

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 681.5

**РЕШЕТИЛОВ
Максим Анатольевич**

**СПОСОБЫ АДАПТИВНОГО ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ В
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

05.13.01 “Управление в технических системах”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНСК, 2000

Работа выполнена в Белорусском государственном университете
информатики и радиоэлектроники

Научный руководитель –

доктор технических наук,
профессор Кругликов В.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Михалев А.С.

кандидат технических наук,
доцент Кузьмицкий И.Ф.

Оппонирующая организация –

Государственное
научно-производственное
предприятие “Агат - Систем”

Защита состоится 4 мая 2000 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники по адресу: г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 232 аудитория 1 корпуса. Тел.: (017)-239-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации обуславливается постоянно растущими требованиями к качеству функционирования различных автоматических систем, определяемому показателями быстродействия, помехозащищенности, точности и универсальности. В настоящее время обеспечение совокупности указанных свойств возможно лишь в связи с использованием принципов адаптации, позволяющих достичь оптимума характеристик системы в существенно различных условиях работы.

Классические способы построения *адаптивных систем* предназначены для обеспечения их соответствия некоторым выбранным критериям качества путем автоматической настройки *структуры* и отдельных *параметров* по заданным алгоритмам адаптации на основании набора значений, получаемых от источников рабочей информации. Наибольший вклад в развитие теории классических параметрических систем был внесен В.П. Живоглядным, А.Г. Ивахненко, Ю.М. Козловым, А.А. Красовским, В.В. Кругликовым, В.М. Кунцевичем, М.М. Лычаком, А.В. Медведевым, В.Ю. Рутковским, Е.А. Санковским, Я.З. Цыпкиным, Р.М. Юсуповым и др. Синтезу алгоритмов адаптации посвящены работы Д.П. Дерезицкого, В.Г. Сраговича, А.В. Тимофеева, В.Н. Фомина, А.Л. Фрадкова, В.А. Якубовича и др., проблемам идентификации – публикации Г.А. Медведева, Э.П. Сейджа, П. Эйкхоффа и др.

В свою очередь, широкое распространение получила теория *оптимального управления*, в частности, ее разделы, касающиеся оптимизации быстродействия. Обеспечение соответствия системы выбранному критерию в общем случае осуществляется за счет формирования оптимального управления, представляющего собой вектор изменяющихся по определенному закону *сигналов*, переводящих объект из начального состояния в конечное. Наиболее фундаментальные исследования по проблемам оптимизации быстродействия представлены в работах А.С. Клюева, А.А. Колесникова, В.А. Олейникова, Л.С. Понтрягина, А.А. Фельдбаума, и др. Следует отметить, что результаты исследований, посвященных вопросам оптимального управления, ограничиваются областью автоматических систем с известным конечным состоянием.

Указанные положения обосновывают необходимость проведения исследований на стыке теории адаптивных систем и теории оптимального управления с целью разработки способов адаптации, реализующих оптимизацию автоматической системы и не ограничивающихся изменениями ее параметров и структуры.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования, на основании которых получены базовые результаты настоящей работы, проводились в рамках НИР 96 – 2015 “Разработать теоретические основы методов анализа и синтеза элементов и систем управления технологическими процессами” кафедры Автоматического управления Белорусского Государственного университета информатики и радиоэлектроники, а также НИР Военной академии Республики Беларусь.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка способов адаптивного управления, позволяющих осуществить оптимизацию быстродействия, точности и помехозащищенности в технических системах в существенно различных условиях их функционирования.

Для реализации указанной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих способов создания систем параметрической адаптации, алгоритмов их функционирования, а также методов идентификации рабочей информации и синтеза оптимального по быстродействию управления;
- разработка подходов к синтезу устройств параметрической адаптации, позволяющих оптимизировать точность и помехозащищенность систем и обладающих минимальной инерционностью;
- исследование процессов в технических системах под воздействием оптимального по быстродействию управления с целью разработки методики идентификации компонент вектора состояния;
- разработка способов кинематической адаптации, позволяющих отрабатывать большие ошибки на основании оптимизации быстродействия в условиях априорной неопределенности конечного состояния;
- применение и оценка полученных теоретических результатов при синтезе устройств параметрической и кинематической адаптации для систем телеуправления.

Объект и предмет исследования. Основным объектом исследования в настоящей работе являются технические системы автоматического управления. Предметом исследования являются принципы, позволяющие осуществить комплексную оптимизацию технических систем.

Методология и методы проведенного исследования. При решении рассматриваемых в диссертационной работе задач использовались методы теории автоматического управления, связанные с разработкой и исследованием оптимальных, адаптивных, стохастических, нестационарных, нелинейных систем; методы теории вероятностей, имитационного модели-

рования, методы организации управления беспилотными летательными аппаратами.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

- предложен новый быстродействующий двухпозиционный алгоритм самоприспособления параметров адаптивной системы;
- предложена новая методика идентификации вектора состояния для формирования квазиоптимального по быстродействию управления;
- исследованы процессы функционирования системы в соответствии с методом кинематической адаптации в фазовом пространстве;
- предложен новый способ решения задачи синтеза оптимального по быстродействию управления в рамках метода кинематической адаптации и предложена структура управляющего устройства для системы, функционирующей в условиях априорной неопределенности конечных значений компонент вектора состояния;
- предложено адаптивное устройство, автоматически оптимизирующее систему в соответствии с критериями быстродействия, точности и помехозащищенности без необходимости поиска компромиссного варианта между указанными критериями.

