УДК 62-506.12

© 2002 г. **Е.Л. Еремин,** д-р техн. наук,
**С.Г. Самохвалова,** канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

# ПРЯМОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С НАСТРОЙКОЙ КОМПЕНСАТОРОВ. I

Рассмотрены модели и беспоисковые алгоритмы систем прямого адаптивного управления с параметрической и сигнально-параметрической настройкой динамических компенсаторов.

## Введение

Развитие теории автоматического управления на современном этапе характеризуется постановкой и решением задач, учитывающих неточность наших знаний об объектах управления и действующих на них возмущениях. Это фактически означает, что управление технологическим процессом или объектом с использованием классических управляющих устройств в виде типовых регуляторов с фиксированными настройками не позволяет гарантированно обеспечить требуемое качество функционирования [1].

В такой ситуации при решении задач управления требуется разрабатывать системы, обладающие способностью приспосабливаться как к изменяющимся условиям работы объекта управления, так и к наличию априорной неопределенности в его математическом описании.

В частности, на современном этапе развития объединенных электроэнергетических систем наблюдается повышенное внимание к проблемам управления устойчивостью их режимов. В связи с этим важную роль приобретают проблемы адаптации управления [2]. Например, в крупных энергосистемах возникает необходимость поддержания соответствия производства и потребления электроэнергии не только в энергосистеме в целом, но и в отдельных ее районах. Эта необходимость может быть связана с хозяйственной самостоятельностью частей энергосистемы или с недостаточной пропускной способностью линий электропередачи, ограничивающей обмен мощностью между ее частями. Поддержание соответствия между потреблением и производством внутри районов энергосистемы требует, вообще говоря, адаптивного регулирования перетоков мощности.

Для решения большинства задач теории автоматического управления, в том числе и адаптивного, необходимо построить модель объекта управления. Модель рассматривается как элемент целостной постановки задачи управления и все в большей степени становится информационно-технологическим инструментом ее решения. Действительно, современное математическое моделирование – это триада: *модель – алгоритм – программа*. При этом если под моделью понимается первый этап разработки – получение эквивалента объекта, отражающего в математической форме важнейшие его свойства, то выбор алгоритмов – это второй, а разработка программ – заключительный этап перевода модели и алгоритма на понятный компьютеру язык, завершающий процедуру создания рабочего инструмента исследователя [3].

Таким образом, для разработки высококачественной системы адаптивного управления необходимо использовать методы математического моделирования на этапе проектирования математического, алгоритмического и программного обеспечения систем автоматического управления, функционирующих в условиях априорной неопределенности.

В многочисленных тематических обзорах и литературных источниках по теории автоматического управления [1, 4 – 11], где рассматриваются объекты, функционирующие в условиях априорной неопределенности, имеются различные варианты классификации систем. А.А. Красовский [12] разделяет адаптивные системы на поисковые и беспоисковые. В теории адаптивного управления, как правило, всегда выделяется класс беспоисковых систем управления. Работа систем этого класса не связана с использованием каких-либо поисковых сигналов, а построение контура управления обычно основывается на процедурах аналитического синтеза.

Среди беспоисковых систем управления большое распространение получили системы с эталонными моделями, так как они приводят к легко реализуемым системам с высокой скоростью адаптации, которые можно использовать во многих случаях.

## Динамические компенсаторы и задачи критерия гиперустойчивости

Преодоление априорной неопределенности в системах прямого адаптивного управления может быть связано с аналитическим синтезом алгоритмов функционирования специального контура системы управления, так называемого блока адаптации. В этом блоке за счет обработки апостериорной (текущей) информации происходит настройка параметров управляющего устройства или регулятора основного контура системы в процессе нормального функционирования объекта управления [13].

