



LUND UNIVERSITY

Nastrouika i Adaptatsiya (Tuning and Adaptation)

Åström, Karl Johan

Published in:
Pribory i Sistemy Upravleniya (Instruments and Control Systems)

1997

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Åström, K. J. (1997). Nastrouika i Adaptatsiya (Tuning and Adaptation). *Pribory i Sistemy Upravleniya (Instruments and Control Systems)*, (9), 53-65.

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

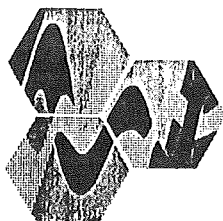
Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00



ИЗМЕРЕНИЯ КОНТРОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 681.513.6

К.Ю. ОСТРЕМ, д-р, проф. (Швеция)

Настройка и адаптация¹

Дается обзор методов настройки и адаптации и их применений. Он охватывает классические подходы, такие как программное изменение коэффициента усиления, адаптивное управление с эталонной моделью и управление с самонастройкой, а также более поздние, нелинейные подходы, основанные на обратном движении и нейронных сетях. Рассматриваются также применения и промышленные изделия.

This paper gives an overview of methods for tuning and adaptation and their applications. The presentation covers classical approaches such as gain scheduling, model reference adaptive control and self-tuning control as well as more recent nonlinear approaches based on backstepping and neural networks. Applications and industrial products are also discussed.

1. Введение

Управление с обратной связью позволяет получить системы, не чувствительные к возмущениям и изменениям параметров объекта. Порой изменения столь велики, что линейная обратная связь с постоянными коэффициентами неспособна справиться с проблемой. В этом случае альтернатива – адаптивное управление. Адаптивный регулятор – это, грубо говоря, регулятор, который пытается получить большую информацию о системе и ее окружении и изменить свое поведение при изменении свойств объекта или возмущениях. Обучение может быть достигнуто путем изменения параметров регулятора либо непосредственно, либо опосредованно, на основе идентификации модели процесса. В силу того что адаптивные системы способны получать информацию о свойствах объекта, адаптивные методы можно также использовать для определения параметров регулятора в тех случаях, когда последние не изменяются существенно. Они годятся и для автоматизации настройки регулятора. Это, по сути дела, наиболее распространенный способ использования адаптации. Достоинство автоматической настройки состоит в том, что в результате существенно упрощаются пусконаладка и функционирование систем.

Термин "адаптироваться" означает "изменять поведение в ответ на изменение внешних условий". Адаптивная система, таким образом, – это система, которая может изменять свое поведение при изменении внешних условий. Поскольку обычные системы с обратной связью также имеют дело с

изменяющимися условиями, необходимо провести разграничение. На протяжении многих лет были потрачены немалые усилия на поиск подходящего формального определения. Здесь мы просто скажем, что адаптивная система – это нелинейная система со специальной структурой. Адаптивное управление – естественное расширение базового контура обратной связи. Его можно рассматривать как попытку достичь более высокой степени автоматизации путем подстройки параметров регулятора в обычном контуре обратной связи. Или, иными словами, адаптивное управление позволяет автоматизировать некоторые операции, обычно выполняемые инженером по КИП для определения подходящих параметров регулятора.

Одно из первых упоминаний об адаптивном управлении – патент на пневматический ПИД регулятор, параметры которого регулируются пневматически [29]. Исследования в области адаптивного управления активно проводились в конце 50-х – начале 60-х гг. Одним из стимулов послужила потребность в системах управления полетом сверхзвуковых летательных аппаратов. Системы с постоянным коэффициентом усиления оказывались не работоспособными при переходе в область сверхзвуковых скоростей. Другим стимулом развития стало расширение сферы компьютеризованного управления технологическими процессами. Этот период иногда называют героической эпохой, поскольку путь от идеи до ее проверки на летных испытаниях был весьма короток при минимуме теоретического анализа в промежутке. В то время зародились многие идеи адаптивного управления, в частности адаптивная схема с эталонной моделью [143] и регулятор с самонастройкой [69]. Однако развитие сдерживалось аппаратными проблемами [51]. Регуляторы тогда реализовывались в виде специализированных аналоговых ЭВМ. На аналоговой технике было трудно добиться желаемых точности и надежности.

Адаптивному управлению существенно помогло развитие теории управления с 1950-х гг. Особенно важным был процесс в теории устойчивости и идентификации систем. Его следствием стал возросший интерес к адаптивному управлению в 70-е и 80-е гг. В этот период был внесен наибольший вклад в теорию и достигнут значительный прогресс в экспериментальной работе. Развитие стимулировалось появлением в начале 70-х гг. микропроцессоров, позволивших реализовывать адаптивные алгоритмы дешево и эффективно. Заметный прогресс наблюдался, в частности, в анализе устойчивости. Интересные результаты были получены от применения теории устойчивости по Ляпунову, а также гиперустойчивости. Важнейшую роль сыграло понятие "позитивность". Необходимые условия устойчивости важных классов адаптивных систем даны в работах [39, 48] и многих других.

Естественным было желание выяснить, что произойдет при нарушении условий устойчивости. В связи с этим появилось множество исследований по робастности адаптивного управления [115]. Было обнаружено, что очень важно не иметь немоделируемой динамики [62, 100, 108, 109, 112, 113].

В конце 80-х – начале 90-х гг. произошло несколько других интересных продвижений. Серьезный прогресс был достигнут

¹ Tuning and Adaptation / Prof., Dr. K. J. Åström. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden // Proc. IFAC 13. Triennial World Congress. San Francisco, USA, 1996. Plenary and Index Vol. P. 1...18. Работа выполнена при поддержке Шведского совета по научно-техническим исследованиям, контракт № 95-759.

в понимании многих ключевых проблем. Достаточно глубоко была изучена проблема самонастройки [53], исследованы условия сходимости [33] и переходные процессы в адаптивных системах.

Результаты, полученные в области управления нелинейными системами [65, 94], стимулировали исследования по адаптивному управлению нелинейными объектами. Типичные результаты – адаптивное управление системами, линеаризуемыми обратной связью [72, 119, 135]. П.В. Кокотовичем и его коллегами предложена также новая схема обратного движения (backstepping) [75, 79]. Для адаптивного управления нелинейными системами можно использовать нейронные сети. Вслед за возрождением интереса к последним в середине 80-х гг., появилось множество работ по этой тематике [60, 89, 101, 104]. В области идентификации систем снова обратились к взаимодействию идентификации и управления [46]. Эти проблемы тесно связаны с адаптивным управлением. Достигнут также существенный прогресс в понимании свойств самонастройки адаптивных регуляторов.

Опубликовано множество обзорных статей и более 20 монографий по адаптивному управлению. Среди наиболее свежих следует отметить работы [4, 11, 14, 28, 31, 33, 34, 43...45, 56, 63, 64, 74, 79, 84, 101...103, 118, 134].

Первые промышленно выпускаемые адаптивные регуляторы появились в начале 80-х гг. С тех пор разработан широкий спектр изделий, реализующих адаптивные методы. Сейчас наиболее широко применяется автоматическая настройка обычных регуляторов. Адаптивные методы используют также в системах управления общего назначения, предназначенных для управления технологическими процессами или движением. Имеется также множество специальных систем в автомобилестроении, аэрокосмической технике, судостроении, бытовой электронике, медико-биологических системах. Существуют адаптивные системы, функционирующие без перерыва уже более 30 лет.

2. Методы адаптации

На рис. 1 изображена принципиальная схема адаптивной системы с двумя контурами. Внутренний – обыкновенный контур обратной связи, образованный объектом и регулятором. Для настройки параметров регулятора служит внешний адаптивный контур. Ключевой момент адаптивного управления состоит в поиске механизма настройки параметров. Контур настройки нелинеен; одна нелинейность естественно возникает в результате умножения в связи с изменениями параметров, в механизмах адаптации есть и другие нелинейности.

2.1. Программное изменение коэффициентов усиления

В некоторых системах имеются вспомогательные переменные, достаточно хорошо отражающие как динамику объекта, так и действующие на него помехи. Если эти переменные поддаются измерению, их можно использовать для изменения

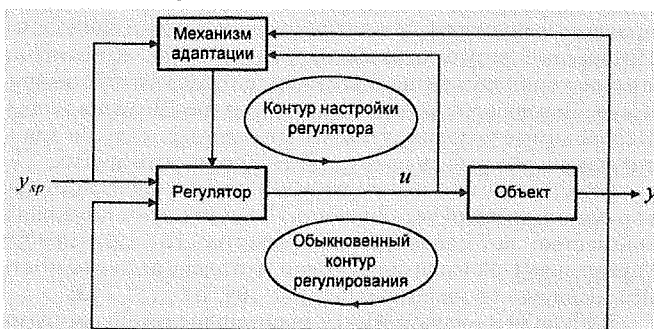


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивной системы

параметров регулятора. Такой подход называют программным изменением коэффициента усиления (gain scheduling), поскольку он первоначально использовался для приспособления к изменениям коэффициента усиления объекта. Систему с программным изменением коэффициента усиления можно рассматривать как систему управления с обратной связью, в которой коэффициенты усиления в контуре обратной связи настраиваются путем компенсации прямой связью. Ее можно трактовать и как адаптацию с разомкнутым контуром, поскольку в ней отсутствует обратная связь от качественного показателя замкнутой системы, которая компенсировала бы неправильную программу. Отметим, однако, что обратная связь имеет место в том смысле, что выход объекта нередко влияет на условия его функционирования.

Концепция программного изменения коэффициента усиления возникла в связи с развитием систем управления полетом. В этих задачах число Маха и динамическое давление измеряются бортовыми датчиками и используются в качестве переменных настройки. При управлении технологическими процессами производительность часто выбирают в качестве переменной настройки, т.е. постоянные времени и времена запаздываний обычно обратно пропорциональны производительности. Вопрос о том, следует ли рассматривать систему с программным изменением коэффициента усиления как адаптивную или нет, спорный. Тем не менее это весьма полезный метод, позволяющий уменьшить влияние изменений параметров; его промышленное применение быстро расширяется. Удивительно, что теоретические исследования систем с программным изменением коэффициента усиления проведены лишь недавно [70, 87, 116, 122, 123].

2.2 Прямые градиентные методы – адаптивные системы с эталонной моделью

Оптимизация была одной из первых попыток выработки механизма настройки параметров. Она привела к появлению адаптивного управления с эталонной моделью – одного из первых систематических подходов к адаптивному управлению. Применение этого подхода в управлении летательным аппаратом позволило создать адаптивную систему с эталонной моделью [143]. В основе этой системы лежат две идеи: 1) цель замкнутой системы формулируется как задача следования за моделью; 2) параметры регулятора настраиваются на основе градиентной схемы.

