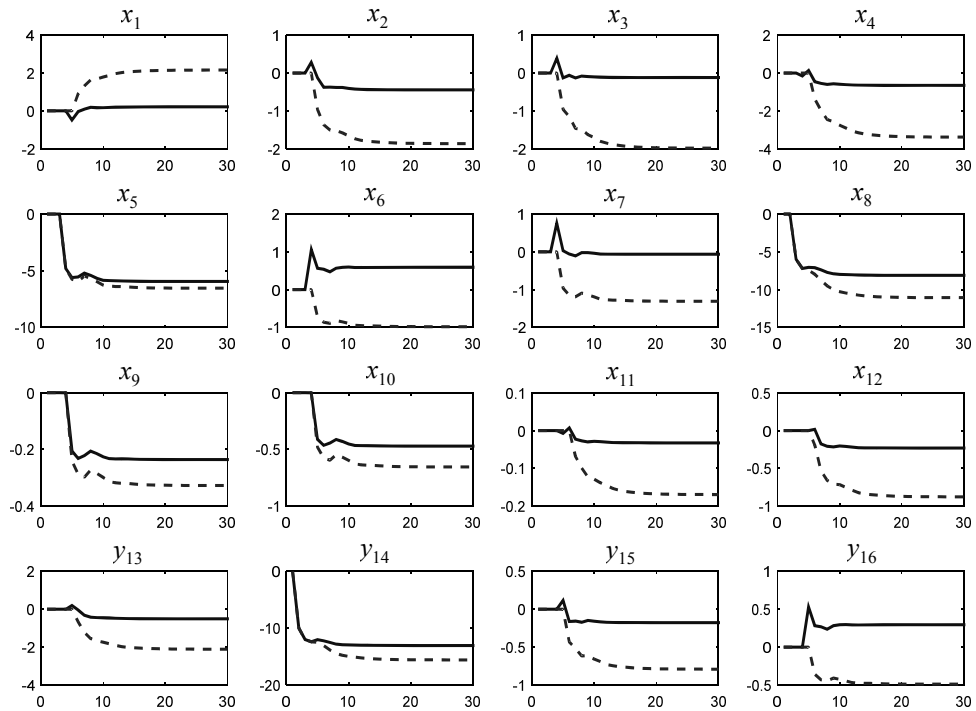


Рис. 4. Управляемый импульсный процесс при возмущении в вершине 14

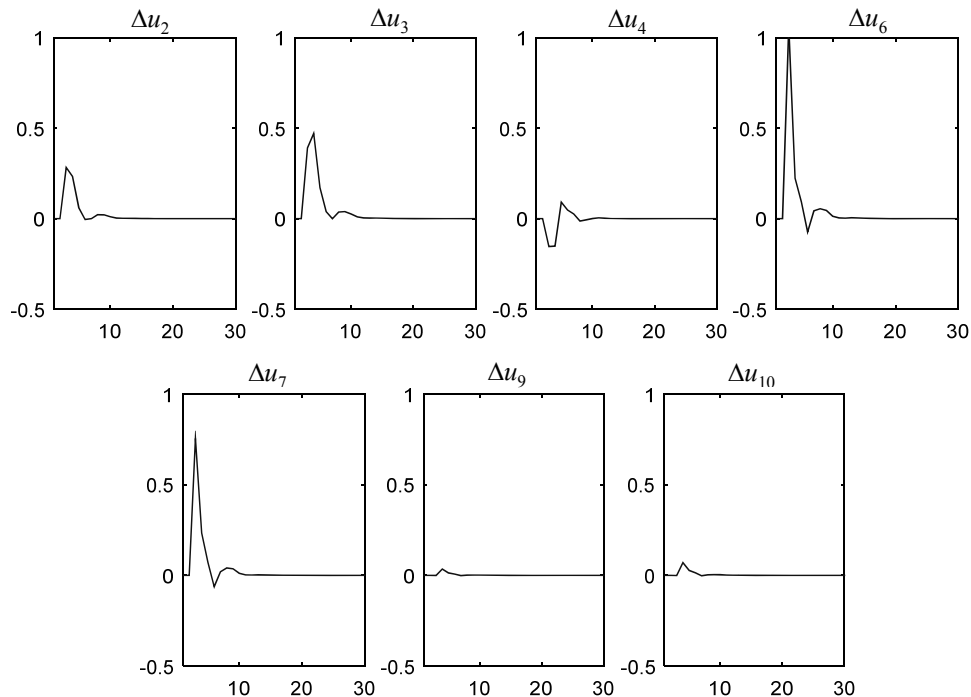


Рис. 5. Управляющие воздействия при возмущении в вершине 14

ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрено применение метода инвариантных эллипсоидов для подавления ограниченных возмущений в динамических режимах сложных систем на основе математических моделей импульсных процессов в КК. Для этого модель импульсного процесса КК разделена на две взаимосвязанные системы разностных уравнений, составленных соответственно для описания динамики измеряемых и неизменяемых координат вершин КК. Изменение неизменяемых координат в первой системе разностных уравнений учтено в качестве неконтролируемых ограниченных возмущений с неизвестными вероятностными характеристиками. На основе первой системы разностных уравнений спроектирована замкнутая система управления в дискретном времени, в которой формируются управляющие сигналы, воздействующие непосредственно на некоторые измеряемые координаты КК. При разработке алгоритма подавления ограниченных возмущений в замкнутой системе управления применен инструментарий линейных матричных неравенств.

Экспериментальные исследования проведены путем цифрового моделирования неуправляемой системы и замкнутой системы управления импульсным процессом в КК ИТ- компании при подаче возмущений на вершины КК, которые отображают интеллектуальные активы и конкурентоспособность выпускаемой продукции. На основе графиков переходных процессов сравнены динамики изменения координат вершин КК при отсутствии управления (в свободном движении) и при подаче синтезированных управляющих воздействий. По сравнению с неуправляемым процессом при пода-

че синтезированных управляющих воздействий значительно уменьшилась длительность разработки проекта, улучшилось качество проекта, увеличились объемы продаж. Это произошло за счет увеличения затрат на маркетинг, зарплаты сотрудников, функционирование группы менеджеров и на инновации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Roberts F.* Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems / F. Roberts // Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976. — 559 p.
2. *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.
3. *Романенко В.Д.* Стабилизация импульсных процессов в когнитивных картах сложных систем на основе модальных регуляторов состояния / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский // Кибернетика и вычислительная техника. — 2015. — Вып. 179. — С. 43–55.
4. *Изерман Р.* Цифровые системы управления / Р. Изерман. — М.: Мир, 1984. — 541 с.
5. *Острём К.* Системы управления с ЭВМ / К. Острём, Б. Виттенмарк. — М.: Мир, 1987. — 480 с.
6. *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.
7. *Поляк Б.Т.* Робастная устойчивость и управление / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. — М.: Наука, 2002. — 303 с.
8. *Назин С.А.* Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов / С.А. Назин, Б.Т. Поляк, М.В. Топунов // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 106–125.
9. *Романенко В.Д.* Исследование сценариев развития IT-компании на основе принятия решений в режиме управления импульсными процессами когнитивных карт / В.Д. Романенко, Ю.Л. Милявский, М.В. Поляков и др. // Тезисы докладов 1-го междунар. научно-практ. форума «Наука и бизнес», Днепропетровск, Noosphere (29–30 июня 2015 г.). — С. 233–237.

Поступила 13.04.2017