Один из способов построения адаптивных систем связан с применением компенсаторов, параметры которых должны быть выбраны заданным образом. Часто этот выбор оказывается трудоемким, а иногда и неосуществимым, хотя решение этой же задачи может быть найдено, например, за счет настройки параметров адаптивного последовательного компенсатора (АПК). Наряду с АПК, в системах управления применяются и параллельные компенсаторы, которые при настройке называют адаптивными шунт-компенсаторами (АШК). Структурные модели предлагаемых систем адаптивного управления с АПК и АШК приведены на рис. 1 и 2.

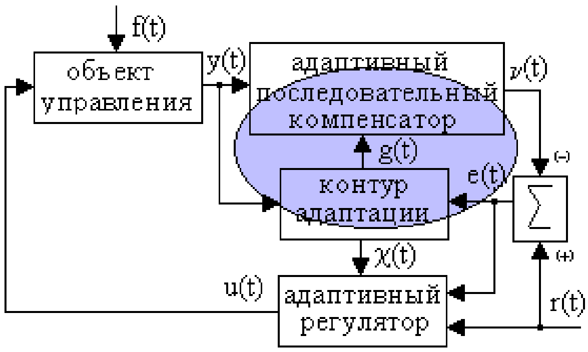


*Рис. 1.* Система с АПК.

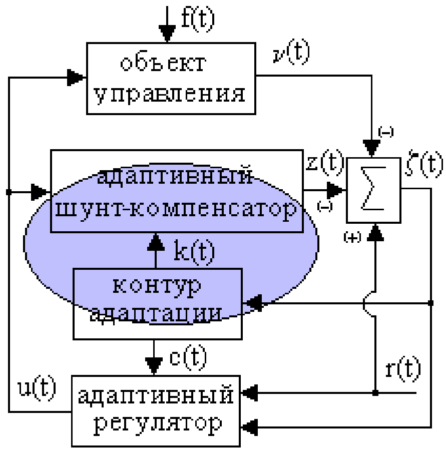


*Рис. 2.* Система с АШК.

Основными методами синтеза алгоритмов управления априорно неопределенными объектами являются:
второй метод Ляпунова;
метод скоростного градиента;
критерий гиперустойчивости и др.

Для решения задач управления динамическими объектами далее применяется критерий гиперустойчивости, поскольку он формулирует необходимые и достаточные условия устойчивости в целом динамических систем.

Концепция гиперустойчивости автоматических систем была введена в теорию управления В.М. Поповым [14]. Дальнейшее развитие теория гиперстойчивости получила при разработке систем адаптации с явной эталонной моделью для объектов без запаздывания [15].

В работе [13] критерий гиперустойчивости рассмотрен для систем с неявной эталонной моделью. Данный подход развивается и в настоящей работе для адаптивных систем управления с АПК и неявной эталонной моделью.

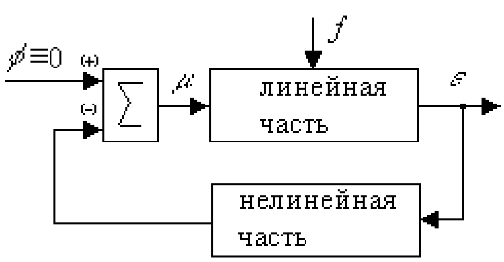


*Рис. 3.* Эквивалентная структура.

В рамках применения критерия гиперустойчивости все исследуемые системы управления преобразовывались к структуре, показанной на рис. 3, что позволило с единых позиций осуществлять синтез систем адаптации как с АПК, так и с АШК. Согласно критерию гиперустойчивости его центральными задачами являются: выполнение частотного условия относительно линейной части системы

$$\operatorname{Re} W(j\omega,\xi) > 0, \quad \forall\omega > 0, \quad \forall\xi \in \Xi \tag{1}$$

и интегрального неравенства Попова относительно нелинейной части системы

$$h(0,t) = -\int_0^t \mu^T(s)\varepsilon(s)ds \geq -\gamma_0^2 = const, \forall t \geq 0. \tag{2}$$

