

На правах рукописи

СИМАКОВ Александр Александрович

**АЛГОРИТМЫ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ
В СИСТЕМАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ
ДИСКРЕТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (отрасль: информатика, вычислительная техника и
управление)**

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2002

Работа выполнена на кафедре “Автоматика и системы управления” Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: кандидат технических наук, доцент,
Когут Алексей Тарасович.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор,
Кориков Анатолий Михайлович;
кандидат технических наук, доцент,
Барковский Александр Николаевич.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Новосибирский государственный технический
университет

Защита состоится 20 ноября 2002 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.06



М.А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из разделов в современной теории автоматического управления является построение адаптивных систем, осуществляющих некоторым наилучшим способом управление объектом при неполной информации о его свойствах и возможных детерминированных или стохастических внешних возмущениях.

Известными работами в теории адаптивного управления являются труды А. А. Фельдбаума, Я. З. Цыпкина, И. Д. Ландау, Б. Н. Петрова, В. В. Солодовникова, А. А. Красовского, Дж. И. Гибсона, Дж. Н. Саридиса, А. Л. Фрадкова, Б. Н. Крутько, В. Н. Фомина, В. А. Якубович, И. Б. Ядыкина, А. Б. Данилина, А. И. Рубана, А. М. Корикина, А. В. Тимофеева, П. И. Чинаева.

При синтезе адаптивных систем достаточно широко используется процедура, когда на основе заданных или желаемых характеристик или полученной заранее с помощью программного управления траектории задающего воздействия, проектируется детерминированная следящая система. Как правило, при средних статистических значениях параметров и внешних возмущений она обладает некоторыми показателями качества и точности процессов управления, вообще говоря, хуже заданных.

В диссертационной работе любые по физической природе и динамическим свойствам объекты описываются адекватными дискретными моделями, как в переменных состояния, так и однородными разностными уравнениями. При таком подходе определение закона управления на финитном и даже теоретически бесконечном времени сводится к поиску величины управляющего воздействия для каждого момента дискретизации с использованием локальных функционалов качества.

Одним из способов построения таких систем является метод прямого синтеза закона управления, разработанный Б. Н. Петровым, П. Д. Крутько и в дальнейшем развитый А. И. Рубаном. Управление отыскивается в виде функции текущего состояния объекта, его параметров и предыдущих значений управляющего воздействия.

В случае отсутствия аналитического решения (или его сложности) применяют аппроксимацию модели линейным отрезком ряда Тейлора, что приводит к необходимости построения итерационной процедуры, аналогичной градиентному поиску, область и скорость сходимости которого ограничены, а при достаточно больших начальных приближениях наблюдается расхождение вычислительного процесса (неустойчивость синтезируемой системы). С целью улучшения свойств алгоритма А. И. Рубан предлагает использовать разработанный им метод последовательной линеаризации (МПЛ). В МПЛ на каждом шаге определения управления вводится множитель, величина которого за счет

дополнительных итераций позволяет с более высокой скоростью получать искомое решение. С вычислительной точки зрения – это аналог метода наискорейшего спуска. Проведенные автором эксперименты показали, что МПЛ не всегда сходится, особенно при значительном удалении начального приближения от искомой точки.

В работе предлагается, для расширения области устойчивости, уточнить модель объекта управления за счет введения вторых производных в формуле Тейлора. Однако полученная аппроксимация не линейна относительно управления, что не позволяет непосредственно из приближенной модели решить задачу прямого синтеза. Чтобы получить линейную зависимость относительно управляющего воздействия, в работе применяется методика полиномиальной аппроксимации (ПА), на основе которой построены алгоритмы управления, названные алгоритмами второго порядка (АВП).

Суть ПА состоит в учете при аппроксимации нелинейных зависимостей вторых и высших членов разложения функции в ряд Тейлора с сохранением линейной процедуры определения управляющего воздействия.

Недостаточность априорной информации восполняется в адаптивной системе, где во многих случаях требуется использовать достаточно простые, но эффективные методы оценивания и идентификации.

Цель работы. Целью настоящей работы является построение и исследование алгоритмов второго порядка поиска управляющего воздействия для дискретных нелинейных объектов, полученных с применением полиномиальной аппроксимации и синтез на их основе адаптивной системы с использованием методов оценивания параметров и состояний объектов.

Задачи исследования.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие основные задачи:

- 1) разработана методика учета вторых производных в линеаризации модели с применением полиномиальной аппроксимации;
- 2) построена рекуррентная процедура управления на основе алгоритмов второго порядка;
- 3) проведен сравнительный анализ показателей качества динамики объекта управления в системах, построенных на алгоритмах второго порядка и соответствующих классических;
- 4) построена адаптивная система на основе алгоритмов управления, оценивания состояний и параметров объекта, их программная реализация и проведены экспериментальные исследования алгоритмов на модельных примерах.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились с привлечением теории матриц, теории управления, оценивания и идентификации.

