

УДК 681.5

СВОЙСТВА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ*

Г. А. Французова

*Новосибирский государственный технический университет,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: frants@sintez.nstu.ru*

Рассматривается задача синтеза систем автоматического поиска экстремума для одноканального объекта, модель которого можно представить в виде последовательного соединения нелинейной динамической составляющей и статической функции качества с выраженным минимумом или максимумом. Обсуждается возможность поиска экстремума методом локализации, предполагающим использование в обратной связи старшей производной выходной переменной динамической части объекта. В зависимости от варианта организации таких обратных связей выделяются два основных типа экстремальных систем: одноконтурные, в которых в регулятор вводится информация о градиенте статической характеристики, и двухконтурные. В последних системах предлагается применять регулятор на основе метода локализации для предварительной стабилизации процессов во внутреннем контуре, содержащем динамическую часть. Во внешнем контуре используется интегральный закон управления и с учётом информации о градиенте организуется движение к экстремуму с заданным динамическим качеством. Моделирование иллюстрирует особенности рассмотренных экстремальных систем.

Ключевые слова: управление, поиск экстремума, нелинейная система, метод локализации, градиент.

Введение. Решение задач текущей оптимизации работы (настройки на экстремум) промышленных систем при неполной информации о параметрах объекта выдвигает на первый план необходимость учёта динамических свойств технических устройств и расчёт регуляторов методами теории автоматического управления. При этом проектируют специальные автоматические системы поиска экстремума, которые называют системами экстремального регулирования. Их характерным признаком является наличие в модели объекта управления динамической части (ДЧ) и статической экстремальной функции, которая в процессе работы может изменяться непредвиденным образом, сохраняя экстремальный характер.

Вероятно, первое упоминание о проблеме экстремального регулирования относится к 1922 г. [1]. Однако аналитически задача автоматической оптимизации сформулирована в середине XX века в работах [2–5]. В последующие годы были заложены основы теории проектирования систем автоматического поиска экстремума, разрабатывались системы экстремального регулирования для решения ряда прикладных задач [6–10]. Система автоподстройки частоты радиоприёмника, оптимизация рабочего режима термоэмиссионных преобразователей, системы автоматизации топочных устройств, паровых котлов и химических агрегатов, система максимизации давления в авиационном компрессоре — вот перечень некоторых промышленных применений экстремальных систем.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 7.559.2011).

Во многих случаях разработка алгоритмов экстремального регулирования базируется на предположении, что динамическую часть объекта с достаточной точностью можно представить в классе линейных моделей. Однако технологические процессы чаще всего имеют сложный нелинейный характер взаимосвязи между регулируемымыми переменными, а их параметры известны неточно. Один из возможных подходов к синтезу нелинейных систем поиска экстремума изложен в [11–13]. Следует также отметить, что наряду с регулярными способами проектирования экстремальных систем существуют специальные приёмы, которые помогают в частных ситуациях находить удовлетворительные решения.

В данной работе представлены два варианта организации систем автоматического поиска экстремума для класса нелинейных одноканальных динамических объектов с переменными параметрами, основанные на методе локализации [14, 15], что предполагает введение обратных связей по производным динамической части объекта и позволяет иметь косвенную текущую оценку возмущений. В первом случае формируется одноконтурная система, в которой регулятор наряду со старшей производной ДЧ содержит оценку градиента функции качества для организации движения к экстремуму. В двухконтурных системах регулятор на основе метода локализации применяется для предварительной стабилизации процессов во внутреннем контуре, который содержит динамическую часть объекта. Во внешнем контуре используется типовой закон регулирования и на базе информации о градиенте осуществляется поиск экстремума. В представленной работе анализируются особенности предлагаемых систем автоматического поиска экстремума и возможная область их применения. Основные свойства иллюстрируют результаты численного моделирования.

