

ДВА ПОДХОДА К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Д.Ю. Муромцев

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем», ТГТУ*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: задача оптимального управления; методы искусственного интеллекта; метод синтезирующих переменных; множество состояний функционирования; модель задачи оптимального управления; обратная задача оптимального управления; полный анализ оптимального управления.

Аннотация: Приводится сравнительная характеристика двух концепций анализа и синтеза систем энергосберегающего управления: одна базируется на полном анализе задач оптимального управления, другая – на исследовании систем с использованием методов искусственного интеллекта. Рассматриваются основные вопросы анализа и синтеза оптимального управления на множестве состояний функционирования.

Введение

В последние годы в связи с расширением возможностей компьютерных технологий широкое распространение получают два подхода, используемых при разработке систем энергосберегающего управления (СЭУ).

Один подход связан с анализом и синтезом оптимального управления на множестве состояний функционирования (МСФ) или полным анализом задачи оптимального управления (ЗОУ) [1, 2]. Другой подход основан на применении методов искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей, генетических алгоритмов и др. [3 – 5]. Оба подхода используются при решении ЗОУ в условиях неопределенности. Поэтому представляет интерес дать сравнительную характеристику этих подходов при решении задач энергосберегающего управления, раскрыть их возможности и области применения.

1 Особенности и области применения

При проектировании алгоритмического обеспечения СЭУ возникают серьезные трудности, связанные с различного рода неопределенностями. Эти неопределенности могут вызываться неадекватностью модели, влиянием возмущающих воздействий, неточным заданием начальных условий, нарушениями технических устройств и другими факторами. В связи с этим возрастает актуальность решения задач анализа и синтеза оптимального управления (ОУ) в условиях неопределенности. Для решения таких задач широкое распространение получили методы, основанные на нечеткой логике, искусственных нейро-сетях и т.п. В определенном смысле альтернативой такому подходу является анализ и синтез ЗОУ на МСФ.

В данном случае также может присутствовать неопределенность, в зависимости от ее характера выделяют различные классы систем на МСФ [1].

Оба подхода интенсивно развиваются и находят широкое применение на практике, в т.ч. при решении задач ОУ. На начальном этапе разработки СЭУ при формализации ЗОУ требуется принять ответственное решение – какой из методов будет положен в основу алгоритмического обеспечения. Для этого важно сопоставить основные характеристики обоих подходов и области их применения. Сравнение по основным параметрам, играющим важную роль при проектировании СЭУ приведено в табл. 1, где видно, что подход полного анализа ЗОУ на МСФ более предпочтителен при разработке бортовых контроллеров (класса Embedded System) для энергоемких аппаратов и машин, когда требуется синтезировать управляющие воздействия в реальном времени.

Второй подход имеет большие возможности при оптимизации сложных объектов, имеющих высокие размерности векторов фазовых координат и управления.

Широкие перспективы открываются при совместном использовании обоих подходов для автоматизации сложных технологических установок и комплексов. В данном случае нижний уровень системы управления образуют бортовые контроллеры отдельных машин и аппаратов. Алгоритмическое обеспечение этих контроллеров использует результаты полного анализа ЗОУ, алгоритмическое обеспечение верхнего уровня системы в виде управляющей ЭВМ строится на основе нейронечеткого подхода.

Таблица 1

Показатели и характеристики	Полный анализ на МСФ	Анализ с использованием искусственного интеллекта
Применяемые методы	Принцип максимума, динамическое программирование, аналитическое конструирование оптимальных регуляторов, метод синтезирующих переменных	Нечеткие множества, нейросетевые, адаптация
Объекты управления (модели динамики)	Описываются дифференциальными уравнениями	Практически любые
Время, затрачиваемое на решение ЗОУ	а) если полный анализ выполнен, то оперативно или в масштабе реального времени б) если полный анализ не выполнен, то используется методика анализа с применением метода синтезирующих переменных; время – десятки часов	Требуется значительное время на сбор большого объема данных, этапа обучения (адаптации)
Используемые технические средства для реализации управлением	Простые (бортовые, контроллеры)	Средней сложности (управляющие ЭВМ)
Подготовленность персонала, эксплуатирующего СЭУ	Обычная для служб КИП и А	Требуется дополнительное обучение