Проверка работоспособности и эффективности алгоритмов осуществлялась средствами математического моделирования на ЭВМ с использованием современных средств автоматизации математических вычислений, которые сравнивались с результатами лабораторных испытаний робототехнического комплекса.

Результаты, выносимые на защиту:

- 1) вычислительные формы алгоритмов управления второго порядка;
- 2) процедуры, построенные на базе алгоритмов управления второго порядка;
- 3) результаты анализа свойств и устойчивости алгоритмов управления второго порядка;
- 4) адаптивная система управления деревообрабатывающим робототехническим комплексом «Мастер».

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) применении методики полиномиальной аппроксимации для построения алгоритмов управления нелинейными дискретными объектами;
- 2) разработке двухступенчатой и многошаговой рекуррентных процедур для алгоритмов управления второго порядка;
- 3) обосновании возможности повышения порядка аппроксимации в классическом методе последовательной линеаризации;
- 4) разработке программного обеспечения адаптивной системы управления нелинейными дискретными объектами на основе алгоритмов второго порядка.

Практическая ценность.

Разработаны и исследованы адаптивные системы управления нелинейными дискретными объектами, имеющие более широкую область допустимых значений начальных приближений параметров и задающих воздействий, чем в работающих системах. Разработан комплекс программ, реализующий подсистемы управления, оценивания состояния и параметрической идентификации объекта в среде автоматизации математических вычислений MatLAB.

Реализация результатов работы.

Результаты работы использованы при разработке адаптивной системы управления деревообрабатывающим робототехническим комплексом «Мастер».

Теоретические результаты и программное обеспечение используются в учебном процессе при проведении занятий и выполнении курсовых работ по дисциплинам «Локальные системы управления» и «Моделирование систем управления» для студентов специальности 2101 – Управление и информатика в технических системах. Внедрение результатов подтверждается соответствующими актами.

Диссертационная работа выполнялась в рамках госбюджетной НИР “Разработка и исследование автоматизированных методов идентификации, управления и обработки информации в технических системах” (1996 – 1999 гг. № ГР 01.9.60000794), проводимой в Омском государственном университете путей сообщения.

Апробация работы.

Основной материал диссертации представлен в научных докладах, которые обсуждались на II-й и III-й международных научно-технических конференциях “Динамика систем, механизмов и машин” (ОГТУ, Омск, 1997г., 1999г.); международной научно-технической конференции “Проблемы оптимизации и экономические приложения” (ИИТПМ, Омск, 1997г.); межвузовской научно-технической конференции “Железнодорожный транспорт Сибири: проблемы и перспективы” (ОмГУПС, Омск, 1998г.); научно-техническом семинаре “Моделирование сложных систем” (ОФИМ им. С.Л. Соболева СО РАН, Омск, 2002г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 статей и 4 тезиса докладов, оформлено 4 отчета по НИР.

Структура и объем работы Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения и содержит 133 страницы, включая 100 страниц машинописного текста, 53 рисунка и 2 таблицы на 32 страницах, список литературы из 164 наименований на 15 страницах, 12 страниц приложений с текстами программ и актами о внедрении результатов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы работы, излагаются цели и содержание работы, указывается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассматривается постановка задачи оптимального управления и дан обзор основных методов ее решения. Приведен анализ классического и метода последовательной линеаризации.

Исследуется класс объектов, динамика которых описывается одномерным разностным уравнением с известными параметрами:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k)], \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x(k)$ – измеряемая координата переменной состояния;

$u(k)$ – управляющее воздействие;

k – шаг дискретизации;

$f[x(k), u(k)]$ – нелинейная функция.

Функция $f[x(k), u(k)]$ обладает свойствами непрерывности относительно аргумента u , причем

$$|u(k)| \leq U. \quad (2)$$

Решается задача поиска в каждый дискретный момент времени такого управляющего воздействия (с учетом реальных ограничений (2)), которое доставляет системе движение по заданной траектории $g(k)$ и минимизирует квадратичный функционал вида:

$$I(k+1) = [x(k+1) - g(k+1)]^2. \quad (3)$$

Функция $g(k)$ выбирается таким образом, чтобы обеспечить желаемые свойства системы.

Минимум функционала (3) достигается, если существует решение уравнения:

$$f[x(k), u(k)] = g(k+1). \quad (4)$$

Задача поиска управления формируется в следующей форме:

$$u(k) = f_u^{-1}[x(k), g(k+1)], \quad (5)$$

где $f_u^{-1}(\cdot)$ – функция обратная к $f(\cdot)$ по аргументу $u(k)$.