Постановка задачи. Будем рассматривать задачу синтеза для одноканальных объектов, математическая модель которых имеет вид

$$\begin{cases} y^{(n)} = f(t, y, \dots, y^{(n-1)}) + b(t, y, \dots, y^{(n-1)})u, \\ Y = Y(y), \end{cases} \quad (1)$$

где $u \in R^1$ — управляющее воздействие с ограниченным ресурсом, $|u| \leq u_m$; $y \in R^1$ — выходная переменная ДЧ объекта; $Y \in R^1$ — статическая экстремальная характеристика (ΘX), которая имеет экстремум Y_0 при $y = y_0$. Параметры ДЧ могут быть определены неточно или изменяться в процессе работы, что отражает зависимость функций $f(\cdot)$ и $b(\cdot)$ от t ; известны только их граничные значения: $|f(\cdot)| \leq f_{\max}$, $0 < b_{\min} \leq |b(\cdot)| \leq b_{\max}$.

Целью функционирования системы является автоматическое определение точки экстремума $\{y_0; Y_0\}$ и стабилизация в ней с помощью управляющего воздействия. Как было показано в [16], это эквивалентно выполнению свойства $\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_0] \leq \Delta^0$ с определёнными показателями качества в статике и динамике, причём предписанное значение y_0 заранее неизвестно. Специфика синтеза экстремальной системы отражается в форме задания требований к качеству процесса выхода на экстремум и предполагает использование информации о градиенте выходной характеристики $G = \partial Y / \partial y$.

Одним из эффективных способов синтеза систем с требуемым динамическим качеством для нелинейных объектов, функционирующих в условиях действия возмущений, является метод локализации [14, 17]. Рассмотрим различные варианты формирования регулятора на его основе для объекта (1) с целью организации автоматического поиска экстремума.

Одноконтурные системы. Рассмотрим ситуацию, когда модель ДЧ (1) имеет первый порядок ($n = 1$), т. е. описывается уравнением

$$\dot{y} = f(t, y) + b(t, y)u. \quad (2)$$

В этом случае предлагается формировать алгоритм управления в следующем виде [15]:

$$u = k[F_1(G) - \dot{y}], \quad (3)$$

где k — коэффициент регулятора. Требования к процессу выхода на экстремум с использованием информации о градиенте $G(y)$ задаются в форме желаемого дифференциального уравнения

$$\dot{y} = F_1(G) = -\gamma G. \quad (4)$$

В результате подстановки (3) в (2) получим дифференциальное уравнение для выходной переменной ДЧ замкнутой системы

$$\dot{y} = \frac{f(t, y)}{1 + b(t, y)k} + \frac{b(t, y)k}{1 + b(t, y)k} F_1(G). \quad (5)$$

Как видно, при увеличении коэффициента регулятора (в асимптотике при $k \rightarrow \infty$) поведение системы (5) вырождается в уравнение желаемой динамики (4), причём точность обеспечения требуемых динамических свойств зависит от численного значения коэффициента k . Поскольку в статике $\dot{y} = 0$, то из (4) следует $G = 0$. Таким образом, равновесный режим системы с регулятором (3) соответствует искомому положению экстремума y_0 .

Остановимся на формировании желаемого уравнения (4). Особенностью систем автоматического поиска экстремума является, как правило, функционирование в относительно небольшой окрестности положения экстремума, поэтому ЭХ $Y(y)$ в этой окрестности обычно можно аппроксимировать параболой [12]

$$Y = Y_0 + q(t)(y - y_0)^2,$$

откуда аналитически определить градиент в виде

$$G = 2q(y - y_0). \quad (6)$$

В результате (4) принимает форму линейного дифференциального уравнения для выходной переменной ДЧ:

$$\dot{y} = -2\gamma q(y - y_0), \quad (7)$$

где γ выбирается исходя из условия устойчивости системы (7) с использованием корневых оценок качества процесса [15].

Двухконтурные системы. В случае объектов с моделью (1) произвольного порядка рекомендуется проектировать двухконтурные системы [16–21] с организацией разнотемповых движений, в которых внутренний контур включает в себя ДЧ объекта, а внешний — его экстремальную характеристику (рис. 1). В целях стабилизации процессов во внутреннем контуре и подавления влияния внешних неконтролируемых возмущений предлагается формировать закон управления (регулятор P_2) на основе метода локализации:

$$u = k[F_2(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, v) - y^{(n)}], \quad (8)$$

где функция $F_2(\cdot)$ задаётся в форме линейного желаемого дифференциального уравнения

$$y^{(n)} = F_2(\cdot) = -c_1 y - c_2 \dot{y} - \dots - c_n y^{(n-1)} + c_1 v; \quad (9)$$