Рассмотрим, например, замкнутую систему с настраиваемыми параметрами, типа изображенной на рис. 2. Идеальный отклик на входные сигналы определяется моделью, выход которой обозначим через y_m . Пусть y – выход объекта, а $e = y - y_m$ – ошибка. Введем функцию потерь $J(e) = e^2$. Интуитивно представляется разумным настраивать параметры так, чтобы функция потерь убывала. Это приводит к следующему закону настройки параметров

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma \varphi e; \quad (1)$$

$$\varphi = -\frac{\partial e}{\partial \theta}.$$

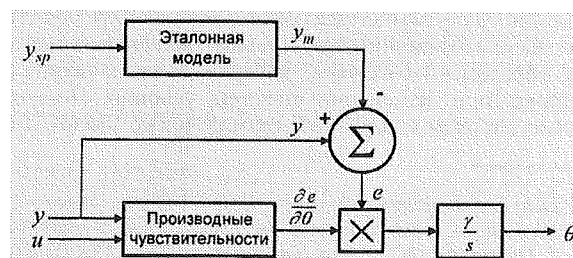


Рис. 2. Механизм уточнения параметров в адаптивной системе с эталонной моделью

Этот закон называют "правилом МИТ". Величина $\partial e/\partial \theta$ в уравнении (1) – производная чувствительности [37]. С правилом МИТ связано несколько проблем. Одна из них состоит в том, что для построения производных чувствительности часто требуются аппроксимации, что иллюстрируется следующим примером.

Пример 1

Рассмотрим простой контур с линейной обратной связью. Объект имеет передаточную функцию P , а регулятор – C . Обозначим через R преобразование Лапласа входного сигнала. Тогда преобразование Лапласа выходного сигнала замкнутой системы равно

$$Y = \frac{PC}{1+PC} R = (1-S)R,$$

а преобразование Лапласа ошибки –

$$E = \frac{PC}{1+PC} R - Y_m.$$

Производная чувствительности в этом случае определяется выражением

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = -\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial \theta} SY, \quad (2)$$

где $S = 1/(1+PC)$ – функция чувствительности.

Для построения функции чувствительности необходимо, таким образом, знать функции чувствительности замкнутого контура. Это, в свою очередь, требует информации о неизвестном объекте. Следовательно, для вычисления функций чувствительности требуются аппроксимации.

Схема механизма настройки параметров приведена на рис. 2. Блок под названием "Эталонная модель" дает желаемый отклик на приложенные задающие сигналы, а производные чувствительности вырабатываются линейной динамической системой. Механизм настройки параметров нелинеен из-за умножения ошибки на производные чувствительности.

Правило МИТ весьма несложно. Его применение может привести, однако, к неустойчивым системам, в особенности если скорость адаптации высока.

Адаптивным системам с эталонной моделью были посвящены многочисленные исследования. Существует множество вариантов закона настройки, задаваемого уравнением (1). Весьма полезно нормализованное правило:

$$\frac{d\theta}{dt} = \gamma \frac{e\varphi}{\alpha + \varphi^T \varphi}.$$

Важное наблюдение было сделано Р.В. Монополи [97], заметившим, что алгоритм можно улучшить путем добавления корректирующего компонента в выражение для ошибки e – *расширенную ошибку*. Множество исследований посвящено выработке понимания проблемы устойчивости. Применение теории устойчивости Ляпунова или гиперустойчивости Попова позволяет получить устойчивую замкнутую систему при выполнении некоторых условий [105]. Полученные условия настройки напоминают нормализованное правило МИТ, задаваемое приведенным выше уравнением, с той разницей, что производные чувствительности заменены другими величинами.

Пик исследований по устойчивости адаптивных систем пришелся на конец 1980-х гг., прежде чем было достигнуто понимание проблемы устойчивости [39, 105, 48, 49, 103]. Среди допущений, принятых для обеспечения устойчивости, следует упомянуть необходимость отсутствия у системы нулей в правой полуплоскости. Градиентные алгоритмы заменяют также алгоритмами, обеспечивающими более быструю сходимость.

2.3. Непрямые схемы настройки – самонастраивающиеся регуляторы

Изображенная на рис. 2 схема настройки реализует *прямой метод*, поскольку значения параметров регулятора уточняются непосредственно. При их косвенном уточнении – исходя из модели объекта – можно получить другую схему (рис. 3). Оцениваются параметры модели объекта, после чего параметры регулятора находятся расчетным путем. Эту схему можно рассматривать как автоматизацию построения модели объекта и конструирования регулятора. Для получения хороших оценок может также оказаться необходимым ввести возмущающие сигналы с тем, чтобы убедиться, что объект возбужден. Эта функция в целях упрощения не показана на рис. 3. Оценивание параметров и конструирование регулятора можно провести множеством разных методов. Параметры можно уточнять на каждом такте или с меньшей скоростью.



Рис. 3. Схема механизма уточнения параметров в самонастраивающемся регуляторе

На ранних этапах исследования не прямых схем предполагалось, что объект представляет собой линейную динамическую систему, например систему с дискретным временем, описываемую уравнением

$$y_t + a_1 y_{t-1} + \dots + a_n y_{t-n} = b_1 u_{t-1} + \dots + b_n u_{t-n}, \quad (3)$$

или эквивалентную ей с непрерывным временем. В силу того что неизвестные параметры входят в уравнение линейно, их можно оценить с помощью линейных регрессионных методов, например методом наименьших квадратов. К самонастраивающимся регуляторам применялось множество известных методов конструирования регуляторов, таких как расположение полюсов, LQG , H^∞ .

Интересное свойство самонастраивающихся регуляторов состоит в том, что их параметры могут сходиться к правильным значениям, даже если структура модели для их конструирования выбрана неверно. Это достаточно давно обнаруженное свойство исследовано в работах [32, 34, 35, 83]. В статье [90] показано, что самонастройка может не реализоваться для критериев качества типа обобщенных затрат; дальнейшие результаты по этой проблеме приведены в работе [52]. Анализ проблемы самонастройки дает понимание и вопросов сходимости параметров [18, 85, 114, 146].

2.4. Погрешности модели

Для не прямых схем естественно возникает несколько вопросов. Один из них – как быть с погрешностями оценивания. В проблеме оценивания присутствуют два типа погрешностей: смещение, объясняемое возможным неправильным выбором структуры модели, и погрешность, возникающая из-за случайных флуктуаций [91]. В первоначальных схемах конструирования регуляторов погрешности в оценках параметров игнорировались. Такое допущение называется "точностной эквивалентностью" (certainty equivalence) [126].

* LQG – задача аналитического конструирования регулятора при линейных ограничениях, квадратичном критерии качества и гауссовой помехе. – Прим. пер.

Проблема неточности достаточно сложна. Во-первых, нелегко найти хорошие оценки погрешностей оценивания. Во-вторых, необходимо определить, как следует модифицировать процедуру конструирования регулятора, чтобы учесть погрешность модели.

Результаты теории идентификации систем свидетельствуют, что можно найти асимптотические оценки дисперсии оценки, если смещение равно 0. Проверить такое допущение крайне сложно. В настоящее время в этой области ведутся активные исследования. Делалось несколько попыток оценить смещение [107]. Все используемые методы основаны на предположениях, справедливость которых трудно проверить.

Весьма активные исследования в области робастного управления позволили выработать хорошие процедуры конструирования, позволяющие учесть неточность модели. Имеет место, однако, некоторое несоответствие с результатами теории идентификации систем, поскольку робастное управление требует жестких ограничений на параметры, тогда как многие результаты из теории идентификации дают лишь среднеквадратичные ограничения. Сделано несколько попыток преодолеть это несоответствие, но проблемы еще далеки от разрушения.

При отсутствии смещения погрешность оценивания можно учесть при конструировании адаптивного регулятора. Это приводит к стратегиям, называемым *осторожным управлением* (cautious control) и *дуальным управлением*. Управление интегратором с неизвестным коэффициентом усиления – один из наиболее простых примеров, иллюстрирующих эти идеи.

Пример 2

Рассмотрим систему с дискретным временем, описываемую уравнением

$$y_{t+1} = y_t + by_t + e_t,$$

где b – нормально распределенная (со средним b_0 и дисперсией P_0) случайная величина, e_t – последовательность независимых нормально распределенных (с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин.

Эта, на первый взгляд, простая задача весьма интересна. Проблема на самом деле достаточно сложна, поскольку знак параметра b неизвестен. Например, не существует стратегии робастного линейного управления, которая позволила бы стабилизировать систему.

Пусть допустимое управление таково, что u_t – функция всех данных, имеющихся на момент t , т.е. $\chi_t = (u_{k-1}, y_k, k = 0, \dots, t)$. Предположим, что требуется поддерживать выходную величину как можно ближе к величине y_r в среднеквадратичном смысле. Это отражено в критерии

$$V_n = E \left(\sum_{k=t+1}^{t+n} (y_k - y_r)^2 | \chi_t \right), \quad (4)$$

где $E(\cdot | \chi_t)$ – условное математическое ожидание.

Задачу оценивания решить нетрудно, поскольку условное распределение b при заданном χ_t нормально (со средним b_t и дисперсией P_t). Управление точностной эквивалентностью задается следующей формулой:

$$u_t = \frac{1}{b_t} (y_r - y_t).$$

Оно, как легко видеть, определяет пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления $1/b_t$. Задача нахождения управляющей стратегии, которая минимизировала бы V_t , достаточно проста. Ее решением является следующий закон управления:

$$u_t = - \frac{1}{b_t} \frac{1}{b_t^2 + P_t} (y_r - y_t).$$

Эта стратегия управления называется *осторожным регулятором* (cautious controller), поскольку она уменьшает отклонение и использует меньший коэффициент усиления при неточных оценках. Осторожное управление приближается к точно эквивалентному при $P_t/b_t^2 \rightarrow 0$.

Минимизация критерия (4) весьма затруднительна при $n > 1$. Однако решения, которые можно определить численно, представляют несомненный интерес. Стратегии можно описать выражением

$$u_t = f(y_t, b_t, P_t),$$

где f – функция, определяемая численно.

Эти стратегии близки к осторожному регулятору, когда оценки точны, т.е., когда отношение P_t/b_t^2 мало, а ошибка управления $y_r - y_t$ велика. Они, однако, совершенно иные, когда величины P_t/b_t^2 и $y_r - y_t$ малы. Управляющие сигналы, порождаемые данной стратегией, могут превосходить соответствующие сигналы при точно эквивалентном управлении и осторожных регуляторах. Это объясняется тем, что закон управления генерирует управляющие сигналы, чтобы улучшить оценки. Причина, по которой в осторожном регуляторе не реализуются пробные воздействия, состоит в том, что временной горизонт составляет лишь один шаг, и стимул к пробным воздействиям отсутствует.