Решение (5) в аналитическом виде в общем случае не существует, поэтому применяются методы поиска управляющего воздействия, построенные на аппроксимации модели (1). В методе последовательной линеаризации используется отрезок ряда Тейлора для функции $f[x(k), u(k)]$, в котором присутствуют только производные первого порядка. Исследователями в ряде научных работ показано, что устойчивость динамической системы обеспечивается только при малых отклонениях начальных приближений от истинных значений управляющего воздействия.

Приведен анализ области устойчивости на примере нелинейного дискретного объекта с помощью математического моделирования процессов динамики системы управления и подтверждается узкая область устойчивости. Делается вывод о расширении области устойчивости системы управления, если при аппроксимации модели объекта учитываются квадратичные члены ряда Тейлора.

Во второй главе исследуются системы эффективного управления, построенные на алгоритме второго порядка (АВП) и его модификации (АВПМ), основанных на полиномиальной аппроксимации.

Функция $f[x(k), u(k)]$ аппроксимируется многочленом Тейлора второго порядка при условии, что членами ряда более высокого порядка можно пренебречь, тогда модель динамики объекта запишется в виде:

$$x(k+1) = f_k + \nabla f_k \Delta u(k) + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \Delta u(k) \Delta u(k), \quad (6)$$

где $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$;

$$f_k = f[x(k), u(k-1)];$$

$$\nabla^p f_k = \frac{\partial^p f(x, u)}{\partial u^p} \Big|_{u=u(k-1); x=x(k)}, p = 1, 2.$$

Для функции f_k необходимо существование аналитических частных производных по аргументу $u(k)$ до второго порядка включительно.

В соответствии с уравнением (4) решение относительно управляющего воздействия находим из следующей записи:

$$g(k+1) = f_k + \nabla f_k \Delta u(k) + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \Delta u(k) \Delta u(k). \quad (7)$$

Непосредственно из уравнения (7) нельзя в общем случае аналитически выразить управляющее воздействие, т.к. в данном выражении присутствует нелинейная зависимость относительно $\Delta u(k)$.

Для устранения нелинейности предлагается применить методику полиномиальной аппроксимации, на основании которой выражение (7) приводится к линейному виду заменой одной или двух разностей $\Delta u(k)$ на известное приближенное к ней значение $\delta u(k)$. Причем из условия о точности разложения ряда Тейлора при малых $\Delta u(k)$ следует очевидное неравенство:

$$\delta u(k) \leq \Delta u(k). \quad (8)$$

Подстановка известной величины $\delta u(k)$ в формулу (7) приводит к трем выражениям:

$$g(k+1) = f_k + \{ \nabla f_k + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta u(k) \} \Delta u(k); \quad (9)$$

$$g(k+1) = \{ f_k + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta^2 u(k) \} + \nabla f_k \Delta u(k); \quad (10)$$

$$g(k+1) = \{ f_k + \nabla f_k \delta u(k) \} + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta u(k) \Delta u(k), \quad (11)$$

или относительно неизвестного управляющего воздействия $u(k)$:

$$u(k) = u(k-1) + \{ \nabla f_k + \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta u(k) \}^{-1} [g(k+1) - f_k]; \quad (12)$$

$$u(k) = u(k-1) + \{ \nabla f_k \}^{-1} [g(k+1) - f_k - \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta^2 u(k)]; \quad (13)$$

$$u(k) = u(k-1) + \{ \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta u(k) \}^{-1} [g(k+1) - f_k - \nabla f_k \delta u(k)]. \quad (14)$$

Три формы решения (12), (13) и (14) позволяют вычислять управление $u(k)$ на текущем шаге, используя предыдущие значения $u(k-1)$ и известную величину $\delta u(k)$.

В зависимости от выбора $\delta u(k)$ можно получить двухступенчатую и многошаговую процедуры. В двухступенчатой значение $\delta u(k)$ на каждом шаге определяется как разность двух приближенных к $u(k)$ значений:

$$\delta u(k) = u^*(k) - u(k-1), \quad (15)$$

где $u(k-1)$ – величина управляющего воздействия на предыдущем шаге; $u^*(k)$ является первым приближением к значению $u(k)$ и определяется методом последовательной линеаризации.

На второй ступени значение $\delta u(k)$ подставляется в одну из форм (12), (13) и (14) записи решения.