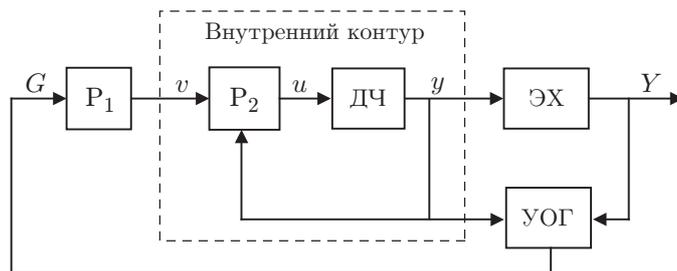


Рис. 1. Схема двухконтурной системы (УОГ — устройство оценки градиента)

v — управляющее воздействие для внешнего контура (выход регулятора P_1).

Описание внутреннего контура получается в результате подстановки (8) в (1):

$$y^{(n)} = \frac{f(\cdot)}{1 + b(\cdot)k} + \frac{b(\cdot)k}{1 + b(\cdot)k} F_2(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, v).$$

Соответствующий выбор коэффициента k обеспечивает в нём с требуемой точностью динамические свойства согласно уравнению (9), которое в дальнейшем можно рассматривать в качестве модели внутреннего контура [16, 18].

Следует заметить, что при формировании желаемого дифференциального уравнения (9) процессы в ДЧ для ряда объектов протекают существенно быстрее по сравнению с изменением во времени ЭХ. Это позволяет связать соотношением

$$t_1 \geq Dt_2 \quad (10)$$

длительности переходных процессов во внешнем и внутреннем контурах (t_1 и t_2 соответственно). Здесь D — степень разделения по темпам процессов в отдельных контурах (обычно достаточно обеспечить $D \approx 10$). Таким образом, согласно методу разделения движений [20] при расчёте внешнего контура динамику внутреннего (9) можно не учитывать, а рассматривать только его равновесный режим: $y = v$.

Во внешнем контуре для формирования движения к экстремуму используется интегральный регулятор P_1 вида

$$\dot{v} = -\alpha G, \quad (11)$$

где α выбирается из условия обеспечения требуемого времени выхода на экстремум t_1 . С учётом квадратичной аппроксимации ЭХ и точной оценки градиента (6) уравнение регулятора (11) принимает вид $\dot{v} = -2\alpha q(y - y_0)$. В этом случае динамические свойства замкнутого внешнего контура будут соответствовать модели

$$\dot{y} + 2\alpha qy = 2\alpha qy_0, \quad (12)$$

откуда в статике следует $y = y_0$; α вычисляется с учётом условия устойчивости системы (12) на основе требований к длительности процесса поиска экстремума.

Таким образом, искомое положение экстремума статической характеристики $Y(y)$ достигается автоматически, поскольку ему соответствует положение равновесия системы (12). Отметим также, что переходный процесс поиска экстремума соответствует линейному дифференциальному уравнению первого порядка (12) и не зависит от модели ДЧ, а также от влияния на неё неконтролируемых возмущений.

Системы с устройствами оценки производных. Ранее были рассмотрены свойства одноконтурных и двухконтурных экстремальных систем в предположении, что оценки градиента и производных выходной переменной ДЧ могут быть получены точно. При

практической реализации алгоритмов управления (3), (8) и (11) оценки этих производных можно получить с помощью дифференцирующего фильтра [14–16] с моделью вида

$$\mu_1^n y_1^{(n)} + d_n \mu_1^{n-1} y_1^{(n-1)} + \dots + d_1 \mu_1 \dot{y}_1 + y_1 = y \quad (13)$$

и устройства оценки частной производной [15, 16]

$$\begin{cases} \mu_2 \dot{Y}_1 = (Y - Y_1) |\dot{y}_1|, \\ G_1 = \mu_2^{-1} (Y - Y_1) \text{sign}(\dot{y}_1), \end{cases} \quad (14)$$

где μ_1 и μ_2 — малые параметры, отражающие скорость протекания процессов в соответствующих устройствах, причём $\mu_1 \ll \mu_2$; $y_1, \dots, y_1^{(n)}$ — оценки выходной переменной динамической части системы и её производных; Y_1 и \dot{Y}_1 — оценки функции качества и её полной производной соответственно; G_1 — оценка градиента.