Практическая значимость полученных результатов. Применение разработанных устройств, реализующих принципы адаптивного управления, позволит значительно повысить качество функционирования любой технической системы, нуждающейся в оптимизации.

Применение результатов диссертационной работы в системах телеуправления беспилотными летательными аппаратами позволяет существенно улучшить технические показатели систем телеуправления, связанные с быстродействием, повысить их точность и надежность.

Применение предложенного алгоритма и программы имитационного моделирования в учебном процессе заметно увеличивает уровень знаний студентов по дисциплинам, связанным с изучением программирования и теории автоматического управления.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

- быстродействующие алгоритмы и устройства параметрической адаптации и идентификации компонент сигнала ошибки в стохастических нелинейных системах;
- метод идентификации компонент вектора состояния нелинейной нестационарной системы высокого порядка, необходимых для формирования квазиоптимального по быстродействию управления;
- метод кинематической адаптации, оптимизирующий быстродействие нестационарной нелинейной системы высокого порядка;

– алгоритм имитационного моделирования автоматических систем, позволяющий избежать ошибок моделирования, связанных с решением нелинейных разностных уравнений.

Личный вклад соискателя. Все новые результаты, изложенные в настоящей работе, получены автором самостоятельно. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V Межгосударственной научной конференции “Актуальные проблемы информатики: математическое, программное и информационное обеспечение” (Минск, БГУ, 1996), Пятой Международной конференции “Компьютерный анализ данных и моделирование” (Минск, БГУ, 1998), II Международной научно-технической конференции “Динамика систем, механизмов и машин” (Омск, ОмГТУ, 1997), 52-й международной научно-технической конференции “Технические ВУЗы – республике” (Минск, БГПА, 1997), III Военно-научной конференции (Минск, ВА РБ, 1999).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 1 статья в научно-техническом журнале на 6 страницах, 1 статья в научно-техническом сборнике на 5 страницах, 3 работы (статьи) в сборниках трудов конференций на 13 страницах, 6 тезисов докладов на 8 страницах. Общий объем опубликованных работ составляет 32 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 121 название, 9 приложений. Содержит 175 страниц, в том числе 78 рисунков (включая 54 рисунка в приложениях), 3 таблицы, 65 листов приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении произведена оценка современного уровня развития теоретической базы для проведения комплексной оптимизации и адаптации в системах телеуправления.

В первой главе проанализирована общая специфика систем телеуправления, выделены основные факторы, определяющие нелинейные и нестационарные свойства, а также сложность идентификации процессов и параметров таких систем. Рассмотрена сущность имеющихся способов телеуправления.

Исследование особенностей функционирования системы телеуправления беспилотным летательным аппаратом позволяет сделать вывод о том, что беспилотный аппарат – один из наиболее сложных объектов с точки зрения организации законов и процессов управления. В этой связи контур телеуправления может рассматриваться, как некоторое обобщение автоматической системы, представляющей собой совокупность нелинейных звеньев, разделенных линейными частями, обладающими, в свою очередь, нестационарными свойствами. Сигналы системы ограничены и подвержены влиянию шумовых воздействий, законы изменения отдельных параметров априорно не определены. В упрощенном линейном представлении контур телеуправления описывается передаточной функцией седьмого порядка, второго порядка астатизма, обладающей ярко выраженными колебательными свойствами.

Результаты улучшения основных характеристик, увеличения точности и расширения универсальности системы телеуправления могут найти широкое применение в различных областях техники.

Соответственно, синтез законов оптимального управления, а также устройств, реализующих эти законы, равно как и оптимальная самонастройка контура определяются качеством функционирования системы с учетом ее нелинейных, нестационарных и стохастических свойств.

В качестве средства достижения показателями системы своего максимально высокого уровня выбрана адаптация, как единственно возможный в настоящее время способ обеспечения оптимального функционирования объекта в условиях априорной неопределенности значений параметров и сигналов, совокупность которых оказывает влияние на степень соответствия системы некоторому выбранному критерию.

Анализ исследований, посвященных разработкам в области адаптивного управления, позволил выявить основные факторы, влияющие на быстродействие функционирования обобщенного алгоритма контура адаптации, первый шаг которого связан с идентификацией рабочей информации, а второй – непосредственно с работой контура адаптации с целью самонастройки системы. Обнаружено, что с точки зрения быстродействия, область применения некоторых принципов построения адаптивных систем, связанных с идентификацией параметров объекта управления, ограничена. Тем не менее, указанные ограничения не могут являться причиной полного отказа от использования адаптации: только применение адаптивного управления предоставляет разработчикам возможность обеспечения наилучших значений характеристик системы даже в наихудшем варианте условий ее функционирования. Кроме того, прин-

ципы, заложенные в основу работы адаптивных систем, представляют собой базис для создания перспективных технологий оптимального управления, не связанных с настройкой отдельных параметров.

Исследование работ, посвященных оптимальному по быстродействию управлению, выявило необходимость синтеза на основании имеющихся теоретических результатов законов квазиоптимального управления, пригодных для оптимизации систем, функционирующих в условиях априорной неопределенности законов изменения нестационарных параметров объекта и конечных значений вектора состояния.

Во второй главе разработаны подходы к синтезу быстродействующего устройства параметрической адаптации.

Выбор критерия оптимальности был осуществлен с учетом специфики функционирования системы, характеризующейся видами и диапазонами изменения составляющих входных воздействий, а также заранее неопределенными внешними факторами. В качестве критерия оптимальности был выбран критерий обеспечения максимальной вероятности попадания объекта в заданную точку воздушного пространства.

