УДК 62.50
DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2019.3.08

МЕТОД АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В КОГНИТИВНЫХ КАРТАХ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА ПРИРАЩЕНИЙ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И КООРДИНАТ ВЕРШИН

В.Д. РОМАНЕНКО, Ю.Л. МИЛЯВСКИЙ

Анотація. Рассмотрено решение проблемы автоматизации управления импульсными процессами в когнитивных картах сложных систем путем синтеза закона управления на основе варьирования координат вершин когнитивных карт и весовых коэффициентов при формировании управляющих воздействий в замкнутой системе управления. В качестве примера рассмотрено применение разработанных алгоритмов для управления качеством подготовки персонала IT компании, модель которой представлена в виде когнитивной карты.

Ключевые слова: когнитивная карта, замкнутая система управления, импульсный процесс, квадратичный критерий оптимальности.

ВВЕДЕНИЕ

Когнитивная карта (КК) представляет собой взвешенный ориентированный граф, вершины которого отображают концепты (координаты) сложных систем, а ребра (дуги) графа с весовыми коэффициентами описывают причинно-следственные взаимосвязи между вершинами.

В процессе функционирования сложной системы под влиянием различных возмущений координаты КК изменяются во времени. Каждая вершина КК R_i принимает значение $Y_i(k)$ в дискретные моменты времени $k = 0,1,2,\ldots$. На следующем периоде дискретизации координата $Y_i(k+1)$ определяется в зависимости от величины $Y_i(k)$ и приращений других вершин R_j, связанных ребрами с R_i в момент времени k. Изменение координаты вершины R_j в момент времени k, которое задается разностью $P_j(k) = Y_j(k) - Y_j(k-1), k > 1$, согласно работы [1] называется импульсом. Процесс распространения импульсов по вершинам КК определяется уравнением

$$Y_i(k+1) = Y_i(k) + \sum_{j=1}^{n} a_{ij} P_j(k), i = 1,\ldots,n,$$

где a_{ij} — весовой коэффициент ребра ориентированного графа, которое соединяет j-ю вершину с i-й. Тогда правило импульсного изменения значений координат вершин КК формулируется в виде разностного уравнения первого порядка в приращениях переменных:

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

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

В векторной форме выражение (2) записывается следующим образом:

$$\Delta \overline{Y}(k+1) = A \Delta \overline{Y}(k),$$

где $A(n \times n)$ — транспонированная весовая матрица смежности КК.

В работах [2, 3] выполнена разработка методов по автоматизации управления импульсными процессами в КК сложных систем путем формирования внешнего вектора управления на основе варьирования ресурсами координат вершин КК в замкнутых системах управления с использованием известных методов теории автоматического управления для синтеза дискретных регуляторов. Для этого было составлено уравнение вынужденного движения импульсного процесса в КК системы для i-й координаты

$$\Delta Y_i(k+1) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} \Delta Y_j(k) + b_i \Delta u_i(k), i = 1,...,n, \tag{2}$$

где $\Delta u_i(k) = u_i(k) - u_i(k-1)$ — первая разность управляющего воздействия, которое реализуется путем изменения имеющихся в наличии ресурсов координат вершин. При этом коэффициент b_i может равняться единице или нулю, а именно, $b_i = 1$, когда на i-ю вершину КК запланировано формирование управляющего воздействия посредством изменения ресурсов координаты Y_i. В векторной форме записи уравнение (2) имеет вид

$$\Delta \overline{Y}(k+1) = A \Delta \overline{Y}(k) + B \Delta \overline{u}(k),$$

где матрица управления $B(n \times p)$ составляется из единиц и нулей; $\Delta \overline{u}(k)$ — вектор приращений управляющих воздействий.

В работе [4] рассмотрен новый принцип синтеза управления импульсным процессом в КК в замкнутой системе управления на основе варьирования весовыми коэффициентами a_{ij} КК при реализации управляющих воздействий $\Delta u_i(k)$. Это возможно реализовать тогда, когда можно изменять степень влияния $\Delta a_{ij}(k)$ одной вершины КК на другую вершину на k-м периоде дискретизации. При этом лицо, принимающее решение, может реализовывать варьирование некоторых весов КК путем изменения коэффициентов передачи административных, политических, образовательных, информационных, научных, финансовых взаимодействий между координатами сложной системы, представленных вершинами КК. Таким образом, величина приращения управляющего воздействия при импульсном процессе в работе [4] формируется не за счет изменения ресурсов $\Delta Y_j(k)$, а на основе изменения степени влияния $\Delta a_{ij}(k)$ координаты $\Delta Y_j(k)$ на координату