С учётом (13) и (14) поведение одноконтурной системы экстремального регулирования (2)–(4) описывают уравнения

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, y) + b(t, y)k(-\gamma G_1 - \dot{y}_1), \\ \mu_1 \dot{y}_1 = y - y_1, \\ \mu_2 \dot{Y}_1 = (Y - Y_1) |\dot{y}_1|, \\ G_1 = \mu_2^{-1} (Y - Y) \text{sign}(\dot{y}_1). \end{cases} \quad (15)$$

Наличие в (15) двух малых параметров μ_1 и μ_2 позволяет применить метод разделения движений [20] и последовательно выделить три разнотемповых составляющих процесса [21]. Сверхбыстрые движения обусловлены параметром μ_1 и соответствуют модели

$$\begin{cases} y = \text{const}, \quad f = \text{const}, \quad b = \text{const}, \quad G_1 = \text{const}, \\ \mu \dot{z} = f + bk[-\gamma G_1 - z] - z, \end{cases} \quad (16)$$

где введена замена переменной $z = \mu_1^{-1}(y - y_1)$. Быстрая составляющая процесса возникает из-за наличия устройства оценки градиента, её описывают уравнения

$$\begin{cases} y = \text{const}, \quad f = \text{const}, \quad b = \text{const}, \\ \mu_2 \dot{G}_1 = (G - G_1) \left| \frac{f - bk\gamma G_1}{1 + bk} \right|, \end{cases} \quad (17)$$

а медленную составляющую движения определяет модель

$$\dot{y} = \frac{f(t, y) - b(t, y)k\gamma G}{1 + b(t, y)k}. \quad (18)$$

Поскольку сверхбыстрые (16) и быстрые (17) процессы отдельно асимптотически устойчивы, то поведение системы (15) определяет уравнение медленных процессов (18), которое соответствует системе с точным дифференцированием (5).

Аналогичные результаты получены и для двухконтурной системы экстремального регулирования [18, 19], в которой наблюдается дополнительный вид процессов — среднетемповые движения во внутреннем контуре управления, соответствующие предварительной стабилизации динамической части.

Таким образом, регуляторы с реальными дифференцирующими устройствами для двух типов рассмотренных систем также обеспечивают автоматическое движение к экстремуму с заданной динамикой. Отклонение этих процессов от идеальных может наблюдаться только на начальном участке, обусловленном быстрыми процессами.

Отличительные особенности различных типов систем. Поскольку ресурс управления объекта (1) ограничен, то для реализации регуляторов (3) и (8) необходимо убедиться в том, что численные значения u в любой момент времени не будут превышать значения u_m . Исследуем сначала управляющее воздействие в одноконтурной системе, подставляя в (3) вместо \dot{y} правую часть уравнения ДЧ (2):

$$u = k[F_1(G) - f(t, y) - b(t, y)u]. \quad (19)$$

После несложных преобразований получим

$$u = \frac{k}{1 + b(t, y)k} [F_1(G) - f(t, y)].$$

В асимптотике при $k \rightarrow \infty$ управление принимает вид

$$u = b^{-1}(t, y)[F_1(G) - f(t, y)]. \quad (20)$$

Выражение (20) позволяет определить максимальное значение управления u_{\max} в худшей ситуации, когда функции $f(t, y)$ и $b(t, y)$ достигают своих предельных значений. Если при этом выполняется условие

$$u_{\max} = \left| b_{\min}^{-1} \right| \left(|F_{1\max}| + |f_{\max}| \right) \leq u_m, \quad (21)$$

то в замкнутой системе можно обеспечить желаемые процессы (4) при произвольных изменениях параметров объекта и ограниченных внешних возмущениях.