В многошаговой процедуре классический метод применяется только в начале итерационного процесса (рассчитывается $\delta u(k)$ по формуле (15)), а на последующих шагах используются управления, найденные на предыдущих итерациях:

$$\delta u(k) = u(k-1) - u(k-2). \quad (16)$$

Повысить качество управления объектами, описанных уравнением (1) можно по аналогии с МПЛ за счет введения на каждом шаге варьируемого коэффициента γ^ℓ . Тогда получим следующие формы решений для модифицированного алгоритма второго порядка (АВПМ):

$$u(k) = u(k-1) + \left\{ \nabla f_k + \frac{1}{2} \gamma^\ell \nabla^2 f_k (u^*(k) - u(k-1)) \right\}^{-1} [g(k+1) - f_k]; \quad (17)$$

$$u(k) = u(k-1) + \left\{ \nabla f_k \right\}^{-1} \left[g(k+1) - f_k - \frac{1}{2} \gamma^\ell \nabla^2 f_k (u^*(k) - u(k-1))^2 \right]; \quad (18)$$

$$u(k) = u(k-1) + \left\{ \gamma^\ell \frac{1}{2} \nabla^2 f_k \delta u(k) \right\}^{-1} [g(k+1) - f_k - \nabla f_k \delta u(k)]. \quad (19)$$

Для выбора оптимального значения γ^ℓ вводится дополнительная итерационная процедура, в которой γ^ℓ изменяется по методу дихотомии в пределах $0 < \gamma^\ell \leq 1$.

Реализация схем АВПМ проводилась по двухступенчатой и многошаговой процедурам.

С помощью имитационного моделирования исследованы АВП и АВПМ на примере нелинейного дискретного объекта. Проведен сравнительный анализ качественных характеристик процессов в системе управления для алгоритмов

второго порядка и классических алгоритмов первого порядка при различных вычислительных формах и процедурах.

В работе под сходимостью алгоритма управления понимается приближение траектории входного воздействия $u(k)$, рассчитанной данным алгоритмом к оптимальной кривой $u_{opt}(k)$, которая получена аналитически и обеспечивает движение динамической системы по заданной траектории $g(k)$ при условии, что величина начального приближения $u(0)$ находится в области допустимых значений.

Сходимость алгоритмов управления, построенных по одной из трех форм (12), (13) и (14) приближенного решения, существенно влияет на устойчивость всей динамической системы. Поэтому выделялись особенности каждой формы, которые позволили определить границы области применения алгоритмов.

Было определено, что алгоритм, построенный по первой форме (12), не имеет существенных ограничений, если применяется для класса объектов, которые могут быть с достаточной точностью аппроксимированы динамической моделью второго порядка (6). При реализации второй формы (13) показано лишь незначительное расширение области устойчивости и улучшение качества процессов управления по сравнению с классическими методами. Также обоснована неработоспособность третьей формы (14), так как в данном случае система становится неустойчивой, что приводит к расходящимся процессам.

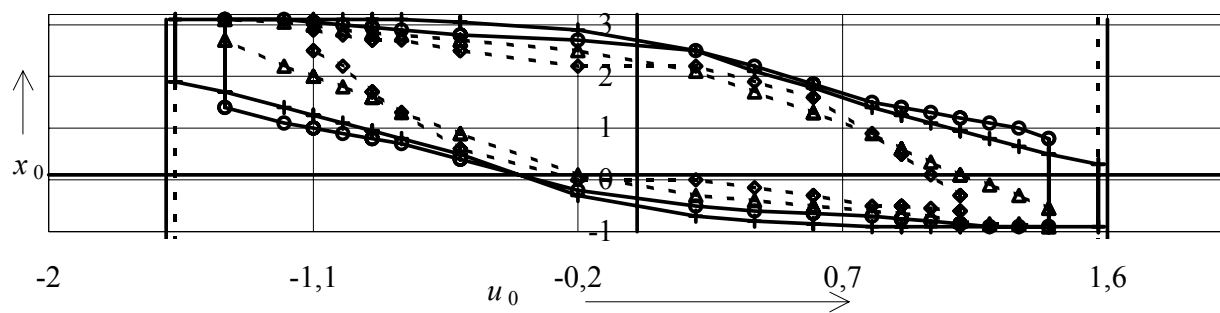
Изложенные выводы подтвердились экспериментальными исследованиями, которые проводились на нелинейных дискретных объектах. Сравнительный анализ разработанных алгоритмов второго порядка и классических проводился по следующим качественным характеристикам:

- область сходимости алгоритма;
- показатели качества управляемых процессов (время регулирования, перерегулирование);
- класс объектов, к которым применим алгоритм;
- возможность определения на каждой итерации оптимальной величины шага.