Произведен анализ составляющих сигнала ошибки, имеющей место в контуре управления. Обнаружено, что сигнал ошибки h содержит в себе три составляющие: шумовую $h_{ш}$, а также динамическую $h_{д}$ и флюктуационную $h_{фл}$ компоненты.

Исследование влияния параметров настройки системы на величину и скорость отработки низкочастотных составляющих сигнала ошибки позволило выбрать в качестве способа увеличения помехоустойчивости системы изменение обобщенного коэффициента отработки помехи $k_{отр}$ путем варьирования в заданном диапазоне r доступных изменению постоянных времени T_i , при неизменном коэффициенте преобразования:

$$k_{отр \text{ адапт}} = k_{отр}(T_1, \dots, T_r); \quad k_{отр \text{ адапт}} \neq k_{отр}(k_w).$$

Синтез алгоритма адаптации производился в соответствии с определенными ранее требованиями к его специфике (быстродействию, отсутствию поисковых движений, пробных сигналов и т.д.).

В работе выделены и исследованы на экстремум мультипликативные составляющие вероятности попадания в заданную точку пространства:

$$P_{п}(h - h_{ш} \leq h_{доп}) = P_1(t_{пп} \leq t_{в} - t) P_2(0 \leq |h_{фл}| \leq h_{доп} - |h_{д}(t_{в})|).$$

где $h_{доп}$ – максимально допустимое значение ошибки в точке вывода в момент $t_{в}$, $t_{пп}$ – длительность переходного процесса.

Мультипликативные вероятности достигают своего экстремума при:

$$-\frac{t_{\text{в}} - t}{\sigma_t^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t_{\text{в}} - t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right] = 0, \quad -\frac{h_{\text{доп}} - |h_{\text{д}}|}{\sigma_{\text{фл}}^2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(h_{\text{доп}} - |h_{\text{д}}| - m_{\text{фл}})^2}{2\sigma_{\text{фл}}^2} \right] = 0,$$

где σ_t – среднее квадратическое отклонение времени отработки $h_{\text{д}}$, m_t – математическое ожидание $t_{\text{пп}}$, $\sigma_{\text{фл}}$ – среднее квадратическое отклонение $h_{\text{фл}}$, $m_{\text{фл}}$ – математическое ожидание $h_{\text{фл}}$.

Анализ полученных выражений позволил получить в явном виде закон изменения обобщенного коэффициента отработки помехи в зависимости от характеристик компонент сигнала ошибки. Полученный закон представляет собой алгоритм адаптации, в соответствии с которым должна производиться настройка системы:

$$k_{\text{отр адант}} = k_{\text{отр max}} \text{ при } |h_{\text{д}}| \geq h_{\text{доп}}, \quad k_{\text{отр адант}} = k_{\text{отр min}} \text{ при } |h_{\text{д}}| \leq h_{\text{доп}}.$$

Некоторое преобразование условий, формирующих алгоритм адаптации, привело к возможности выбора в качестве источников рабочей информации составляющих сигнала ошибки, измерение которых осуществляется наиболее простым способом. Разработанные с учетом нелинейных свойств системы структурные схемы устройств идентификации удовлетворяют требованиям малой инерционности, универсальности, простоты технической реализации, качества и надежности.

Синтезирована структура адаптивной системы, предназначенной для оптимальной самонастройки параметров контура в соответствии с изменениями характеристик входных воздействий.

Основными достоинствами полученной системы являются:

1. В процессе функционирования адаптивной системы производится ее самонастройка в соответствии с критерием обеспечения максимальной вероятности попадания объекта в заданную точку воздушного пространства без ухудшения точности системы.

2. В качестве источников рабочей информации используются быстродействующие устройства идентификации характеристик сигнала ошибки, в связи с чем время адаптации системы адекватно скорости изменения характеристик воздействий. Последнее свидетельствует об отсутствии ограничений на скорость изменения характеристик, накладываемых в соответствии с гипотезой квазистационарности.

3. Оптимальность настройки достигается в крайних точках диапазона изменения обобщенного коэффициента отработки помехи, что обеспечивает простоту технической реализации устройства варьирования соответствующих постоянных времени.

В третьей главе изложено теоретическое обоснование принципов получения рабочей информации, необходимой для организации управления, квазиоптимального по быстродействию.

Одним из факторов, определяющих количество переключений знака сигнала оптимального по быстродействию управления (1) является порядок системы.

$$u(t) = \begin{cases} g(t), & 0 \leq t < t_0, & t_0 = \tau_0 \\ u_i, & \tau_{i-1} \leq t \leq \tau_i, & i = \overline{1, n} \\ 0, & t > \tau_n \end{cases}, \quad (1)$$

где $g(t)$ – входное воздействие, переводящее систему в начальное состояние $x(t_0)$, x – вектор состояния системы, u_i – кусочно-постоянный сигнал управления, τ_i – моменты переключения.

Поскольку моменты переключения взаимосвязаны с параметрами системы, в случае влияния непредвиденных возмущений достаточно осуществить хотя бы одно переключение в момент, определенный не по реальной, а по предполагаемой совокупности параметров, чтобы конечное состояние системы $x(t_1)$ отличалось от ожидаемого. Таким образом, задача синтеза квазиоптимального по быстродействию управления связана с минимизацией количества переключений и компонент вектора состояния, идентификация которых необходима при организации управления. Кроме того, требование точности перевода системы в конечное состояние обуславливает задачу идентификации указанных компонент, исключаяющей их искажение инерционной частью системы.

