Уфа : УГАТУ, 2007 Вестник УГАТУ • Управление, ВТ и И Т. 9, № 2 (20). С. 76–81

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.51

А. Г. ЛЮТОВ

СИНТЕЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ МЕХАТРОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Предложен подход к оптимизации систем управления сложными мехатронными объектами, позволяющий упростить процедуру синтеза оптимальных управлений в реальном времени и одновременно улучшить качество функционирования систем управления мехатронными объектами в условиях неопределенности. Эффективность подхода обусловлена сокращением вычислительных затрат в процессе синтеза оптимальных управлений и автоматизацией процедуры выбора весовых коэффициентов минимизируемого функционала путем их адаптивной настройки в процессе функционирования системы. *Сложный мехатронный объект; неопределенность; оптимальное управление; синтез адаптивной системы; весовые коэффициенты функционала; адаптивная настройка*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее существенных проблем при построении систем управления сложными мехатронными объектами (МО) является неопределенность характеристик объекта управления и внешних воздействий. Примером подобных объектов являются многочисленные технологические процессы и аппараты, различного рода робототехнические системы, электромеханические устройства. Так, применительно к процессам механообработки в машиностроительной отрасли, неполнота априорной и текущей информации об объекте управления обуславливается такими факторами, как изменение режимов работы оборудования, нестабильность характеристик материалов заготовок и режущего инструмента, нестабильность характеристик и износ оборудования, износ режущего инструмента и т. д. [1]. Действие вышеперечисленных факторов приводит к неконтролируемым изменениям температурной и силовой нагрузки на мехатронную систему и обуславливает необходимость существенного снижения интенсивности рабочих режимов современного механообрабатывающего оборудования, что недопустимо при его высокой стоимости. Существующие методы построения систем управления процессами механообработки не позволяют добиться требуемого качества и надежности их работы или решают это лишь частично.

ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ

При управлении динамическими объектами наилучшего результата, как известно, позволяют достичь методы оптимального управления. Традиционный подход при этом сводится к синтезу оптимальных алгоритмов (законов) управления на стадии проектирования системы. Однако при функционировании управляемого объекта в условиях неопределенности его характеристик и свойств внешней среды необходим синтез оптимальных управлений в реальном времени в процессе функционирования системы, т. е. по сути ее адаптивной оптимизации. Очевидно, что возможность практической реализации подобных алгоритмов предполагает достаточную формализуемость и вычислительную простоту процедур синтеза оптимальных управлений. Применение традиционных подходов (например, на основе классических квадратичных функционалов) для синтеза оптимальных управлений в реальном масштабе времени является весьма затруднительным, что во многом обусловлено отсутствием прямой связи параметров синтезируемой системы с варьируемыми весовыми коэффициентами минимизируемого функционала [2, 3].

Процедура синтеза адаптивной системы обычно разбивается на два этапа [4]: синтез основного контура и синтез контура адаптации. Если для решения задач второго этапа синтеза адаптивной системы существует достаточно большое количество методов, то вопросы выбора настраиваемых параметров основного контура, т. е. одна из задач первого этапа, недостаточно формализованы и зависят в основном от знаний и опыта проектировщика. Кроме того, использование традиционных процедур синтеза оптимальных управлений при построении адаптивной системы возможно лишь на основе идентификационного подхода для определения структуры и параметров основного контура, поскольку для синтеза необходима в качестве исходной информация о структуре и параметрах объекта. Однако применение идентификационного подхода к адаптивному управлению значительно увеличивает вычислительные затраты на реализацию процедур совмещенного синтеза и существенно снижает быстродействие контура адаптации.

В связи с этим актуальной является разработка новых подходов, позволяющих значительно упростить процедуру синтеза оптимальных управлений в реальном времени и одновременно повысить качество функционирования систем управления МО в условиях неопределенности.

В [4, 5] предложен подход к решению задачи оптимизации, который может служить основой для построения систем управления МО с использованием беспоисковых методов адаптации.