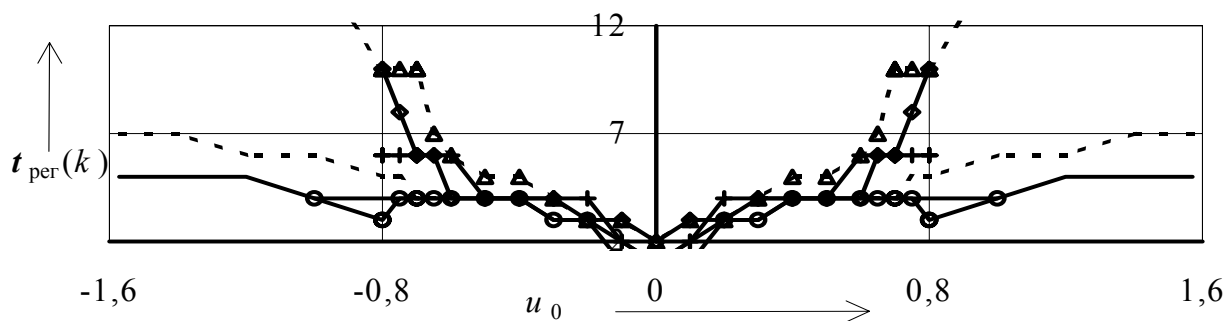
Результаты исследований на примере нелинейного дискретного объекта:

$$x(k+1) = a x(k) + \sin u(k), x(0) = x_0, \quad (20)$$

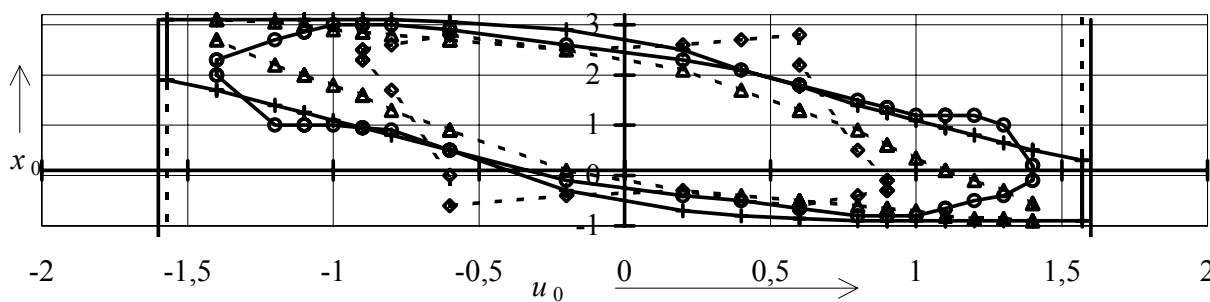
представлены на рис. 1. Области устойчивости и время переходных процессов для МПЛ, АВП и АВПМ (с применением двухступенчатой на рис. 1, а, б и многошаговой на рис. 1, в, г процедур) получены по найденным в результате моделирования экспериментальным точкам, путем исследования процессов при различных начальных условиях ($u(0)$; $x(0)$).



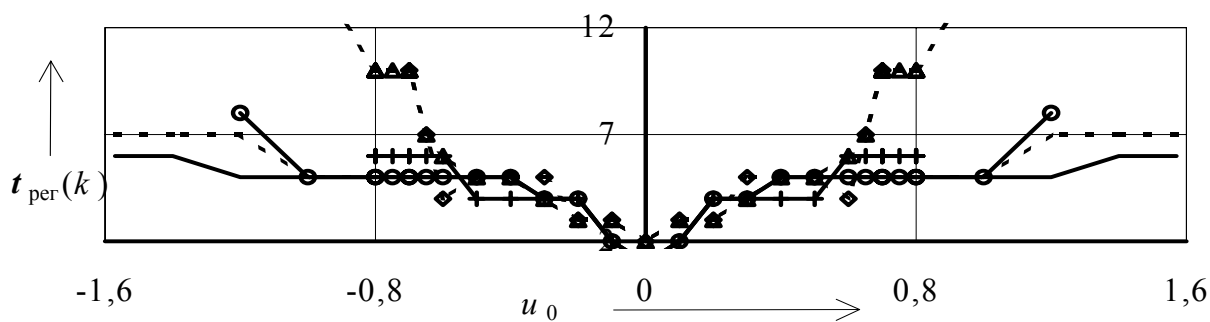
а



б



в



г

1 форма АВПМ — ———; 2 форма АВПМ — —○—; МПЛ — —+—;

1 форма АВП — - - - - -; 2 форма АВП — - - -◇- - -; КМ1 — - - -△- - -.

Рис. 1 Области устойчивости и зависимости времени переходного процесса от начальных условий

Результаты показывают, что при реализации первой формы АВПМ требуется значительно меньшее количество шагов для приведения динамической системы в установившийся режим в сравнении с другими алгоритмами. Также на рисунке можно видеть, что только для первой вычислительной формы АВП и АВПМ замкнутая система устойчива во всем заданном диапазоне $u(0)$, включая его границы. Вторые формы АВП и АВПМ значительных улучшений качества переходных процессов по сравнению с МПЛ не показали.

