

## СИНТЕЗ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Д.Ю. Муромцев, В.В. Папин

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных  
и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;  
crems@crems.jesby.tstu.ru*

**Ключевые слова и фразы:** задачи оптимального управления; задачи синтеза; квадратичный оптимальный регулятор; многофункциональные управляющие устройства; энергосберегающий оптимальный регулятор.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы синтеза многофункциональных управляющих устройств систем энергосберегающего управления динамическими объектами. Приведен пример сравнения двух оптимальных регуляторов: квадратичного и энергосберегающего.

---

В общем случае под синтезом понимается процесс создания новой системы управления с оптимизацией ее свойств и показателей. Можно выделить две группы задач синтеза систем энергосберегающего управления (**СЭУ**). К первой группе относятся задачи синтеза оптимального управления (**ОУ**), результатом решения которых являются соотношения для оперативного расчета энергосберегающих управляющих воздействий. Эти соотношения составляют основу алгоритмического обеспечения СЭУ. Ко второй группе относятся задачи синтеза устройств энергосберегающего управления, в том числе выбор стратегии реализации ОУ, структуры СЭУ и т.д.

Алгоритм синтеза оптимального управления, реализуемый управляющим устройством применительно к конкретному объекту, то есть заданной модели динамики, во многом определяется видом минимизируемого функционала и выбранной стратегией.

*Определение 1.* Управляющее устройство, алгоритмическое обеспечение которого решает задачи синтеза ОУ при одном виде минимизируемого функционала с использованием одной стратегии реализации ОУ, будем называть однофункциональным.

Алгоритмическое обеспечение однофункциональных устройств обычно представляет собой часть результатов полного анализа для конкретной модели задачи оптимального управления (**ЗОУ**), например, для моделей <М, Э, Пр, О>, <М, Т, Пр, О>, <М, Э, Пз, О> и т.д.

*Определение 2.* Управляющее устройство, алгоритмическое обеспечение которого позволяет решать задачи при различных функционалах или (и) стратегиях реализации ОУ, будем называть многофункциональным.

Многофункциональные управляющие устройства (**МФУУ**) являются разновидностью систем с переменной структурой [1]. В МФУУ в зависимости от ситуации может решаться задача синтеза ОУ, например при функционалах затраты

энергии или квадратичном использоваться как позиционная, так и программная стратегии.

Несомненным преимуществом МФУУ является то, что они позволяют объединить достоинства различных однофункциональных управляющих устройств. Рассмотрим это на примере сравнения двух оптимальных регуляторов (ОР): квадратичного (КВОР) и энергосберегающего (ЭОР).

При скалярном управлении в КВОР минимизируется функционал

$$I_{\text{КВ}} = x^T(t_k)N x(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} (x^T(t)Gx(t) + qu^2(t))dt, \quad (1)$$

здесь  $x$  –  $n$ -мерный вектор фазовых координат;  $u$  – управляющее воздействие;  $t_0, t_k$  – начало и конец временного интервала управления;  $N, G, q$  –  $(n \times n)$ -матрицы и весовой коэффициент, учитывающие важность составляющих квадратичного функционала.

Достоинством ОР с функционалом (1) является быстрое уменьшение ошибки рассогласования.

Если модель динамики объекта управления имеет вид

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t), \quad t \in [t_0, t_k], \quad x = z - z^k, \quad (2)$$

то при функционале  $I_{\text{КВ}}$  обычно  $u^*(t)$  ищется в виде

$$u^*(t) = K(t)x(t), \quad (3)$$

где  $K(t)$  –  $(n \times 1)$  – матрица, определяемая решением уравнения Риккати и зависящая от  $A, B, G, q$  [2].

Реально существующее ограничение на управление

$$\forall t \in [t_0, t_k]: u(t) \in [u_n, u_b], \quad (4)$$

и другие ограничения при этом не учитываются.