Следует отметить, при построении адаптивной системы управления с АПК, в силу нестационарности ее линейной части, проблема положительности линейной части системы не может быть решена стандартным способом [13], где для выполнения частотного условия (1) обычно используется явный вид передаточной функции. В такой ситуации возможен иной подход, заключающийся в замене частотных условий на интегральные неравенства во временной области следующего вида:

$$J(0,t) = \int_0^t \mu^T(s)\varepsilon(s)ds \geq -\theta_0^2 = const, \forall t \geq 0. \tag{3}$$

### Задача адаптивного управления с АПК

В общей постановке задачи адаптивного управления (в случае применения АПК) будем полагать, что объект описывается уравнением

$$\frac{dx(t)}{dt} = \Phi_1\left(\frac{dx(t-\rho)}{dt},\xi\right) + \Phi_2\big(x(t-\theta),u(t),\xi\big) + f_\xi(t), \tag{4}$$

с начальными функциями вида

$$x(\theta) = \varphi(\theta),\ \theta \in [-\tau_{\max},0],\ \frac{dx(\rho)}{d\rho} = \frac{d\phi(\rho)}{d\rho},\ \rho \in [-\tau_0,0], \tag{5}$$

где выход и обобщенный выход объекта, а также адаптивный регулятор определены уравнениями

$$y(t) = L^T(\xi)x(t),\ \ v(t) = G^T(t)y(t),\ u = u\big(\nu(t), r(t), \chi(t)\big), \tag{6}$$

с контуром адаптации

$$\frac{d\chi(t)}{dt} = F(\nu(t),\ r(t)),\ \frac{dg(t)}{dt} = V(y(t),\nu(t),r(t)), \tag{7}$$

в котором неявные функции $F(.)$ и $V(.)$ подлежат определению.

Иначе говоря, в условиях априорной неопределенности заданного класса $\xi \in \Xi$ для адаптивной системы (4) – (7) требуется определить явный вид алгоритмов самонастройки коэффициентов регулятора и компенсатора таким образом, чтобы при любых начальных условиях $x(0)$, $\chi_1(0)$, $\chi_2(0)$, $g(0)$ были бы решены следующие задачи:

*Задача 1* – при действии на объект управления затухающих возмущений вида

$$\int_0^{\infty} \|f(t)\|^2 dt < \infty \tag{8}$$

обеспечивалось достижение следующих целей управления и адаптации:

$$\lim_{t\to\infty}(x_*(t) - x(t)) = 0, \lim_{t\to\infty} \chi(t) = \chi_0, \lim_{t\to\infty} g(t) = g_0. \tag{9}$$

*Задача 2* – при действии на объект управления ограниченных по норме возмущений

$$\left\| f_\xi(t) \right\| \le f_0 = const, \quad \xi \in \Xi \tag{10}$$

обеспечивалось выполнение целевых условий

$$\lim_{t\to\infty} \|e(t)\| \le \sigma, \lim_{t\to\infty} \chi(t) \le \chi_0, \lim_{t\to\infty} g(t) \le g_0. \tag{11}$$

Кроме того (*второй вариант задачи 2*), при введении в закон управления сигнальной составляющей $u_{sign}(t)\neq 0$ исследовались вопросы достижения целевых соотношений вида

$$\lim_{t\to\infty}(x_*(t) - x(t)) = 0, \lim_{t\to\infty} \chi(t) = \chi_0, \lim_{t\to\infty} g(t) = g_0. \tag{12}$$

**Задача адаптивного управления с АШК**

Неминимально-фазовый объект управления задачи адаптивного управления с АШК описывался уравнениями

$$a(p,\xi)v(t) = b(p,\xi)u(t) + f(t), \; p \overset{\Delta}{=} d/dt, \tag{13}$$

$$a(p,\xi) = p^n + a_{n-1}(\xi)p^{n-1} + ... + a_1(\xi)p + a_0(\xi), \tag{14}$$

$$b(p,\xi) = b_m(\xi)p^m + b_{m-1}(\xi)p^{m-1} + ... + b_1(\xi)p + b_0(\xi), \tag{15}$$