Другим направлением сочетания двух подходов является создание двух типов моделей для сложных объектов. К первому типу относятся модели в виде дифференциальных уравнений ограниченной размерности, которые с допустимой погрешностью описывают динамические режимы. Идентификация таких моделей может быть выполнена по незначительному объему экспериментальных данных и в короткие сроки. Другой тип образует нейросетевые модели, позволяющие учесть большое число различных факторов и за счет этого повысить точность прогноза изменения фазовых координат. В зависимости от сложившейся ситуации в системе управления будут использоваться модели первого или второго типов.

Наиболее трудоемкие исследования при разработке таких систем связаны с полным анализом оптимального управления множества состояний функционирования, которые могут иметь место в процессе реальной эксплуатации объектов.

2 Полный анализ ЗОУ

При анализе ОУ на множестве состояний функционирования в зависимости от характера изменения состояний и возможности их идентификации выделяют четыре класса систем [1]. Анализ и синтез ОУ для систем различных классов имеют существенные различия. В качестве примера рассмотрим анализ СЭУ первого класса.

К первому классу относятся СЭУ, для которых на временном интервале управления $[t_0, t_k]$ состояние функционирования известно и постоянно, эти СЭУ используют только одну функцию ОУ (или синтезирующую функцию), определяемую по результатам полного анализа соответствующей ЗОУ. Основными принципами и положениями методики полного анализа ЗОУ на множестве состояний функционирования являются следующие [1, 2].

1. Анализ оптимального управления производится для конкретной четверки $\langle M, F, S, O \rangle$ в предположении, что компоненты соответствующего массива исходных данных R могут принимать любые возможные (физически реализуемые) значения (здесь M – модель динамики объекта, F – вид функционала, S – стратегия управления, O – ограничения и связи).

2. Для задаваемых вида модели M и функционала затраты энергии ($F = \mathcal{E}$) с использованием принципа максимума определяются все возможные виды функции ОУ применительно к программной стратегии.

3. Методом синтезирующих переменных определяются соотношения для границ области существования решения ЗОУ, границ областей с разными видами функций ОУ и формулы для расчета параметров соответствующих функций.

4. На основе результатов, полученных в п. 3, аналогичные соотношения и формулы определяются для других видов функционалов (расход топлива, быстроедействие) и стратегий (позиционная).

5. В пространстве \mathcal{L} вектора синтезирующих переменных L строятся границы, в пределах которых выполняются дополнительно накладываемые ограничения к задаче оптимального управления (на значения фазовых координат, скорость изменения управления и т. п.).

6. Определяются расчетные соотношения для решения обратных задач оптимального управления.

7. Определяются формулы для расчета траекторий изменения фазовых координат и значений функционала для всех возможных видов функций ОУ.

Для выполнения полного анализа ЗОУ обычно используются принцип максимума и метод синтезирующих переменных [6, 7]. Его применение позволяет визуализировать процесс решения ЗОУ и в компактной форме хранить результаты

[8]. Методику полного анализа рассмотрим на примере частной ЗОУ $\langle AI, \mathcal{E}, Pr, O \rangle$, т.е. модель динамики – реальный двойной интегратор (AI), функционал – затраты энергии (\mathcal{E}), программная стратегия (Pr), концы фазовой траектории закреплены, временной интервал фиксирован, управление (скалярное) ограничено (O), т.е.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2(t), \quad \dot{z}_2 = a_2 z_2(t) + bu(t), \quad t \in [t_0, t_k], \\ \forall t \in [t_0, t_k]: u(t) &\in [u_H, u_B], \quad z_i(t_0) = z_i^0, \quad z_i(t_k) = z_i^K, \quad i = 1, 2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$J_{\mathcal{E}} = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \rightarrow \min, \quad u^*(\cdot) = (u^*(t), t \in [t_0, t_k]).$$