Объект порядка n , содержащий v звеньев без самоуспокоения описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = c^T x(t) + Du(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где A и B – матрицы коэффициентов $n \times n$ и $n \times 1$ соответственно, $u(t)$ – скалярный сигнал управления, $|u(t)| \leq u_{\max}$, $y(t)$ – скалярный выход системы, c – вектор коэффициентов размерности $n \times 1$, D – скаляр.

Система порядка v , состоящая только лишь из звеньев без самоуспокоения, описывается уравнениями (3):

$$\begin{cases} \dot{x}^* = A^* x^*(t) + B^* u(t) \\ y^*(t) = c^{*T} x(t) \end{cases}, \quad (3)$$

где элементы матрицы A^* a^*_{ij} удовлетворяют условиям:

$$a^*_{ij} = 0, \quad i = \overline{1, v}, \quad j = \overline{1, v}, \quad j \neq i+1, \quad a^*_{ij} = a_{ij}, \quad i = \overline{1, v}, \quad j = i+1.$$

Теорема 1. Пусть среди собственных чисел $\lambda_1 \dots \lambda_n$ матрицы A системы дифференциальных уравнений (2) имеется v равных нулю, действительные части остальных – отрицательные, а входное воздействие имеет вид (1). Тогда выходной сигнал $y(t)$ системы (2) стремится к выходному сигналу $y^*(t)$ системы (3) при $t \rightarrow \infty$ при нулевых начальных условиях.

С целью выделения подобъекта (3) из объекта (2) произведена декомпозиция системы, которая послужила основанием для разработки модели, предназначенной для идентификации базовых координат внутреннего состояния объекта управления. Структура модели однозначно соответствует структуре астатического подобъекта (3), входные сигналы объекта (2) и модели одинаковы, начиная с нулевых начальных условий. Получаемые текущие значения компонент вектора состояния представляют собой исходные данные в процессе формирования управления, квазиоптимального по быстродействию.

Использование в качестве источников указанной информации значений легкодоступных измерению компонент внутреннего состояния астатической модели позволяет существенным образом упростить процесс отыскания законов управления объектом в целом, поскольку модель обладает более простой структурой; минимизировать энергию, затрачиваемую на управление объектом, поскольку структура модели включает в себя координаты, определяющие собственное движение объекта; снизить количество компонент вектора состояния, идентификация которых необходима в процессе квазиоптимального управления.

Сравнительный анализ процессов в нелинейных и нестационарных звеньях при неизвестных, в общем случае, законах изменения параметров нестационарного звена во времени выявил возможность идентичного подхода к исследованию влияния нестационарных и нелинейных звеньев на функционирование системы при синтезе законов оптимального управления. Приведение процессов изменения параметров системы к некоторому обобщенному воздействию, аддитивному выходному сигналу, позволило применить к линейной стационарной части системы декомпозицию, идентичную вышерассмотренному случаю. В результате была получена модель, позволяющая идентифицировать компоненты вектора состояния нестационарной (нелинейной) системы, а также значение аддитивного сигнала, определяющегося приведенными к выходу процессами изменений параметров или влиянием нелинейностей.

Исследование классических методов синтеза оптимального по быстродействию управления в системах позиционирования на предмет возможности их распространения на случай систем с априорно неизвестным конечным состоянием показало, что закон оптимального управления в виде кусочно-постоянной функции, доставляющий для систем позиционирования единственную оптимальную траекторию движения в фазовом пространстве, для систем с априорно неизвестным конечным состоянием образует несколько экстремальных траекторий.

Теорема 2. Для системы (3) второго порядка существуют максимум три фазовые траектории, по которым возможен ее перевод управлением вида (1) из произвольного начального состояния в некоторое конечное.

Таким образом, задача синтеза оптимального по быстродействию управления в своем классическом варианте, применительно к системам с априорно неизвестным конечным состоянием, усложняется необходимостью выбора одной, оптимальной траектории из нескольких экстремальных. Более того, полученные выражения (4) для момента переключения знака управляющего воздействия позволяют сделать вывод о том, что в процессе оптимального по быстродействию управления в качестве рабочей информации используются сведения о будущем значении входного воздействия и законов изменения нестационарных параметров, что накладывает требование априорного задания входа системы на всем временном отрезке оптимального управления.

$$x_1 = 0.5x_2^2/u_{\max} + C_{11}, \quad x_2 < x_2(t_1); \quad x_1 = -0.5x_2^2/u_{\max} + C_{12}, \quad x_2 > x_2(t_1), \quad (4)$$

$$C_{11,12} = \frac{g(t_1) - F(t_1) - (\dot{g}(t_1) - \dot{F}(t_1) \mp \beta_1 u_{\max}) \beta_1 / \beta_2}{\beta_2} \mp 0.5 \left(\frac{\dot{g}(t_1) - \dot{F}(t_1) \mp \beta_1 u_{\max}}{\beta_2} \right)^2 / u_{\max}$$

где x_1, x_2 – компоненты вектора x , $F(t)$ – обобщенное воздействие, к которому приводится влияние нелинейных и нестационарных звеньев, β_1 и β_2 – коэффициенты, связанные с параметрами системы.

Таким образом, классический подход к синтезу законов оптимального по быстродействию управления в общем случае не может найти применение в области систем с априорно неизвестным конечным состоянием, что обосновывает задачу поиска других вариантов решения проблемы оптимизации системы телеуправления по быстродействию.