Для двухконтурной системы целесообразно исследовать управление u , которое вырабатывает регулятор P_2 , сформированный на основе метода локализации. Прделав преобразования, аналогичные выражениям (19), (20), получим предельное управляющее воздействие во внутреннем контуре, которое будет иметь вид (21), где функцию $F_2(\cdot)$ определяет уравнение (9). Учтём то обстоятельство, что при предварительной стабилизации ДЧ необходимо искусственно ускорить процессы во внутреннем контуре согласно условию (10). Это означает, что $F_{2\max}$ будет существенно больше, чем $F_{1\max}$ для одноконтурных систем. Например, в случае ДЧ первого порядка (2) желаемая функция для одноконтурных систем имеет вид (7), а для двухконтурных описывается уравнением $F_2(y, v) = -c_1 y + c_1 v$. При этом их максимальные значения связаны соотношением $F_{2\max} \geq DF_{1\max}$. Отсюда следует, что для реализации регулятора в случае двухконтурного управления требуется больший ресурс объекта u_m , чем при проектировании одноконтурных систем экстремального регулирования, основанных на методе локализации. Данное обстоятельство отнесём к достоинствам одноконтурного управления.

Недостатком систем является то, что область применения одноконтурного управления ограничивается в основном нелинейными объектами с ДЧ первого порядка. В этом нетрудно убедиться, поскольку для общего вида объектов (1) желаемое уравнение (4), определяющее поведение системы, следует задавать в форме

$$y^{(n)} = -\gamma G = -2\gamma q(y - y_0). \quad (22)$$

Таким образом, система (22) при $n \geq 2$ будет находиться на границе устойчивости и её поведение зависеть от начальных состояний объекта и дифференцирующих устройств.

Таблица 1

Тип системы	Желаемое уравнение	Вид регулятора	
		P ₁	P ₂
Одноконтурная	$\dot{y} = F_1(G) = -\gamma G$	$u = k[F_1(G) - \dot{y}]$	—
Двухконтурная	$\dot{y} = F_2(y, v) = -c_1 y + c_1 v$	$\dot{v} = -\alpha G$	$u = k[F_2(y, v) - \dot{y}]$

Для одноконтурной системы рекомендуется задавать согласованные с объектом начальные состояния дифференцирующего фильтра и устройства оценки частной производной, т. е. обеспечивать условия $y(0) = \hat{y}(0)$ и $Y(0) = \dot{Y}(0)$.

Особенностью двухконтурных систем с предварительной стабилизацией динамической части является то, что их поведение независимо от порядка ДЧ определяет линейное уравнение первого порядка (12). Все внешние неконтролируемые возмущения локализованы в быстром внутреннем контуре управления, где их влияние подавляется с помощью регулятора P₂. В нём также отрабатываются рассогласованные начальные значения объекта и дифференцирующего фильтра, которые в этом случае не влияют на характер движения к экстремуму в отличие от одноконтурных систем.

Пример. Проиллюстрируем свойства рассмотренных типов систем поиска экстремума для модельного объекта вида

$$\begin{cases} \dot{y} = -y + a\ell^{-\beta/y} + u + M(t), \\ Y = Y_0 + q[y - y_0]^2, \end{cases}$$

где $a = 10$; $\beta = 5$; $M(t) = M_m(t - t_0)$; $M_m = -9$; $t_0 = 4$ с; $q = -0,5$. Достижение точки максимума $\{y_0 = -2$; $Y_0 = 2\}$ функции $Y(y)$ должно осуществляться за время $t_n \leq 2$ с из начального состояния $y(0) = 3$, $\dot{y}(0) = 0$.

Для удобства сравнения в табл. 1 представлен вид регуляторов в зависимости от типа экстремальной системы.

В целях получения оценок производных для одноконтурных и двухконтурных систем используем одинаковые по структуре дифференцирующий фильтр первого порядка и устройство оценки частной производной с параметрами μ_1 и μ_2 . При организации двухконтурного управления длительность процессов во внутреннем контуре t_k должна удовлетворять условию (10) и быть меньше длительности процесса оценки градиента. Численные значения параметров регуляторов двух типов систем сведены в табл. 2.

Процесс движения к экстремуму в одноконтурной и двухконтурной системах, а также изменение выходной переменной ДЧ иллюстрирует рис. 2. Видно, что для двухконтурной системы он имеет две фазы: первая соответствует быстрым процессам во внутреннем контуре управления, вторая — движению к экстремуму.

Изменение градиента в различных системах при поиске экстремума приведено на рис. 3.