Для численного решения ЗОУ (1) задается массив исходных данных

$$R = (a_2, b, u_H, u_B, z_1^0, z_2^0, z_1^K, z_2^K, t_0, t_k). \quad (2)$$

В соответствии с методом синтезирующих переменных исходная ЗОУ (в натуральном масштабе) преобразуется в базовую ЗОУ с нормированным управлением $U \in [-1; 1]$ и временем $T \in [0; 2]$, т.е.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \bar{a} z_2(T), \quad \dot{z}_2 = \bar{a}_2 z_2(T) + \bar{b} U(T) + \bar{b}_0, \quad T \in [0, 2], \\ \forall T \in [0; 2]: U(T) &\in [-1; 1], \quad z_i(0) = z_i^0, \quad z_i(2) = z_i^K, \quad i = 1, 2; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\bar{J}_{\mathcal{E}} = \int_0^2 U^2(T) dT \rightarrow \min, \quad U^*(0) = (U^*(T), T \in [0; 2]),$$

где

$$\begin{aligned} \bar{a}_2 &= (t_k - t_0) a_2 / 2, \quad \bar{a} = (t_k - t_0) / 2, \\ \bar{b} &= (u_B - u_H)(t_k - t_0) b / 4, \quad \bar{b}_0 = (u_B + u_H)(t_k - t_0) b / 4, \end{aligned} \quad (4)$$

$$T = 2 \frac{t - t_0}{t_k - t_0}, \quad U = 2 \frac{u - u_0}{u_B - u_H}; \quad u_0 = \frac{u_B + u_H}{2}.$$

Для решения базовой ЗОУ задается массив данных

$$\bar{R} = (\bar{a}, \bar{a}_2, \bar{b}, \bar{b}_0, z_1^0, z_2^0, z_1^K, z_2^K). \quad (5)$$

Утверждение 1. Вид функции ОУ $u^*(t)$ и ее параметры в задаче (1) однозначно определяются значениями синтезирующих переменных

$$L_1 = \int_0^2 U(T) dT, \quad L_2 = \int_0^2 e^{\bar{a}_2(2-T)} U(T) dT \quad (6)$$

и коэффициентом \bar{a}_2 , которые рассчитываются по формулам:

$$L_2 = \frac{1}{b} \left(z_2^K - e^{2\bar{a}_2} z_2^0 - \frac{\bar{b}_0}{\bar{a}_2} (e^{2\bar{a}_2} - 1) \right), \quad (7)$$

$$L_1 = L_2 - \frac{1}{b} \left[\frac{\bar{a}_2}{\bar{a}} (z_1^K - z_1^0) - (e^{2\bar{a}_2} - 1) z_2^0 - \bar{b}_0 \left(\frac{e^{2\bar{a}_2} - 1}{\bar{a}_2} - 2 \right) \right], \quad \bar{a}_2 = \frac{t_k - t_0}{2} a_2. \quad (8)$$

Для доказательства утверждения используются переход к базовой задаче, формула Коши для $z(t_k)$ и единственность функций ОУ (если решение задачи

существует) при функционале $J_{\mathcal{E}}$. Значения тройки (L_1, L_2, \bar{a}_2) рассчитываются по элементам массива \bar{R} , а следовательно, и R (см. (4)).

Утверждение 2. Если решение ЗОУ (3) (а следовательно, и (1)) существует, то возможны следующие основные виды функций ОУ с двумя параметрами, определяемые решением уравнений (6):

$$\begin{aligned}
 U_1^*(T) &= D_0 + D_1 e^{-\bar{a}_2 T} = U_0(T), \quad T \in [0; 2]; \\
 U_2^*(T) &= \begin{cases} 1, & T \in [0; T_2], \\ U_0(T), & T \in [T_2; 2]; \end{cases} & U_3^*(T) &= \begin{cases} U_0(T), & T \in [0; T_3], \\ 1, & T \in [T_3; 2]; \end{cases} \\
 U_4^*(T) &= \begin{cases} -1, & T \in [0; T_4], \\ U_0(T), & T \in [T_4; 2]; \end{cases} & U_5^*(T) &= \begin{cases} U_0(T), & T \in [0; T_5], \\ -1, & T \in [T_5; 2]; \end{cases} \\
 U_6^*(T) &= \begin{cases} -1, & T \in [0; T_6], \\ U_0(T), & T \in [T_6; T'_6], \\ 1, & T \in [T'_6; 2]; \end{cases} & U_7^*(T) &= \begin{cases} 1, & T \in [0; T_7], \\ U_0(T), & T \in [T_7; T'_7], \\ -1, & T \in [T'_7; 2]; \end{cases}
 \end{aligned} \tag{9}$$