$\Delta Y_i(k+1)$. Для этого было сформировано уравнение вынужденного движения импульсного процесса для отдельной координаты Y_i КК:

$$Y_i(k+1) = Y_i(k) + (1-q^{-1})\sum_{j=1}^{n} a_{ij} Y_j(k) + \Delta a_{i\mu_l}(k) Y_\mu(k) + \xi_i(k), \quad i = 1,...,n, \quad (3)$$

где $Y_\mu(k)$ — μ-я координата КК, которая может воздействовать на $Y_i(k+1)$ через варьируемый коэффициент $\Delta a_{i\mu_l}(k)$, где l — порядковый номер приращения $\Delta a_{i\mu_l}(k) = a_{i\mu_l}(k) - a_{i\mu_l}(k-1)$ в векторе $\Delta\overline{a}(k)$; $\xi_i(k)$ — неконтролируемое случайное возмущение с $E\xi_i(k) = 0$; q^{-1} — оператор обратного сдвига на один период дискретизации.

Динамика вынужденного движения импульсного процесса КК (3) в работе [4] представлена в векторно-матричной форме:

$$\overline{Y}(k+1) = (I + A - Aq^{-1})\overline{Y}(k) + L(k)\Delta\overline{a}(k) + \overline{\xi}(k).$$

Матрица $L(k)$ составляется из измеряемых координат $Y_\mu(k)$ КК, которые через дуги с варьируемыми весовыми коэффициентами $\Delta a_{i\mu_l}(k)$ воздействуют на координаты $Y_i(k+1)$ ($i = 1,...,n$). При этом предполагается, что приращение весового коэффициента $\Delta a_{i\mu_l}(k)$ будет использоваться в качестве управляющего воздействия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При условии, что $\lim\limits_{k\to\infty} \Delta Y_i(k) = 0$ для стабилизации координат вершин КК Y_i на заданных уровнях G_i на каждом периоде дискретизации необходимо формировать управляющие воздействия, которые по синтезированному закону управления воздействуют непосредственно на вершины КК. Однако на практике при управлении импульсными процессами в КК возникает сложность, вызванная малыми ресурсами вершин КК или малыми интервалами весовых коэффициентов $\Delta a_{i\mu_l}(k)$, которыми можно варьировать при реализации управляющих воздействий. Как правило, таких вершин или весовых коэффициентов, доступных для варьирования, очень мало, что приводит к большой разнице между размерностью n вектора выходных управляемых координат Y_i и размерностью вектора управляющих воздействий u_i. Поэтому возникла задача объединения двух подходов, которая заключается в формировании внешнего вектора управления путем одновременного варьирования ресурсов координат вершин КК и весовых коэффициентов в замкнутой системе управления. Это позволит увеличить общее количество управляющих воздействий в КК и улучшить качество управления.

При объединении двух подходов к управлению (2) и (3) общая математическая модель управляемого импульсного процесса КК в векторно-матричной форме в полных координатах вершин представлена в виде

$$\overline{Y}(k+1)=(I+A-Aq^{-1})\overline{Y}(k)+(B\quad L(k))\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}+\overline{\xi}(k). \qquad (4)$$

Сформулируем правила формирования векторов приращений $\Delta\overline{u}(k)$ и $\Delta\overline{a}(k)$, а также матриц B и $L(k)$ в модели (4).

1. На каждую вершину КК Y_i ($i=1,...,n$) можно воздействовать только одним управляющим воздействием путем варьирования ресурсов Δu_i данной вершины или посредством варьирования весового коэффициента $\Delta a_{i\mu_l}(k)$. Вследствие этого гарантируется автономность системы управления.

2. Вектор приращений весовых коэффициентов $\Delta\overline{a}(k)$ размерности m при $m<n$ содержит только ненулевых элементы $\Delta a_{i\mu_l}(k)\neq 0$, где μ — номер вершины КК, которая через дугу с коэффициентом $a_{i\mu}$ воздействует на i-ю вершину Y_i, а $l=1,2,...,m$ — порядковый номер данного коэффициента в векторе $\Delta\overline{a}(k)$.