Термин "дуальное управление" был предложен А. Фельдбаумом в работе [41]. Идея заключается в том, что в условиях неопределенности управление должно быть и изучающим, и направляющим. Оно должно, таким образом, вести систему к заданной цели, в то же время вводя дополнительные пробные сигналы, если в системе имеется неопределенность. Система дуального управления поддерживает оптимальный баланс между всеми задачами. Проблемы дуального управления можно сформулировать как оптимизационные (см. пример 2). Предположив, что решение существует, можно воспользоваться методом динамического программирования для вывода функционального уравнения оптимального закона управления. Это уравнение, называемое уравнением Беллмана, представляет собой обобщение уравнений Гамильтона–Якоби в динамическом программировании [19, 20]. С уравнением Беллмана связаны две проблемы. Пространство состояний велико: для простого примера 2 это – R^3 , и размерность стремительно увеличивается с ростом числа неизвестных параметров. Уравнение также трудно решить численно. Более подробно эти вопросы рассмотрены в монографии [14].

Сделано множество попыток приближенно определить стратегии дуального управления. Первоначальные усилия концентрировались на аппроксимациях уравнения Беллмана [16, 17]. Были решены также некоторые несложные задачи [13, 22, 133]. Пробовали модифицировать критерии [42, 145]. Недавний обзор работ в рассматриваемой области приведен в докладе [144]. Весьма интересное применение дуального управления предложено в работе [3]. Оно связано с управлением приводом рафинера древесной стружки, где дуальное управление вполне естественно. Хотелось бы найти методы конструирования адаптивных регуляторов для достаточно общих (в разумных пределах) задач, а также "добавить" возможности дуального управления стандартным самонастраивающимся регуляторам. Эти проблемы до сих пор не решены. Есть надежда, что проявившийся вновь интерес к дуальному управлению принесет и новые идеи [50, 141].

2.5. Идентификация для управления

В последнее время в области идентификации систем наблюдается значительный интерес к осмыслению того, как результаты идентификации будут использоваться в управлении. Эта проблема тесно связана с адаптивным управлением.

Можно действительно утверждать, что адаптивное управление представляет собой окончательное слияние идентификации и управления. Хорошие обзоры результатов, полученных в этой области, имеются в работах [46, 140], содержащих множество ссылок. Можно обратиться также к публикациям [24, 46, 88, 121, 131, 147].

Итеративные схемы с повторяющимися шагами идентификации и управления – один из результатов проведенных исследований [24, 128]. Параметры регулятора остаются постоянными в процессе идентификации и изменяются в начале цикла, идентификация проводится в замкнутом контуре. Такую схему можно рассматривать как адаптивную систему управления, параметры регулятора в которой уточняются в некоторые, достаточно редкие моменты времени. Одно из достоинств идентификации в замкнутом контуре несмотря на то, что функции чувствительности замкнутого контура неизвестны, состоит в том, что метод позволяет определить действие функции чувствительности на некоторые сигналы.

Интересная итеративная схема предложена в работе [58]. Ее можно описать следующим образом. Все эксперименты проводятся в замкнутом контуре. Это требует априорного знания стабилизирующего регулятора. Сперва выполняется очередной идентификационный эксперимент. Строится модель, удовлетворяющая данным замкнутого контура, и конструируется регулятор. Для второго эксперимента в качестве входного выбирается выходной сигнал первого эксперимента. Далее процесс повторяется.

Рассмотренный подход применим к широкому спектру задач. Первоначально метод был предложен в стохастической постановке. Доказательства сходимости для некоторых задач приводятся в работах [57, 58].

Чтобы ознакомиться с некоторыми следствиями, связанными с адаптивным управлением, рассмотрим систему из примера 1. Пусть объект P неизвестен; будем предполагать, что известен стабилизирующий регулятор. Параметры регулятора сохраняются постоянными, на систему подается эталонный сигнал r_0 конечной продолжительности. Будем считать, что сигналы в системе успокаиваются столь быстро, что ими можно пренебречь через конечный промежуток времени. Выходной сигнал y_0 регистрируется. Затем он используется в качестве эталонного и подается в систему. Преобразование Лапласа сигнала ошибки ϵ задается формулой

$$\epsilon(s) = \frac{1}{1+PC} Y_0 = SY_0.$$

Сравнение с уравнением (2) показывает, что производная чувствительности равна

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = -\frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial \theta} \epsilon.$$

Поскольку передаточная функция C регулятора известна, можно точно найти производную чувствительности и определить параметры регулятора, обеспечивающие меньшее значение функции потерь. Таким образом, удается избежать трудностей аппроксимации, возникающих в обычных схемах адаптивного управления с эталонной моделью.

2.6. Нелинейные системы

С середины 80-х гг. наметился значительный прогресс в управлении нелинейными системами. Один из новых результатов – линеаризация обратной связи [61, 94]. Теория хорошо изложена в монографиях [65, 106]. После получения этих результатов вполне естественным стало исследование соответствующих адаптивных систем, что было сделано в работах [30, 47, 72, 119]. Имеется множество физических задач,

хорошо соответствующих данной постановке, например управление ротационными электрическими машинами, компрессорами, реактивными двигателями, летательными аппаратами.

Другой подход к управлению нелинейными системами предусматривает использование отдельных характеристик физических систем. В некоторых случаях системы сохраняют или рассеивают энергию. Тогда можно применить выражение для энергии как часть функции Ляпунова. Таким образом были сконструированы адаптивные регуляторы для роботов [130]. Теперь эта идея реализована в регуляторе для роботов, промышленно выпускаемом фирмой Adept. Родственная идея состоит в конструировании регуляторов на основе теории пассивности [71, 78]. Следует отметить, что пассивность сыграла решающую роль в развитии основ теории адаптивных систем с эталонной моделью.

Существуют проблемы, связанные с применением точно эквивалентного управления. Их можно проиллюстрировать на примере, взятом из монографии [79].

Пример 3

Рассмотрим систему

$$\frac{dx}{dt} = u + \theta x^2$$

с начальным условием $x(0) = x_0$. В силу того что параметр θ входит в уравнение линейно, его можно оценить по методу наименьших квадратов. Точно эквивалентное управление, стабилизирующее систему, имеет вид $u = -x - \hat{\theta}x^2$.

Обозначим через $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ погрешность оценивания. Замкнутая система тогда приобретает следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = -x + \tilde{\theta}x^2. \quad (5)$$

Если оценка точна, последнее слагаемое исчезает и x экспоненциально сходится к нулю. Ситуация существенно иная при наличии ошибки оценивания. Предположим, что эта

ошибка экспоненциально стремится к нулю, т.е. $\tilde{\theta}(t) = \epsilon e^{-t}$. Подставив последнее выражение в формулу (5), получим уравнение Риккати, имеющее решение

$$x(t) = \frac{2x_0}{\epsilon x_0 e^{-t} + (2 - \epsilon x_0) e^t}.$$

Если $0 < \epsilon x_0 < 2$, то $x(t)$ экспоненциально сходится к нулю при $t \rightarrow \infty$. При $\epsilon x_0 > 2$, решение $x(t)$, однако, уходит в бесконечность за конечное время. \square

Приведенный пример иллюстрирует одну из трудностей, связанных с адаптивным управлением нелинейными системами. Новым методом, позволяющим избежать этих трудностей, является обратное движение. Этот метод описан в недавно изданной монографии [79]. Он был первоначально разработан в качестве альтернативы линеаризации обратной связи. Метод применим к системам треугольной структуры:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, x_3)$$

:

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n(x_1, \dots, x_n, u).$$

Закон управления получают с помощью рекурсивной процедуры, начинающейся с уравнения для x_1 . Он строится

в предположении, что x_2 — управляющая переменная. Далее рекурсия распространяется на другие уравнения. Получаемый таким образом закон управления гарантирует стабилизацию системы. Устойчивость определяется либо по теории Ляпунова, либо по пассивности [71, 78].

Метод обратного движения был обобщен на обратную связь по выходу для систем с неизвестными параметрами [73, 80]. Интересно отметить, что, если метод применить к линейной системе с неизвестными параметрами, закон управления будет отличаться от закона адаптивного управления, полученного в результате использования точностной эквивалентности [77]. Одно из отличий состоит в том, что закон управления содержит скорость изменения оценки. Это улучшает переходную характеристику [75, 81].

2.7. Нейронные сети

Представление нелинейности — ключевой момент исследования нелинейных систем. Искусственные нейронные сети — эффективный способ описания нелинейной функции нескольких переменных. Одним из приятных свойств нейронных сетей является наличие методов подгонки параметров описания к данным. Другое состоит в том, что изменение параметров влияет на функцию лишь локально. Нейронные сети использовались для нелинейного адаптивного управления самыми разными способами [28, 60, 101 и др.].

Линейная модель (3) заменяется уравнением

$$y_i = f(u_{i-1}, \dots, u_{i-n}, u_{i-1}, \dots, u_{i-n}, \theta),$$

где нелинейная функция f представлена в виде нейронной сети с параметрами θ .

Модели в виде уравнений в пространстве состояний могут быть аналогично представлены с помощью нейронных сетей. Параметры входят усложненным образом в нормальные нейронные сети. Лучевые базисные функции дают, однако, представления, линейные по параметрам [117]. Задача идентификации эквивалентна обучению нейронной сети по входо-выходным данным. Задачи нахождения обратной модели и конструирования регуляторов на основе подгонки модели могут быть также выражены в виде аналогичной задачи обучения нейронных сетей. Нейронные модели — это модели типа "черный ящик". Их достоинство состоит в том, что описания носят весьма общий характер, недостатки — в том, что они нередко содержат множество параметров и время обучения может быть весьма велико [68, 127].

Другой способ применения нейронных сетей в управлении — создание локальной сети моделей, каждый узел которой является линейной динамической системой, а выход получается в результате объединения выходов линейных систем. Узлы могут иметь весовые коэффициенты, а системы в узлах — зависеть от параметров. Этот подход развит в работах [59, 82].

Нейронные сети использовали также при обучении регуляторов на нечеткой логике [28, 66, 142].

3. Автоматическая настройка

Адаптивные методы могут быть весьма полезны для управления объектами с постоянной динамикой. Причина состоит в том, что их применение позволяет значительно сэкономить затраты на сдачу объекта в эксплуатацию и непосредственно в процессе производства. Это наиболее распространенный способ промышленного использования адаптивных методов. При реализации регуляторов на микропроцессорах дополнительные затраты на установку алгоритмов настройки весьма незначительны, а производственные выгоды существенны.