а также функции ОУ с одним параметром

$$U_8^*(T) = \begin{cases} 1, & T \in [0; T_8], \\ -1, & T \in [T_8; 2]; \end{cases} \quad U_9^*(T) = \begin{cases} -1, & T \in [0; T_5], \\ 1, & T \in [T_5; 2]. \end{cases} \tag{10}$$

Доказательство утверждения 2 следует непосредственно из принципа максимума. Пересчет ОУ (9), (10) в нормированном масштабе к ОУ $u_i^*(t)$, $i = \overline{1,9}$ в натуральном масштабе производится по формулам:

$$u_i^* = \frac{u_{\text{н}} + u_{\text{в}}}{2} + \frac{u_{\text{в}} - u_{\text{н}}}{2} U_i^*, \quad t_i = t_0 + \frac{t_{\text{к}} - t_0}{2} T_i. \tag{11}$$

Например,

$$u_1^*(t) = d_0 + d_1 e^{-a_2(t-t_0)},$$

где

$$d_0 = \frac{u_{\text{н}} + u_{\text{в}}}{2} + \frac{u_{\text{в}} - u_{\text{н}}}{2} D_0, \quad d_1 = \frac{u_{\text{в}} - u_{\text{н}}}{2} D_1.$$

Следует заметить, что параметры разных видов функций ОУ находятся решением разных уравнений. Например, параметры D_0 и D_1 ОУ $U_1^*(T)$ определяются решением системы уравнений

$$2D_0 + \frac{1}{\bar{a}_2} (1 - e^{-2\bar{a}_2}) D_1 = L_1, \quad \frac{1}{\bar{a}_2} (e^{2\bar{a}_2} - 1) D_0 + \frac{1}{2\bar{a}_2} (e^{2\bar{a}_2} - e^{-2\bar{a}_2}) D_1 = L_2.$$

Утверждение 3. Решение ЗОУ (1) существует, если значение пары (L_1, L_2) принадлежит области G_c , границы которой определяются соотношениями

$$\begin{aligned}
 L_2' &= \frac{1}{\bar{a}_2} e^{2\bar{a}_2} (1 + e^{-2\bar{a}_2} - 2e^{-0,5\bar{a}_2(2-L_1)}), \quad L_2'' = \frac{1}{\bar{a}_2} e^{2\bar{a}_2} (2e^{-0,5\bar{a}_2(2-L_1)} - 1 - e^{-2\bar{a}_2}), \\
 L_1 &\in [-2; 2], \quad L_2 \in \left[\frac{1}{\bar{a}_2} (1 - e^{2\bar{a}_2}); -\frac{1}{\bar{a}_2} (1 - e^{2\bar{a}_2}) \right].
 \end{aligned} \tag{12}$$

Для доказательства утверждения 3 используются виды функции ОУ (10), соответствующие решению задачи максимального быстродействия.

Утверждение 4. Область G_c существования решения ЗОУ представляет собой объединение областей $G_i, i = \overline{1,7}$, соответствующих видов функций ОУ, т.е.

$$G_c = \bigcup_{i=1}^7 G_i, \text{ при этом границам областей } g_{i,j} \text{ соответствуют частные случаи}$$

функции ОУ (9) с «закреплением» конца траектории $U_i^*(\cdot)$ (или $U_j^*(\cdot)$) в одной из точек $(U = 1, T = 0), (U = 1, T = 2), (U = -1, T = 0), (U = -1, T = 2)$.