Если весовой коэффициент $a_{i\mu}$ для дуги КК, входящей в вершину Y_i, нельзя варьировать, то приращение $\Delta a_{i\mu_l}(k)=0$ и в векторе $\Delta\overline{a}(k)$ не учитывается.

3. Матрица B формируется проектировщиком системы управления импульсным процессом КК. Эта матрица предназначена для организации масштабирования и коммутирования синтезированного управляющего воздействия Δu_i, $i=1,...,p$. Размерность матрицы B равна $n\times p$, где n — размерность КК, а p — размерность вектора $\Delta\overline{u}(k)$. Элементами B являются единицы или нули. Элемент $b_{i\mu}=1$, если на i-ю вершину КК воздействует μ-е управляющее воздействие. Таким образом, в каждой строке матрицы B только один элемент может быть равным единице, а остальные элементы будут равны нулю.

4. Матрица $L(k)$ размерности $n\times m$ в каждой i-й строке содержит только один элемент, равный измеряемой координате $Y_{\mu l}(k)$, которая размещена в l-й строке, где l — порядковый номер приращения $\Delta a_{i\mu_l}(k)$ в векторе $\Delta\overline{a}(k)$, а μ — номер вершины КК, которая через приращение весового коэффициента $\Delta a_{i\mu_l}(k)$ управляет вершиной Y_i КК.

5. Все элементы в i-й строке матрицы $L(k)$ равны нулю, если в i-ю вершину Y_i не входит дуга КК с варьируемым весовым коэффициентом, т.е. $\Delta a_{i\mu}=0$.

Таким образом, общее количество управлений в КК может быть таковим: $p+m\leq n$.

СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО РЕГУЛЯТОРА

Синтез комбинированного вектора оптимального управления $\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}$ реализуется на основе минимизации следующего квадратичного критерия оптимальности

$$J(k+1)=E\left\{(\overline{Y}(k+1)-\overline{G})^{\mathrm{T}}(\overline{Y}(k+1)-\overline{G})+\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}\right\},$$

где $\overline{G}$ — вектор задающих воздействий для стабилизации координат вершин КК на заданных уровнях; $R_1(p\times p)$, $R_2(m\times m)$ — весовые диагональные положительно определенные матрицы; E — оператор математического ожидания. С учетом уравнения (4) выполним минимизацию этого критерия относительно комбинированного вектора управления $\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}$:

$$\frac{\partial J(k+1)}{\partial\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}}=2\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}\left\{(I+A-Aq^{-1})\overline{Y}(k)+(B\quad L(k))\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}+\overline{\xi}(k)-\overline{G}\right\}+$$

$$+2\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}=0,$$

откуда получим закон комбинированного оптимального управления:

$$\begin{pmatrix}\Delta\overline{u}(k)\\ \Delta\overline{a}(k)\end{pmatrix}=-\left(\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}(B\quad L(k))+\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\right)^{-1}\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}\times$$

$$\times\{(I+A-Aq^{-1})\overline{Y}(k)+\overline{\xi}(k)-\overline{G}\}. \qquad (5)$$

На основе уравнений (4), (5) можно составить уравнение динамики замкнутой системы управления импульсным процессом КК:

$$\overline{Y}(k+1)=\left\{I-(B\quad L(k)\left[\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k)\\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\right]^{-1}\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}\right\}\times$$

$$\times(I+A-Aq^{-1})\overline{Y}(k)+(B\quad L(k)\times$$

$$\times\left[\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k)\\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\right]^{-1}\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}\overline{G}+$$

$$+\left\{I-(B\quad L(k))\left[\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}B & B^{\mathrm{T}}L(k)\\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\right]^{-1}\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}\right\}\overline{\xi}(k). \qquad (6)$$

Устойчивость замкнутой системы управления (6) определяется собственными значениями изменяющегося во времени нелинейного матричного выражения

$$I-(B\quad L(k))\left[\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k)\\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}R_1 & 0\\ 0 & R_2\end{pmatrix}\right]^{-1}\begin{pmatrix}B^{\mathrm{T}}\\ L^{\mathrm{T}}(k)\end{pmatrix}. \qquad (7)$$

Утверждение. Обратная матрица

$$\left[\begin{pmatrix} B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k) \\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix}\right]^{-1}$$

в выражении (7) является диагональной и положительно определенной.