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Наиболее важной частью решаемой задачи оптимизации при синтезе систем управления является выбор критерия оптимизации, так или иначе отражающего цель и условия управления. Критерии оптимизации задаются обычно в виде некоторых функционалов или целевых функций, подлежащих минимизации. Предварительное назначение функционала, т. е. задание его структуры и ориентировочных значений параметров (весовых коэффициентов), производится обычно на стадии проектирования системы. В том случае, если результаты моделирования синтезированной системы оказываются неудовлетворительными (что, как правило, имеет место), производится итерационная коррекция структуры или параметров минимизируемого функционала до получения приемлемых во всех отношениях результатов. Существующие подходы к процедуре итерационной коррекции минимизируемого функционала в общем случае являются сложными и трудно формализуемыми [2, 3], что существенно ограничивает возможности их применения при синтезе оптимальных управлений в реальном времени.

В рамках упомянутого выше подхода предлагается формирование критериев оптимизации осуществлять на основе функционалов с мультипликативной функцией затрат на управление [4]

$$I = V[x(t_2)] + \int\limits_{t_1}^{t_2} Q[x(t), t]U[u(t), t]\, dt. \qquad (1)$$

Здесь V — функция конечного состояния управляемого процесса $x(t_2)$; Q и U — скалярные функции вектора состояния $x(t)$ и вектора управления $u(t)$ соответственно, а также времени t.

Применение данных функционалов дает возможность получения аналитических выражений, напрямую связывающих весовые коэффициенты данного класса функционалов с коэффициентами эквивалентных уравнений синтезируемой системы. При этом сложная традиционная процедура оптимального синтеза производится только один раз на стадии проектирования системы с целью определения структуры и начальных параметров регулятора. В дальнейшем осуществляется лишь простая процедура целенаправленного формирования оптимальных показателей качества управления в системе путем коррекции коэффициентов ее регулятора через полученные заранее уравнения связи этих коэффициентов с весовыми коэффициентами минимизируемого функционала.

Функционал (1) может быть определен методом подстановки:

$$I = V[\tilde{x}(\theta_2)] + \int\limits_{\theta_1}^{\theta_2} Q[\tilde{x}(\theta), \theta]\, d\theta, \qquad (2)$$

путем замены в нем независимой переменной t на новую переменную θ, связанную с t дифференциальным соотношением

$$d\theta = U[u(t), t]\, dt, \qquad (3)$$

где $\tilde{x}(\theta)$ — вектор состояния управляемого процесса, соответствующий новым уравнениям состояния для θ, полученным из исходных в соответствии с правилами замены переменных в дифференциальных выражениях.

Полученное таким образом выражение функционала (2) является эквивалентным исходному выражению (1) с точки зрения решаемой задачи оптимизации, но в отличие от (1) не содержит $U[u(t),t]$ в явном виде. Это важное обстоятельство позволило для некоторых классов динамических систем получить аналитические выражения, связывающие весовые коэффициенты минимизируемого функционала с коэффициентами уравнений оптимизируемой системы, что существенно упрощает решение задачи совмещенного синтеза.

В частности, классический функционал с аддитивной функцией затрат на управление может быть приведен к форме функционала с мультипликативной функцией затрат

$$I = V[x(t_2)] + \int_{t_1}^{t_2} Q[x(t),t]\,dt + \int_{t_1}^{t_2} U[u(t),t]\,dt =$$

$$= V[\tilde{x}(\theta_2)] + \int_{\theta_1}^{\theta_2} Q[\tilde{x}(\theta),\theta]\,d\theta, \quad (4)$$

где $d\theta = \{1 + U[u(t),t]/Q[x(t),t]\}\ dt.$ (5)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения задачи оптимизации с применением предложенных функционалов разработан метод линеаризованной подстановки [7], который для функционала с мультипликативной функцией затрат на управление позволяет путем перехода в них к новой независимой переменной получить из исходных дифференциальных уравнений замкнутой системы эквивалентные (в общем случае нелинейные) дифференциальные уравнения. После линеаризации этих уравнений коэффициенты полиномов соответствующих эквивалентных передаточных функций замкнутой системы становятся функциями от весовых коэффициентов функционала, что позволяет избежать традиционной процедуры численной параметрической оптимизации и рассматривать данные весовые коэффициенты как настраиваемые параметры оптимального регулятора.