В ЭОР минимизируется функционал

$$I_{\text{Э}} = \int_{t_0}^{t_k} u^2(t)dt \quad (5)$$

и управляющие воздействия определяются синтезирующей функцией

$$u^*(t) = S(x(t), t_k - t; R_0), \quad (6)$$

где

$$R_0 = (A, B, u_n, u_b, x^0, x^k, t_0, t_k).$$

На первый взгляд функционал (5) можно рассматривать как частный случай функционала (1) и поэтому определение синтезирующей функции (6) является простой, хорошо изученной задачей. Однако это не так, ЭОР с функционалом (5) осложняется тем, что функция (6) может иметь несколько видов. Для определения конкретного вида  $S(x, \tau, R_0)$ , зависящего от  $R_0$  и обеспечивающего достижение цели управления  $x(t_k) = x^k$ , требуется решение ряда задач: определение всех возможных видов функции (6) для исследуемого объекта управления, нахождение границ областей существования видов синтезирующих функций и областей, в которых выполняются ограничения на  $x$  и  $u$ , разработка алгоритмов поиска вида функции (6) и расчета ее параметров для текущего значения массива  $R$ . Неправильное определение вида синтезирующей функции может приводить к срыву процесса регулирования при выполнении задачи с функционалом  $I_{\text{Э}}$ . Если компоненты

$K(t)$  в КВОР при выбранных  $G$  и  $q$  зависят только от параметров объекта (матрицы  $A, B$ ), то вид и параметры синтезирующей функции (6) зависят еще от  $u_n, u_B, x^0, x^K, (t_0 - t_K)$ .

Достоинством алгоритма (3), по сравнению с (6), является быстрая обработка больших рассогласований (значений  $x$ ) в задачах стабилизации и слежения [2]. На рис. 1, а приведена качественная картина изменения  $x(t)$  для  $n=1$  при использовании КВОР и ЭОР. Вместе с тем использование аппарата синтезирующих переменных [3–5] позволяет обеспечить «приемлемый» профиль траектории  $x(\cdot)=(x(t)), t \in [t_0, t_K]$  путем наложения ограничений на некоторые промежуточные значения  $x(t)$  (рис. 1, б). Такой ЭОР будем называть модифицированным, он реализует выполнение ограничений к профилю  $x(\cdot)$ .

Ограничение к профилю траектории  $x(\cdot)$  можно сформулировать, например, следующим образом: к моменту времени  $t_{\Pi} = \frac{1}{2}(t_K - t_0)$  рассогласование  $|x_0|$  (в предположении  $x_K = 0$ ) должно уменьшиться на  $2/3$ , то есть  $x_{\Pi} = x(t_{\Pi}) = \frac{1}{3}x_0$ .

В общем случае ограничение к профилю траектории  $x(\cdot)$  в задаче с функционалом (5) записывается в виде

$$x(\cdot) \in X(\cdot) \quad (7)$$

или

$$x(t_i) = g_i \Delta x_m, \quad i=1, 2, \dots, p, \quad (7a)$$

где  $X(\cdot)$  – область допустимых значений  $x(\cdot)$ ;  $t_i, g_i$  –  $i$ -й фиксированный момент времени и коэффициент, задающий  $x(t_i)$ , соответственно;  $\Delta x_m$  – максимальное рассогласование, обычно  $|x_0 - x_K|$ ;  $p$  – число фиксированных точек требуемой траектории  $X(\cdot)$ . В формуле (7a) предполагается  $n=1$ , но ее не трудно обобщить на случай  $n > 1$ .

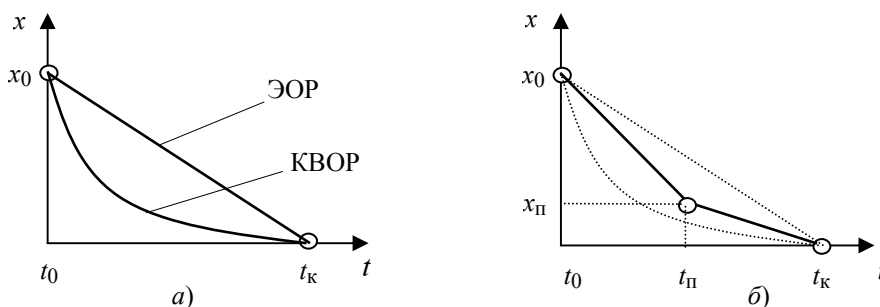
Наряду с ограничением (7a) в случае необходимости ЭОР должен обеспечивать ограничения:

а) на максимальные значения компонентов вектора  $x$ , например, ограничение на скорость (компонента  $x_2$ ) изменения температуры при нагреве тел, то есть

$$\forall t \in [t_0, t_K]: \quad |x_2(t)| \leq x_{2\text{доп}}, \quad (8)$$

ускорение движущегося объекта

$$\forall t \in [t_0, t_K]: \quad |\dot{x}_2(t)| \leq \dot{x}_{2\text{доп}}; \quad (8a)$$