Материал четвертой главы посвящен разработке способов телеуправления в соответствии с методом кинематической адаптации.

Анализ процессов управления беспилотным летательным аппаратом позволяет сделать вывод о том, что возможно возникновение ситуаций, когда сигнал ошибки в контуре имеет большую величину. В связи с наличием ограничения максимального управляющего воздействия, длительность переходных процессов отработки больших ошибок велика и может превысить полетное время объекта, что существенным образом снижает технические показатели системы телеуправления.

Возможность возникновения большой ошибки в контуре обусловлена способами, в соответствии с которыми осуществляется процесс телеуправления: объект должен постоянно находиться на кинематической траектории (КТ), связывающей станцию наведения (точку старта объекта) с предполагаемой точкой вывода. Форма КТ, равно как и координаты предполагаемой точки вывода, определяются в соответствии с выбранным методом наведения и характеристиками движения предполагаемой точки вывода, при этом текущее положение объекта в воздушном пространстве и характеристики его движения не учитываются.

Сущность метода кинематической адаптации заключается в приспособлении одного конца КТ к текущему положению объекта в случае возникновения большой ошибки в контуре управления, что позволяет компенсировать сигнал ошибки h , и, таким образом, избежать возникновения длительных переходных процессов:

$$h(t) = (\epsilon_{\Gamma B}(t) + \epsilon_M(t))r_a(t) - \epsilon_a(t)r_a(t) - h(t_\Phi)\Delta r(t) / \Delta r(t_\Phi), \quad (5)$$

где $\epsilon_{\Gamma B}(t)$ – текущее значение угловой координаты точки вывода, $\epsilon_M(t)$ – смещение, зависящее от метода наведения, $r_a(t)$ – наклонная дальность аппарата, $\epsilon_a(t)$ – текущее значение угловой координаты аппарата, t_Φ – момент фиксации траектории, $\Delta r(t) = r_{\Gamma B}(t) - r_a(t)$, $r_{\Gamma B}(t)$ – наклонная дальность точки вывода.

Анализ поведения объекта при осуществлении адаптации КТ путем только лишь компенсации сигнала ошибки в контуре показал, что после фиксации адаптированной траектории возникают переходные процессы, связанные с рассогласованием вектора скорости объекта и касательной к адаптированной КТ. В связи с вышеуказанным фактом фиксация КТ должна предваряться разворотом вектора скорости до совмещения его направления с направлением касательной к адаптированной траектории:

$$\vec{v}_a \times \partial \vec{r}_k / \partial t = 0 \quad (6)$$

где \vec{v}_a – вектор скорости объекта, \vec{r}_k – радиус-вектор кривизны КТ в момент t_Φ .

Синтезированный алгоритм кинематической адаптации представляет собой реализацию указанных требований:

1. При превышении $h(t)$ некоторого значения h_0 (случай возникновения большой ошибки) производится разворот вектора скорости объекта вплоть до выполнения условия (6).

2. Движение по адаптированной КТ; формирование сигнала управления осуществляется в соответствии с выражением (5), что позволяет компенсировать малые отклонения объекта от новой траектории.

Интерпретация метода кинематической адаптации с точки зрения переменных состояния объекта управления позволяет выделить два этапа, характеризующих приспособление КТ. На первом этапе осуществляется процесс квазиоптимального по быстродействию управления с целью изменения координаты x_2 объекта, соответствующей направлению вектора скорости аппарата в воздушном пространстве. Граничное условие для x_2 в момент фиксации выглядит следующим образом:

$$x_2(t) = (\dot{g}(t) - \dot{F}(t) - C_k \Delta \dot{r} - \beta_1 u) / \beta_2. \quad (7)$$

где $C_k = h(t_\Phi) / \Delta r(t_\Phi) = \text{const}$ – постоянная метода.

На втором этапе производится изменение координаты x_1 , соответствующей положению аппарата, за счет собственного движения объекта.

С точки зрения теории оптимального управления, задача решения первого шага алгоритма адаптации КТ может быть сформулирована следующим образом: *перевести объект управления за минимальное время из некоторого состояния $x(t_0)$ в состояние $x(t_\Phi)$, в котором $x_1(t_\Phi)$ – произвольная величина, $x_2(t_\Phi)$ определяется выражением (7).*

Определены базовые ограничения, связывающие значение большой ошибки в контуре управления в начальный момент времени с временем управления, оставшимся до предполагаемого момента t_B :

$$h(t_0) \leq 0.5\beta_2 u \left(\frac{\Delta r(t_0)}{\Delta \dot{r}} \right)^2 + \beta_1 u \frac{\Delta r(t_0)}{\Delta \dot{r}} - \int_{t_0}^{t_B} \dot{g}(t) dt + F(t_B) - F(t_0).$$

Предварительные результаты сравнения зон ограничения, построенных для штатной системы и для системы, функционирующей в соответствии с алгоритмом кинематической адаптации, позволяют сделать

вывод о большом потенциале возможностей, открывающихся в системе при использовании рассматриваемого метода.

Синтез законов управления (8) в соответствии с методом кинематической адаптации показал возможность использования классических методов синтеза оптимального управления для позиционных систем применительно к рассматриваемому случаю системы с априорно неизвестным конечным состоянием, что достигается за счет использования текущего значения входного воздействия, а также обобщенного сигнала изменения нестационарных параметров и влияния нелинейных звеньев.

$$u = \begin{cases} u_{\max}, & x_2(t) < x_2(t_{\phi}) \\ -u_{\max}, & x_2(t) > x_2(t_{\phi}) \end{cases} \quad t \in [t_0, t_{\phi}) \quad (8)$$

В процессе исследования источников рабочей информации на предмет содержащихся в них погрешностей и шумов, была сделана оценка влияния искажений истинных значений переменных, входящих в выражения, в соответствии с которыми осуществляется управление.