закон управления задан в виде

$$u(t)=c(t)r_*, \qquad r_*=const>0. \tag{16}$$

Сложность решения поставленной задачи существенно зависит как от уровня априорной неопределенности, так и от наличия в объекте управления (13) – (15) неминимально-фазовости. В последней ситуации, как правило, исключается возможность построения систем прямого адаптивного управления без применения специальных мер, – например, направленных на придание характеристикам исследуемого объекта желаемых свойств. Один из возможных способов синтеза работоспособной адаптивной системы управления связан с процедурой построения расширенного объекта управления.

Рассматривался некоторый динамический контур, играющий в дальнейшем роль АШК, свойства которого были определены уравнением реального дифференцирующего звена

$$(Tp+1)z(t)=pu(t). \tag{17}$$

Соединяя объект (13) – (15) параллельно с контуром (17), получим расширенный объект, выход которого будет сформирован в виде

$$\zeta(t)=\nu(t)+k(t)z(t), \qquad k(t)>0,\ \forall t>0. \tag{18}$$

Для системы управления (13) – (18) требуется синтезировать явный вид алгоритмов настройки параметров регулятора и компенсатора таким образом, чтобы в условиях априорной неопределенности и при любых $y(0)$, $c(0)$ и $\alpha(0)$ обеспечивалось бы выполнение целевых условий

$$\lim_{t\to\infty} z(t)=z_*=0, \quad \lim_{t\to\infty}\zeta(t)=\zeta_*=v_*, \tag{19}$$

$$\lim_{t\to\infty} v(t)=v_*=r_*, \ \lim_{t\to\infty} c(t)=c_0=const, \tag{20}$$

$$\lim_{t\to\infty} k(t)=k_0=const>0. \tag{21}$$

При решении данной задачи алгоритмы контура адаптации адаптивной системы управления с АШК могут быть синтезированы в виде

$$k(t)=\vartheta_0\int_0^t \left|r_*-v(\upsilon)-k(\upsilon)z(\upsilon)\right|^q d\upsilon+k(0),\ \vartheta_0,q=const>0, \tag{22}$$

$$c(t)=c_И(t)+c_П(t), \tag{23}$$

$$\frac{dc_И(t)}{dt}=\vartheta_И\big(r_*-v(t)-k(t)z(t)\big)r_*,\ \ \vartheta_И=const>0, \tag{24}$$

$$c_П(t)=\vartheta_П\big(r_*-v(t)-k(t)z(t)\big)r_*,\ \ \vartheta_П=const>0. \tag{25}$$

### Адаптивные системы управления для объектов с АПК

Пусть система управления с АПК для объектов с запаздыванием по состоянию описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt}=A_1(\xi)x(t)+A_2(\xi)x(t-\tau)+b(\xi)u(t)+f_\xi(t), \tag{26}$$

$$y(t)=L^T(\xi)x(t),\ v(t)=g^T(t)y(t),\ x(s)=\varphi(s),\ s\in[-\tau_k,0], \tag{27}$$

$$u(t)=\chi_1(t)r_*+\chi_2(t)[r_*-v(t)]+\chi_3(t)q_1^T y(t-\tau), \tag{28}$$

цель управления и адаптации заданы соотношениями (9).

При решении данной задачи настройку алгоритмов параметров регулятора и компенсатора будем проводить с использованием новых беспоисковых алгоритмов параметрической самонастройки типа

$$\frac{d\chi_1(t)}{dt}=\alpha_1 r_*[r_*-g^T(t)y(t)], \tag{29}$$

$$\frac{d\chi_2}{dt}=\alpha_2[r_*-g^T(t)y(t)]^2, \tag{30}$$

$$\frac{d\chi_3}{dt}=\alpha_3 q_1^T y(t-\tau)[r_*-g^T(t)y(t)], \tag{31}$$

$$\frac{dg_i}{dt} = \beta_i \left| y_i(t)[r_* - g^T(t)y(t)] \right|. \tag{32}$$

Структурная схема системы управления для объектов с запаздыванием по состоянию (26) – (32) показана на рис. 4.

