

УДК 62-52.66.012.37

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Ю.Л. Муромцев¹, Д.Ю. Муромцев¹, В.А. Погонин²

*Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1),
«Информационные процессы и управление» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова и фразы: интеллектуальные контроллеры; когнитивная графика; оптимальное управление; энергосберегающее управление.

Аннотация: Рассмотрены вопросы построения математического обеспечения и базы знаний интеллектуальных контроллеров систем энергосберегающего управления.

Основные трудности решения задач анализа и синтеза энергосберегающего управления многомерными объектами связаны с большим числом возможных видов функций оптимального управления (ОУ), и, следовательно, со сложностью математического обеспечения интеллектуальных микропроцессорных управляющих устройств (контроллеров). Математическое обеспечение должно содержать громоздкие соотношения для границ областей различных видов функций ОУ, системы уравнений и алгоритмы их развития для расчета параметров управляющих воздействий, алгоритмы проверки существования решения задач оптимального управления (ЗОУ) задаваемых исходных данных.

Для преодоления отмеченных трудностей используется когнитивная графика, отражающая результаты полного анализа ЗОУ методом синтезируемых переменных, и анализ функций компонентов индикаторного управления. Структура когнитивной карты позволяет определить как может измениться вид функции ОУ при незначительном отклонении параметров объекта и других исходных данных задачи.

1. Когнитивное моделирование видов функций ОУ.

Для решения задач определения вида функции ОУ важно иметь модель M_x , которая характеризует, какие возможны изменения функции ОУ при незначительных отклонениях значений компонентов массива R от задаваемых. Эта ин-

формация требуется при формировании баз знаний контроллеров в системах энергосберегающего управления.

Основу модели M_x составляют когнитивные карты K_i , $i = \overline{1, m}$ видов функций множеств V_i^{Π} . Когнитивная карта представляет собой граф $K_i(V, S)$, множество вершин V , которого соответствует множеству возможных видов функций ОУ, а множество связей (ребер) S характеризует как может измениться вид функции ОУ при изменении массива R . На рис. 1 представлена когнитивная карта K_i для компоненты $U_i(T)$, имеющей одноэкстремальный характер. Приведенный на рис. 1 граф $K_i(V_i, S_i)$ имеет $\dim V_i = 17$ вершин.

Карта K_i позволяет получить важную информацию о границах областей G_{ij} существования видов функций ОУ. Ребра графа K_i соответствуют граничным поверхностям S_{iv} областей G_{ij} .

Пример 1. Рассмотрим область G_{i0} , в которой имеет место ОУ $U_{i0}(T)$ (см. (34)) с кодом (d) . Если экстремум функции $U_{i0}(T)$ находится вне временного интервала $[0; 2]$, то область G_{i0} ограничена четырьмя поверхностями, соответствующими ребрам $((d), (d, 1))$, $((d), (1, d))$, $((d), (d, -1))$, $((d), (-1, d))$.

Для ОУ, относящемуся к граничной поверхности $S((d), (d, 1))$ выполняются условия $\forall T \in [0; 2) : U_{i0}(T) \in (-1; 1)$, $U_{i0}(T = 2) = 1$.

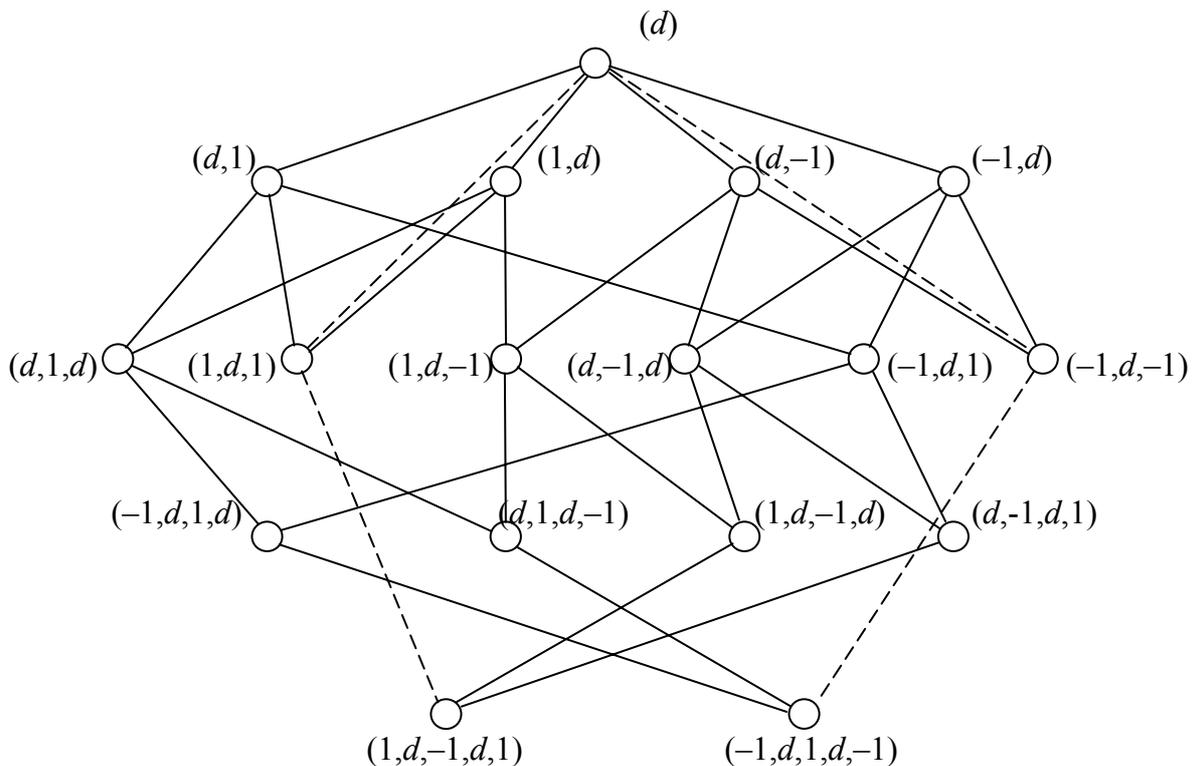


Рис. 1. Когнитивная карта K_i видов функций $U_i(T)$

$(d,1)$, $(1,d)$ и т.д., то есть с одним моментом переключения. В этом случае система уравнений для расчета параметров ОУ формируется следующим образом.

Утверждение 3. Если из состояния «ненапряженного» режима с $\bar{U}_0(T) = (U_{0i}(T), i = \overline{1,n})$ компонента $U_\mu(T)$ принимает один из видов ОУ второго уровня (см. рис.1), то есть ОУ имеет вид

$$\bar{U}(T) = (U_\mu(T/T_\mu), U_{0i}(T), i = \{1,2,\dots,n\} \setminus \mu), \quad (4)$$

то для расчета массива параметров ОУ $((D_1, \dots, D_n, T_\mu)$ система уравнений (1) для видов $(d,1)$, $(1,d)$ дополняется уравнением

$$b_\mu \sum_{i=1}^n D_i \bar{f}_{\mu i}(T_\mu) = 1 \quad (5)$$

или для $(d,-1)$, $(-1,d)$

$$b_\mu \sum_{i=1}^n D_i \bar{\mu}_{\mu i}(T_\mu) = -1, \quad (6)$$

а в системе уравнений (1) вносятся следующие изменения:

1) компоненты $\varphi_{i\mu, \mu j}$ заменяются на $\varphi_{i\mu, \mu j}(0, T_\mu)$, $\varphi_{i\mu, \mu j}(T_\mu, 2)$, $\varphi_{i\mu, \mu j}(0, T_\mu)$, $\varphi_{i\mu, \mu j}(T_\mu, 0)$ соответственно для $(d,1)$, $(1,d)$, $(d,-1)$, $(-1,d)$;

2) правые части системы уравнений записываются в виде:

$$\begin{aligned} L_i - \bar{b}_\mu \varphi_{i\mu}(T_\mu, 2), i = \overline{1,n} \text{ для } (d,1); \\ L_i - \bar{b}_\mu \varphi_{i\mu}(0, T_\mu), i = \overline{1,n} \text{ для } (1,d); \\ L_i + \bar{b}_\mu \varphi_{i\mu}(T_\mu, 2), i = \overline{1,n} \text{ для } (d,-1); \\ L_i + \bar{b}_\mu \varphi_{i\mu}(0, T_\mu), i = \overline{1,n} \text{ для } (-1,d), \end{aligned} \quad (7)$$

здесь $\forall i, j = \overline{1,n}$

$$\begin{aligned} \varphi_{i\mu, \mu j}(0, T_\mu) &= \int_0^{T_\mu} \bar{f}_{i\mu}(2-T) \bar{f}_{i\mu}(T) dT; \\ \varphi_{i\mu, \mu j}(T_\mu, 2) &= \int_{T_\mu}^0 \bar{f}_{i\mu}(2-T) \bar{f}_{i\mu}(T) dT; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}\varphi_{i\mu}(T_{\mu}, 2) &= \int_{T_{\mu}}^2 \bar{f}_{i\mu}(2-T) dT; \\ \varphi_{i\mu}(0, T_{\mu}) &= \int_0^{T_{\mu}} \bar{f}_{i\mu}(2-T) dT.\end{aligned}\quad (9)$$

Аналогичны формулам (8), (9) записываются выражения для $\varphi_{i\mu, \mu j}(0, T_{\mu}^-)$, $\varphi_{i\mu, \mu j}(T_{\mu}^-, 2)$, $\varphi_{i\mu}(T_{\mu}^-, 2)$, $\varphi_{i\mu}(0, T_{\mu}^-)$.

Для доказательства утверждения используется векторно-матричное уравнение (3). При этом для компоненты $U_{\mu}(T/T_{\mu(\mu)})$ временной интервал разбивается на две части $[0, T_{\mu(\mu)})$ и $[T_{\mu(\mu)}, 2]$. Дополнительное уравнение (5) или (6) соответствует значению $U_{\mu}(T = T_{\mu(\mu)})$.

Пример 2. В качестве примера изменений в уравнениях (1) приведем систему уравнений для случая $\mu = 2$ и $U_2(T/T_{\mu}) \approx (1, d)$. Система уравнений для расчета параметров (D_1, \dots, D_n, T_2) имеет вид

$$\begin{aligned}D_1 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{1i, i1} + \bar{b}_2^2 \varphi_{12, 21}(T_2^i, 2) \right) + D_2 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{1i, i1} + \bar{b}_2^2 \varphi_{12, 22}(T_2^i, 2) \right) + \dots \\ \dots + D_n \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{1i, in} + \bar{b}_2^2 \varphi_{i2, 2n}(T_2^i, 2) \right) = L_1 - \bar{b}_2^2 \varphi_{12, 2n}(0, T_2^i); \\ D_1 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{2i, i1} + \bar{b}_2^2 \varphi_{22, 21}(T_2^i, 2) \right) + D_2 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{2i, i2} + \bar{b}_2^2 \varphi_{22, 22}(T_2^i, 2) \right) + \dots \\ \dots + D_n \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{2i, in} + \bar{b}_2^2 \varphi_{22, 2n}(T_2^H, 2) \right) = L_1 - \bar{b}_2^2 \varphi_{22}(0, T_2^H),\end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned}
& D_1 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{ni,i1} + \bar{b}_2^2 \varphi_{n2,21}(T_2^i, 2) \right) + D_2 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{ni,i2} + \bar{b}_2^2 \varphi_{n2,22}(T_2^i, 2) \right) + \dots \\
& \dots + D_n \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^n \bar{b}_i^2 \varphi_{ni,in} + \bar{b}_2^2 \varphi_{n2,2n}(T_2^i, 2) \right) = L_1 - \bar{b}_2^2 \varphi_{n2,2n}(0, T_2^i), \\
& \bar{b}_2 \sum_{i=1}^n D_i \bar{f}_{2i}(T_2^H) = 1.
\end{aligned}$$

3. Проверка существования решения ЗОУ.

Важное место при полном анализе ОУ занимает проверка существования решения задачи для задаваемого массива исходных данных R . Это связано с тем, что число видов функций для ММО-систем исключительно велико, оно может достигать несколько сотен и тысяч. Поэтому определять аналитические выражения всех границ для областей различных видов функций ОУ не представляется возможным. Более целесообразным является алгоритмическая проверка существования решения ЗОУ и вида функции управления для задаваемого массива исходных данных R .

В общем случае решение ЗОУ на границе области существования в пространстве синтезирующих переменных, если все компоненты вектора $U(T)$ имеют вид $(-1, 1)$ или $(1, -1)$, т.е.

$$\forall i = \overline{1, n} : U_i(T/T_i) = \begin{cases} -1, T \in [0, T_i], \\ 1, T \in [T_i, 2]. \end{cases}$$

или

$$U_i(T/T_i) = \begin{cases} 1, T \in [0, T_i], \\ -1, T \in [T_i, 2]. \end{cases} \quad (10)$$

Функцию $U(T)$ на всем временном интервале $[0; 2]$ будем называть «индикаторной» и обозначать $U_H(T) = (U_{hi} \circ (T), i = \overline{1, n})$, графическое представление траекторий изменения компонентов $U_{hi}(\circ) = (U_{hi}(T), T \in [0, 2], i = \overline{1, n})$ позволяет получить ценную информацию о существовании решения ЗОУ и предполагаемом виде функции $U^*(T)$.

Пример 3. Пусть компонента $U_{H,\mu}(T)$ имеет вид, показанный на рис. 2, а.

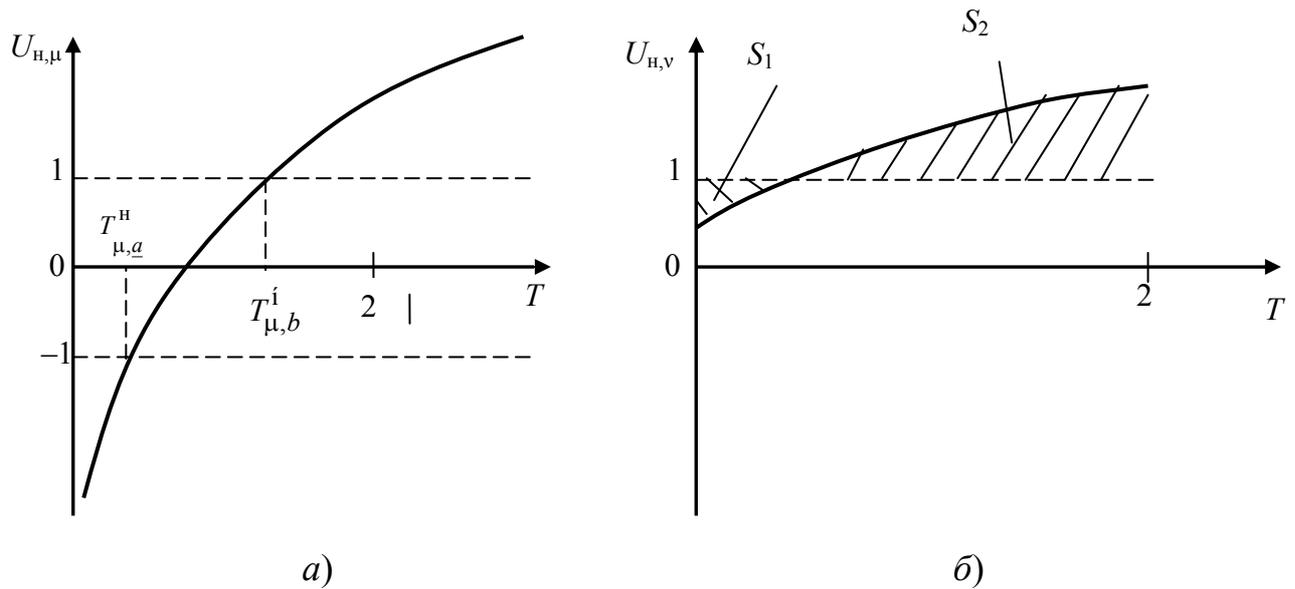


Рис. 2. Возможные изменения компонент $U_{n,\mu}(T)$ (а) и $U_{n,\nu}(T)$ (б) индикаторного управления

В этом случае для компоненты $U_{\mu}(T/T_{\mu}) = \begin{cases} -1, T \in [0; T_{\mu}) \\ 1, T \in [T_{\mu}; 2] \end{cases}$ время T_{μ} берется из интервала $[T_{\mu,a}^H, T_{\mu,b}^H]$. При этом под действием $U_{\mu}(T/T_{\mu})$ «вклад» Δz_i в изменение $z_i(t)$ равен

$$\Delta z_i = b_{\mu}(-\varphi_{i\mu}(0, T_{\mu}) + \varphi_{i\mu}(T_{\mu}, 2)),$$

где

$$\varphi_{i\mu}(0, T_{\mu}) = \int_0^{T_{\mu}} \bar{f}_{i\mu}(2-T)dT, \quad \varphi_{i\mu}(T_{\mu}, 2) = \int_{T_{\mu}}^2 \bar{f}_{i\mu}(2-T)dT.$$

Использовать результаты утверждения 3 целесообразно последовательной заменой наиболее «нагруженных» компонентов, т.е. видами ОУ, содержащих наибольшее число моментов переключений. Эти виды расположены на нижних рядах когнитивной карты, представленной на рис. 1.

Определение 1. Компоненты вектора $U_{n,\mu}(T)$, $\mu \in I_{\mu}$, имеющие вид представленный на рис. 2, а, б, и влияющие на существования решения ЗОУ, назовем лимитирующими (здесь I_{μ} – множество номеров лимитирующих компонентов).

Утверждение 4. Если часть компонент индикаторного вектора $U_n(T)$, полученных при решении системы уравнений (1) не удовлетворяет условию «нена-

груженого» режима [1] и после замены этих компонент «граничными» функциями вида (10) и решение задачи существует, то существует и оптимальное управление $U^*(T) \in V_{\Pi}$.

Доказательство утверждения основано на аддитивном относительно составляющих вектора $U_{\Pi}(T)$ значений z_i , к $i = \overline{1, n}$ и коррекции вектора L на действие граничных управлений вида (10). При этом, время переключения T_{Π} выбирается из интервала, определяемого траекторией $U_{\Pi, \mu}(\circ)$, которая выходит за пределы $[-1; 1]$.

Использовать результаты утверждения 4 целесообразно последовательной заменой наиболее «нагруженных» компонентов, то есть видами ОУ, содержащих наибольшее число моментов переключений.

Утверждение 5. Если для исходных данных R_i при свободном времени t_k существует решение задачи оптимального быстродействия с $u_{\dot{a}}(t), t \in [t_0, t_{\dot{a}}]$ и выполняется условие $t_{\dot{a}} \leq t_{\dot{e}}$, то существует и решение задачи оптимального управления (ЗОУ) с исходными данными $R_{\dot{e}}$ при фиксированном временном интервале $[t_0, t_k]$.

Здесь предполагается, что массив данных $R_{\dot{e}}$ и R совпадают за исключением (быть может) компонентов $t_{\dot{e}}$ и t_k .

Следствие утверждения 5. Если решение задачи максимального быстродействия существует и $t_{\dot{a}} > t_{\dot{e}}$, то решение исходной задачи может быть достигнуто за счет увеличения времени t_k при сохранении неизменными других компонент массива исходных данных.

Необходимо отметить, что при проектировании систем энергосберегающего управления для обеспечения существования решения ЗОУ в различных ситуациях необходимо использовать возможности изменения других компонентов массива R , например, u_i^B, b_i и т.д.

В ряде случаев характер изменения компонент вектора $U_{\Pi}(T)$ может быть использован для выдвижения гипотез и существования решения ЗОУ. Например, либо решения ЗОУ не существует, либо оно может существовать при $U(T) = 1, T \in [0, 2]$, если недостаток действия компоненты $U_{\nu}(T)$ компенсируется другими составляющими вектора управления.

Заключение

Полученные результаты могут служить основой для разработки математического обеспечения специализируемых СБИС, использующего когнитивную графику для повышения быстродействия и сокращения энергопотребления управ-

ляющим устройством за счет исключения большого числа операций, связанных с обращением микропроцессора к памяти.

Статья выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-08-12218.

Список литературы

1. Муромцев, Ю.Л. Методология полного анализа энергосберегающего управления многомерными объектами / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин // Системы упр. и информ. технологии. – 2008. – № 2.3(32). – С. 364–369.

2. Кулинич, А.А. Система когнитивного моделирования «Канва» / А.А. Кулинич // Програм. продукты и системы. – 2002. – № 3. – С. 24–28.

**MATHEMATICAL PROVISION OF INTELLIGENT CONTROLLER
FOR ENERGY SAVING CONTROL SYSTEMS**

Yu.L. Muromtsev, D.Yu. Muromtsev, V.A. Pogonin

Abstract: The problems of mathematical provision and knowledge base of intelligent controllers for energy saving system are considered.