Управляющее воздействие u , сформированное на основе метода локализации, представлено на рис. 4. Поскольку в двухконтурной системе это управление является сверх-

Таблица 2

Тип системы	Параметры					
	γ	c_1	k	α	μ_1	μ_2
Одноконтурная	0,5	—	20	—	0,02	0,2
Двухконтурная	—	50	20	0,5	0,002	0,2

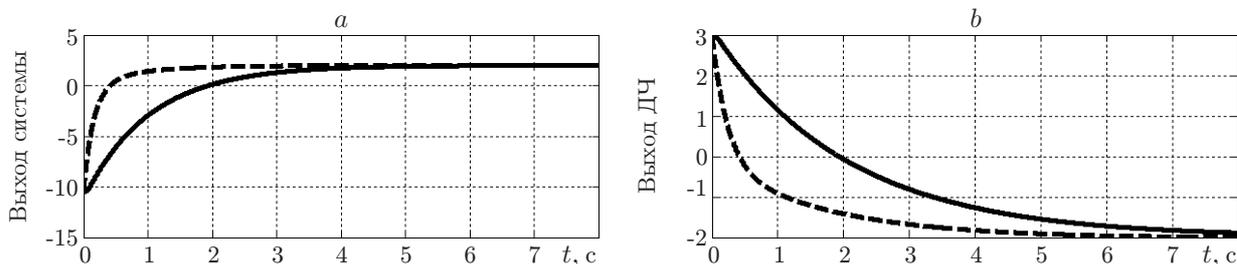


Рис. 2. Переходные процессы в системах: a — выходные переменные систем, b — выходы ДЧ (сплошные кривые — одноконтурная система, штриховые — двухконтурная система)

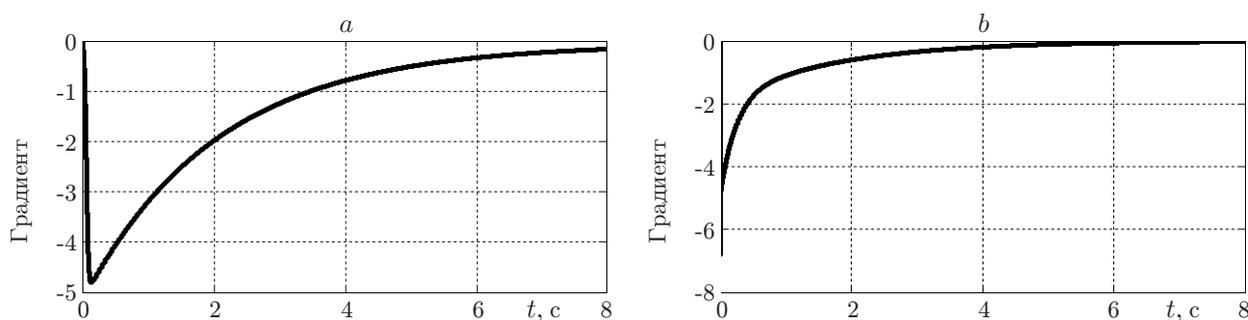


Рис. 3. Процесс изменения градиента: a — одноконтурная система, b — двухконтурная система

быстрой переменной, то для него показан только начальный участок процесса. Видно, что в системах двух типов в начальный момент времени наблюдается «бросок» по управлению, причём при двухконтурном управлении он на два порядка больше, чем при одноконтурном.

Процессы на выходе одноконтурной и двухконтурной систем при наличии ступенчатого возмущающего воздействия $M_m(t-t_0)$ иллюстрирует рис. 5. Видно, что в обоих случаях регуляторы обрабатывают возмущение, которое не влияет на процесс поиска экстремума (см. рис. 2).

Рис. 6 показывает, что при наличии возмущения управление в различных системах изменяется скачкообразно в момент действия $M_m(t-t_0)$ и подавляет его влияние.

Аналогичным образом в системах парируется влияние изменения параметров объекта (a и β), которое обрабатывается в быстрых и сверхбыстрых движениях. При этом процессы на выходе системы остаются неизменными, соответствуют рис. 2 и заданным требованиям к поиску экстремума.