В заключительном разделе рассмотрена структурная схема и функционирование устройства кинематической адаптации, реализующего разработанный способ телеуправления.

Материал пятой главы посвящен разработке цифровой имитационной модели и оценке результатов моделирования системы телеуправления с устройствами параметрической и кинематической адаптации.

Существенные недостатки, свойственные распространенным пакетам цифрового аналитического моделирования автоматических систем, основанным на решении разностных уравнений, обосновывают отказ от их использования и необходимость в разработке алгоритмов, базирующихся на имитационном подходе в процессе цифрового представления и моделирования САУ.

Для системы общего вида произведено выделение базовых компонент и определены функциональные действия для каждой из компонент имитационной модели. Так, в качестве базовой компоненты K_i линейной части системы может рассматриваться интегрирующее звено I_i , функциональное действие которого описывается выражением:

$$x_t = x_{t-1} + (k_i + \xi_{ii})(v + \delta)_t M,$$

где x_t и x_{t-1} – состояние I_i в текущий и предыдущий моменты времени соответственно; k_i – коэффициент усиления интегратора I_i ; ξ_{ii} – текущее значение случайной величины ξ_i , характеризующей изменение параметра

САУ в процессе работы, математическое ожидание $m(\xi_i) = 0$, диапазон изменения задается интервалом $|\xi_i| \in [0, \xi_{i \max}]$; $(v + \delta)_i$ – текущее значение входного сигнала, имеющего вид временного ряда с трендом v , математическое ожидание $m(\delta) = 0$; $M = f_d$ – временной масштаб, определяющий частоту дискретизации f_d работы модели, $M = \text{const} \forall K_i$.

С учетом того, что алгоритм моделирования представляется в виде циклической последовательности шагов, которые соответствуют квантам модельного времени, компонента I_i является дискретным аналогом непрерывного интегратора. Соответственно, за один шаг цикла все I_i выполняют по одному функциональному действию, которое заключается в накоплении входного сигнала. Структура синтезируемой таким образом модели аналогична структуре, используемой при проведении исследований на аналоговых вычислительных машинах: система представляется состоящей из блоков, входы и выходы которых связаны друг с другом. Описание структуры взаимосвязи отдельных блоков представляет собой в синтезируемом алгоритме тело цикла. Каждая итерация цикла соответствует приращению кванта модельного времени. Внутри каждого кванта происходит последовательное вычисление величины входного воздействия и выходного сигнала каждого из блоков. Получаемая таким образом последовательность значений представляет собой временную диаграмму процессов функционирования системы.

Погрешность алгоритма моделирования мала и легко поддается оценке. Современные языки программирования позволяют использовать составленную на языке C++ программу на мощной вычислительной технике, снижающей до минимума время моделирования.

Моделирование системы с контуром параметрической адаптации позволило обнаружить уменьшение уровня флуктуационной составляющей ошибки в 1.5 – 7 раз по сравнению со штатной системой, что достигается без ухудшения быстродействия.

Моделирование системы с устройством кинематической адаптации в условиях детерминированных воздействий показало увеличение быстродействия в 2.8 – 4.9 раза.

Моделирование процессов совместного функционирования устройств параметрической и кинематической адаптации в условиях воздействия помехи, приложенной ко входу системы, выявило увеличение быстродействия системы как минимум в 3.7 раза, в общем случае адаптивная система способна быстро (до 10 с) обрабатывать входные воздействия, изменяющиеся в диапазоне, превышающем как минимум в 10 раз уровень, связанный с ограничением максимального управляющего воздействия.

В приложениях представлены результаты цифрового моделирования штатной и адаптивной системы в различных условиях функционирования, структура алгоритма и текст программы имитационного моделирования, акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в рамках настоящей работы, позволили получить важные теоретические и практические результаты, сущность которых сформулирована в следующих положениях:

1. На основании исследования влияния компонент сигнала ошибки в стохастической системе на ее вероятностные свойства произведен синтез алгоритма параметрической адаптации, разработаны устройства идентификации необходимых компонент сигнала ошибки и устройство параметрической адаптации, не обладающее существенной инерционностью и позволяющее минимизировать значение флюктуационной ошибки в контуре управления без ухудшения точности и быстродействия системы [8].

2. На базе проведенного теоретического исследования собственного движения астатического объекта высокого порядка разработана методика идентификации компонент вектора состояния, определяющих движение объекта в произвольный момент времени и представляющих собой источник рабочей информации в процессе формирования квазиоптимального по быстродействию управления, представлена структура модели объекта, предназначенная для идентификации указанных компонент. Разработана модель для идентификации компонент вектора состояния в нелинейной нестационарной системе. Решена задача синтеза квазиоптимального по быстродействию управления в нелинейной нестационарной системе, определены условия, при которых возможна организация такого управления [3-5, 11].

3. На основании метода кинематической адаптации разработан способ телеуправления, позволяющий избежать возникновения длительных переходных процессов обработки сигнала ошибки, превышающей уровень, связанный с ограничением максимального управляющего воздействия в контуре телеуправления, исследованы особенности реализации метода в воздушном пространстве и в пространстве фазовых координат. Решена задача синтеза квазиоптимального по быстродействию управления в рамках метода кинематической адаптации для нелинейного нестационарного представления системы телеуправления. Разработана структура устройства кинематической адаптации [1, 9, 10].