Настройка регулятора уже давно привлекает внимание инженеров. Первоначально работа по настройке была нацелена на разработку процедур и рекомендаций, использовавшихся операторами при ручной настройке. Позднее интерес к настройке возрос в связи с появлением промышленно поставляемых регуляторов, снабженных средствами автоматической настройки. Автоматическая настройка сейчас широко используется в ПИД регуляторах. Ее начинают применять в управлении движением; соответствующие эксперименты проводятся и в других областях. По-видимому, в будущем большинство создаваемых регуляторов будет в том или ином виде оснащено встроенными средствами настройки.

Для автоматической настройки регуляторов было испробовано много методов. Существуют как эмпирические методы, основанные на эвристике, так и подходы, основанные на классической теории управления, распознавании образов, системах, основанных на знаниях, нейронных сетях и нечетком управлении. Настройка, таким образом, — это область, где можно встретить применение самых разных методов управления.

Регуляторы настраивают множеством различных способов. Имеются эвристические методы, имитирующие действия опытных операторов. Они основаны на спецификациях в терминах характеристик контура регулирования и простых экспериментах типа ударных испытаний (bump tests), в которых на уставку или выход регулятора подаются возмущения. Типичными примерами являются методы, разработанные Зиглером и Николсом [148]. Подобные процедуры оказали сильное воздействие на практическое применение техники управления, поскольку дали возможность получить разумные настройки регуляторов при незначительных затратах. Свидетельством тому — широкое распространение этих методов.

Другой способ настройки базируется на моделировании системы и действующих на нее возмущений и применении того или иного метода конструирования регулятора. Модели систем получают на основе физического моделирования, методами идентификации систем или комбинированием первого со вторыми. Существует множество подходов, существенно различающихся по сложности используемых моделей. Многие методы исходят из простых моделей. Методы, основанные на модели, были рассмотрены в разделе 2.

Эвристические методы настройки можно, конечно, также считать базирующимися на модели. Однако используемые в них модели существенно иные; они могут, например, учитывать особенности переходных или частотных характеристик.

3.1. ПИД регулирование

Стандартные ПИД регуляторы развиваются весьма динамично с середины 80-х гг. Практически все выпускаемые сейчас ПИД регуляторы оснащены средствами самонастройки. Некоторые обладают также возможностями автоматического генерирования программ изменения коэффициента усиления и адаптации коэффициентов усиления прямых и обратных связей.

С п е ц и ф и к а ц и и. При решении задачи управления необходимо понимать его главную цель. Две типичные цели управления — слежение за уставкой и подавление помех. Важно также иметь оценку основных ограничений, в число которых могут входить динамические характеристики системы, нелинейности, помехи, неопределенность объекта. Типичные спецификации системы управления могут включать подавление возмущений нагрузки, слежение за уставкой, робастность к неопределенности модели, нечувствительность к измерительным шумам.

Подавление возмущений нагрузки имеет первостепенное значение при управлении объектом. Возмущения могут

воздействовать на систему множеством различных путей. Для целей спецификации удобно будет предположить, что они приложены ко входу объекта. Это обеспечивает возбуждение системы возмущением. Кроме того, спецификацию можно проконтролировать. Типичные характеристики ошибки – максимальная ошибка, время достижения максимума, время установления, коэффициент затухания, интегральная ошибка и абсолютная интегральная ошибка.

Слежение за уставкой обычно имеет меньшее значение при управлении технологическими процессами, чем подавление возмущений нагрузки, поскольку изменение уставки – достаточно редкое событие [124, 125]. Более того, реакцию на изменения уставки можно настраивать независимо от возмущений нагрузки, используя структуру с двумя степенями свободы. Спецификации могут включать требования относительно времени нарастания, времени установления, коэффициента затухания, перерегулирования и статической неравномерности.

Чувствительность к погрешностям моделирования можно выразить через максимум функции чувствительности M_s . Отметим, что величина $1/M_s$ – это наименьшее расстояние между годографом Найквиста и критической точкой. Другими относящимися сюда характеристиками являются запас по усилению и запас по фазе.

Высокочастотный измерительный шум попадает в систему по обратной связи. Необходимо обеспечить не слишком большое значение коэффициента усиления регулятора на высоких частотах, чтобы измерительный шум не приводил к чрезмерным управляющим воздействиям. Этого можно достичь, наложив ограничение на высокочастотный коэффициент усиления регулятора.

Приведенные спецификации охватывают ключевые моменты для одиночных контуров. Основанные на них процедуры конструирования ПИД регуляторов даны в работах [10, 110, 111].

3.2. Методы, основанные на характеристиках

Наиболее простые методы конструирования основаны на нескольких динамических характеристиках объекта, которые легко получить экспериментально. Типичные характеристики во временной области – статический коэффициент усиления K_p , доминирующая постоянная времени T_n и доминирующее время запаздывания L , являющиеся параметрами передаточной функции объекта

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL}.$$

Типичные характеристики в частотной области – статический коэффициент усиления K_p , предельный коэффициент усиления $K_p = 1/k_{180}$ и предельный период $T_u = 2\pi/\omega_{180}$.

Схемы Зиглера–Николса – один из наиболее распространенных методов настройки – основаны на использовании лишь двух параметров: L и $a = K_p L/T$ для метода отклика на ступенчатое воздействие и K_u и T_u для частотных методов [148]. Метод Зиглера–Николса был разработан, чтобы дать относительное затухание $\zeta \approx 0,2$, которое слишком мало. Оказалось также, что два параметра не несут достаточной информации для достижения хорошей настройки. Существенно лучшие правила настройки можно получить, используя дополнительный параметр. В качестве него можно выбрать нормализованное время запаздывания $\tau = L/(L + T)$, или отношение коэффициентов усиления $\kappa = 1/K_p K_u = k_{180}/K_p$ [10, 11].

3.3. Релейная обратная связь

Релейная обратная связь – мощный метод возмущения динамической системы и определения ее полезных характеристик. Основная идея заключается в том, что многие системы с релейной обратной связью обладают устойчивыми предельными циклами. Частота и амплитуда предельного цикла определяются характеристиками системы и позволяют лучше понять ее свойства. Рассмотрим замкнутую систему с релейной обратной связью, представленную на рис. 4. Ее типичное поведение иллюстрирует рис. 5, на котором изображены графики входного и выходного сигнала. Отметим, что предельный цикл с формой выходного сигнала, близкой к синусоиде, устанавливается в системе очень быстро. Выход и вход объекта находятся в противофазе. Эксперимент с релейной обратной связью, таким образом, автоматически дает колебания с частотой ω_{180} . Пусть амплитуда выходного сигнала объекта a , амплитуда релейного сигнала d . Методом гармонического баланса можно найти коэффициент усиления объекта при ω_{180} . Он равен $k_{180} = \pi a / 4d$. Это следует также из анализа с помощью описывающей функции, поскольку описывающая функция идеального реле – отрицательная вещественная полуось [15].

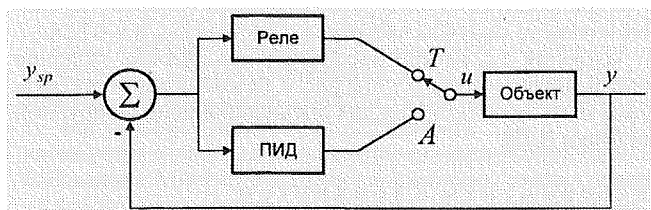


Рис. 4. Схема системы с релейной самонастройкой. Релейная обратная связь получается установлением переключателя в положение Т, обыкновенная обратная связь – в положение А

Необходимые условия существования предельного цикла при релейной обратной связи были сформулированы Цыпкиным [136] и Остром [7]. Введение релейной обратной связи в линейную систему способно привести к весьма сложному поведению последней. Система может обладать предельными циклами со многими переключениями за период, иметь множество предельных циклов; могут наблюдаться также предельные циклы с дрожанием на части периода или даже хаотическое движение. Для типичных передаточных функций, встречающихся в задачах управления объектами, часто имеется единственный устойчивый предельный цикл. Приведенные в работе [7] результаты позволяют исследовать, что произойдет с конкретной передаточной функцией $G(s)$. Один из наиболее простых, но интересных случаев – двойной интегратор, дающий бесконечно много предельных циклов, зависящих от начальных условий. Полного описания всех линейных систем, обладающих единственным устойчивым предельным циклом, до сих пор, однако, не существует.

Автоматическую настройку ПИД регулятора сейчас выполняют следующим образом. Объект сперва замыкают релейной обратной связью. После получения устойчивого

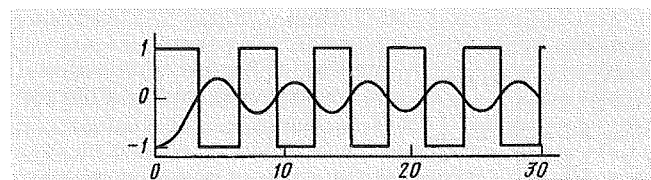


Рис. 5. Входной и выходной сигналы системы, изображенной на рис. 4, с передаточной функцией, задаваемой соотношением $G(s) = 3/(1 + 5s)(s + 1)^2$. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – управляющий сигнал и выход объекта

предельного цикла определяют его амплитуду и период. Это позволяет найти параметры объекта K_n и ω_n . Затем реле заменяют ПИ регулятором, параметры которого определяют по K_n и ω_n , и незначительно изменяют уставку. Отсюда можно выявить статический коэффициент усиления K_p объекта и улучшенные параметры ПИД регулятора.

Некоторые усовершенствования предусматривают предварительное определение шума объекта и использование реле с гистерезисом. Полезно также ввести обратную связь от амплитуды колебаний предельного цикла к амплитуде реле с целью обеспечить разумное значение амплитуды колебаний предельного цикла. На практике последний приходит в состояние равновесия через несколько полупериодов.

Идея использования возмущений, создаваемых релейной обратной связью, для настройки простых регуляторов была предложена в статье [9]. Метод весьма успешно применялся в различных промышленных изделиях. Известно несколько интересных его разновидностей [120]. Детальное рассмотрение метода содержится в книге [11].

3.4. Другие применения релейной обратной связи

Имеется много других способов применения релейной обратной связи. Если интегратор последовательно подсоединить к реле, то получим частоту ω_{90} . Частоту ω_{270} и коэффициент усиления k_{270} можно определить аналогично, включив дифференциатор после реле на рис. 4. Релейная обратная связь может быть использована для оценивания немоделируемой динамики [132].

Эксперименты в замкнутом контуре

Релейную обратную связь можно рекомендовать и для замкнутых систем. Рассмотрим рис. 6, который иллюстрирует эксперимент с релейной обратной связью, примененной в замкнутой системе. Пусть $L = PC$ – передаточная функция контура, т.е. объединенная передаточная функция регулятора и объекта. Передаточная функция замкнутой системы равна

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}. \quad (6)$$

Предположим, что описывающая функция достаточно точна. Тогда эксперимент позволяет получить колебания с такой частотой, что сдвиг фазы частотной характеристики $T(i\omega)$ равен 180° . Из уравнения (6) следует, что это – та частота, при которой $L(i\omega)$ имеет сдвиг фазы, равный 180° , т.е. частота пересечения фаз. Это несложное наблюдение полезно для настройки, т.к. показывает, что регулятор может быть настроен в замкнутом контуре.