**Рис. 1** Траектории изменения  $x(t)$  в задаче стабилизации для КВОР и ЭОР (а) и для модифицированного ЭОР (б)

б) скорость изменения управляющего воздействия

$$\forall t \in [t_0, t_k]: \quad |\dot{u}(t)| \leq \dot{u}_{\text{доп}}; \quad (8б)$$

в) выделенный лимит энергии

$$\int_{t_0}^{t_k} u^2(t) dt \leq I_{\text{доп}}; \quad (8в)$$

г) значение управления в конечный момент времени

$$u(t_k) = u_k, \quad (8г)$$

где  $x_{2\text{доп}}$ ,  $\dot{x}_{2\text{доп}}$ ,  $\dot{u}_{\text{доп}}$ ,  $I_{\text{доп}}$  – допустимые значения  $x_2$ ,  $\dot{x}_2$ ,  $\dot{u}$  и затрат энергии (функционала).

Ограничения на управление и  $x(t_k)$  в ЗОУ  $\langle M, \mathcal{E}, S, O \rangle$  будем называть основными, а ограничения (7) – (8г) – дополнительными. С учетом дополнительных ограничений размерность массива  $R_0$  увеличивается, то есть

$$\tilde{R}_0 = (A, B, u_n, u_b, x^0, x^k, t_0, t_k; t_n, g; x_{2\text{доп}}, \dot{x}_{2\text{доп}}, \dot{u}_{\text{доп}}, I_{\text{доп}}). \quad (9)$$

В целях повышения надежности функционирования потребуем, чтобы ЭОР при нарушении обратной связи по  $x$  вырабатывал ОУ в соответствии с программной стратегией, а при отсутствии решения ЗОУ находил управление, обеспечивающее наименьшее снижение эффективности системы оптимального управления, например, путем увеличения времени  $t_k$ , ослабления отдельных дополнительных ограничений на  $x$  и  $u$ . Придание ЭОР перечисленных функций позволяет отнести его к так называемым интеллектуальным контроллерам [6–8].

В задачах оптимального управления  $\langle M, \mathcal{E}, S, O \rangle$  решаемых МФУУ, можно выделить два вида ограничений по степени их значимости для процесса регулирования.

*Определение 3.* Ограничения в ЗОУ будем называть сильными (общего характера), если нарушить их физически невозможно или они представляют собой основную цель управления, и частными – если в исключительных случаях для достижения главной цели управления допускается их невыполнение.

Выделение этих двух видов ограничений зависит от особенностей конкретного объекта и условий его реальной работы. Ограничение на величину управляющего воздействия в каждый момент времени (см. (4)) всегда сильное. Сильные ограничения учитываются при построении областей  $\mathcal{L}_c$  и  $\mathcal{L}_j$ . К частным ограничениям в различных условиях могут быть отнесены следующие: на значения фазовых координат в интервале времени  $[t_0, t_k]$ , например, характеризующих ускорение или скорость движения объекта (см. (8), (8а)); скорость изменения управления (см. (8б)); лимит используемой энергии (см. (8в)); величину временно-го интервала управления  $[t_0, t_k]$ .

*Определение 4.* Часть области  $\mathcal{L}_c$ , в которой выполняются частные ограничения конкретной ЗОУ, будем называть допустимой и обозначать  $\mathcal{L}_{\text{доп}}$ .

Для ряда объектов, например, топливных печей, двигателей внутреннего сгорания и др., накладывается ограничение на скорость изменения управляющего воздействия, то есть

$$\left| \frac{du}{dt} \right| \leq \dot{u}_{\text{доп}} = g. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим построение области  $\mathcal{E}_{1g} \subset \mathcal{E}_1$  для объекта двойного интегрирования. В области  $\mathcal{E}_1$   $u_1^*(t) = \bar{u}(t) = d_0 + d_1 t$ , следовательно [9]

$$\left| \frac{du}{dt} \right| = |d_1| = \left| 1,5 \frac{u_B - u_H}{t_K - t_0} (L_2^0 - L_1^0) \right| \leq g. \quad (11)$$