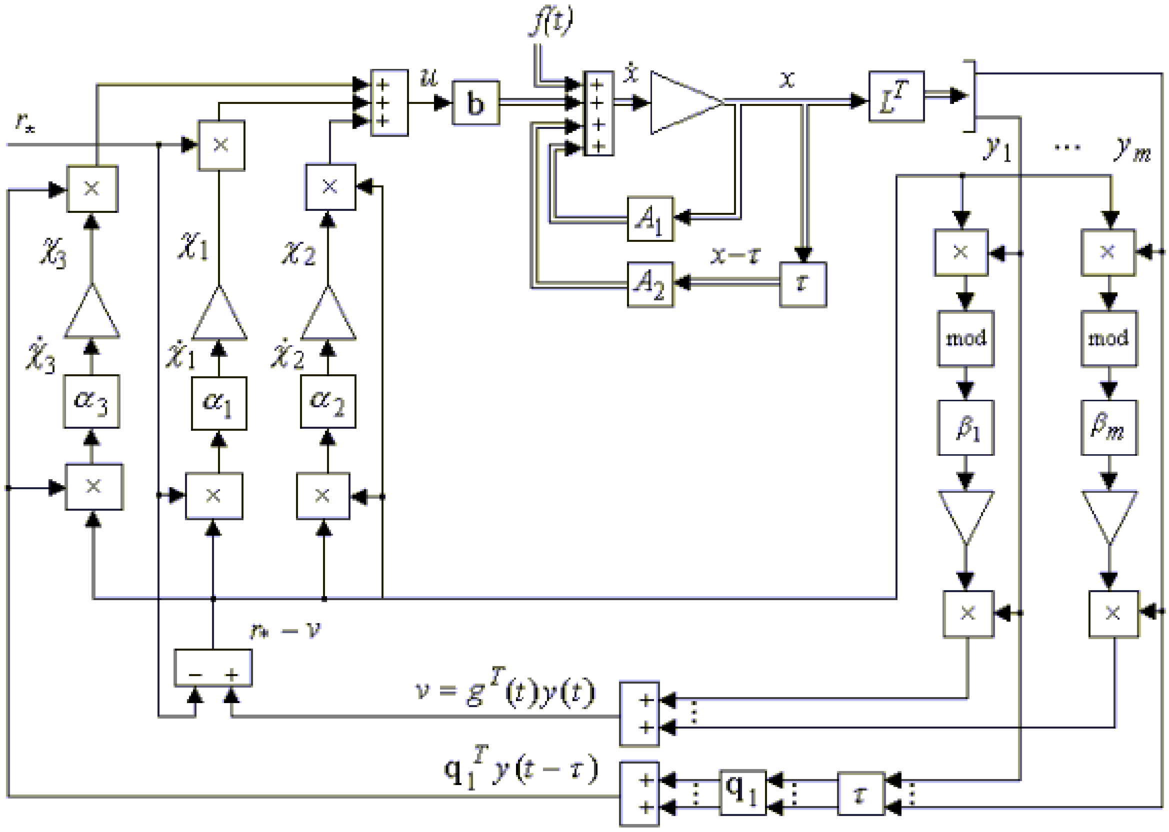


*Рис. 4.* Структурная схема адаптивной системы (26) – (32).

С практической точки зрения наибольший интерес представляют системы, объект которых подвержен постоянному действию помех.

При действии на объект возмущений вида (10) один из подходов решения задачи адаптивного управления состоит во введении в закон управления сигнальной составляющей, с помощью которой обеспечивается компенсация вредного влияния на свойства системы управления постоянных возмущений.