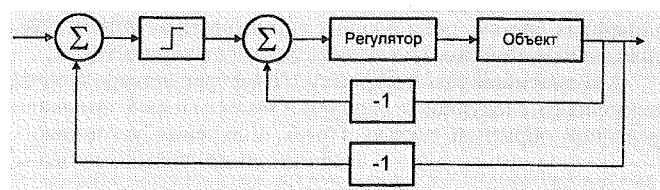


Рис. 6. Релейная обратная связь, примененная в замкнутой системе

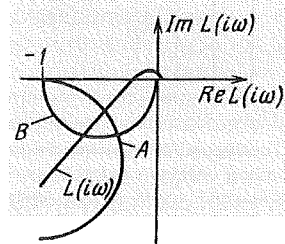


Рис. 7. Частоты, получаемые в различных экспериментах с релейной обратной связью

Введя интегратор последовательно с реле (см. рис. 6) и применив анализ с помощью описывающей функции, можно определить, что колебания будут совершаться с такой частотой, при которой $\arg T(i\omega) = -\pi/2$. Данное условие имеет изящную интерпретацию на диаграмме Найквиста. Это просто полуокружность с диаметром $(-1, 0)$ (рис. 7). Знание точек пересечения годографа Найквиста передаточной функции контура с окружностью B и отрицательной вещественной полуосью дает полезную информацию о поведении передаточной функции контура в области, критичной для многих свойств замкнутой системы.

Измерение запасов по коэффициенту усиления и фазе

Релейную обратную связь можно использовать также для непосредственного измерения запасов по усилению и фазе замкнутой системы. Эксперимент с релейной обратной связью в замкнутой системе, изображенной на рис. 6, позволяет найти точку, в которой годограф Найквиста передаточной функции контура пересекает отрицательную вещественную полуось (см. рис. 7). Если пересечение происходит при $L(i\omega) = -m$, запас по усилению определяется как $a_m = m/(1 - m)$. Если реле имеет гистерезис, то в результате эксперимента получают частоту, при которой передаточная функция контура пересекает часть окружности A (см. рис. 7).

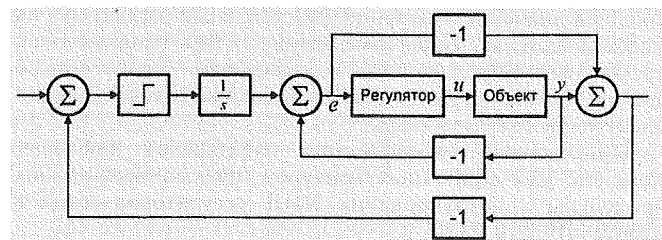


Рис. 8. Определение запаса по фазе с помощью релейной обратной связи

Запас по фазе можно определить аналогично, используя релейную обратную связь, как это показано на рис. 8. Предположив, что реле идеально, и воспользовавшись описывающими функциями, можно установить, что в системе будут совершаться колебания с частотой, определяемой точкой пересечения годографа коэффициента усиления. Запас по фазе можно в этом случае найти по сдвигу фазы между входным и выходным сигналами объекта.

4. Применение

В настоящее время адаптивные методы используются столь широко, что было бы достаточно трудно дать всеобъемлющий обзор их применения. В этом разделе приводятся отдельные примеры их использования, описываются некоторые промышленные изделия и области применения.

4.1. Использование адаптивных методов

Здесь рассматриваются несколько различных путей использования адаптивных методов.

Автоматическая настройка ПИД регуляторов – в настоящее время наиболее широкая область применения методов адаптации. Первая причина состоит в том, что ПИД регуляторы достаточно просты, вторая – что они используются в огромном количестве, третья – что время их разработки весьма мало. Сообщения о промышленном использовании ПИД регуляторов [23, 40] также ясно показывают необходимость автоматической настройки в промышленном масштабе. Некоторые общие принципы последней были рассмотрены в

разделе 3 данного обзора, более подробную информацию можно найти в работах [11, 12, 55].

Важно отметить, что средства автоматической настройки для стандартного применения можно создавать с очень простыми пользовательскими интерфейсами. Настройка осуществляется простым нажатием на кнопку – это так называемая "однокнопочная настройка". Для более опытных пользователей может быть предусмотрено дальнейшее взаимодействие путем изменения параметров, относящихся к конкретным спецификациям.

Управление движением – другая область, где все больше используется автоматическая настройка. Системы и задачи здесь в достаточной степени стандартизованы, но детали могут существенно меняться в зависимости от размеров двигателя и его быстродействия. Система CONCAD, выпущенная компанией Servotronics, является характерным примером этого. Вполне резонно предположить, что пределы применения автоматической настройки заметно расширяются.

Программное изменение коэффициента усиления – весьма мощный метод, до сих пор применявшийся только в достаточно сложных системах. Одна из причин этого состоит в том, что разработка и реализация программ требуют значительных ресурсов. Ситуация радикально изменилась с появлением автонастройки, обеспечивающей автоматическое построение программ изменения коэффициента усиления. Показано, что можно получить немалые выгоды от программы, содержащей лишь несколько рабочих точек. Автоматическая генерация программ изменения коэффициента усиления включена в состав стандартных одноконтурных регуляторов, а также в распределенные системы управления технологическими процессами.

Непрерывная адаптация. Первоначальной движущей силой обращения к адаптивному управлению было стремление справиться с изменениями динамики объекта и возмущениями. Типичные примеры – изменения из-за не поддающихся измерению вариаций свойств сырья, износа механических систем, засорения теплообменников. Это – традиционные случаи использования адаптивного управления, где требуются непрерывно адаптирующиеся регуляторы.

Управление с прямой связью – весьма мощный и полезный метод отработки измеряемых возмущений. Имеются две существенные трудности, значительно ограничивающие использование метода: во-первых, он требует хороших моделей; во-вторых, регулятор прямой связи сложно настраивать из-за необходимости ждать появления помехи. Обеих трудностей можно избежать благодаря адаптивным методам. Адаптация позволяет получить хорошие модели, а настройка проводится автоматически при возникновении помехи. Многие выгоды, приписываемые применению адаптивных регуляторов на ранних этапах развития этого направления, относили и на счет использования адаптивной прямой связи [21, 95]. Следует также отметить, что адаптивная прямая связь включена даже в весьма простые ПИД регуляторы [54].

4.2. Промышленные изделия

Имеется широкий набор промышленных изделий, в которых используется адаптация. Далее приводится их обобщенная характеристика с несколькими примерами.

Средства настройки. Выпускаются приборы для настройки, функционирующие следующим образом. Обычный регулятор отсоединяют от объекта, и вместо него подключают прибор для настройки. После проведения настройки снова возвращают регулятор и вводят в него параметры, найденные в результате настройки. Одно из достоинств таких приборов состоит в том, что их можно использовать вместе с обычным оборудованием, недостаток – в том, что параметры регулятора могут быть определены

многими способами, а следовательно, пользователь должен быть достаточно квалифицированным. Некоторые устройства для настройки снабжены средствами анализа спектров и динамики объекта. Система Protuner компании Techmation, реализованная на ПЭВМ со специальными платами для связи с объектом, – один из примеров средства настройки.

ПИД регуляторы. Большинство промышленных задач управления решается с помощью стандартных регуляторов типа ПИД. Эти регуляторы существуют во многих видах: как отдельные узлы, как блоки в программируемых логических контроллерах (ПЛК) и распределенных системах управления, как части определенных систем управления. Адаптивные алгоритмы встроены во многие такие системы. Наиболее распространена, по-видимому, автоматическая настройка; ее нередко объединяют с непрерывной адаптацией управления по отклонению и по возмущению и с программным изменением коэффициента усиления. В случаях, когда адаптивные алгоритмы тесно объединены с регулятором, можно создать весьма простые в применении системы. Несколько систем сконструировано таким образом, что настройка осуществляется простым нажатием на кнопку. Ряд изделий рассмотрен в работах [11, 12]. Эта продукция выпускается большинством производителей оборудования для управления технологическими процессами.

Распределенные системы управления технологическими процессами традиционно базировались на стандартных ПИД регулировании, логике и упорядочении во времени. Системы программируются обычно с использованием блочноориентированной парадигмы, так что систему управления можно собрать, соединяя между собой блоки из библиотеки. Многие из этих систем снабжены теперь средствами адаптивного управления. Часто эти свойства унаследованы от аналогичных средств в одноконтурных регуляторах. Усовершенствованный контроллер Университета Ньюкастла (The University of Newcastle Advanced Controller), созданный в Австралии под руководством Г. Гудвина, – недавняя разработка такого типа. Подобные системы потенциально способны обеспечивать лучшие показатели, чем ПИД регуляторы, но требуют более квалифицированных пользователей в сравнении с простыми регуляторами [96].

Специализированные системы. Для специфических применений могут быть созданы адаптивные регуляторы, эффективно использующие априорную информацию. Это позволяет снизить число оцениваемых параметров, а также разработать схемы безопасности, что обеспечит безопасную работу системы в любых производственных условиях. Такие регуляторы разработаны для управления судами, целлюлозных автоклавов, ультрафильтрационных цементных печей, приводов, автоматических станков, управления двигателями, активных подвесов. Типичный пример – системы управления движением. Интересная система такого типа на базе ПЭВМ разработана израильской фирмой Servotronics.

4.3. Некоторые применения

В данном подразделе проводятся примеры применения адаптивного управления. Они иллюстрируют разнообразие и богатство возможностей использования адаптивных методов.

Производство. Адаптивное управление используют в широкой номенклатуре производственных систем компании 3M [2]. Типичное применение – производство клейкой ленты. Осуществляется управление профилем и натяжением, а также концентрацией растворителя. Это производство требует повышенного внимания, т.к. ведется круглосуточно в течение более чем 360 дней в году. Собственными силами был разработан стандартный многомерный самонастраивающийся регулятор, основанный на рекурсивном алгоритме наименьших квадратов. Множество систем реализовано на различных

ПЛК. Они применяются в типичных задачах регулирования. Отмечаются повышение качества продукции и существенное снижение затрат. Компания экспериментировала с адаптивным регулятором с конца 70-х гг. [1]. Тем не менее лишь тогда когда его удалось реализовать на стандартных ПЛК, началось широкое использование адаптивных регуляторов. Весьма важно было иметь собственный опыт в реализации ПЛК.

Управление технологическими процессами в нефтехимии. В работе [38] описан пакет программ AtLoop для управления промышленными объектами, созданный на факультете автоматизации Университета науки и технологии Китая (г. Хэфэй). Система обладает средствами релейной автонастройки ПИД регулятора и управления с самонастройкой. Она использовалась на нескольких нефтехимических предприятиях Китая, в результате чего была отмечена существенная экономия средств.

Управление металлорежущими станками. Системы адаптивного управления резкой металла – естественное расширение систем компьютерного управления станками. Существует множество вариаций материалов и процедур обработки. Адаптивное управление улучшает качество обработки и повышает ее скорость [76, 86, 138, 139].

Робототехника. Компания Adept создает промышленную робототехническую систему с прямым управлением двигателями. Причина введения адаптивного управления – улучшение показателей слежения и стабилизации. Адаптивное управление введено в сочленениях 1 и 2 системы AdeptOne. В сочленениях 3 и 4, где используются зубчатые механизмы, оно не вводилось. В системе использовались обычные трехэлементные (three-term) системы управления. Адаптация основана на схеме, описанной в работах [129, 130]. Настраивались лишь коэффициенты усиления прямых связей. Система превзошла все ожидания компании, что объясняют способностью компенсировать немоделируемые явления, существующие даже в руке-манипуляторе с прямым управлением.

Дуговая сварка – сложный процесс, протекающий под воздействием множества факторов. Критическим параметром является, например, температура листа. Эксперименты с адаптивным управлением сваркой проводились в научно-исследовательской лаборатории армии США (US Army CERL, Champaign, Illinois) [27]. Оценивалось несколько методов: адаптивный ПИ регулятор с компенсацией времени запаздывания, адаптивное управление по минимуму дисперсии и адаптивное размещение полюсов. Наилучшие результаты получены для адаптивного H_∞ -регулятора с компенсацией времени запаздывания [26].

Непрерывный автоклав. В целлюлозно-бумажной промышленности адаптивное управление применяется широко. Полезное свойство многих задач из этой области состоит в том, что имеются непрерывные помехи, хорошо возбуждающие систему. Это делает оценивание параметров несложным. Рассмотренная в работе [25] прикладная задача интересна тем, что установка, пуск и техническое обслуживание выполнялись производственным персоналом предприятия на базе стандартной платформы. Персонал состоял из нескольких энтузиастов-самоучек, не имеющих серьезных познаний в математике и теории управления.

Испытание материалов. В статье [36] описывается применение адаптивного регулятора в устройствах испытания материалов. Образец материала растягивается по заданной схеме с помощью гидравлического сервомеханизма, и сила растяжения регистрируется. Испытание включает много циклов для многих материалов, поддерживает характеристики системы вне зависимости от типа эталона. Адаптивный регулятор – типичный пример "серого ящика". Он использует простую физическую модель и два однопараметрических идентификатора для изменения параметров ПИ регулятора. Система эксплуатируется более чем в 350 различных испытательных машинах.

Автомобильная промышленность. Функции управления в автомобилях традиционно основывались на табличном поиске в разомкнутом контуре. Автоматическая настройка служила для подгонки табличных входных величин. Имеются также отдельные замкнутые контуры, основанные на ПИ и ПИД регулировании. В некоторых контурах начинают использовать адаптивные функции для компенсации изменений в компонентах и условиях производства. Настраиваются чаще коэффициенты усиления прямых связей. Элементы адаптации присутствуют и в управлении электропоездами. Проводились эксперименты по адаптивному управлению двигателями [67, 93, 98, 137], а также по активной подвеске.

4.4. Перспективы развития

Пути развития адаптивного управления после 1980 г. весьма интересны. Порассуждаем о том, что ждет нас в будущем. Важно то, что на этих системах без особых затруднений может работать обычный производственный персонал.

Существенные трудности. Для всех адаптивных регуляторов требуется априорная информация, особенно о временных масштабах. Для систем с непрерывным временем это нужно в целях выбора фильтров, необходимых при оценивании, систем с дискретным временем – чтобы выбрать интервал дискретизации. Априорная информация нужна также для нахождения соответствующих спецификаций. Системы, требующие незначительного объема априорной информации, особенно важны для настройки. Весьма желательно обладать системами, некритичными к знаниям пользователя.

Интересно отметить, что многие новые подходы к настройке объединяют идеи как эвристической настройки, так и основанной на модели. Один из распространенных подходов предусматривает начальную настройку регулятора одним из эвристических методов. При необходимости характеристики можно затем улучшить на основе подхода, использующего модель. Примеры таких схем даны в работах [92, 96]. К этому подходу близок и метод "виндсерфинга" с итерациями идентификации и управления [88]. Подходы и инструментарий, разработанные для простых регуляторов, переносятся и на распределенные системы управления. Их функциональные возможности также расширяются из-за больших вычислительных мощностей и лучших человеко-машинных интерфейсов. Простые автонастройщики используются и для инициализации более сложных алгоритмов. Подобный пример приведен в работе [92].

Улучшенные возможности. Адаптивный регулятор можно оснастить наблюдателем и средствами оценивания параметров объекта. Такой регулятор содержит много ценной информации об объекте и может служить для различных целей.

Естественно использовать эту информацию для интегрированных диагностирования и управления. Таким образом можно получить значительно более точные результаты диагностирования, чем с помощью традиционной системы, где оно основано лишь на ошибке управления.

Данные об оценках параметров могут способствовать извлечению большей информации о контуре управления [6]. Можно определить статическую нелинейность, а также такие динамические характеристики, как время запаздывания, нули и полюса в правой полуплоскости, существенно ограничивающие качество системы. Регулятор, таким образом, может поставлять информацию для оценивания контура регулирования, весьма полезную при модернизации объекта. Нелинейности в исполнительных устройствах, такие как люфт и трение, – другие явления лимитирующие качество управления. Информацию о них также способен дать адаптивный регулятор.

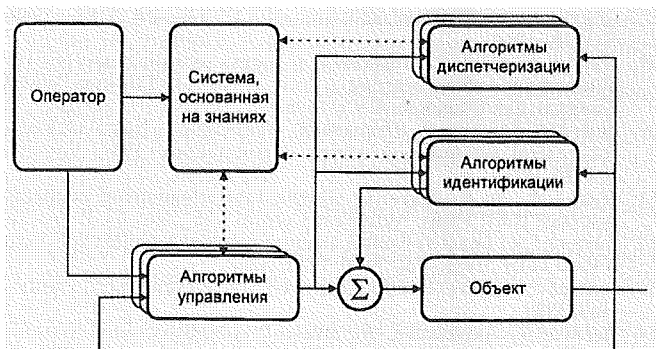


Рис. 9. Регулятор, сочетающий автоматическую настройку и адаптацию со множеством других функций

Для регуляторов, разработанных по количественным спецификациям, удается определить, соответствует ли их функционирование этим спецификациям; для задач регулирования – оценить наилучшее возможное качество функционирования. Система, таким образом, может быть оснащена средствами оценивания качества функционирования.

Экспертное управление. Структура системы, сочетающей в себе автоматическую настройку и адаптивное управление с оцениванием контура и качества функционирования, изображена на рис. 9. В этой системе несколько различных регуляторов, алгоритмов оценивания и анализа данных, а также механизмы для переключения алгоритмов. Системы такого типа исследованы в работах [5, 8]. В последнее время был достигнут прогресс в анализе системы с переключениями упомянутого типа [99].

5. Выводы

Основная масса работ по адаптивному управлению на раннем этапе его развития была сфокусирована на управлении линейными системами. Теперь это уже достаточно разработанная область. Задачи в детерминированной и стохастической постановках рассматривались в непрерывном и дискретном времени. Хорошо развиты такие методы, как адаптивное управление с эталонной моделью и управление с самонастройкой. Поведение полученной в результате замкнутой системы также изучено достаточно хорошо. Определены строгие условия устойчивости и сходимости. Показано, что системы могут иметь весьма сложное поведение, которое в значительной степени зависит от входного сигнала; система может вести себя хаотично в присутствии немоделируемой динамики, особенно при плохом выборе расчетных параметров. Ведутся весьма интересные разработки в области адаптивного управления нелинейными системами. Они идут в нескольких направлениях. Одно из направлений стимулируется новыми достижениями в нелинейной теории управления, в основе другого лежит использование нейронных сетей. Проводятся также исследования в сфере систем с переключениями.

Перечисленные идеи и подходы лежат в основе промышленных изделий. Настройка регуляторов – поистине плодотворная область. Для простых регуляторов типа ПИД создано несколько поколений автонастройщиков. Эти системы сейчас включают в себя такие функции, как автоматическая настройка, автоматическая генерация программ для изменения коэффициента усиления, непрерывная настройка параметров прямой и обратной связи. Все это реализовано таким образом, что системы весьма просты в использовании.

Несмотря на достигнутый прогресс, достаточное число сложных проблем требуют разрешения. Огромное значение приобретает введение в самонастраивающиеся регуляторы элементов дуального управления. Весьма интересная и важная с позиций зрения приложения к автоматической настройке теоретическая проблема – классификация всех линейных

систем, имеющих единственный устойчивый предельный цикл при релейной обратной связи. Решение этой задачи позволит указать ситуации, в которых безопасно использование релейной обратной связи.

Даже скромные усовершенствования существующих адаптивных систем открывают широкие возможности для создания систем с интегрированным управлением и диагностикой, общим оцениванием контура и качества.