Из (11) видно, что границы области  $\mathcal{E}_{1g}$  в пределах  $L_1$  определяются отрезками прямых (рис. 2, а):

$$L_2^0 = L_1^0 - \frac{2g}{3} \frac{t_K - t_0}{u_B - u_H}, \quad L_2^0 = L_1^0 + \frac{2g}{3} \frac{t_K - t_0}{u_B - u_H}. \quad (12)$$

Для объекта управления с матрицей

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a_2 \end{pmatrix}$$

уравнения, аналогичные (12), имеют вид:

$$L_2 = \frac{e^{2\bar{a}_2} - 1}{2\bar{a}_2} L_1 - \frac{g}{2\bar{a}_2^2} (1 - \bar{a}_2) - (1 - \bar{a}_2) e^{-2\bar{a}_2} (1 - e^{2\bar{a}_2});$$

$$L_2 = \frac{e^{2\bar{a}_2} - 1}{2\bar{a}_2} L_1 + \frac{g}{2\bar{a}_2^2} (1 - \bar{a}_2 - (1 + \bar{a}_2) e^{-2\bar{a}_2}) (1 - e^{2\bar{a}_2}), \quad \bar{a}_2 \stackrel{\Delta}{=} a_2 \frac{t_K - t_0}{2}. \quad (13)$$

Рассмотрим определение границ области  $\mathcal{E}_{1\gamma}$ , в которой выполняется ограничение на ускорение фазовой координаты  $z_1$ , то есть

$$|\ddot{z}_1| \leq \left| \dot{z}_2^{\text{доп}} \right| \stackrel{\Delta}{=} \gamma, \quad (14)$$

на примере объекта двойного интегрирования. Так как для ОУ первого вида

$$\dot{z}_2 = b\bar{u}(t) = b(d_0 + d_1 t), \quad (15)$$

то границы определяются из условий

$$|b(d_0 + d_1 t)| \leq \gamma \quad (16a)$$

и

$$|b(d_0 + d_1 t_0)| \leq \gamma. \quad (16b)$$

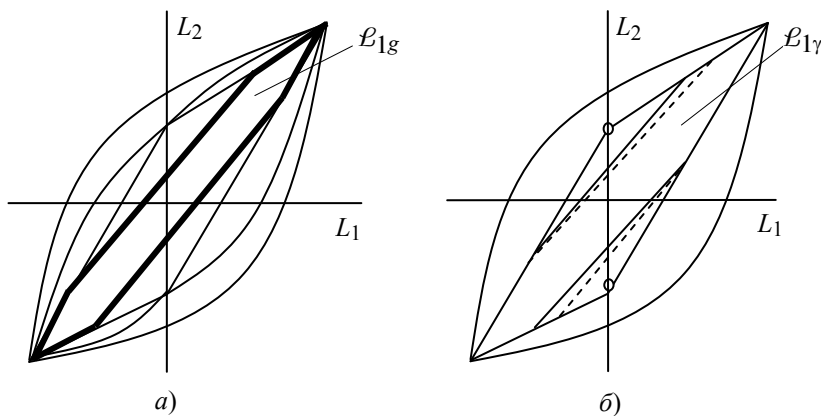


Рис. 2. Области  $\mathcal{E}_{1g}$  (а) и  $\mathcal{E}_{1\gamma}$  (б)

В предположении  $t_0 = 0$  из условия (16а) получаем:

$$\begin{aligned} L_2' &= \frac{t_k - 3}{1,5t_k - 3} L_1 + \frac{t_k}{1,5t_k - 3} \frac{2\gamma - b(u_B + u_H)}{b(u_B - u_H)}, \\ L_2'' &= \frac{t_k - 3}{1,5t_k - 3} L_1 - \frac{t_k}{1,5t_k - 3} \frac{2\gamma - b(u_B + u_H)}{b(u_B - u_H)}, \end{aligned} \quad (17)$$

а из условия (16б):

$$\begin{aligned} L_2' &= \frac{2t_k + 3}{1,5t_k + 3} L_1 + \frac{t_k}{1,5t_k + 3} \frac{2\gamma - b(u_B + u_H)}{b(u_B - u_H)}, \\ L_2'' &= \frac{2t_k + 3}{1,5t_k + 3} L_1 - \frac{t_k}{1,5t_k + 3} \frac{2\gamma - b(u_B + u_H)}{b(u_B - u_H)}. \end{aligned} \quad (18)$$

На основе (17), (18) определяются границы области  $\mathcal{L}_{1\gamma}$ , представляющие собой отрезки прямых (рис. 2, б).

В отличие от рассмотренных областей  $\mathcal{L}_g$ ,  $\mathcal{L}_\gamma$  аналитическое построение области  $\mathcal{L}_L$  с ограниченным лимитом энергии (см. (8в)) достаточно трудоемко. Например, для первого вида функции ОУ в задаче двойного интегратора при  $t_0 = 0$  и  $u_B = |u_H|$  граница области  $\mathcal{L}_{1L}$  имеет нелинейный характер и определяется из соотношения

$$\varphi_1(t_k)L_1^2 + \varphi_{1,2}(t_k)L_1L_2 + \varphi_2(t_k)L_2^2 \leq \frac{4\tilde{I}_L t_k}{(u_B - u_H)^2},$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_1(t_k) &\stackrel{\Delta}{=} (9 - 9t_k + 19t_k^2 - 6t_k^3), \quad \varphi_2(t_k) \stackrel{\Delta}{=} (9 - 9t_k + 14,25t_k^2 - 4,5t_k^3), \\ \varphi_{1,2}(t_k) &\stackrel{\Delta}{=} (-18 + 18t_k - 33t_k^2 + 10,5t_k^3). \end{aligned}$$

Если в ЗОУ присутствуют все три рассмотренных вида ограничений, то допустимая область  $\mathcal{L}_{\text{доп}}$  определяется как пересечение областей  $\mathcal{L}_g$ ,  $\mathcal{L}_\gamma$  и  $\mathcal{L}_L$ , то есть

$$\mathcal{L}_{\text{доп}} = \mathcal{L}_g \cap \mathcal{L}_\gamma \cap \mathcal{L}_L.$$

*Утверждение 1.* Если  $L_0 \in \mathcal{L}_{\text{доп}}$ , то можно выбрать такое время квантования, что при отсутствии возмущений в процессе регулирования для всех моментов времени на интервале  $[t_0, t_k]$  ограничения (10), (14) выполняются, и выделенный лимит энергии не будет перерасходован.

Это следует из того, что при времени квантования  $\delta \rightarrow 0$   $u^*(t)$  и  $z^*(t) \forall t \in [t_0, t_k]$  при программной и позиционной стратегиях совпадают с точностью до малой величины  $\varepsilon$ . Вместе с тем при  $L_0 \in \mathcal{L}_{\text{доп}}$  все ограничения для ОУ с программной стратегией выполняются. Это следует из следующего утверждения.

*Утверждение 2.* Если  $R_0 \in \mathcal{R}_j$ , то есть имеет место программное ОУ  $u_j^*(\cdot)$ , то задавшись допустимым отклонением  $\delta u$  всегда можно найти такие временной шаг квантования  $\delta t$  и синтезирующую функцию  $S_j(x, \tau; R_0)$ , что при отсутствии возмущений значения управления  $u(t) \forall t \in [t_0, t_k]$  при программной ( $u_{j\text{пр}}^*(t)$ ) и позиционной ( $u_{j\text{пр}}^*(t)$ ) стратегиях не будут различаться на величину больше  $\delta u$ .

Это нетрудно показать, если предположить, что при позиционной стратегии в последовательные моменты времени  $t_0, t_0 + \delta t, t_0 + 2\delta t, \dots$  обеспечивается решение ЗОУ для  $R$  при скорректированных значениях  $x$  и  $t$ . Обозначим скорректированный массив данных ЗОУ в момент  $t_0 + k\delta t$  через  $R_k$  и через  $d_{ij}(R_k)$  – параметры ОУ  $j$ -го вида,  $j = 1, 2, \dots$ , рассчитанные по данным  $R_k$ .

В качестве основных показателей эффективности работы МФУУ при выборе временного шага квантования  $\delta t$  можно рассматривать коэффициенты, характеризующие увеличение функционала энергозатрат  $k_\Phi$  и погрешностей достижения конечного состояния (фазовых координат  $z_i^k$ )  $k_{zi}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Коэффициент  $k_\Phi$  будем определять по формуле

$$k_\Phi = \frac{\tilde{I}_{\text{пз}}^*(\delta t)}{I_{\text{пр}}^*}, \quad (19)$$

где  $\tilde{I}_{\text{пр}}^*, I_{\text{пз}}^*(\delta t)$  – значение функционалов при программной и позиционной (с шагом  $\delta t$ ) стратегиях.

Коэффициент  $k_{zi}$  соответствует относительной погрешности в конечный момент времени, то есть

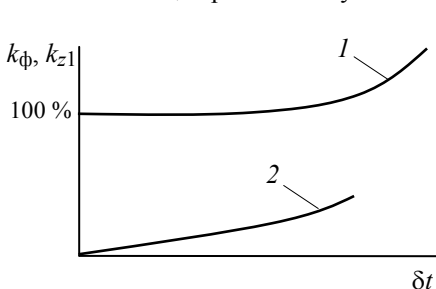
$$k_{zi} = \frac{|z_i^k - z_i^k(\delta t)|}{z_i^k - z_i^0} 100\% \quad \text{или} \quad k_{zi} = \frac{|z_i^k - z_i^k(\delta t)|}{|z_i^{\text{max}}|} 100\%, \quad (20)$$

здесь  $z_i^k, z_i^0$  – значения исходных данных ЗОУ;  $z_i^{\text{max}}$  – максимальное значение  $z_i$  на интервале  $[t_0, t_k]$ , вторая формула используется в случаях, когда  $z_i^k = z_i^0$  или разность  $(z_i^k - z_i^0)$  мала.

На рис. 3 приведен качественный характер зависимостей  $k_\Phi(\delta t)$  и  $k_{z1}(\delta t)$ , на основе которых выбирается шаг квантования  $\delta t$ .

Таким образом, решение задачи синтеза алгоритмического обеспечения МФУУ связано с выполнением следующих этапов:

1. Построение области допустимых решений  $\mathcal{L}_{\text{доп}}$  в пространстве синтезирующих переменных для задаваемых входных данных, если  $\mathcal{L}_{\text{доп}} = 0$ , то последовательно ослабляются частные ограничения (см. *определение 3*).
2. Определение возможных видов синтезирующих функций из области  $\mathcal{L}_{\text{доп}}$ .
3. Построение области практической устойчивости.
4. Определение временного шага квантования.
5. Имитация работы полученного алгоритма.



**Рис. 3. Качественный характер зависимостей  $k_\Phi$  (1) и  $k_{z1}$  (2) от шага квантования  $\delta t$**

При выполнении первого этапа наибольшие трудности могут возникать в связи с частным ограничением (7). В качестве примера рассмотрим построение алгоритма ЭОР, обеспечивающего решение ЗОУ с закрепленным промежуточным значением фазовой координаты (см. рис. 1, б), более подробно.

*Определение 5.* Алгоритм функционирования ЭОР назовем модифицированным, если он обеспечивает решение ЗОУ (2), (5) с дополнительным ограничением (7а).

В задаче закрепления промежуточного значения вектора  $x = (x_1, x_2)^T$  возможны два случая: 1) в момент времени переключения  $t_{\Pi}$  закрепляются все компоненты вектора  $x$ ; 2) при  $t = t_{\Pi}$  закрепляется только первая фазовая координата  $x_1$  (например, температура).

В первом случае алгоритм заключается в следующем:

1) по заданным значениям  $k_t, k_1, k_2$  рассчитываются

$$t_{\Pi} = k_t(t_k - t_0), \quad x_1^{\Pi} = k_1 x_1(t_0), \quad x_2^{\Pi} = k_2 x_2(t_0);$$

2) определяется и реализуется синтезирующая функция

$$S(x, \tau; R_{t_0}), \quad R_{t_0} = (A, B, u_n, u_v, x_0, x_{\Pi}, t_0, t_{\Pi});$$

3) в момент времени  $t_{\Pi}$  определяется и реализуется синтезирующая функция

$$S(x, \tau; R_{t_{\Pi}}), \quad R_{t_{\Pi}} = (A, B, u_n, u_v, x_{\Pi}, x_k, t_{\Pi}, t_k).$$

Таким образом, на интервале времени  $[t_0, t_k]$  последовательно используются две синтезирующие функции, то есть

$$S(x, \tau; R_{h_0}) = \begin{cases} S(x, \tau; R_{t_0}), & t \in [t_0, t_{\Pi}); \\ S(x, \tau; R_{t_{\Pi}}), & t \in [t_{\Pi}, t_k]. \end{cases}$$

Основную трудность здесь представляет определение коэффициента  $k_2$ , который в общем случае зависит от  $k_t$  и  $k_1$ .

Во втором случае значение  $x_2(t_{\Pi})$  определяется из условия минимизации функционала на интервале устранения рассогласования  $[t_0, t_k]$ , то есть дополнительно решается задача минимизации суммы функционалов  $I_{t_0, t_{\Pi}}(x_2^{\Pi})$  и  $I_{t_{\Pi}, t_k}(x_2^{\Pi})$  по значению  $x_{\Pi}$ .

Сопоставление показателей работы КВОР с МФУУ, выполняющим функции ЭОР, показывает, что экономия энергозатрат может достигать 40 % и более.

**Заключение.** Рассмотренные задачи синтеза оптимального управления и алгоритмического обеспечения СЭУ решаются на основе результатов полного анализа соответствующих ЗОУ. Предложенный математический аппарат позволяет разрабатывать алгоритмы расчета в реальном времени энергосберегающих управляющих воздействий, которые могут реализовываться простыми микропроцессорными устройствами.

Показано, что в процессе эксплуатации объектов могут возникать ситуации, когда требуется изменить вид минимизируемого функционала. Для этих случаев предложен подход построения многофункциональных оптимальных регуляторов.

#### *Список литературы*

1. Артемьев, В.В. Теория систем со случайными изменениями структуры / В.В. Артемьев. – М. : Наука, 1979. – 428 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
3. Муромцев, Ю.Л. Метод синтезирующих переменных при оптимальном управлении линейными объектами / Ю.Л. Муромцев, Л.И. Ляпин, Е.В. Сатина // Изв. вузов. Приборостроение. – 1993. – № 11–12. – С. 19–25.
4. Ляпин, Л.Н. Оптимальный по минимуму затрат энергии регулятор объекта двойного интегрирования / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев, О.В. Попова // Изв. Акад. наук СССР. Техн. кибернетика. – 1992. – № 3. – С. 39–46.
5. Муромцев, Ю.Л. Теоретические основы энергосберегающего управления : монография / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.А. Погонин. – М. : ЯНУС-К, 2010. – 288 с.



6. Муромцев, Ю.Л. Методология «оперативного проектирования» систем оптимального управления промышленными объектами / Ю.Л. Муромцев, И.В. Гюрин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 7. – С. 1–3.

7. Зырянов, Ю.Т. Применение энергосберегающих технологий для автоматизированного управления модульными котельными / Ю.Т. Зырянов, А.В. Петров // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 3 (39). – С. 13–17.

8. Муромцев, Д.Ю. Интеллектуальные управляющие устройства / А.И. Козлов, Д.Ю. Муромцев // Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : материалы II Всерос. (VII Тамбов. межвуз.) науч.-практ. конф. (4–5 сент. 2003 г.) / Тамб. гос. ун-т им. Г.Р. Державина. – Тамбов, 2003. – С. 83–84.

9. Ляпин, Л.Н. Анализ и оперативный синтез оптимального управления в задаче двойного интегратора на множестве состояний функционирования / Л.Н. Ляпин, Ю.Л. Муромцев // Изв. Акад. наук СССР. Техн. кибернетика. – 1990. – № 3. – С. 57–64.

---

## Synthesis of Multifunctional Control Devices

D.Yu. Muromtsev, V.V. Papin

*Department “Radio-Electronic and Designing of Microprocessor Systems”, TSTU;  
crems@crems.jesby.tsty.ru*

**Key words and phrases:** energy saving optimum regulator; multifunctional control devices; problems of optimum control; problems of synthesis; square optimum regulator.

**Abstract:** The issues of synthesis of multifunctional control devices for energy saving management systems of dynamic objects are considered. The two optimum regulators – square and energy saving ones have been compared.

---

## Synthese der multifunktionalen steuernden Einrichtungen

**Zusammenfassung:** Es sind die Fragen der Synthese der multifunktionalen steuernden Einrichtungen der Systeme der energiesparenden Steuerung der dynamischen Objekte betrachtet. Es ist das Beispiel des Vergleiches der zwei optimalen Regler angeführt: quadratischen und energiesparenden.

---

## Synthèse des dispositifs multifonctionnels de commande

**Résumé:** Sont examinés les problèmes de la synthèse des dispositifs multifonctionnels de commande des systèmes de la commande conservant de l'énergie des objets dynamiques. Est cité l'exemple de la comparaison de deux régulateurs : celui-ci quadratique et celui-là conservant de l'énergie.

---

**Авторы:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Папин Виктор Владимирович* – студент, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».