Например, границе $g_{1,2}$ между областями G_1 и G_2 соответствует уравнение

$$U_{1;2}(T) = \begin{cases} 1, & T = 0, \\ U_0(T), & T \in (0; 2]. \end{cases}$$

Сечения областей G_i при $\bar{a}_2 = \text{const}$ показаны на рис. 1.

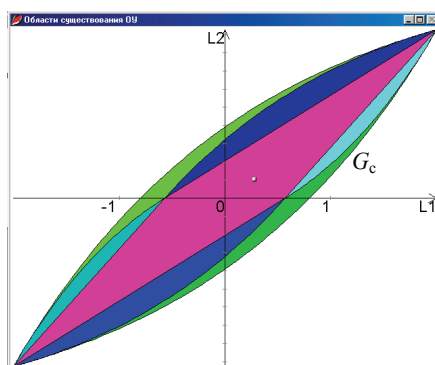


Рис. 1 Область существования решения ЗОУ $\langle AI, \mathcal{E}, Pr, O \rangle$

Определение 1. Обратной будем называть задачу определения желаемых (относительно границ областей G_c и G_i) значений синтезирующих переменных путем изменения компонентов массива исходных данных R .

Для решения обратной задачи применительно к четверке $\langle AI, \mathcal{E}, Pr, O \rangle$ в массиве R выделяются группы компонентов, влияющие только на отдельные синтезирующие переменные, и на несколько переменных одновременно [9].

Например, при условии $|u_n| = u_b$

$$L = \frac{2}{(t_k - t_0)u_b} \left(z_2^k - z_2^0 - \bar{a}_2 (z_1^k - z_1^0) \right), \quad L_2 = \frac{2}{(t_k - t_0)u_b} \left(z_2^k - z_2^0 e^{\bar{a}_2(t_k - t_0)} \right).$$

Из этих уравнений видно, что z_1^k, z_1^0 влияют только на L_1 , компоненты b, u_b, z_2^k, z_2^0 – на L_1 и L_2 , а t_0, t_k, a_2 – на L_1, L_2 и \bar{a}_2 .

Полный анализ на МСФ выполнен для набора четверок, образуемых из $M \in \langle A, DI, AI, DA, TI \rangle, F \in \{J_s, J_T, J_B\}$ и $S \in \{Pr, Pz\}$. При этом модели динамики могут иметь запаздывание по каналу управления, условия ЗОУ могут содержать интегральные ограничения на лимит энергии и запас топлива и др. Результаты полного анализа этих четверток образуют базу знаний, имеющую фреймовую структуру.

3 Синтез

При разработке СЭУ приходится решать различные задачи синтеза, среди которых можно выделить задачи синтеза ОУ и непосредственно системы оптимального управления. Классификация задач синтеза приведена на рис. 2.

В общем случае задача синтеза ОУ применительно к конкретной модели ЗОУ в виде четверки $\langle M, F, S, O \rangle$ формулируется следующим образом [10]. Даются диапазоны возможного изменения компонентов массива R в реальных условиях эксплуатации объекта управления и на основе результатов полного анализа с использованием синтезирующих переменных требуется определить встречающиеся виды функций программного управления и соотношения для расчета параметров ОУ, т.е. разработать алгоритмическое обеспечение СЭУ. Другими словами, известны:

- модель ЗОУ $\langle M, F, S, O \rangle$, включая формулы расчета синтезирующих переменных, соотношения для определения границ областей видов ОУ, расчета параметров ОУ, траекторий изменения фазовых координат и значений функционалов;
- диапазоны возможных изменений параметров объекта $[a_{\text{н}}, a_{\text{в}}]$, $[b_{\text{н}}, b_{\text{в}}]$, границ управления $[u'_{\text{н}}, u''_{\text{н}}]$, $[u'_{\text{в}}, u''_{\text{в}}]$, начального и конечного значений вектора фазовых координат $[z'_{i0}, z''_{i0}]$, $[z'_{ik}, z''_{ik}]$, $i = \overline{1, n_z}$ начало и конец временного интервала $[t'_0, t''_0]$, $[t'_k, t''_k]$.