Список литературы

1. Alam M.A. A multivariable self-tuning controller for industrial application: Preprints 9th IFAC World Congress. Budapest, Hungary, 1984. P. III: 259...262.
2. Alam M.A., Carlson D.H. Adaptive control, 3M experience / Proc. 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA. Session WA06. 1995.
3. Allison B.J., Ciarniello J.E., Tessier P.J.-C., Dumont G.A. Dual adaptive control of chip refiner motor load // Automatica. 1995. Vol. 31. № 8. P. 1169...1184.
4. Anderson B.D.O., Bitmead R.R., Johnson C.R., Jr., et al. Stability of Adaptive Systems: Passivity and Averaging Analysis. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
5. Arzén K.-E. An architecture for expert system based feedback control // Automatica. 1989. Vol. 25. № 6. P. 813...827.
6. Åström K.J. Assessment of achievable performance of simple feedback loops // International J. Adaptive Control and Signal Processing. 1991. Vol. 5. P. 3...19.
7. Åström K.J. Oscillations in systems with relay feedback / K.J. Åström et al., Eds. Adaptive Control, Filtering, and Signal Processing // IMA Volumes in Mathematics and its Applications. Springer-Verlag, 1995. Vol. 74. P. 1...25.
8. Åström K.J., Anton J.J., Arzén K.-E. Expert control // Automatica. 1986. Vol. 22. № 3. P. 277...286.
9. Åström K.J., Hagglund T. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins // Automatica. 1984. Vol. 20. P. 645...651.
10. Åström K.J., Hagglund T. New tuning methods for PID controllers / European Control Conference. Rome, Italy, 1995.
11. Åström K.J., Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, USA, 1995. Second edition.
12. Åström K.J., Hagglund T., Hang C.C., Ho W.K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers – A survey // Control Engineering Practice. 1993. Vol. 1. № 4. P. 699...714.
13. Åström K.J., Helmersson A. Dual control of an integrator with unknown gain // Comp. & Maths. with Appls. 1986. Vol. 12A. № 6. P. 653...662.
14. Åström K.J., Wittenmark B. Adaptive control. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. Second edition.
15. Atherton D.P. Nonlinear control Engineering – Describing Function Analysis and Design. London, UK: Van Nostrand Reinhold Co, 1975.
16. Bar-Shalom Y., Tse E. Concepts and methods in stochastic control / In: Leonard, Ed. Control and Dynamic Systems – Advances in Theory and Applications. Vol. 12. New York: Academic Press, 1976.
17. Bayard D.S., Eslami M. Implicit dual control for general stochastic systems // Opt. Control Appl. Methods. 1985. Vol. 6. P. 265...273.
18. Becker A., Kumar P.R., Wei C.Z. Adaptive control with the stochastic approximation algorithm // IEEE Trans. on Automatic Control. 1985. Vol. 30. № 4. P. 330...338.
19. Bellman R. Dynamic Programming. New Jersey: University Press, 1957.
20. Bellman R. Adaptive Control Processes – A Guided Tour. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1961.
21. Bengtsson G., Egardt B. Experiments with self-tuning control in the process industry: Preprints 9th IFAC World Congress. Budapest, Hungary, 1984. P. XI: 132...140.
22. Bernhardsson B. Dual control of a first-order system with two possible gains // International J. Adaptive control and Signal Processing. 1989. Vol. 3. P. 15...22.
23. Bialkowski W.L. Dreams versus reality: A view from both sides of the gap // Pulp and Paper Canada. 1993. Vol. 94. № 11.
24. Bitmead R.R. Iterative control design approaches: Preprints IFAC 12th World Congress. Sidney, Australia, 1993. Vol. 9. P. 381...384.
25. Bratthegård O. Adaptive control in a continuous digester: Preprints Control Systems-94. Stockholm, Sweden: Swedish Pulp and Paper Research Institute, 1994.
26. Brown L.J., Meyn S.P. Adaptive dead time compensation / Proc. 34th IEEE Conference on Decision and Control. Session FM06. New Orleans, LA, 1995. P. 3435-3437.
27. Brown L.J., Meyn S.P. Adaptive dead time compensation with application to a robotic welding system // IEEE Trans. Control Technology. 1995. Submitted.

28. Brown M., Harris C. Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control. Prentice Hall, 1994.
29. Caldwell W.I. Control system with automatic response adjustment. American Patent, 2517081. 1950. Filed April 1947.
30. Campion G., Bastin G. Indirect adaptive state-feedback control of linearly parametrized nonlinear systems // International J. Adaptive Control and Signal Processing. 1990. Vol. 4. P. 345...358.
31. Camudis de Wit C. Adaptive Control for Partially Known Systems. Amsterdam: Elsevier, 1988.
32. Chen H.F., Caines P.E. Strong consistency of stochastic gradient algorithms of adaptive control // IEEE Trans. Automatic Control. 1985. Vol. 30. № 2. P. 189...192.
33. Chen H.F., Guo L. Asymptotically optimal adaptive control with consistent parameter estimates // SIAM J. Control and Optimization. 1987. Vol. 25. № 3. P. 558...575.
34. Chen H.F., Guo L. Identification and Stochastic Adaptive Control. Boston: Birkhäuser, 1991.
35. Chen H.F., Zhang J.F. Identification and adaptive control for systems with unknown orders, time-delay and coefficients (uncorrelated noise case) // IEEE Trans. Automatic Control. 1990. Vol. 35. № 8. P. 866...877.
36. Clarke D.W., Hinton C.E. Adaptive control of a materials-testing machine / Colloquium on Applications of Nonlinear and Adaptive Control to Physical Systems. Rome, Italy. European HCM Network on Nonlinear and Adaptive Control, 1995.
37. Cruze J.B., Jr. Systems Sensitivity Analysis. Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross, 1973.
38. Demin S., Gang W., Fuming W., et al. Auto-tuning of PID parameters and its applications in industrial processes / 1994 Hong Kong International Workshop on New Directions of Control and Manufacturing (HKIWNDCM'94). Hong Kong, 1994. P. 117...122.
39. Egardt B. Stability of adaptive controllers // Lecture Notes in Control and Information Sci. 1979. Vol. 20. Berlin, FRG: Springer-Verlag, 1979.
40. Ender D.B. Process control performance: Not as good as you think // Control Engineering 1993. Vol. 40. № 10. P. 180...190.
41. Feldbaum A.A. Dual control theory. I-IV // Automation Rem. Control. 1960-61. Vols. 21, 22. P. 874...880, 1033...1039, 1...12, 109...121.
42. Filatov N.M., Unbehauen H. Adaptive predictive control policy for nonlinear stochastic systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1995. Vol. 40. № 11.
43. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в больших системах. М.: Наука, 1990.
44. Gawthrop P.J. Continuous-Time Self-Tuning Control. Vol. 1. Design/Engineering Control Series. Lechworth, UK: Research Studies Press, Ltd, 1987.
45. Gawthrop P.J. Continuous-Time Self-Tuning Control. Vol. 2. Implementation / Engineering Control Series. Taunton, UK: Research Studies Press, Ltd, 1990.
46. Gevers M. Towards a joint design of identification and control? / Trentelman, Williams, Eds. Essays on Control: Perspectives in the theory and Its Applications, ECC'93. Groningen: Birkhäuser, 1993. P. 111...151.
47. Ghanadan R., Blankenship G.L. Adaptive control of nonlinear systems via approximate linearization // IEEE Trans. on Automatic Control. 1996. (В печати).
48. Goodwin G.C., Ramadge P.J., Caines P.E. Discrete-time multivariable adaptive control // IEEE Trans. On Automatic Control. 1980. Vol. AC-25. P. 449...456.
49. Goodwin G.C., Sin K.S. Adaptive Filtering, Prediction and Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.
50. Graves C.H., Veres S.M. Adaptive control by worst-case duality: Preprints 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, ACASP'95. Budapest, Hungary, 1995. P. 73-78.
51. Gregory P.C., Ed. Proc. Self-Adaptive Flight Control Symposium. Wright Air Development Center, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, 1959.
52. Guo L. Convergence and logarithm laws of self-tuning regulators // Automatica. 1995. Vol. 31. № 3. P. 435...450.
53. Guo L., Chen H.F. The åström-wittenmark's self-tuning regulator revisited and ELS-based adaptive trackers // IEEE Trans. Automatic Control. 1991. Vol. 30. № 7. P. 802...812.
54. Hagglund T., Åström K.J. Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques // Automatica. 1991. Vol. 27. P. 599...609.
55. Hang C.C., Åström K.J., Ho W.K. Relay auto-tuning in the presence of static load disturbances // Automatica. 1993. Vol. 29. № 2. P. 563...564.
56. Hang C.C., Lee T.H., Ho W.K. Adaptive Control. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, USA, 1993.
57. Hjalmarsson H., Gevers M., De Bruyne F. For model-based control design, closed-loop identification gives better performance // Automatica. 1996. (В печати).
58. Hjalmarsson H., Gunnarsson S., Gevers M. A convergent iterative restricted complexity control design scheme / Proc. 33rd IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, FL, USA. 1994. P. 1735...1740.
59. Hunt K.J., Haas R., Kalkkuhl J.C. Local controller network for autonomous vehicle steering / Proc. IFAC 13. Triennial World Congress. San Francisco, USA, 1996.
60. Hunt K.J., Sharbaro D., Zbikowski B., Gawthrop P.J. Neural networks for control systems - a survey // Automatica. 1992. Vol. 28. P. 1083...1112.
61. Hunt L.R., Su R., Meyer G. Global transformations of nonlinear systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1983. Vol. 28. P. 24...31.
62. Ioannou P.A., Datta A. Robust adaptive control: A unified approach // Proc. IEEE. 1991. Vol. 79. P. 1736...1768.
63. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
64. Isermann R., Lachmann K.-H., Matko D. Adaptive Control Systems. London, UK: Prentice Hall, 1992.
65. Isidori A. Nonlinear Control Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 3rd edition.
66. Jang J.S.R. Neuro-fuzzy modeling and control // Proc. IEEE. 1995. Vol. 83. № 3. P. 378...406.
67. Jones V.K. Towards Adaptive Control of a Spark-Ignition Engine. Ph. D. Thesis. Stanford University, 1995.
68. Juditsky A., Hjalmarsson H., Benveniste A., et al. Nonlinear black-box models in system identification: Mathematical foundations // Automatica. 1995. Vol. 31. № 4. P. 1725...1750.
69. Kalman R.E. Design of a self-optimizing control system // Trans. ASME. 1958. Vol. 80. P. 468...478.
70. Kaminer I., Pascoal A.M., Khargonekar P.P., Coleman E.E. A velocity algorithm for the implementation of gain-scheduled controllers // Automatica. 1995. Vol. 31. № 8. P. 1185...1192.
71. Kanellakopoulos I. Raptive adaptive control of nonlinear systems // Int. J. Adaptive Control and Signal Processing. 1993. Vol. 7. P. 339...352.
72. Kanellakopoulos I., Kokotović P.V., Morse A.S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1991. Vol. 36. P. 1241...1253.
73. Kanellakopoulos I., Kokotović P.V., Morse A.S. Adaptive output-feedback control of systems with output nonlinearities // IEEE Trans. Automatic Control. 1992. Vol. 37. P. 1266...1282.
74. Kokotović P.V. Foundations of Adaptive Control. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
75. Kokotović P.V. The joy of feedback: Nonlinear and adaptive // Control Systems Magazine. 1991. Vol. 12. P. 7...17.
76. Koren Y., Ulsoy A.G. Adaptive control / Metals handbook. Vol. 16. Machining. Cleveland: ASM, 1989. P. 618...626.
77. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Nonlinear design of adaptive controllers for linear systems // IEEE Trans. Automatic Control. 1994. Vol. 39. P. 783...752.
78. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Passivity and parametric robustness of a new class of adaptive systems // Automatica. 1994. Vol. 30. P. 1703...1716.
79. Krstić M., Kanellakopoulos I., Kokotović P.V. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: John Wiley & Sons, 1995.
80. Krstić M., Kokotović P.V. Adaptive nonlinear design with controller-identifier separation and swapping // IEEE Trans. Automatic Control. 1995. Vol. 40. P. 426...440.
81. Krstić M., Kokotović P.V., Kanellakopoulos I. Transient performance improvement with a new class of adaptive controllers // Systems & Control Letters. 1993. Vol. 21. P. 451...461.
82. Kuipers B., Åström K.J. The composition and validation of heterogeneous control laws // Automatica. 1994. Vol. 30. № 2. P. 233...249.
83. Kumar P.R., Praly L. Self-tuning trackers // SIAM J. Control and Optimization 1989. Vol. 25. № 4. P. 1053...1071.
84. Kumar P.R., Varaiya P. Stochastic Systems: Estimation, Identification and Adaptive Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1986.
85. Lai T.L., Wei C.Z. Least squares estimate in stochastic regression with applications to identification and control of dynamic systems // Ann. Math. Stat. 1982. Vol. 10. P. 154...166.
86. Lauderbaugh L.K., Ulsoy A.G. Model reference adaptive force control in milling // J. Engineering for Industry. 1989. Vol. 111. February. P. 13...21.
87. Lawrence D.A., Rugh W.J. Gain scheduling dynamic linear controllers for a nonlinear plant // Automatica. 1995. Vol. 31. № 3. P. 381...390.
88. Lee W.S., Anderson B.D.O., Mareels I.M.Y., Kosut R.L. On some key issues in the windsurfer approach to adaptive robust control // 1995. Vol. 31. № 11. P. 1619...1636.
89. Levin A.U., Narendra K.S. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: Controllability and stabilization // IEEE Trans. Neural Networks. 1993. Vol. 4. P. 192...206.
90. Lin W., Kumar P.R., Seidman T.I. Will the self-tuning approach work for general cost criteria // Systems & Control Letters. 1985. Vol. 6. P. 77...85.

91. *Ljung L.* System Identification – Theory for the User. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1987. (Есть пер.: *Льонг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991).
92. *Lundh M., Åström K.J.* Automatic initialization of a robust self-tuning controller // *Automatica*. 1994. Vol. 30. № 11. P. 1649...1662.
93. *Matsumura S., Ogata K., Fujii S., et al.* Adaptive control for the steam temperature of thermal power plants // *Control Engineering Practice*. 1994. Vol. 2. P. 567...575.
94. *Meyer G., Su R., Hunt L.R.* Application of nonlinear transformations to automatic flight control // *Automatica*. 1984. Vol. 20. P. 103...107.
95. *Modén P.E.* Experience with adaptive control since 1982 / Proc. 34th IEEE Conference on Decision and Control/ New Orleans, LA, 1995. P. 667...672.
96. *Modén P.E.* Pidcona – A complete autotuning PID controller / Preprints 3rd IFAC Workshop on Algorithms and Architecture for Real-Time Control, AARTC'95, Ostend, Belgium, 1995. P. 385...390.
97. *Monopoli R.V.* Model reference adaptive control with an augmented error signal // *IEEE Trans. on Automatic Control*. 1974. Vol. AC-19. P. 474...484.
98. *Moraal P.E.* Adaptive compensation of fuel dynamics in an SI engine using a switching EGO sensor / Proc. 34th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, 1995. WA06.
99. *Morse A.S.* Control using logic-based switching / A. Isidori, Ed. Trends in Control. A European Perspective. Springer, 1995. P. 69...113.
100. *Naik S.M., Kumar P.R., Ydstie B.E.* Robust continuous-time adaptive control by parameter projection // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol. 37. P. 182...197.
101. *Narendra K.S.* Ed. Adaptive and Learning systems – Theory and Applications. New York: Plenum Press, 1986.
102. *Narendra K.S., Annaswamy A.M.* A new adaptive law for robust adaptation without persistent excitation // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1987. Vol. AC-32. P. 134...145.
103. *Narendra K.S., Annaswamy A.M.* Stable Adaptive Systems. New Jersey: Prentice Hall, 1989.
104. *Narendra K.S., Parthasarathy K.* Identification and control of dynamical systems using neural networks // *IEEE Trans. Neural Networks*. 1990. Vol. 1. P. 4...27.
105. *Narendra K.S., Valavani L.S.* A comparison of Lyapunov and hyperstability approaches to adaptive control of continuous systems // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1980. Vol. AC-25. P. 243...247.
106. *Nijmeijer H., Schaft A., van der.* Nonlinear Dynamical Control Systems. New York, Springer-Verlag, 1990.
107. *Ninness B., Goodwin G.C.* Estimation of model quality // *Automatica*. 1995. Vol. 31. № 12. P. 1771...1798.
108. *Ortega R., Praly L., Landau I.D.* Robustness of discrete-time direct adaptive controllers // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1985. Vol. AC-30. P. 1179...1187.
109. *Ortega R., Yu T.* Robustness of adaptive controllers: A survey // *Automatica*. 1989. Vol. 25. № 5. P. 651...678.
110. *Persson P., Åström K.J.* Dominant pole design – A unified view of PID controller tuning: Preprints 4th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. Grenoble, France, 1992. P. 127...132.
111. *Persson P., Åström K.J.* PID control revisited: Preprints IFAC 12th World Congress. Sidney, Australia, 1993.
112. *Praly L.* Global stability of a direct adaptive control scheme with respect to a graph topology / K.S. Narendra, Ed. Adaptive and Learning systems – Theory and Applications. New York: Plenum Press, 1986.
113. *Praly L., Lin S-F., Kumar P.R.* A robust adaptive minimum variance controller // *SIAM J. Control and Optimization*. 1989. Vol. 27. P. 235...266.
114. *Ren W., Kumar P.R.* Stochastic parallel model adaptation: Theory and applications to active noise canceling, feedforward control, IIR filtering and identification // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol. 37. № 5. P. 566...578.
115. *Rohrs C., Valavani L.S., Athans M., Stein G.* Robustness of continuous-time adaptive control algorithms in the presence of unmodeled dynamics // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1985. Vol. AC-30. P. 881...889.
116. *Rugh W.J.* Analytical framework for gain scheduling // *IEEE Control Systems Magazine*. 1991. Vol. 11. P. 79...84.
117. *Santer R.M., Slotine J.-J.E.* Gaussian networks for direct adaptive control // *IEEE Trans. Neural Networks*. 1992. Vol. 3. P. 837...863.
118. *Sastry S., Bodson M.* Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. New Jersey, Prentice-Hall, 1989.
119. *Sastry S.S., Isidori A.* Adaptive control of linearizable systems // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1989. Vol. 34. P. 1123...1131.
120. *Schei T.S.* A method for closed loop automatic tuning of PID controllers // *Automatica*. 1992. Vol. 28. № 3. P. 587...591.
121. *Schrama R.J.P.* Accurate identification for control: The necessity of an iterative scheme // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol. 37. P. 991...994.
122. *Shamma J.S., Athans M.* Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1990. Vol. 35. P. 898...907.
123. *Shamma J.S., Athans M.* Gain scheduling: Potential hazards and possible remedies // *IEEE Control Systems Magazine*. 1992. June. P. 101...107.
124. *Shinskey F.G.* Process-Control Systems. Application, Design, and Tuning. New York: McGraw-Hill, 1988. 3rd edition.
125. *Shinskey F.G.* How good are our controllers in absolute performance and robustness // *Measurement and Control*. 1990. Vol. 23. May. P. 114...121.
126. *Simon H.A.* Dynamic programming under uncertainty with a quadratic criterion function // *Econometrica*. 1956. Vol. 24. P. 74...81.
127. *Sjöberg J., Zhang Q., Ljung L., et al.* Nonlinear black-box modeling in system identification. A unified overview // *Automatica*. 1995. Vol. 31. № 12. P. 1691...1724.
128. *Skelton R.E.* Model error concepts in control design // *Int. J. Control*. 1989. Vol. 49. P. 1725...1753.
129. *Slotine J.-J.E., Li W.* On the adaptive control of robot manipulators // *Int. J. Robotics Research*. 1987. Vol. 6. P. 49...59.
130. *Slotine J.-J.E., Li W.* Adaptive manipulator control. A case study // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1988. Vol. 33. P. 995...1003.
131. *Smith R.S., Doyle J.C.* Model validation: A connection between robust control and identification // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1992. Vol. 37. № 7. P. 942...952.
132. *Smith R.S., Doyle J.C.* Closed loop relay estimation of uncertainty bounds for robust control models: Preprints IFAC 12th World Congress. Sidney, Australia, 1993. Vol. 9. P. 57...60.
133. *Sternby J.* A simple dual control problem with an analytical solution // *IEEE Trans. Automatic Control*. 1976. Vol. AC-21. P. 840...844.
134. *Tao G., Kokotović P.V.* Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities. 1996. (В печати).
135. *Teel A.R., Kadiyala R.R., Kokotović P.V., Sastry S.S.* Indirect techniques for adaptive input-output linearization of non-linear systems // *Int. J. Control*. 1991. Vol. 53. P. 193...222.
136. *Tsympkin Ya. Z.* Relay control systems. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1984.
137. *Turin R.C., Geering H.P.* Model-based adaptive fuel control in an SI engine. Paper 930857, SAE. 1994.
138. *Ulsoy A.G., Koren Y.* Applications of adaptive control to machine tool process control // *IEEE Control Systems Magazine*. 1989. June. P. 33...37.
139. *Ulsoy A.G., Koren Y., Rasmussen F.* Principal developments in the adaptive control of machine tools // *J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1983. 105: 107...112.
140. *Van den Hof P.M.J., Schrama R.J.P.* Identification and control – closed-loop issues. // *Automatica*. 1995. Vol. 31. № 12. P. 1751...1770.
141. *Veres S.M.* Weak-duality in worst-case adaptive control: Preprints 1994 American Control Conference. Baltimore, MD. 1994. P. 75...79.
142. *Wang L.-X.* Adaptive Fuzzy Systems and Control Design and Stability Analysis. Prentice Hall. 1994.
143. *Whitaker H.P., Yarmon J., Kezer A.* Design of model-reference adaptive control systems for aircraft. Report R-164. Instrumental Laboratory, Massachusetts Institute of Technology. 1958.
144. *Wittenmark B.* Adaptive control methods: An overview / 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing. Budapest, Hungary, 1995. P. 67...72. Invited paper.
145. *Wittenmark B., Elevitch C.* An adaptive control algorithm with dual features / Preprint 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation. York, UK, 1985. P. 587...592.
146. *Ydstie B.E.* Stability of discrete model reference adaptive control – revisited // *Systems Control Letters*. 1989. Vol. 13. P. 1429...1438.
147. *Zang Z., Bitmead R.R., Gevers M.* Iterative weighted least squares identification and weighted LQG control design // *Automatica*. 1995. Vol. 31. № 11. P. 1577...1594.
148. *Ziegler J.G., Nichols N.B.* Optimum settings for automatic controllers // *Trans ASME*. 1942. Vol. 64. P. 759...768.