Пусть основной контур системы управления описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(\xi)x(t) + b(\xi)u(t) + f_\xi(t), \tag{33}$$

$$y(t) = L^T(\xi)x(t), \;\; v(t) = g^T(t)y(t), \tag{34}$$

где структура адаптивного регулятора имеет вид

$$u(t) = \chi_1(t)r_* + \chi_2(t)(r_* - v(t)) + u_{sign}(t). \tag{35}$$

Можно показать, что в адаптивной системе управления (33) – (35) уравнение сигнальной составляющей и алгоритмы самонастройки параметров регулятора и компенсатора могут быть определены в виде

$$u_{sign}(t) = \delta_1(1+\delta_2\,|\,\varepsilon\,(t)\,|^{\,q})\mathrm{sign}(\varepsilon\,(t)), \qquad (36)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \alpha_2[r_* - g^T(t)y(t)]^2, \qquad (37)$$

$$\frac{dg_i(t)}{dt} = \beta_i(t)\,|\,y_i(t)[r_* - g^T(t)y(t)]\,|,\;\; \beta_i(t) = \begin{cases} \beta_{1i}, \ \forall\,|\,\varepsilon(t)\,|\geq\delta_0, \\ \beta_{2i}, \ \forall\,|\,\varepsilon(t)\,|<\delta_0. \end{cases} \qquad (38)$$

Структурная схема системы с сигнально-параметрической адаптацией изображена на рис. 5.