4. Разработаны принципы построения, синтезирован алгоритм и осуществлена программная реализация цифровой имитационной модели, свободной от недостатков, присущих аналитическим моделям автоматических систем, основанным на решении разностных уравнений [2]. Произведено моделирование и дан сравнительный анализ качественных показателей штатной системы телеуправления, а также адаптивной системы, включающей устройства параметрической и кинематической адаптации. Получено практическое подтверждение результатов исследования и процессов синтеза, свидетельствующее о высокой эффективности разработанных принципов адаптивного управления и успешном решении поставленных задач обеспечения быстродействия, помехозащищенности и универсальности системы [1, 3, 11].

Поскольку система телеуправления может рассматриваться как наиболее общий представитель класса систем автоматического управления нелинейным нестационарным объектом, функционирующим в условиях априорно неизвестного конечного состояния, полученные в работе теоретические и практические результаты могут найти широкое применение в разнообразных областях техники, характеризующихся различной степенью сложности в организации процесса управления.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кругликов В.В., Решетилов М.А. Разработка метода и устройства оптимальной коррекции кинематической траектории // 2-й научно-технический сборник Военной академии Республики Беларусь / Военн. академия РБ. – Минск, 1998. – С. 249-253.
2. Кругликов В.В., Решетилов М.А. Аспекты имитационного моделирования автоматических систем // Компьютерный анализ данных и моделирование: Сб. научн. статей V Международ. конференции (8-12 июня 1998 г., Минск) / Бел. гос. ун-т; Под ред.: С.А. Айвазяна, Ю.С. Харина. – Мн., 1998. – Ч. 4: К-Я. – С. 5-9.
3. Решетилов М.А. Многокритериальный синтез закона управления квазиоптимального электропривода // Энергетика. – Мн., 1999. – № 4. – С. 40-46.
4. Кругликов В.В., Решетилов М.А. Особенности синтеза квазиоптимального по быстродействию управления для следящей системы // Материалы III военно-научной конференции Военн. академии РБ. – Мн., 1999. – С. 212-215.
5. Кругликов В.В., Решетилов М.А. Синтез квазиоптимального по бы-

- строедействию управления // Материалы III военно-научной конференции Военн. академии РБ. – Мн., 1999. – С. 202-205.
6. Решетиллов А.Р., Решетиллов М.А. Характеристики нелинейных звеньев в режимах периодических колебаний систем управления электропривода // Автоматизированный электропривод промышленных установок: Тез. респуб. научно-технич. конференции / Бел. гос. политехн. академ. – Мн., 1994. – С. 75.
 7. Решетиллов А.Р., Решетиллов М.А. Начальная область периодических вынужденных колебаний в аналоговых нелинейных системах общего вида // Современные проблемы радиотехники, электроники и связи: Тез. докладов научн. техн. конференции (4-5 мая 1995) / Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Мн., 1995. – С. 309-310.
 8. Кругликов В.В., Решетиллов М.А. К вопросу о выборе целевой функции в алгоритмах адаптации // Актуальные проблемы информатики: математическое, программное и информационное обеспечение: Мат-лы V межгосуд. науч. конференции (14-18 мая 1996 г.). – Мн.: Изд-во Бел. гос. ун-та, 1996. – С. 188.
 9. Кругликов В.В. Решетиллов М.А. Формирование кинематической траектории беспилотного летательного аппарата с учетом динамических свойств системы управления // Динамика систем, механизмов и машин: Тез. докл. II Международ. научно-техн. конференции / Омский гос. технич. ун-т. – Омск, 1997. – Кн. 2. – С. 39.
 10. Решетиллов М.А. Метод кинематической адаптации // Материалы международной 52-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников, аспирантов и студентов БГПА “Технические ВУЗы – республике”: В 7 ч. / Бел. гос. политехн. академия. – Мн., 1997. – Ч. 1. – С. 163.
 11. Решетиллов М.А. Синтез квазиоптимального управления в нестационарной следящей астатической системе // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы II Респуб. научно-технич. конференции студентов и аспирантов (15-20 марта 1999 г.) / Гомельск. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 1999. – Ч. 1. – С. 88-89.



РЭЗЮМЭ

Рэшацілаў Максім Анатольевіч

СПОСАБЫ АДАПТЫЎНАГА ТЭЛЕКІРАВАННЯ Ё ТЭХНІЧНЫХ СІСТЭМАХ

Ключавыя словы: аўтаматычныя сістэмы, нелінейныя сістэмы, нестацыянарныя сістэмы, стахастычныя сістэмы, сістэмы тэлекіравання, беспілотны лятальны апарат, аптымізацыя хуткадзеяння, квазіаптымальнае кіраванне, параметрычная адаптацыя, кінематычная адаптацыя, пераходныя працэсы, імітацыйнае мадэліраванне.

Дысэртацыя прысвечана праблемам распрацоўкі адаптыўнага кіравання з мэтай аптымізацыі дакладнасці, перашкодаўстойлівасці і хуткадзеяння ў тэхнічных сістэмах. Разглядаюцца нелінейныя нестацыянарныя сістэмы тэлекіравання беспілотнымі лятальнымі апаратамі.

На падставе даследвання імавернасных уласцівасцей сістэмы праведзен сінтэз алгарытму параметрычнай адаптацыі, распрацаваны маляінэрцыйныя ўстройства ідэнтыфікацыі кампанентаў сігналу разузгаднення і ўстройства параметрычнай адаптацыі па ўваходным удзеянням.

Распрацавана метадыка ідэнтыфікацыі кампанентаў вектару стану з мэтай фарміравання квазіаптымальнага па хуткадзеянню кіравання. Прадстаўлена мадэль для ідэнтыфікацыі кампанентаў вектару стану ў нелінейнай нестацыянарнай сістэме.

Распрацаваны спосаб тэлекіравання, які дазваляе пазбегнуць працяглых пераходных працэсаў адпрацоўкі сігналу разузгаднення вялікай велічыні. Вырашана задача сінтэза квазіаптымальнага па хуткадзеянню кіравання ў рамках метаду кінематычнай адаптацыі для нелінейнай нестацыянарнай сістэмы тэлекіравання. Прадстаўлена структура ўстройства кінематычнай адаптацыі.

Распрацаваны прынцыпы пабудавання, сінтэзаваны алгарытм і здзейснена праграмная рэалізацыя цыфравой імітацыйнай мадэлі аўтаматычнай сістэмы. Выканана мадэліраванне і зроблен параўнальны аналіз паказальнікаў штатнай сістэмы тэлекіравання, а таксама адаптыўнай сістэмы з устройствамі параметрычнай і кінематычнай адаптацыі. Атрымана практычнае пацвярджэнне вынікаў даследванняў і працэсаў сінтэзу, якое сведчыць аб высокай эфектыўнасці распрацаваных прынцыпаў адаптыўнага кіравання.

РЕЗЮМЕ

Решетиллов Максим Анатольевич

СПОСОБЫ АДАПТИВНОГО ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ключевые слова: автоматические системы, нелинейные системы, нестационарные системы, стохастические системы, системы телеуправления, беспилотный летательный аппарат, оптимизация быстродействия, квазиоптимальное управление, параметрическая адаптация, кинематическая адаптация, переходные процессы, имитационное моделирование.

Диссертация посвящена проблемам синтеза адаптивного управления с целью оптимизации точности, помехозащищенности и быстродействия в технических системах. Рассматриваются нелинейные нестационарные системы телеуправления беспилотными летательными аппаратами.

На основании исследования вероятностных свойств системы произведен синтез алгоритма параметрической адаптации, разработаны малоинерционные устройства идентификации компонент сигнала ошибки и устройство параметрической адаптации по входным воздействиям.

Разработана методика идентификации компонент вектора состояния для формирования квазиоптимального по быстродействию управления. Представлена модель для идентификации компонент вектора состояния в нелинейной нестационарной системе.

Разработан способ телеуправления, позволяющий избежать возникновения длительных переходных процессов отработки сигнала ошибки большой величины. Решена задача синтеза квазиоптимального по быстродействию управления в рамках метода кинематической адаптации для нелинейной нестационарной системы телеуправления. Представлена структура устройства кинематической адаптации.

Разработаны принципы построения, синтезирован алгоритм и осуществлена программная реализация цифровой имитационной модели автоматической системы. Произведено моделирование и дан сравнительный анализ качественных показателей штатной системы телеуправления, а также адаптивной системы, включающей устройства параметрической и кинематической адаптации. Получено практическое подтверждение результатов исследования и процессов синтеза, свидетельствующее о высокой эффективности разработанных принципов адаптивного управления.

ABSTRACT

Reshetilov Maxim Anatolyevich

METHODS OF ADAPTIVE TELECONTROL IN ENGINEERING SYSTEMS

Keywords: automatic systems, nonlinear systems, non-stationary systems, stochastic systems, systems of telecontrol, pilotless flight vehicle, optimization of speed, pseudo-optimum control, parametrical adaptation, kinematic adaptation, transients, simulation.

The thesis is devoted to problems of adaptive control synthesis, and is focused on accuracy optimization, speed optimization and noise immunity in engineering systems. The nonlinear non-stationary systems of telecontrol by pilotless flight vehicles are considered.

It has been proposed the parametrical adaptation algorithm synthesis on the basis of system probability properties investigations. There have been developed the fast-response blocks of error signal components identification and block of parametrical adaptation on entering actions.

It has been developed the technique of state vector components identification for shaping of speed-quasioptimal control. The model for identification of state components vector in a nonlinear non-stationary system is represented.

It has been developed the method of telecontrol permitting to avoid of long transients of large magnitude error signal execution. The task of speed-quasioptimal control synthesis is solved within the framework of kinematic adaptation method for a nonlinear non-stationary system of telecontrol. The structure of kinematic adaptation block is represented.

It has been synthesized the algorithm of an automatic system digital simulation modelling. Also it has been accomplished the program realization of simulation model. The simulation has been done and the comparative analysis of qualitative indexes of a nominal system of telecontrol, and also adaptive system including blocks of parametrical and kinematic adaptation is given. The practical confirmation of a research outputs proves high effectiveness of the developed principles of an adaptive control.

РЕШЕТИЛОВ
Максим Анатольевич

**СПОСОБЫ АДАПТИВНОГО ТЕЛЕУПРАВЛЕНИЯ В
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.13.01 – Управление в технических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.03.2000.

Бумага писчая. Печать ризографическая

Уч. -изд. л. I, O.

Тираж 90 экз.

Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. I, 39.

Заказ I53.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156, 220027, Минск, ул. П. Бровки, 6