Необходимо найти:

- возможные виды функции ОУ для указанных интервальных значений исходных данных, а также соотношения, позволяющие проверять существование решения ЗОУ и определять вид функции $u^*(t)$ или $s^*(z, t_k - t)$;
- формулы расчета параметров ОУ;
- траектории изменения фазовых координат и значения минимизируемого функционала.

Кроме того, определяется вероятность существования решения ЗОУ при возможных изменениях исходных данных и насколько существенен запас, при котором имеет место решение ЗОУ.

Задача синтеза управляющих воздействий (УВ) в реальном времени решается бортовым контроллером и заключается в следующем. Известны виды функций ОУ $u_h(t)$, которые могут иметь место при $h \in H_0$, соотношения для их определе-

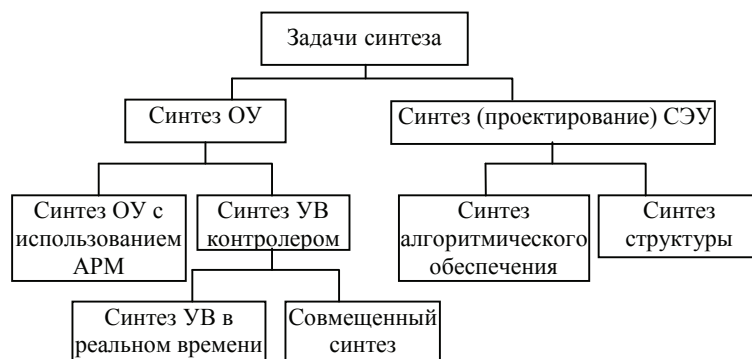


Рис. 2 Классификация задач синтеза

ния, формулы для расчета параметров ОУ, т.е. фрагменты моделей ЗОУ $\langle M_h, F_h, S_h, O_h \rangle$. Требуется для задаваемого массива исходных данных R_h за допустимое время Δt_d проверить существование решения ЗОУ, если оно существует, то определить вид функции ОУ и рассчитать ее параметры. Если решение ЗОУ для R_h не существует, то за время Δt_d контроллер решает обратную задачу по коррекции компонентов R_h и расчету ОУ для откорректированного массива данных. Одновременно выделяется сигнал оператору об изменении R_h . Время Δt_d назначается из условия выполнения соотношения $\forall i \in [1, n]: |z_i(t) - z_i(t + \Delta t_d)| \leq \delta z_i$, здесь δz_i – допустимые изменения i -й составляющей вектора фазовых координат размерности n .

Задача совмещенного синтеза возникает в основном в связи с непредвиденным появлением ситуаций, функционирование в которых ранее не предусматривалось, например, отказ технических устройств, появление дополнительных возмущающих воздействий и т.п. При этом могут изменяться как вид, так и параметры модели динамики. Задача совмещенного синтеза формулируется следующим образом. При возникновении в момент времени $t_h \in [t_0, t_k]$ состояния $\tilde{h} \notin H_0$ требуется на временном интервале $[t_h, t_h + \Delta t_{ид}]$ зарегистрировать значения z, u , по которым определить вид и параметры модели объекта. Затем за время Δt_c рассчитать функцию ОУ для оставшегося временного интервала и новой модели. При этом должно выполняться условие $\Delta t_{ид} + \Delta t_c \leq \Delta t_d$.

В случае многостадийных процессов (см. п. 2.3) задача синтеза оптимальной программы комбинированным методом решается с использованием АРМ проектировщика алгоритмического обеспечения [11].

Задача синтеза алгоритмического обеспечения СЭУ заключается в выделении из результатов полного ЗОУ, хранящихся в базе знаний экспертной системы, фрагментов (фреймов), необходимых для работы локальных управляющих устройств. Исходными данными для решения этой задачи является множество моделей ЗОУ $J = \{ \langle M, F, S, O \rangle_n, h \in H_0 \}$ и множество соответствующих массивов реквизитов $R = \{ R_h, h \in H_0 \}$, содержащих интервалы возможного изменения значений компонентов.

Заклучение

Выполнение исследований по анализу и синтезу оптимального управления на множестве состояний функционирования позволяет учесть многие аспекты работы систем в условиях неопределенности. Основным ограничением для проведения полного анализа ЗОУ является необходимость описания динамики объекта системой дифференциальных уравнений ограниченной размерности. От этого ограничения свободен подход, использующий нечеткие нейросетевые методы. Однако для данного подхода характерны значительные временные затраты на период «обучения». Это существенно затрудняет решение задач синтеза оптимальных управляющих воздействий в реальном времени.

Сочетание обоих подходов при анализе и синтезе ОУ позволяет значительно расширить возможности систем энергосберегающего управления.

Список литературы

1. Муромцев Ю.Л. Моделирование и оптимизация систем при изменении состояний функционирования / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж: ВГУ, 1992. – 164 с.
2. Муромцев Ю.Л. Микропроцессорные системы энергосберегающего управления: Учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова. – Тамбов: ТГТУ, 2001. – 80 с.
3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учеб. / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
4. Пупков К.А. Интеллектуальные системы / К.А. Пупков, В.Г. Коньков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 348 с.
5. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – 4-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
6. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
7. Муромцев Ю.Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, Е.В. Сатина // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 11-12. – С. 19-25.
8. Орлова Л.П. Информационно-технологическая среда проектирования микропроцессорных систем энергосберегающего управления // Информационные технологии в производстве. – 1997. – № 1. – С. 30-35.
9. Муромцев Д.Ю. Обратные задачи моделирования при анализе и синтезе энергосберегающего управления: В кн.: Актуальные проблемы информатики и информационных технологий: Материалы III-ей Тамбовской межвузовской научной конференции. – Тамбов: ТГТУ им. Державина, 1999. – С. 62-63.
10. Муромцев Д.Ю. Оперативный синтез энергосберегающего управления для линейных систем с запаздыванием на множестве состояний функционирования // Тр. ТГТУ: Сб. научных статей молодых ученых и студентов. – Тамбов, 1999. Вып. 4. – С. 47-50.
11. Muromtzev Ju. L., Orlov V.V., Latzel P., Zimmermann R. Intelligentes informations – technologisches Medium «Analysator». – Вестник ТГТУ. – 1997. – Т. 3, № 1-2. – С. 16 - 24.

Two Approaches to Analysis and Synthesis of Energy-Saving Control in Conditions of Uncertainty

D.Yu. Muromtsev

Department “Designing of Radio-Electronic and Microprocessor Systems”, TSTU

Key words and phrases: complete analysis of optimum management; methods of artificial intelligence; method of synthesizing variables; model of TOM; reverse TOM; set of functioning conditions; task of optimum management (**TOM**).

Abstract: Comparative characteristics of two concepts of analysis and synthesis of energy-saving control systems is given. The one is based on the complete analysis of the task of optimum control, the other – on the examination of the system using methods of artificial intelligence. Basic problems of analysis and synthesis of optimum control on the set of functioning conditions are studied.

Zwei Einstellungen zur Analyse und Synthese der energiesparenden Steuerung unter den Bedingungen der Unbestimmtheit

Zusammenfassung: Es wird die Vergleichcharakteristik von zwei Konzeptionen der Analyse und Synthese der Systeme der energiesparenden Steuerung angeführt. Die eine gründet sich auf die Vollanalyse der Aufgaben der Optimalsteuerung, die andere gründet sich auf die Untersuchung der Systeme mit Benutzung der Methoden der Kunstintelligenz. Es werden die Grundfragen der Analyse und Synthese der Optimalsteuerung auf der Menge der Funktionierungszustände beobachtet.

Deux approches envers l'analyse et la synthèse de la commande conservant de l'énergie dans les conditions de l'indétermination

Résumé: Est exposée la caractéristique comparative de deux conceptions de l'analyse et de la synthèse des systèmes de la commande conservant de l'énergie: l'une est basée sur l'analyse complète des problèmes de la commande optimale, l'autre – sur l'étude des systèmes avec l'utilisation de l'intellect artificiel. Sont examinés les essentiels problèmes de l'analyse de la commande optimale sur la multitude des états du fonctionnement.