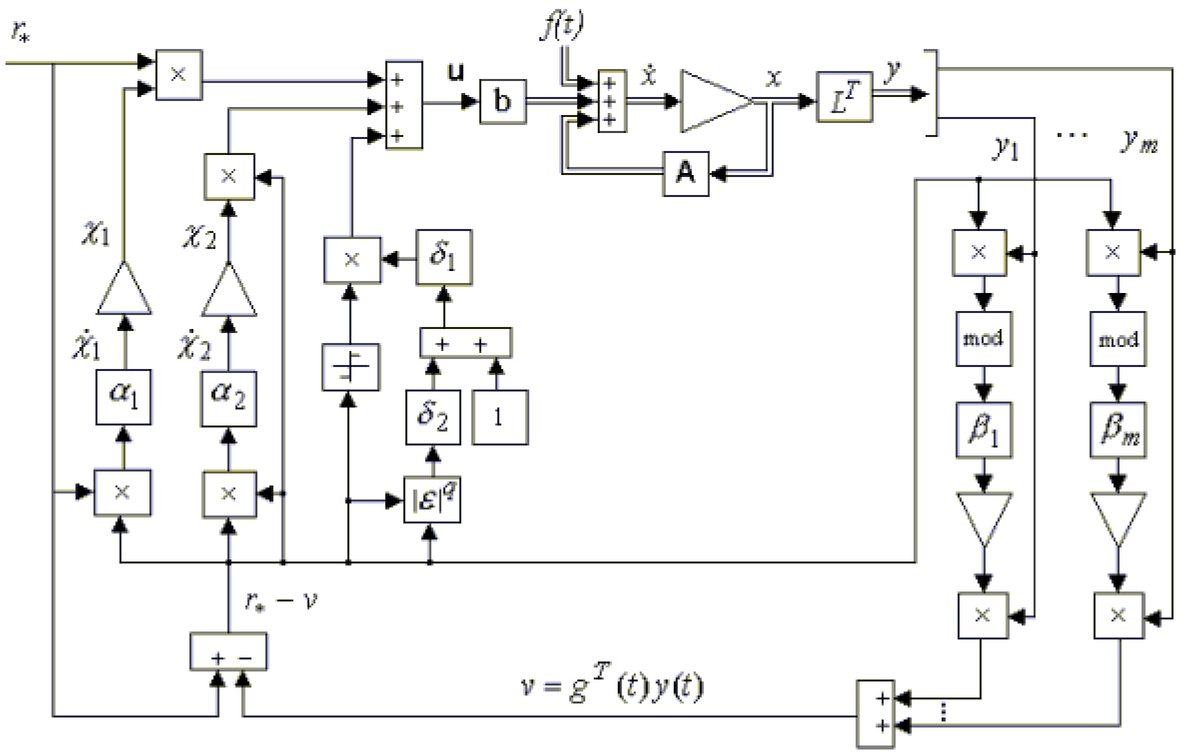


*Рис. 5.* Структурная схема адаптивной системы (33) – (38).

В рамках применения критерия гиперустойчивости, кроме представленных, синтезирован ряд систем управления с адаптивными компенсаторами, на которые получены патенты Российской Федерации [16 – 25].

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Фрадков А.Л.* Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990.
2. *Устинов С.М., Масленников В.А.* Проблемы адаптации при управлении статистической устойчивостью больших энергообъединений // Изв. АН. Энергетика. 1998. №5. С.10-19.
3. *Новосельцев В. Н.* Математическое моделирование в век компьютеров. М.: Институт проблем управления РАН, 2002.

4. *Воронов А.А., Рутковский В.Ю.* Современное состояние и перспективы развития адаптивных систем // Вопросы кибернетики. Проблемы теории и практики адаптивного управления. М.: Научный совет по кибернетике АН СССР, 1985. С. 5 – 48.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. *А.А. Красовского*. М.: Наука, 1987.
6. *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. М.: Наука, 1997.
7. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999.
8. *Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
9. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектному управлению. I // Изв. РАН. ТиСУ. 2001. №1. С. 5 – 22.
10. *Васильев С.Н*. От классических задач регулирования к интеллектному управлению. II // Изв. РАН. ТиСУ. 2001. №2.С. 5 – 21.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.3: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. *Н.Д. Егупова.* М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
12. *Красовский А.А.* Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. М.: Физматгиз, 1963.
13. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. Бишкек: Илим, 1992.
14. *Попов В.М.* Гиперустойчивость автоматических систем. М.: Наука, 1970.
15. *Landau I.D.* Adaptive Control Systems. The Model Reference Approach. N.Y.; Dekker, 1979.
16. Патент РФ №2109317. Адаптивная система управления /*Е.Л. Еремин, А.Д. Плутенко, Д.Ю. Шестаков*. // Б.И. 1998. №11.
17. Патент РФ №2130636. Адаптивная система управления для объектов с запаздыванием /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Е.Л. Еремин, А.Д. Плутенко, А.А. Остапенко*. //Б.И. 1999. №14.
18. Патент РФ №2148269. Адаптивная система управления для объектов с запаздыванием нейтрального типа /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2000. №12.
19. Патент РФ №2152067. Адаптивная система управления /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2000. №18.
20. Патент РФ №2155362. Адаптивная система управления для объектов с запаздыванием нейтрального типа /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2000. №24.
21. Патент РФ №2156993. Робастная система управления /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Т.А. Галаган, Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2000. №27.
22. Патент РФ №2165639. Адаптивная система управления для объектов с запаздыванием /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Т.А. Галаган, Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2001. №11.
23. Патент РФ №2170452. Робастная система управления для объектов с запаздыванием /*С.Г. Самохвалова (Акилова), Т.А. Галаган, Е.Л. Еремин*. //Б.И. 2001. №19.
24. Патент РФ №2173871. Адаптивная система для объектов с запаздыванием по управлению /*Е.Л. Еремин, И.Е. Еремин, С.Г. Самохвалова*. //Б.И. 2001. №26.
25. Патент РФ №2177635. Сигнально-адаптивная система для объектов с запаздыванием по состоянию /*Е.Л. Еремин, И.Е. Еремин, С.Г. Самохвалова*. //Б.И. 2001. №36.