Таким образом, подтверждено, что наиболее эффективной является двухступенчатая процедура, построенная по первой вычислительной форме модифицированного алгоритма второго порядка.

В третьей главе разрабатывается адаптивная система для нелинейных дискретных объектов на основе алгоритмов управления второго порядка. Рассматриваются основные подходы к решению задач оценивания состояния системы и параметрической идентификации. Проведено экспериментальное исследование функционирования системы управления в условиях неполного наблюдения вектора состояния объекта.

Рассматривается класс объектов, динамика которых описывается многомерными уравнениями состояния и наблюдения:

$$\mathbf{x}(k) = F[\mathbf{x}(k-1), \mathbf{u}(k-1), \boldsymbol{\alpha}], \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (21)$$

$$\mathbf{y}(k) = C \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\xi}(k), \quad (22)$$

где $\mathbf{x}(k)$ – вектор состояния размерности n ;

$\mathbf{u}(k)$ – вектор управляющего воздействия размерности s ;

$\mathbf{y}(k)$ – вектор наблюдаемых переменных размерности m ;

$F(\cdot)$ – нелинейная вектор-функция;

$\boldsymbol{\alpha}$ – r -мерный вектор параметров;

C – матрица связи с выходом размером $m \times n$ (в общем случае уравнение наблюдения (22) может быть не линейно, но для простоты выкладок рассматриваем его линейный вариант);

$\boldsymbol{\xi}(k)$ – m -мерный вектор приведенной к выходу несмещенной случайной помехи с нормальным законом распределения и конечной дисперсией.

Требуется оценить ненаблюдаемые координаты $\mathbf{x}(k)$ и неизвестные параметры $\boldsymbol{\alpha}$ уравнения объекта.

Обобщенное оценивание – один из подходов решения данной задачи. Достоинством данного подхода является применение единого алгоритма для совместного определения оценок вектора состояния и параметров уравнения (21). В качестве метода обобщенного оценивания выбран рекуррентный фильтр Калмана-Бьюси первого порядка.

Обобщенная модель объекта записывается в виде:

$$\hat{\mathbf{z}}(k) = h(\hat{\mathbf{z}}(k-1), \mathbf{u}(k-1)), \hat{\mathbf{z}}(0) = \hat{\mathbf{z}}_0, \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}_z \hat{\mathbf{z}}(k), \quad (24)$$

где $\hat{\mathbf{z}}(k) = (\hat{\mathbf{x}}(k), \dots, \mathbf{a})$ – расширенный вектор состояния размером $w \times 1$, ($w=n+r$);

$\hat{\mathbf{z}}_0$ – вектор оценок начальных условий;

$h(\hat{\mathbf{z}}(k-1), \mathbf{u}(k-1)) = (F(\hat{\mathbf{x}}(k-1), \mathbf{u}(k-1), \mathbf{a}), \dots, \mathbf{a})$ – расширенная функция размером $w \times 1$;

Используя рассчитанные оценки расширенного вектора состояния $\hat{\mathbf{z}}(k)$, уточняется модель объекта управления, в соответствии с которой, определяется управляющее воздействие.

Тогда модель объекта управления представляется следующим матричным уравнением:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = f[\hat{\mathbf{x}}(k), \mathbf{u}(k)], \quad (25)$$

где $\hat{\mathbf{x}}(k)$ – оценка вектора состояния размерности n ;

$\mathbf{u}(k)$ – вектор входного воздействия размерности s ;

$f(\cdot)$ – нелинейная вектор-функция,

при оценках начальных условий и управления

$$\hat{\mathbf{x}}(0) = \hat{\mathbf{x}}_0, \mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0.$$

Реализуется двухступенчатая процедура, построенная по первой вычислительной форме алгоритма АВПМ, которая в многомерном случае примет вид:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \{ \mathbf{C}_g \nabla f_k + \gamma^\ell \frac{1}{2} \mathbf{C}_g \nabla^2 f_k [\delta \mathbf{u}(k) \otimes I] \}^{-1} [\mathbf{g}(k+1) - \mathbf{C}_g f_k], \quad (26)$$

где $\mathbf{g}(k+1)$ – желаемая вектор-функция размером h ;

$\mathbf{C}_g$ – матрица связи с заданным вектором $\mathbf{g}(k+1)$ размером $h \times n$;

$\otimes$ – кронекеровское произведение.

Таким образом, на основе алгоритмов обобщенной идентификации и оценивания, а также полученного закона управления строится адаптивная система.