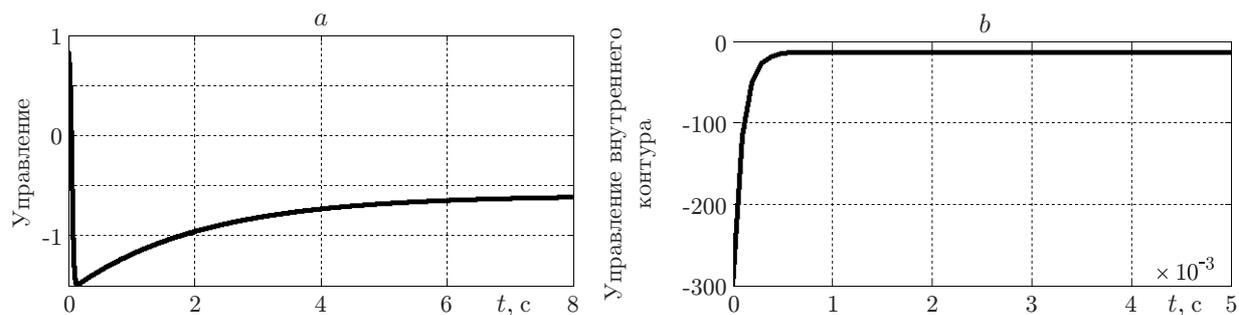


Рис. 4. Изменение управляющего воздействия $u(t)$: a — одноконтурная система, b — начальный участок двухконтурной системы

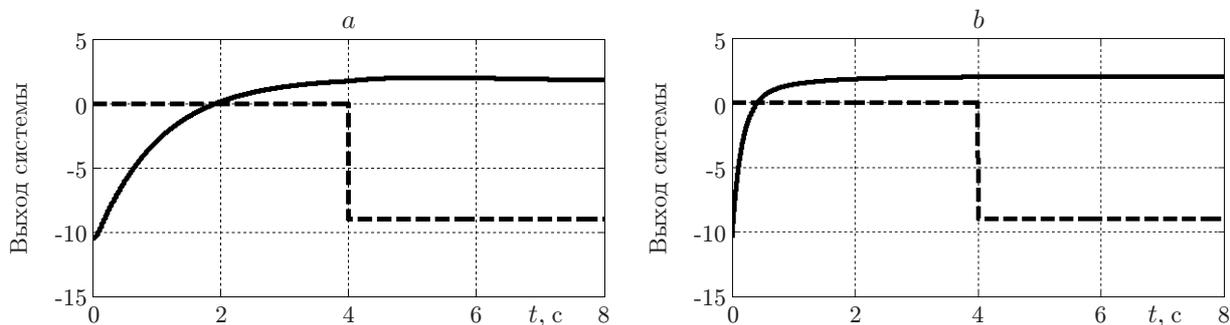


Рис. 5. Обработка возмущающего воздействия: *a* — одноконтурная система, *b* — двухконтурная система (сплошные кривые — выход Y , штриховые — возмущение)

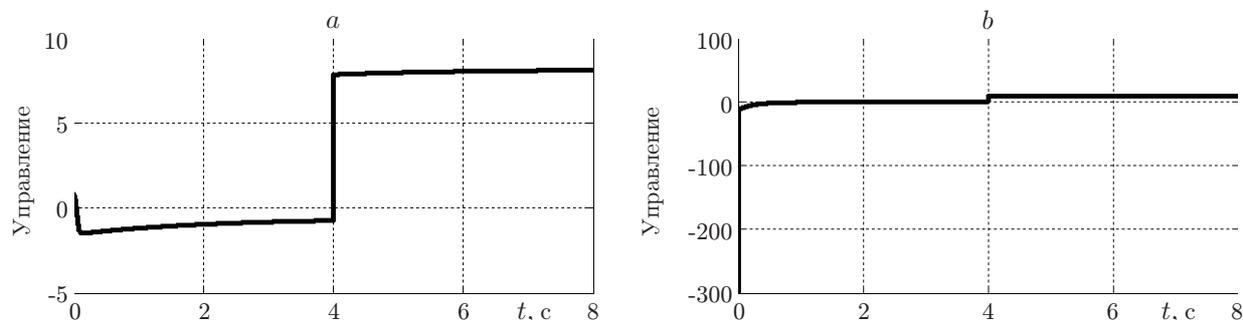


Рис. 6. Влияние возмущающего воздействия на управление: *a* — одноконтурная система, *b* — двухконтурная система

Заключение. В данной работе рассмотрены два варианта синтеза автоматических систем поиска экстремума на основе метода локализации, каждый из которых имеет свою возможную область применения. Одноконтурные системы просты в реализации и не требуют большого ресурса управления. Однако они имеют малый запас устойчивости, поэтому их целесообразно создавать для объектов первого порядка.

Двухконтурные системы с предварительной стабилизацией динамической части могут применяться для объектов произвольного порядка. Они обеспечивают парирование возмущений и наилучшее качество поиска экстремума, но требуют большего ресурса управления и «быстрых» дифференцирующих устройств.

Представленные рекомендации могут быть использованы при проектировании автоматических систем экстремального регулирования для сложных технологических процессов или технических устройств со статической функцией качества. При этом выбор способа управления должен соответствовать конкретной технической ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leblanc M.** Sur l'électrification des chemins de fer au moyen de courants alternatifs de fréquence élevée // Rev. gen. de l'Electricité. 1922. **12**, N 8. P. 275–277.
2. **Моросанов И. С.** Метод экстремального управления // АиТ. 1957. № 18. С. 1077–1092.
3. **Казакевич В. В.** Системы экстремального регулирования и некоторые способы улучшения их качества и устойчивости // Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машгиз, 1958. С. 66–96.
4. **Островский Ю. И.** Экстремальное регулирование // АиТ. 1957. № 18. С. 900–907.

5. **Jacobs O. L. R., Langdon S. M.** An optimal extremal control system // *Automatica*. 1970. N 6. P. 297–301.
6. **Sternby J.** Extremum control system: An area for adaptive control? San Francisco, USA, 1980 (Prepr. /Joint Amer. Contr. Conf.; WA2-A).
7. **Tunay I.** Antiskid control for aircraft via extremum-seeking // *Proc. of the American Control Conf. Arlington, USA, 2001. Vol. 2. P. 665–670.*
8. **Галкин Л. М., Карманов В. И., Стрюков С. М.** Автоматическая оптимизация рабочего режима термоэмиссионных преобразователей по давлению паров цезия // *АиТ*. 1984. № 11. С. 151–158.
9. **Schneider G., Ariyur K. B., Krstic M.** Tuning of a combustion controller by extremum seeking: a simulation study // *Proc. of the 39th IEEE Conf. Decision and Control. Sydney, Australia, 2000. P. 5219–5223.*
10. **Wang H.-H., Yeung S., Krstic M.** Experimental application of extremum seeking on an axial-flow compressor // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2000. **8**, N 2. P. 300–309.
11. **Krstic M., Wang H.-H.** Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // *Automatica*. 2000. **36**, N 4. P. 595–601.
12. **Krstic M.** Performance improvement and limitations in extremum seeking control // *System and Control Lett.* 2000. **39**, N 5. P. 313–326.
13. **Ariyur K. B., Krstic M.** *Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control.* New-Jersey: Wiley Interscience Publ., 2003. 236 p.
14. **Востриков А. С.** Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: НГТУ, 2007. 252 с.
15. **Востриков А. С., Французова Г. А.** Теория автоматического регулирования. М.: Высш. шк., 2006. 365 с.
16. **Французова Г. А.** Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 5. С. 7–11.
17. **Востриков А. С.** Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы // *Автометрия*. 2010. **46**, № 2. С. 3–19.
18. **Frantsuzova G. A.** Design of two-loops extremum seeking system by means of localization method // *Proc. of the IASTED Intern. Conf. "Automation, Control and Information Technology (ACIT-2005)". Anaheim — Calgary — Zurich: ACTA Press, 2005. P. 415–419.*
19. **Французова Г. А.** Двухконтурные системы экстремального регулирования с предварительной стабилизацией динамической части // *Автометрия*. 2006. **42**, № 2. С. 29–37.
20. **Герашенко Е. И., Герашенко С. М.** Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. М.: Наука, 1975. 296 с.
21. **Французова Г. А.** Условия разделимости движений для автоматических систем поиска экстремума с вектором скорости в управлении // *Науч. вестн. НГТУ*. 2003. № 1(14). С. 3–16.

Поступила в редакцию 4 мая 2012 г.