Предложенный приближенный метод позволяет значительно сократить вычислительные затраты в процессе синтеза оптимальных управлений и автоматизировать процедуру выбора весовых коэффициентов минимизируемого функционала путем их адаптивной настройки в процессе функционирования системы. Разработана методика оптимизации систем управления МО с использованием функционалов с мультипликативной функцией затрат.

Процедура оптимизации в общем случае состоит из следующих этапов:

1. Производится выбор минимизируемого функционала, так или иначе отражающего качество процессов управления в системе и накладываемые на них ограничения в классе традиционных функционалов с аддитивной функцией затрат на управление.

2. Для выбранного функционала с весовыми коэффициентами, значения которых соответствуют малой степени учета затрат на управление, и заданного дифференциального уравнения объекта управления производится определение структуры и начальных параметров замкнутой системы и регулятора с помощью подходящего метода оптимизации.

3. Функционал с аддитивной функцией затрат на управление приводится к форме функционала с мультипликативной функцией затрат согласно выражению (4).

4. Осуществляется замена независимой переменной согласно соотношению (5) в полученных дифференциальных уравнениях оптимальной замкнутой системы в соответствии с правилами замены переменных в дифференциальных выражениях.

5. Производится линеаризация полученного эквивалентного нелинейного дифференциального уравнения замкнутой системы. При этом коэффициенты линеаризованного дифференциального уравнения оптимальной замкнутой системы становятся прямыми аналитическими функциями весовых коэффициентов минимизируемого функционала, которые и выступают в качестве настраиваемых параметров основного контура системы.

6. Осуществляется коррекция определенных в пункте 2 методики начальных параметров оптимального регулятора путем целенаправленного изменения настраиваемых параметров в эквивалентном линеаризованном дифференциальном уравнении системы до удовлетворения требований к качеству управления.

Этапы с 1 по 5 реализуются однократно на стадии проектирования системы. Этап 6 может быть формализован, автоматизирован и может выполняться в реальном времени в процессе функционирования системы, в том числе и на основе тех или иных методов адаптации.

В качестве примера рассмотрим практическое применение данной методики для решения задачи оптимизации с использованием квадратичного функционала качества с одним весовым коэффициентом α ($\alpha > 0$)

$$J = \int_0^\infty \varepsilon^2(t)\, dt + \alpha \int_0^\infty u^{\circ 2}(t)\, dt, \qquad (6)$$

где $\varepsilon(t)$, $u(t)$ — значения ошибки управления и управляющего воздействия в замкнутой системе соответственно. Первое слагаемое в (6) представляет собой квадратичную оценку качества управления, второе слагаемое характеризует энергетические затраты исполнительных механизмов регулятора и выступает ограничивающим фактором при оптимизации.

Первоочередной задачей синтеза при этом является определение оптимальной передаточной функции замкнутой системы $\Phi^*(s) = H(s)R^*(s)\left[1 + H(s)R^*(s)\right]^{-1}$, где $R^*(s)$ и $H(s)$ — передаточные функции оптимального регулятора и объекта управления соответственно, из условия минимума функционала (6), в которые весовой коэффициент α (или некоторая функция этого коэффициента $\beta = \beta(\alpha)$) входил бы в качестве прямого параметра.

В соответствии с предложенным выше подходом эквивалентное дифференциальное уравнение подсистемы, записанное для ошибки управления ε и полученное из исходного дифференциального уравнения замкнутой подсистемы путем замены независимой переменной, будет иметь в общем случае вид:

$$\begin{gathered} b_n \frac{1}{[\varphi'(\theta)]^n} \frac{d^n \varepsilon}{d\theta^n} + \left\{ b_{n-1} \frac{1}{[\varphi'(\theta)]^{n-1}} - \right. \\ \left. - P_{n-1}\left[\varphi'(\theta), \varphi''(\theta)\right] \right\} \times \frac{d^{n-1}\varepsilon}{d\theta^{n-1}} + \ldots + \\ + \left\{ b_1 \frac{1}{\varphi'(\theta)} - P_1\left[\varphi'(\theta), \varphi''(\theta), \varphi'''(\theta), \ldots\right] \right\} \times \\ \times \frac{d\varepsilon}{d\theta} + b_0 \varepsilon = a_m \frac{d^m g}{d\theta^m} + a_{m-1} \frac{d^{m-1} g}{d\theta^{m-1}} + \\ + \ldots + a_1 \frac{dg}{d\theta} + a_0 g. \qquad (7) \end{gathered}$$

Здесь

$$\varphi'\theta = \frac{dt}{d\theta} = \frac{1}{1 + \alpha\left[u^\circ(\theta)/\varepsilon(\theta)\right]^2};$$

$P_i[\varphi', \varphi'', \ldots]$, $i = 1, \ldots, n-1$ — функции перекрестных произведений производных φ', φ'', ... , взятых по θ. При этом предполагается, что на вход подсистемы подается одно из типовых задающих воздействий. После линеаризации уравнения (7) в окрестностях установившегося состояния $\varepsilon(\infty) = \dot{\varepsilon}(\infty) = \ddot{\varepsilon}(\infty) = \ldots = 0$ и возврату к реальному времени соответствующая оптимальная эквивалентная передаточная функция подсистемы (при нулевых начальных условиях) в общем случае будет иметь вид

$$\begin{gathered} \Phi^*_{\text{экв}}(s, \beta) = \left(a_m s^m + \ldots + a_1^s + a_0\right) \times \\ \times \Big(b_n^\circ (1+\beta)^{n-1} \big(1 + (2n+1)\beta\big) s^n + \\ + \ldots + b_3^\circ (1+\beta)^2 (1 + 7\beta) s^3 + \\ + b_2^\circ (1+\beta)(1+5\beta) s^2 + \\ + b_1^\circ (1+3\beta) s + b_0^\circ \Big)^{-1}, \qquad (8) \end{gathered}$$

где $\beta = \alpha k^2$, $k = \text{const}$; $b_0^\circ, b_1^\circ, \ldots, b_n^\circ$ — начальные значения параметров знаменателя передаточной функции, определяемые при малых значениях весового коэффициента α.

Таким образом, эквивалентная передаточная функция (8) замкнутой системы является приближенным оптимальным решением задачи минимизации функционала (6) и определяет однопараметрическое множество $\left\{\Phi^*(s, \beta)\right\}$ устойчивых (при $0 < \beta < \infty$) передаточных функций систем, обеспечивающих физическую реализуемость передаточных функций $R^*(s, \beta)$ регуляторов. При этом динамические свойства $\Phi^*(s, \beta)$ полностью определяются при известной передаточной функции $H(s)$ объекта заданием одного весового коэффициента β.

Полученное выражение (8) для эквивалентной передаточной функции замкнутой системы позволяет отказаться от процедуры факторизации дробно-рациональных выражений (связанной с численным решением системы нелинейных уравнений) и осуществлять параметрическую оптимизацию путем варьирования коэффициента β, входящего в качестве параметра в (8). Это не только значительно повышает эффективность параметрической оптимизации, но и дает возможность реализовать процедуру адаптивной оптимизации системы с использованием беспоисковых методов.

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для построения контуров самонастройки применительно к линеаризованным непрерывным обьектам управления широкое распространение получили в основном такие методы, как метод функций Ляпунова и градиентный метод с использованием функций чувствительности [4]. Применение прямого метода Ляпунова позволяет определить структуру самонастраивающейся системы (СНС) с эталонной моделью, заведомо удовлетворяющей условию устойчивости [8]. Однако практическое использование данного метода достаточно затруднительно, в первую очередь, из-за сложности выбора подходящей функции Ляпунова. Градиентные методы синтеза позволяют получить структуру СНС, но решение задачи обеспечения устойчивости и требуемых динамических характеристик системы представляет довольно сложную проблему. Кроме этого имеются трудности при определении функций чувствительности выходной координаты системы по каждому из настраиваемых коэффициентов. Самостоятельной проблемой при использовании каждого из методов является выбор настраиваемых параметров основного контура системы.

Предложенный выше подход к процедуре оптимизации позволяет устранить указанные трудности при применении градиентных методов и обусловливает возможность их использования для построения контуров самонастройки и осуществления адаптивной оптимизации систем управления МО. Это можно обосновать следующим.

Во-первых, настройка системы осуществляется на одно- $\{\Phi^*(s,\beta)\}$ или многопараметрическом $\{\Phi^*(\mathrm{s},\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)\}$ множестве устойчивых передаточных функций системы, что позволяет в данном случае снять ограничение на применимость градиентных методов, обусловленное необходимостью обеспечения устойчивости системы. Во-вторых, параметры $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_\mu$ выступают в качестве настраиваемых параметров основного контура и полностью определяют динамические свойства передаточной функции $\Phi^*(\mathrm{s},\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)$. В-третьих, снимаются трудности при определении функций чувствительности выходной координаты системы, так как известна зависимость коэффициентов передаточной функции $\Phi^*(\mathrm{s},\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)$ от каждого из настраиваемых параметров $\beta_1,\beta_2,\ldots,\beta_\mu$, что позволяет определить соответствующие модели чувствительности

$$W^i_{\text{мч}}(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu) = \frac{\partial\Phi^*(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)}{\partial\beta_i}. \quad (9)$$

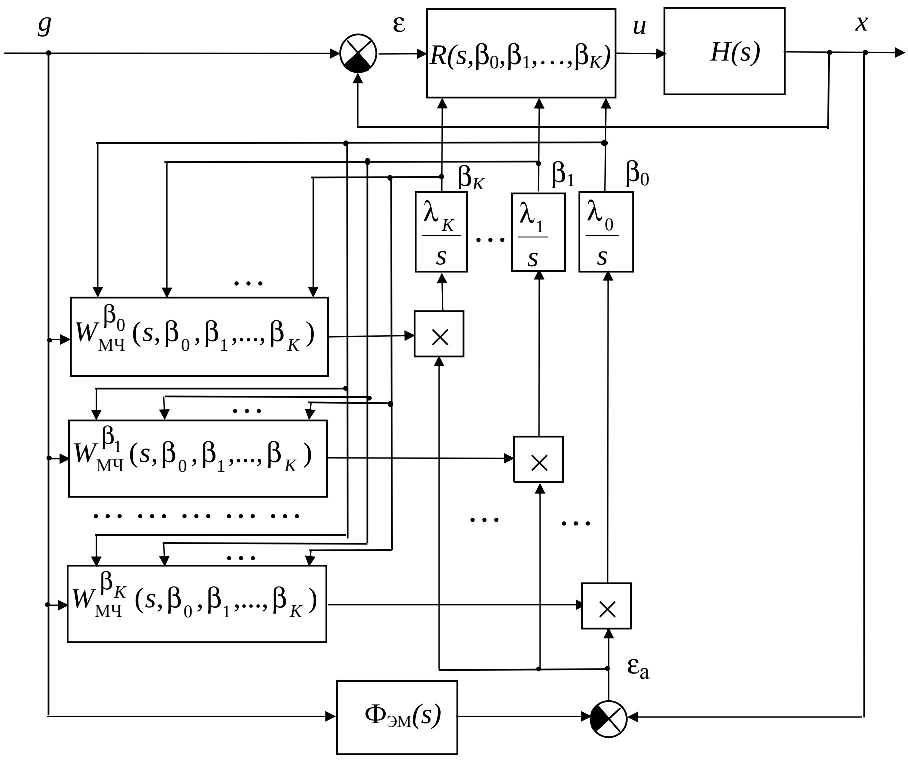

Рис. Структурная схема СНС

Например, для однопараметрического множества передаточных функций $\{\Phi^*(s,\beta)\}$ модель чувствительности в общем случае имеет вид

$$W_{\text{мч}}(s,\beta) = \frac{-(a_m s^m + \ldots + a_1^s + a_0)}{\Big[b_n^\circ (1+\beta)^{n-1} (1+(2n+1)\beta) s^n +}\ldots$$

$$\ldots\frac{\partial \Big[b_n^\circ (1+\beta)^{n-1} (1+(2n+1)\beta) s^n + \ldots + b_3^\circ \times}{+ \ldots + b_3^\circ (1+\beta)^2 (1+7\beta) s^3 +}\ldots$$

$$\ldots\frac{(1+\beta)^2 (1+7\beta) s^3 + +b_2^\circ (1+\beta)(1+5\beta) s^2 +}{+b_2^\circ (1+\beta)(1+5\beta) s^2 +}\ldots$$

$$\ldots\frac{+b_1^\circ (1+3\beta) s + b_0^\circ \Big] \Big/ \partial\beta}{+b_1^\circ (1+3\beta) s + b_0^\circ \Big]^2}. \qquad (10)$$

Определение оптимальной передаточной функции регулятора $R^*(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)$ по полученной эквивалентной передаточной функции $\Phi^*_{\text{экв}}(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)$ производится в соответствии с методом обратных операторов из формулы

$$R*(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu) = \\ = \frac{1}{H(s)} \cdot \frac{\Phi^*_{\text{экв}}(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)}{[1-\Phi^*_{\text{экв}}(s,\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu)]}. \qquad (11)$$

Таким образом, параметры $\beta_1,\beta_2,...,\beta_\mu$ являются настраиваемыми пара-метрами регулятора основного контура.

Если мерой рассогласования движений системы и модели выбрана квадратичная функция от ошибки рассогласования $\varepsilon^2(t) = [x(t) - x_{\text{м}}(t)]^2$, то структурная схема СНС с эталонной моделью, синтезированная по методу градиента [9], показана на рис. Здесь λ, λ_1, λ_2, ... , λ_K — коэффициенты, определяющие скорость процесса самонастройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к оптимизации систем управления позволяет упростить процедуру синтеза оптимальных управлений в реальном времени и одновременно улучшить качество функционирования систем управления сложными МО в условиях неопределенности.

Эффективность данного подхода достигается за счет сокращения вычислительных затрат в процессе синтеза оптимальных управлений и автоматизации процедуры выбора весовых коэффициентов минимизируемого функционала путем их адаптивной настройки в процессе функционирования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зориктуев, В. Ц.** Управление процессами механообработки деталей авиационных двигателей в условиях неопределенности / В. Ц. Зориктуев, А. Г. Лютов. М. : Изд-во МАИ, 2003. 120 с.
2. **Справочник по теории автоматического регулирования** / под. ред. А. А. Красовского. М. : Наука, 1987. 712 с.
3. **Крутько, П. Д.** Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / П. Д. Крутько, А. И. Максимов, Л. М. Скворцов. М. : Радио и связь, 1988.
4. **Фрадков, А. Л.** Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы / А. Л. Фрадков. М. : Наука, 1990. 296 с.
5. **Лютов, А. Г.** Критерий оптимизации динамических процессов с мультипликативной функцией затрат на управление / А. Г. Лютов // Оптимальное управление мехатронными станочными системами : сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 1999. С. 159–162.
6. **Лютов, А. Г.** Оптимизация систем управления с использованием функционалов с мультипликативной функцией затрат / А. Г. Лютов // Оптимальное управление мехатронными станочными системами : сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 1999. С. 163–165.
7. **Лютов, А. Г.** Оптимизация систем управления на основе метода линеаризованной функциональной подстановки / А. Г. Лютов // Оптимизация и управление процессом резания, мехатронные станочные системы : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Уфа : БашГУ, 2004. С. 148–154.
8. **Петров, Б. Н.** Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами / Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков. М. : Наука, 1980. 244 с.
9. **Лютов, А. Г.** Алгоритмы самонастройки оптимальной системы управления мехатронными объектами / А. Г. Лютов // Мехатроника, автоматизация, управление : сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 2005. С. 149–154.

ОБ АВТОРЕ

Лютов Алексей Германович, проф. каф. автоматиз. технол. систем. Дипл. инж. электрон. техн. (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информ. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. управления сложн. техн. объектами.