Экспериментальные исследования адаптивной системы на примере нелинейного дискретного объекта показали работоспособность алгоритма управле-

ния второго порядка в более широкой области отклонений оценок состояния и параметров от истинных значений, чем в классических методах.

В четвертой главе отражены результаты имитационного моделирования и практического применения разработанного адаптивного устройства управления в робототехническом комплексе «Мастер», который используется для обработки древесины.

Объектами являются пять силовых приводов, один из которых обеспечивает вращение заготовки, остальные четыре осуществляют движение рабочего органа манипулятора. Каждый привод состоит из исполнительного двигателя, датчика угла поворота (сельсина) и редуктора, конструктивно объединяющего исполнительный двигатель с датчиком угла поворота. Адаптивное управление каждым приводом осуществляется автономно. В каждой автономной подсистеме оцениваются значения постоянной времени и коэффициента усиления. Динамика силового привода автономного канала описывается нелинейными разностными уравнениями.

В адаптивной системе устройство управления реализуется на основе описанной выше методики полиномиальной аппроксимации по первой вычислительной форме (26) АВПМ. Для оценивания параметров применяется рекуррентный фильтр Калмана-Бьюси первого порядка.

В результате экспериментальных исследований установлено, что работоспособность адаптивной системы обеспечивается при отклонении начальных приближений в пределах 35% от их истинных значений, что соответствует параметрам технического задания.

Рассмотренная система управления с адаптацией была реализована в виде комплекса программ на ЭВМ и внедрена при разработке робототехнического комплекса. Проведенные эксперименты на ряде заказных изделий показали удовлетворительные результаты.

В заключении приводятся основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В приложении приведены листинги программ, в которых реализованы процедуры управления и идентификации, а также акты о внедрении результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Содержанием работы является разработка, исследование и применение адаптивных алгоритмов управления нелинейными дискретными объектами, полученных с применением полиномиальной аппроксимации и, реализованных по многошаговой и двухступенчатой вычислительным процедурам.

1. Исследованы прямой метод синтеза управления первого порядка, основанный на линеаризации модели линейным отрезком ряда Тейлора и его моди-

фикация – метод последовательной линеаризации, где в вычислительную процедуру вводится переменный коэффициент, позволяющий осуществлять дополнительные итерации внутри шага дискретизации с целью уточнения управляющего воздействия. С помощью математического моделирования на примере нелинейного дискретного объекта получены области устойчивости методов и показано, что сохранение устойчивости замкнутой системы требует задания близких к решению начальных приближений.

2. Проведен анализ возможности использования для построения систем управления рекуррентных алгоритмов, полученных на основе полиномиальной аппроксимации, позволяющей учитывать при линеаризации и квадратичные члены разложения нелинейной функции в ряд Тейлора.

3. Получены для алгоритмов управления второго порядка аналитические выражения двух работоспособных линейных вычислительных форм и разработаны для них двухступенчатая и многошаговая рекуррентные процедуры, в которых совместно используются классический метод предварительного оценивания управляющего воздействия на каждом шаге и уточняющий алгоритм второго порядка.

4. Показано на основе анализа результатов математического моделирования преимущество разработанных алгоритмов над классическими методами первого порядка (особенно на первых итерациях), выраженное в расширении области устойчивости и улучшении показателей качества регулирования синтезированной системы. Сравнительный анализ предлагаемых алгоритмов второго порядка показал, что лучшими свойствами обладают двухступенчатые процедуры, построенные по первой вычислительной форме.

5. Получены дополнительное повышение качества процессов сходимости алгоритмов и расширение областей устойчивости нелинейных систем за счет введения на каждой итерации процедуры поиска оптимальной величины шага в модифицированном алгоритме второго порядка.

6. Обосновано применение для реализации адаптивного управления обобщенного оценивания параметров и состояний, позволяющего получить однотипные вычислительные процедуры и минимизирующего затраты на разработку и реализацию полученных алгоритмов. В качестве алгоритма совместного оценивания выбран дискретный фильтр Калмана-Бьюси, который обладает более широкой областью сходимости по сравнению с аналогичными линеаризованными алгоритмами фильтрации.

7. Построена система адаптивного управления для деревообрабатывающего робототехнического комплекса «Мастер». Комплекс алгоритмов осуществляет автономное управление пятью каналами, которые реализуют движение рабочего органа манипулятора. Каждый канал описывается нелинейной разно-

стной моделью второго порядка с двумя идентифицируемыми параметрами.

8. Разработан пакет управляющих программ с использованием системы автоматизации математических вычислений «MatLab», представлены результаты экспериментальных исследований на моделях электромеханических приводов, подтвердившие возможность применения предлагаемых алгоритмов и их преимущество по сравнению с функционирующими линейными законами регулирования.