В основе доказательства этого утверждения лежит то обстоятельство, что матрица $\begin{pmatrix} B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k) \\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k) \end{pmatrix}$ является диагональной, так как на основе правил формирования матриц B и $L(k)$ получим, что $\mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k) = 0$, $L^{\mathrm{T}}(k)B = 0$. Таким образом, приведенная обратная матрица будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} B^{\mathrm{T}}B + R_1 & 0 \\ 0 & L^{\mathrm{T}}(k)L(k) + R_2 \end{pmatrix}^{-1}.$$

В работе [4] приведено доказательство, что произведение матриц $L^{\mathrm{T}}(k)L(k)$ представляет собой диагональную матрицу (размерности $m \times m$) с элементами $Y_{\mu l}^2(k)$ в l-й строке и l-м столбце. Произведение матриц $B^{\mathrm{T}}B$ также представляет собой диагональную матрицу (размерности $p \times p$) с элементами $b_{ii} = 1$. В результате при диагональных и положительно определенных весовых матрицах R_1, R_2 получим, что в работе (14) обратные матрицы $(B^{\mathrm{T}}B + R_1)^{-1}$ и $(\mathrm{L}^{\mathrm{T}}(k)L(k) + R_2)^{-1}$ будут диагональными с элементами соответственно $\dfrac{1}{1 + R_{ii}}$ и $\dfrac{1}{Y_{\mu_l}^2(k) + R_{ll}}$, $i = 1,\ldots, p$, $l = 1,\ldots, m$.

Следствие 1. Произведение матриц

$$(B \quad L(k))\left[\begin{pmatrix} B^{\mathrm{T}}B & \mathrm{B}^{\mathrm{T}}L(k) \\ L^{\mathrm{T}}(k)B & L^{\mathrm{T}}(k)L(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix}\right]^{-1}\begin{pmatrix} B^{\mathrm{T}} \\ L^{\mathrm{T}}(k) \end{pmatrix}$$

в выражении (7) будет в общем случае диагональной матрицей размерности $n \times n$:

$$\begin{pmatrix} B(B^{\mathrm{T}}B + R_1)^{-1}B^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & L(\mathrm{k})(L^{\mathrm{T}}(k)L(k) + R_2)^{-1}L^{\mathrm{T}}(k) \end{pmatrix}$$

с положительными элементами на главной диагонали $\dfrac{1}{1 + R_{ii}} > 0$ и $\dfrac{1}{Y_{\mu_l}^2(k) + R_{ll}} > 0$.

Следствие 2. Собственные значения диагональной матрицы (7), т.е. матрицы

$$I-\begin{pmatrix} B(B^{\mathrm{T}}B+R_1)^{-1}B^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & L(\mathrm{k})(L^{\mathrm{T}}(k)L(k)+R_2)^{-1}L^{\mathrm{T}}(k) \end{pmatrix}, \qquad (8)$$

будут по модулю меньше единицы (на основе следствия 1).

Таким образом, характеристический матричный полином (8) замкнутой системы управления (6) будет иметь корни внутри круга единичного радиуса, вследствие чего замкнутая система (8) будет устойчивой.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ПРОЦЕССОМ В КОГНИТИВНОЙ КАРТЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ IT КОМПАНИИ

Когнитивная карта системы управления импульсным процессом показана на рис. 1.

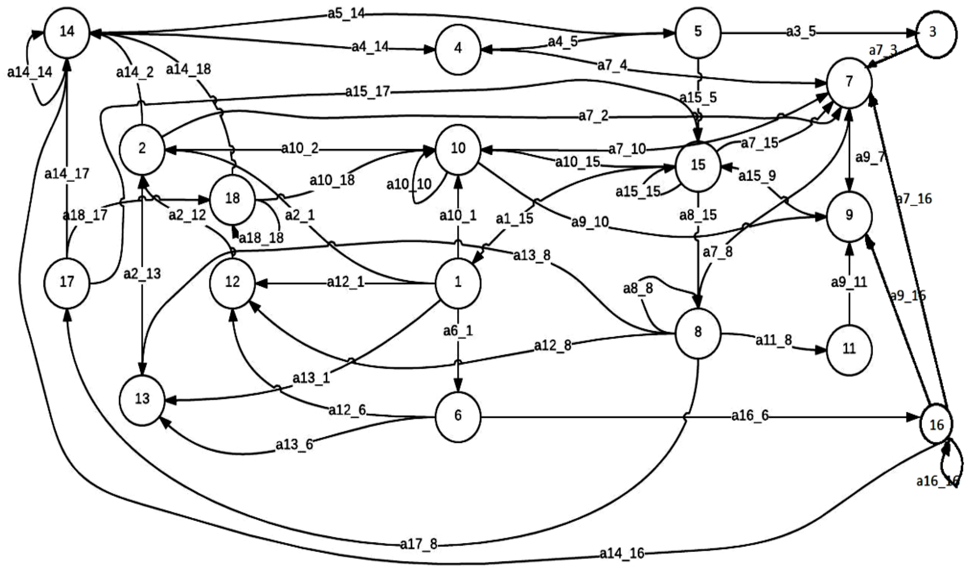

Рис. 1. Когнитивная карта системы управления персоналом IT компании

Выделим в КК вершины Y_i, которыми можно управлять непосредственно через изменения ресурсов $\Delta\overline{u}(k)$ $(p=5)$:

Y_1 — управление карьерой и кадровым резервом;

Y_2 — переаттестация персонала;

Y_5 — уровень контроля;

Y_6 — планирование процесса обучения персонала;

Y_{13} — переподготовка кадров со сменой основной специальности.

Выделим также вершины, которыми можно управлять посредством варьирования весовых коэффициентов $\Delta\overline{a}(k)(m=8)$:

Y_3 — управление премией за досрочное выполнение работы — с помощью коэффициента $\Delta a_{3,5}$;

Y_4 — управление премией за освоение новых учений — с помощью коэффициента $\Delta a_{4,5}$;

Y_7 — средняя заработная плата — с помощью коэффициента $\Delta a_{7,8}$;

Y_{10} — перспективы карьерного роста — с помощью коэффициента $\Delta a_{10,1}$;

Y_{11} — уровень финансирования физкультуры и спорта — с помощью коэффициента $\Delta a_{11,8}$;

Y_{12} — повышение квалификации персонала без смены основной специальности — с помощью коэффициента $\Delta a_{12,6}$;

Y_{14} — уровень профессиональных умений и навыков персонала — с помощью коэффициента $\Delta a_{14,2}$;

Y_{16} — обучение вспомогательного персонала — с помощью коэффициента $\Delta a_{16,6}$.

Неуправляемыми вершинами являются:

Y_8 — финансы компании на одного сотрудника;

Y_9 — удовлетворенность работой;

Y_{15} — уровень инновационной продукции;

Y_{17} — затраты на научно-технические работы;

Y_{18} — эффективность работы аспирантуры.

Ребра между вершинами КК установлены на основе причинно-следственных связей, а весовые коэффициенты для каждого ребра определены экспертами согласно уровню влияния одной вершины КК на другую. При этом матрица смежности КК, приведенной на рис. 1, имеет вид

$$A = \begin{pmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\
0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 \\
0.5 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0.4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0.25 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.4
\end{pmatrix}.$$

Вектор управления путем варьирования ресурсами координат вершин будет иметь вид

$$\Delta\overline{u} = (\Delta u_1 \quad \Delta u_2 \quad \Delta u_5 \quad \Delta u_6 \quad \Delta u_{13})^{\mathrm{T}}.$$

Тогда матрица управления B будет формироваться проектировщиком системы следующим образом:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$

В результате произведение матриц $B^{\mathrm{T}}B$ будет единичной матрицей 5×5. Второй вектор управления на основе приращений весовых коэффициентов $\Delta\overline{a}$ будет иметь вид

$$\Delta\overline{a} = (\Delta a_{3,5} \quad \Delta a_{4,5} \quad \Delta a_{7,8} \quad \Delta a_{10,1} \quad \Delta a_{11,8} \quad \Delta a_{12,6} \quad \Delta a_{14,2} \quad \Delta a_{16,6})^{\mathrm{T}}.$$

Тогда матрица управления $L(k)$ размерности 18×8 составляется следующим образом:

$$L(k) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_5(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_5(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_8(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_1(k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_8(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_2(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

В результате произведение матриц $L^{\mathrm{T}}(k)L(k)$ будет диагональной матрицей 8×8:

$$
L^{\mathrm{T}}(k)L(k)=\begin{pmatrix}
Y_5^2(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & Y_5^2(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & Y_8^2(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & Y_1^2(k) & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & Y_8^2(k) & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6^2(k) & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_2^2(k) & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6^2(k)
\end{pmatrix}.
$$

Пусть начальные значения координат вершин КК, которые измеряются по 10-бальной шкале, находятся на среднем уровне 5. Предположим, что необходимо перевести вершины Y_7, Y_{10}, Y_{14} на более высокий уровень 7. Применив закон управления (5), получим динамику управления импульсным процессом, представленную на рис. 2.

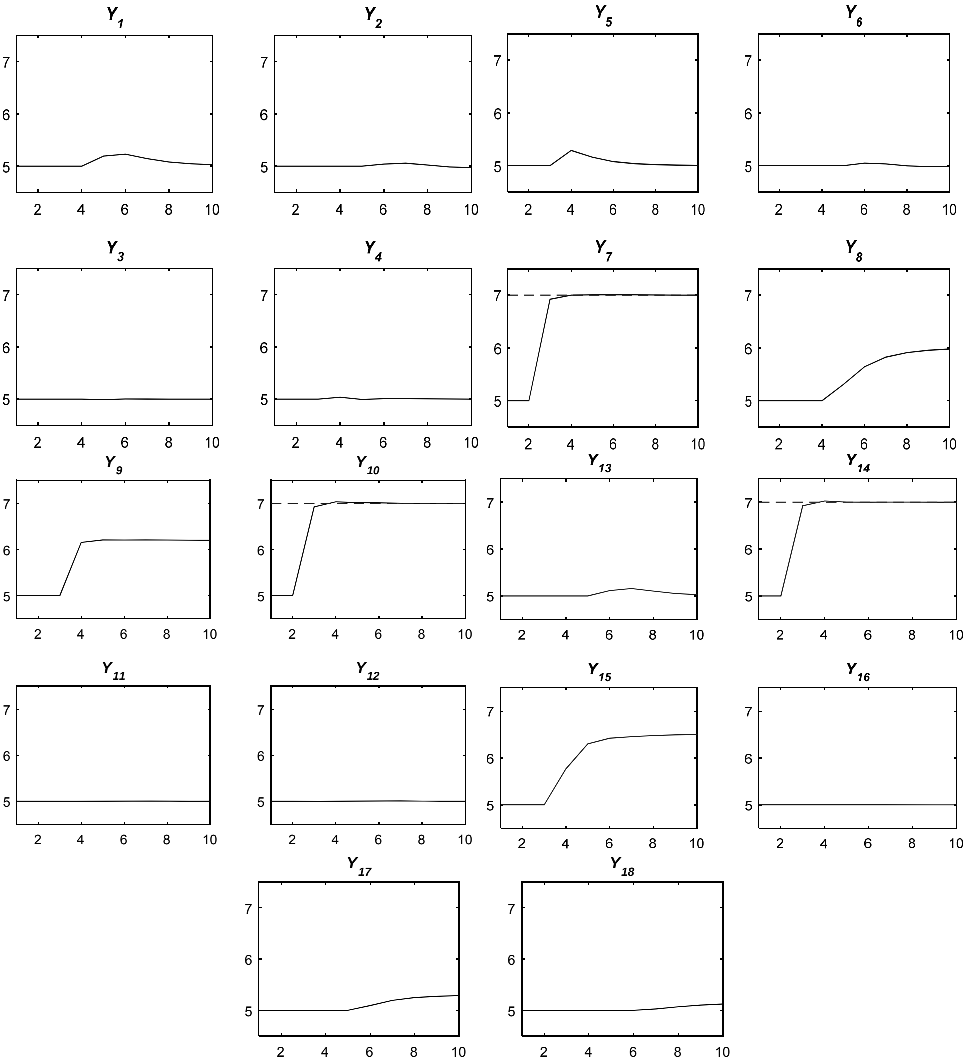

Рис. 2. Управляемый импульсный процесс при перестройке координат вершин КК Y_7, Y_{10}, Y_{14} на новые уровни

ВЫВОДЫ

В данной работе решена проблема автоматизации управления импульсными процессами в КК сложных систем на основе синтеза линейно-квадратичного регулятора, формирующего управляющие воздействия в замкнутой системе управления путем варьирования координат вершин КК и весовых коэффициентов. В работе проведено исследование устойчивости разработанной замкнутой системы управления.

Экспериментальные исследования проведены путем цифрового моделирования синтезированной системы управления импульсным процессом в когнитивной карте управления персоналом IT компании.

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 информатики и управления. — 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. *Romanenko V.* Control method in cognitive maps based on weights increments / V. Romanenko, Y. Milyavsky // Кибернетика и вычисл. техника. — 2016. — Вып. 184. — P. 44–55.

Поступила 20.05.2019