9. На управляющей ЭВМ действующего деревообрабатывающего комплекса «Мастер» установлено программное обеспечение, осуществляющее автономное регулирование пятью электромеханическими приводами. Проведены опытные испытания по изготовлению изделий различных форм, показавшие работоспособность алгоритмов. Качество изготовленной продукции соответствует всем требованиям технического задания, что подтверждается соответствующим актом о внедрении ООО НПП «СибЭлектро».

10. Теоретические результаты и программное обеспечение используются в учебном процессе при проведении занятий и выполнении курсовых работ по дисциплинам «Локальные системы управления» и «Моделирование систем управления».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Симаков А.А. Применение метода второго порядка для поиска оптимального управления в нелинейных системах // Совершенствование устройств подвижного состава, электрификации, автоматики и связи железнодорожного транспорта / Омская гос. акад. путей сообщения. Омск, 1997. С. 110 – 115.

2. Симаков А.А. Реализация оптимального управления в дискретной системе с наблюдателем // Совершенствование устройств подвижного состава, электрификации, автоматики и связи железнодорожного транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 1998. С. 124 – 127.

3. Симаков А.А. Возможность построения алгоритмов нелинейного оптимального управления с учетом остаточных членов ряда Тейлора // Совершенствование устройств подвижного состава, электрификации, автоматики и связи железнодорожного транспорта / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 1999. С. 117 – 123.

4. Синтез адаптивной системы управления нелинейными дискретными объектами / Симаков А. А.; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 21 с. – Библиогр. 12 назв. – Деп. в ВИНТИ 20.02.02, №350-B2002.

5. Система адаптивного управления деревообрабатывающим робототехническим комплексом «Мастер» / Симаков А. А.; Омский гос. ун-т путей сооб-

щения. – Омск, 2002. – 19 с. – Библиогр. 5 назв. – Деп. в ВИНТИ 20.02.02, №351-B2002.

6. Малютин А.Г., Симаков А.А., Щегольский И.А. и др. Применение квадратичной аппроксимации в задачах моделирования и синтеза систем // Математическое моделирование и расчет узлов и устройств объектов железнодорожного транспорта / Омская гос. акад. путей сообщения. Омск, 1997. С. 9 – 12.

7. Когут А.Т., Малютин А.Г., Симаков А.А. и др. Класс методов поиска оптимальных моделей и характеристик экономических объектов // Проблемы оптимизации и экономические приложения / Омский гос. ун-т. Омск, 1997. С. 90.

8. Когут А.Т., Симаков А.А., Щегольский И.А. Анализ сходимости и оценка точности квадратичных алгоритмов решения задач оптимизации // Проблемы электромагнитного влияния и надежность функционирования систем передачи информации на железнодорожном транспорте / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 1998. С. 64 – 69.

9. Когут А.Т., Симаков А.А., Щегольский И.А. Построение процедур условной оптимизации в задачах управления на основе квадратичной аппроксимации // Динамика систем, механизмов и машин / Омский гос. техн. ун-т. Омск, 1997. С. 65, 66.

10. Малютин А.Г., Симаков А.А., Щегольский И.А. Некоторые технические приложения полиномиальной аппроксимации при реализации систем управления // Динамика систем, механизмов и машин / Омский гос. техн. ун-т. Омск, 1999. С. 332, 333.

11. Когут А.Т., Симаков А.А., Щегольский И.А. Исследование свойств некоторых алгоритмов оптимизации средствами моделирования // Железнодорожный транспорт Сибири: проблемы и перспективы / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 1998. С. 112.

12. Разработка и исследование автоматизированных методов идентификации, управления и обработки информации. Отчет о НИР (промежут.) / Омская гос. акад. путей сообщения; Руководитель Когут А.Т. № ГР 01.9.60000794; Инв. № 02.90.70000842. Омск, 1996. 81 с.

13. Моделирование систем идентификации, управления и обработки информации. Отчет о НИР (промежут.) / Омская гос. акад. путей сообщения; Руководитель А.Т. Когут № ГР 01.9.60000794; Инв. № 02.9.80000111. Омск, 1997. 90 с.

14. Применение средств автоматизации в задачах идентификации, управления и обработки информации. Отчет о НИР (промежут.) / Омский гос. ун-т путей сообщения; Руководитель А.Т. Когут № ГР 01.9.60000794; Инв. № 02.9.90000673. Омск, 1998. 56 с.

15. Автоматизация исследований процедур идентификации, управления и обработки информации. Отчет о НИР (промежут.) / Омский гос. ун-т путей сообщения; Руководитель А.Т. Когут № ГР 01.9.60000794; Инв. № 02.9.90000516. Омск, 1999. 77 с.

Соискатель: