

На правах рукописи

НАЗАРОВ Анвар Шамильевич

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
АДАПТИВНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ**

Специальность 05.13.01

**Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2011

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель	засл. деятель науки и техники РФ д-р техн. наук, проф. Ильясов Барый Галеевич
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. Асанов Асхат Замилович, проф. каф. «Прикладная математика и информатика» Казанского (Приволжского) федерального университета / г. Н. Челны /
	канд. техн. наук, доц. Муравьева Елена Александровна, доц. каф. «Автоматизированные технологические и информационные системы» филиала ГОУ ВПО Уфимского государственного нефтяного технического университета / г. Стерлитамак /
Ведущая организация	ОАО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния» / г. Уфа /

Защита диссертации состоится «15» сентября 2011 г. в 10⁰⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «10» августа 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Большинство современных систем автоматического управления сложными динамическими объектами (СДО) требуют их разработки в классе адаптивных многосвязных систем автоматического управления (МСАУ). Объясняется это некоторыми особенностями построения и функционирования многосвязных систем.

Для многих сложных систем управления, например САУ летательными аппаратами (ЛА) и их силовыми установками, характерна большая неопределенность условий их работы. Сведения о действительных значениях ряда параметров объекта управления бывают весьма неточными, а законы их возможных изменений зачастую известны лишь качественно. Недостаточны сведения о начальном состоянии САУ, неопределенны сведения о возможных входных сигналах и возмущающих воздействиях. При большой степени неопределенности и жестких программно-аппаратных ограничениях процедура синтеза системы управления СДО должна предусматривать одновременное решение задач формирования максимально эффективного управляющего устройства и рационального (в некотором смысле, оптимального) алгоритма управления, использующего как априорную, так и апостериорную информацию, получаемую в процессе функционирования системы.

При этом значительно расширился круг самих объектов управления, куда сегодня входят объекты различной физической (технической) природы. Это предъявляет требования к разработке универсальных и наглядных методов анализа и синтеза адаптивных МСАУ СДО, позволяющих в полной мере учитывать их физические и структурные особенности.

На сегодняшний день известны два основных направления, в которых развиваются методы проектирования адаптивных МСАУ. Одним из них является направление, основанное на использовании описания системы в пространстве состояний в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка в форме Коши. Такие известные ученые, как Я. З. Цыпкин, Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков, Р. М. Юсупов, Е. Н. Розенвассер, А. Л. Фрадков и др., посвятили свои научные работы данному классу методов адаптивного управления. Отметим, что уравнения в переменных состояния позволяют с математической точки зрения разработать единые методы численного решения этих уравнений на ЭВМ, а алгоритмы управления, синтезированные на их основе, могут быть использованы для решения широкого круга задач, но эти процедуры довольно сложны и требуют больших вычислительных ресурсов. К тому же абстрактность вектора состояния усложняет процесс проектирования с прикладной точки зрения (с точки зрения понимания технической и физической сущности процесса управления)

К другому направлению развития методов проектирования адаптивных МСАУ относятся методы, использующие описание движения системы в форме матричных передаточных функций (МПФ). Наибольший вклад в развитие данных методов внесли такие ученые, как М. В. Мееров, В. Т. Морозовский, П. И. Чинаев, Р. Т. Янушевский, Б. Г. Ильясов, В. И.

Васильев, Ю. С. Кабальнов, Р. А. Мунасыпов, В. Н. Ефанов, В. Г. Крымский и другие. Прикладные проблемы проектирования МСАУ СДО (применительно к МСАУ газотурбинными двигателями (ГТД)) рассмотрены в трудах А.А. Шевякова, Б. А. Черкасова, О. С. Гуревича, Ф. А. Шаймарданова, Ю. М. Гусева, В. Г. Крымского, В. И. Васильева и других. Описание и исследование адаптивных МСАУ при помощи матричного аппарата делает процесс их проектирования наглядным с точки зрения математического подхода к проектированию МСАУ. Однако данный подход не позволяет проводить системное исследование МСАУ с учетом особенностей ее внутреннего строения, что в большинстве случаев является необходимым условием обеспечения ее качества, а также не ведет к упрощению процесса синтеза алгоритмов адаптации с позиции вычислительной сложности.

Известен теоретико-множественный подход к описанию и исследованию МСАУ, основанный на декомпозиции системы на сепаратные подсистемы и многомерные элементы связи между ними. Данный способ описания, предложенный академиком Б. Н. Петровым и его учениками, относится к одному из направлений развития методов, использующих описание систем в форме передаточных функций (ПФ), поэтому он также сохраняет относительную простоту и наглядность. При этом по сравнению с классическим описанием МСАУ с помощью МПФ позволяет оценивать влияние на устойчивость и качество всей МСАУ, как динамических свойств сепаратных подсистем, так и связей между ними, что позволяет в полной мере учесть структурные особенности МСАУ. К тому же за счет рационального использования частотных методов анализа и синтеза МСАУ, упрощается процесс синтеза алгоритмов ее адаптации с позиции вычислительной сложности. Однако в литературе не приведено сколько-нибудь законченного и формализованного подхода к осуществлению адаптации МСАУ СДО, основанного на данном принципе описания сложных систем.

Указанные выше проблемы проектирования адаптивных МСАУ определили цель выполнения настоящей научной работы и задачи проводимых исследований.

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование процедур и методик анализа и синтеза адаптивных МСАУ СДО на основе частотных методов с целью повышения эффективности управления СДО и оценка эффективности предложенных процедур и методик на примере построения адаптивных МСАУ ГТД.

Для достижения поставленной научной цели исследования в работе были сформулированы следующие **теоретические и прикладные задачи**:

1. Разработать концепцию адаптации МСАУ СДО к изменениям условий внешней среды и режимов функционирования СДО на основе частотных методов анализа и синтеза их характеристик. В рамках предложенной концепции сформулировать процедуру построения МСАУ СДО адаптивных к изменениям условий внешней среды и определить наиболее рациональную структуру системы управления.

2. Разработать алгоритмы структурного и параметрического синтеза адаптивных многосвязных систем управления сложными динамическими объектами, функционирующими в широком диапазоне изменения условий внешней среды в условиях неопределенности.

3. Разработать инженерную методику анализа и синтеза МСАУ ГТД адаптивных к изменениям высот и скоростей полета ЛА, включающую предложенные процедуры и алгоритмы.

4. Провести анализ адаптивной МСАУ ГТД, функционирующей в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета ЛА, с различными компоновками (правилами выбора регулирующих органов и их комбинаций). Апробировать и оценить эффективность разработанной методики путем имитационного моделирования функционирования МСАУ ГТД в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета ЛА.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории автоматического управления, методы системного анализа, методы теории многосвязного регулирования, методы теории функций комплексного переменного и функционального анализа, методы имитационного и математического моделирования.

Основные научные результаты, выносимые на защиту

1. Концепция построения адаптивных МСАУ СДО, основанная на теоретико-множественном подходе к описанию многосвязных систем на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними. Классификация многосвязных систем по степени изменения их системных частотных характеристик и структура, позволяющая реализовать адаптацию МСАУ каждого из выделенных классов к изменениям условий и режимов функционирования СДО.

2. Методы и алгоритмы структурной и параметрической адаптации регуляторов сепаратных подсистем МСАУ СДО, функционирующей в условиях неопределенности, из условия приближения индивидуальных характеристик сепаратных подсистем к их эталонным моделям.

Алгоритм синтеза связей в многомерном регуляторе МСАУ на основе анализа характеристических функций из условия приближения текущей характеристики многомерной связи к ее эталонной (желаемой) модели.

3. Методика анализа и синтеза адаптивных МСАУ ГТД (на примере построения адаптивной МСАУ двухвальным турбореактивным двигателем с форсажной камерой (ТРДФ)).

4. Результаты анализа математических моделей МСАУ ГТД (на примере МСАУ ТРДФ) с различными компоновками, функционирующих в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета, с позиции их рационального применения для управления двигателем при различных внешних условиях и режимах функционирования.

Научная новизна результатов работы:

1. Предложена концепция построения адаптивных МСАУ СДО, функционирующих в условиях неопределенности, отличающаяся декомпозицией алгоритма адаптации всей МСАУ на алгоритмы, основанные на:

- приближении частотных характеристик ее сепаратных подсистем к собственным эталонным моделям;
- приближении частотных характеристик связи между подсистемами к эталонной модели многомерной связи;
- композиции из перечисленных методов адаптации.

Предложенная концепция позволяет повысить эффективность применения существующих алгоритмов адаптации одномерных САУ к адаптивным МСАУ, что обеспечит снижение программно-аппаратных затрат на их разработку по сравнению с существующими методиками реализации адаптивных МСАУ СДО при сохранении понимания технической и физической сущности процесса управления.

2. Научная новизна предложенного алгоритма структурно-параметрической адаптации МСАУ СДО заключается в использовании изменяемой эталонной модели сепаратных подсистем при изменении условий функционирования СДО, позволяющее обеспечить требуемое сочетание запасов устойчивости системы, быстродействие и характер протекания переходных процессов в условиях неопределенности параметров СДО.

3. Научная новизна предложенного алгоритма синтеза связей в многомерном регуляторе МСАУ заключается в идентификации, на основе анализа характеристических функций, характеристик связи, оказывающих наиболее сильное влияние на устойчивость системы и дальнейшей их коррекции из условия приближения текущей характеристики многомерной связи к ее эталонной (желаемой) модели. Алгоритм позволяет строить гарантированно устойчивые МСАУ СДО на всех режимах его работы, что не всегда достижимо только за счет изменения структуры и параметров регуляторов сепаратных подсистем.

Практическая значимость работы:

Разработана инженерная методика синтеза алгоритмов структурной и параметрической адаптации МСАУ ГТД, применение которых позволяет обеспечить устойчивость и требуемое качество управления в широком диапазоне изменения параметров ГТД в условиях неопределенности. Кроме того, предложенная методика, основанная на использовании частотных характеристик системы, имеющих строго определенный физический смысл, понятный инженеру-проектировщику, позволяет в полной мере учесть структурные особенности проектируемой МСАУ, снизить временные затраты на проведение трудоемких процедур анализа и синтеза адаптивной системы в среднем на 20–30 %.

Получены результаты математического и имитационного моделирования адаптивной трехсвязной САУ ГТД, функционирующей в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета: время регулирования по каждой из регулируемых координат соответствует заданным требованиям (отклонение не

превышает ± 0.2 с), перерегулирование отсутствует. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенных алгоритмов адаптации для многомерных систем авиационной автоматики.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в ОАО УНПП «Молния» при разработке проектов МСАУ перспективных ГТД.

Связь темы исследования с научными программами

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики УГАТУ в рамках следующих грантов РФФИ: № 08-08-00774-а, № 08-08-97039-р_Поволжье_а, № 09-08-00490-а. Работа связана с исследованиями по следующим темам:

Программа № 15 РАН, 2007–2009 гг. «Проблемы анализа и синтеза интегрированных систем управления для сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности».

Апробация работы

Основные теоретические и практические результаты работ докладывались на следующих конференциях.

- Международная научно-техническая конференция «Мехатроника, автоматизация, управление» (Санкт-Петербург, 2008, Дивноморское, 2009).
- XI, XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2009–2010).
- IV, V всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (Уфа, 2009–2010).
- Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2008–2009).
- Всероссийская научно-техническая конференция «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (Москва, 2010).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы отражены в 10 публикациях, в том числе в 1 статье в рецензируемом издании, входящем в список ВАК.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа включает введение, четыре главы основного материала и библиографический список. Работа без библиографического списка изложена на 158 странице машинописного текста. Библиографический список включает 115 наименований.

Выражаю благодарность к.т.н., доц., Сайтовой Гузель Асхатовне за высококвалифицированную научную консультацию и технические советы при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации приводится общая характеристика работы – обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и задачи исследования, перечисляются методы исследования, определены научная новизна и практическая ценность результатов работы, выносимых на защиту.

В первой главе выполнен анализ особенностей функционирования и управления СДО на примере авиационных ГТД. Приведен обзор существующих методов и алгоритмов адаптивного управления сложными системами, выявлены их основные достоинства и недостатки. На основе проведенного анализа, сделан вывод об актуальности и целесообразности разработки новых методов синтеза адаптивных МСАУ на основе частотных методов.

Известным способом решения задачи проектирования системы автоматического управления СДО с неопределенным или сложным математическим описанием, неполным информационным обеспечением, с быстро и в широких пределах изменяющимися параметрами и конфигурацией, свойствами и условиями функционирования, воздействиями внешней среды, является проектирование их в классе адаптивных МСАУ.

Анализ существующих методов и алгоритмов синтеза адаптивных МСАУ показал их недостаточную эффективность в данном приложении, поскольку они либо не учитывают связи между подсистемами (предполагая их квазиавтономность), либо значительно усложняют процедуру синтеза. К особенностям ряда методов также можно отнести некоторую абстрактность от реально существующих физических процессов в системе, математическую сложность. К тому же большинство из перечисленных методов не позволяют обеспечить изменяемую структуру управляющей части МСАУ, что в ряде случаев является необходимым условием функционирования сложных динамических систем, так как некоторые изменения в ее поведении не всегда могут быть компенсированы только параметрическими изменениями управляющей части МСАУ.

Таким образом, на сегодняшний день весьма актуальным является разработка и исследование новых методов синтеза адаптивных алгоритмов для МСАУ.

В связи с этим особое внимание привлекают частотные методы анализа и синтеза МСАУ, предложенные Б. Н. Петровым и его учениками. Данные методы весьма перспективны, так как их применение существенно упрощает процедуру синтеза МСАУ без каких либо потерь в точности и качестве регулирования. Целесообразность использования частотных характеристик системы в процессе анализа и синтеза МСАУ обусловливается возможностью решать уравнения высоких порядков графоаналитическим методом, а также получением наглядного представления об изменении параметров системы. Поэтому в качестве характеристик элементов системы рассматриваются их амплитудно-фазовые характеристики (АФХ), расположенные на комплексной плоскости.

Данные методы основаны на теоретико-множественном подходе к описанию МСАУ на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними. В качестве индивидуальной характеристики (ИХ) сепаратной подсистемы МСАУ рассматривается ее индивидуальная передаточная функция $\Phi_i^0(s)$ в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном (автономном) от других подсистем состоянии:

$$\Phi^0_i(s) = \frac{X_i(s)}{X_i^o(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1 + R_i(s)W_{ii}(s)}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$, n – порядок МСАУ, $W_{ii}(s)$ - передаточные функции разомкнутых сепаратных подсистем многосвязного объекта управления, а $R_i(s)$ – передаточные функции регуляторов локальных подсистем. При этом АФХ ИХ сепаратных подсистем получаются путем замены $s = j\omega$, $\omega \in (0, +\infty)$ в выражении (1). В качестве характеристик связей (ХС) сепаратных подсистем рассматриваются функции вида:

$$h_{12\dots k}(s) = \frac{\det \|W_{ij}(s) \cdot \gamma_{ij}\|_{k \times k}}{\det \|W_{ij}(s) \cdot \delta_{ij}\|_{k \times k}}, \quad (2)$$

где $\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$, $k = 2, 3, \dots, n$. Данные характеристики

отражают реально существующие взаимоотношения между подсистемами и строятся из динамических звеньев, выражающих эти соотношения. В общем случае связь между парами, тройками, четверками и последующей размерностью подсистем может быть охарактеризована с помощью определителей матриц вида: $L_k(s) = \|W_{ij}(s)\gamma_{ij}\|_{k \times k}$. В процессе анализа и синтеза МСАУ часто бывает важно выявить не столько абсолютное действие самих перекрестных связей, сколько их действие относительно прямых связей в объекте, которые характеризуются определителями матриц вида: $M_k(s) = \|W_{ij}(s)\delta_{ij}\|_{k \times k}$. Этую относительную связь и рассматривают в качестве приведенных характеристик связи. При этом в качестве частотных ХС рассматриваются корневые годографы уравнения связи МСАУ вида:

$$D(x, h) = 1 + h_2(s)x^2(s) + h_3(s)x^3(s) + \dots + h_n(s)x^n(s) = 0, \quad (3)$$

получаемые путем замены $s = j\omega$, $\omega \in (0, +\infty)$ в аналитических решениях уравнения (3) относительно переменной x .

Использование представленного выше способа описания сложных систем, совместно с частотными методами анализа и синтеза адаптивных МСАУ, основывающихся на построении областей устойчивости в плоскостях АФХ элементов системы, позволяет разработать новые алгоритмы структурного синтеза управляющей части (регулятора) многосвязных систем, с относительно невысокими вычислительными требованиями при большом числе варьируемых параметров. Подобный подход делает возможным строить МСАУ сложными динамическими объектами, такими, как авиационный ГТД, функционирующими в широком диапазоне изменения внешних воздействующих факторов, что не достижимо для систем с регуляторами, построенными не только по жесткому, заранее заданному алгоритму работы, но и для большинства регуляторов, в которых происходит только параметрическая настройка его коэффициентов. Кроме того, данный подход позволяет в полной мере учесть структурные особенности проектируемой МСАУ.

Вторая глава посвящена разработке концепции построения и анализу адаптивных МСАУ СДО, в рамках которой предложены классификация

многосвязных систем по степени изменения их системных динамических характеристик, структура, позволяющая реализовать адаптацию МСАУ различных классов к изменениям условий и режимов функционирования СДО. Рассмотрена методология решения задачи разработки алгоритмов адаптации на основе предложенной концепции адаптации МСАУ СДО.

В зависимости от характера изменений частотных характеристик МСАУ, происходящих в процессе ее функционирования, целесообразно выделить три различных класса МСАУ СДО.

I класс МСАУ, у которых в процессе функционирования происходят изменения динамических характеристик сепаратных подсистем, при этом динамические характеристики многомерных связей между ними существенно не меняются.

II класс МСАУ, у которых в процессе функционирования происходят изменения динамических характеристик многомерных связей между сепаратными подсистемами. При этом динамические характеристики самих сепаратных подсистем существенно не меняются.

III класс МСАУ, у которых в процессе функционирования происходят изменения как динамических характеристик сепаратных подсистем, так и динамических характеристик многомерных связей между ними.

Таким образом, адаптивное управление МСАУ СДО предлагается осуществлять в соответствии с выделенными классами МСАУ.

Известно, что для качественной работы МСАУ многорежимным СДО, функционирующим в широком диапазоне изменения свойств внешней среды, требуется не столько сохранение постоянства качества процессов управления, сколько такое его изменение, которое обеспечивало бы требуемое сочетание запасов устойчивости каждой из сепаратных подсистем, запасов устойчивости МСАУ в целом, быстродействия и характера протекания переходных процессов на каждом режиме. С этой целью адаптацию МСАУ к непрерывно изменяющимся условиям функционирования предлагается осуществлять по моделям их динамических характеристик с перестраиваемой, в соответствии с текущей эталонной моделью, структурой управляющей части. В качестве информативных параметров, определяющих эталонную модель для текущих условий функционирования, целесообразно использовать внешние параметры окружающей среды или внутрисистемные параметры СДО.

Решение задачи разработки алгоритмов адаптивного управления СДО предлагается производить в два этапа:

– На первом этапе формируются алгоритмы, при помощи которых частотные характеристики сепаратных подсистем МСАУ и частотные характеристики их многомерных связей адаптируются по собственным эталонным моделям, тем самым реализуя требование к обеспечению желаемых запасов устойчивости МСАУ.

– На втором этапе решается задача коррекции динамических характеристик сепаратных подсистем, по каждой из регулируемых координат, в зависимости от выбранного показателя качества $\delta(t)$, обеспечивая желаемое качество управления МСАУ.

На основе проведенного анализа построения адаптивных МСАУ СДО с применением классических адаптивных структур можно представить наиболее рациональную в рамках предлагаемого подхода к построению адаптивных МСАУ структуру, схема которой представлена на рисунке 1.

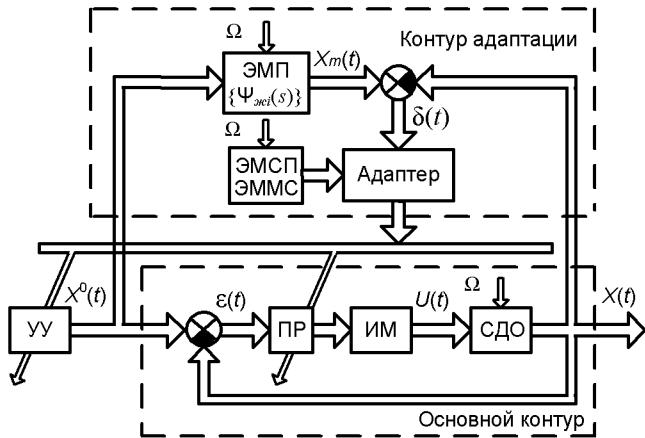


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема адаптивной МСАУ с разомкнутыми и замкнутыми контурами адаптации, где УУ – устройство управления, ИМ – исполнительный механизм, $X^0(t)$ – управляющее воздействие.

В основе структурной схемы, представленной на рисунке 1, лежит классическая двухуровневая структура, реализующая метод адаптации МСАУ по ее модели с разомкнутыми и замкнутыми контурами адаптации.

Цикл разомкнутой адаптации МСАУ в данной структуре реализован посредством релейной (дискретной) структурной реконфигурации перестраиваемого регулятора (ПР) по эталонным моделям системных частотных характеристик: сепаратных подсистем (ЭМСП) и многомерных связей (ЭММС), изменяющимися по заданной функции переключения в зависимости от параметров Ω внешней среды. Совместно со структурной адаптацией МСАУ осуществляется и непрерывная параметрическая адаптация системы к ЭМСП и ЭММС путем коррекции настраиваемых коэффициентов $K = \{K_1, \dots, K_l\}$, где l – количество настраиваемых коэффициентов ПР по известным функциональным зависимостям последних от параметров Ω . Однако, большинство известных функциональных зависимостей параметров СДО от Ω носят лишь качественный характер, к тому же практически в любой реальной системе существуют неопределенности, которые оказывают существенное влияние на динамические характеристики МСАУ. Поэтому для обеспечения высокого качества управления необходимо применение дополнительного замкнутого контура адаптации.

Цикл замкнутой адаптации МСАУ в данной структуре реализуется следующим образом. Желаемое значение $X_m(t)$ выходной координаты сепаратной подсистемы определяется в блоке расчета эталонной модели (ЭМП) в соответствии с режимами и внешними условиями работы СДО, определяемыми параметрами $\Omega = \{\Omega_1, \dots, \Omega_m\}$ внешней среды, где m – количество информативных параметров. Затем $X_m(t)$ сравнивается с текущим значением выходной координаты $X(t)$, а на основе результата сравнения вычисляется ошибка адаптации $\delta(t)$. Далее блок «Адаптер» в соответствии с алгоритмом адаптации по значению $\delta(t)$

принимает решение о необходимости воздействия на систему и, в зависимости от выбранного способа управления, производит требуемую манипуляцию над системой. В данном подходе рассматриваются методы регулирования МСАУ за счет программного изменения динамических характеристик ПР, путем варьирования его коэффициентов и структуры; введения в ПР дополнительных перекрестных связей между сепаратными подсистемами.

Отметим, что МСАУ, построенная по предложенной выше структуре, кроме быстродействия и точности, также более проста в реализации, поскольку присутствие разомкнутой структурной адаптации позволяет уменьшить число настраиваемых параметров.

Таким образом, применение предложенной структуры для класса адаптивных МСАУ сложными динамическими объектами позволит не только исключить ошибки идентификации, дрейф параметров объекта и исполнительных механизмов, но и повысить робастность системы, запасы ее устойчивости при изменении структурных свойств МСАУ.

Третья глава посвящена разработке новых методов и алгоритмов синтеза управляющей части адаптивной МСАУ сложным динамическим объектом.

Алгоритм адаптации МСАУ I класса к изменяющимся условиям функционирования декомпозируется на два этапа:

- адаптация МСАУ к изменению режимов работы или характерных условий функционирования СДО (к изменению текущей ЭМСП) – структурная адаптация регуляторов подсистем;

- адаптация МСАУ к изменению параметров СДО на текущем режиме работы – параметрическая адаптация регуляторов подсистем.

На первом этапе осуществляется поиск регуляторов R_i^k подсистем, где $i = 1, 2, \dots, n$, n – размерность МСАУ, $k = 1, 2, \dots, r$, r – количество основных (максимальных) режимов работы объекта управления. Регуляторы R_i^k рассчитаны в соответствии со своей моделью $\Psi_{jk}^k(s)$. Затем среди данных r режимов, по заданным функциональным критериям, определяется базовый режим 1 работы объекта управления.

При изменении режима функционирования объекта управления алгоритм адаптации в соответствии с выбранными информационными параметрами Ω определяет текущий режим k работы объекта, а соответственно и требуемую модель $\Psi_{jk}^k(s)$ поведения каждой из подсистем на данном режиме. Затем контур адаптации производит необходимое структурное преобразование базового регулятора R_i^I для реализации расчетного для текущего режима k регулятора R_i^k .

Поскольку каждая модель подсистемы, а соответственно и регулятор R_i^k , решает задачу приближения индивидуальной характеристики $\Phi(j\omega)$ подсистемы к ее модели, на каждом режиме функционирования рассчитаны с учетом характеристики многомерной связи со всеми подсистемами МСАУ, задача адаптации всей МСАУ к новым внешним условиям, новому режиму работы считается выполненной.

На втором этапе решается задача обеспечения качества управления по каждой из регулируемых координат путем параметрической коррекции регуляторов сепаратных подсистем $R_i(s)$.

Алгоритмы коррекции $R_i(s)$ предлагаются строить как на основе имеющихся функциональных зависимостей передаточной функции СДО от Ω , так и на основе вычисления текущей ошибки адаптации $\delta(t)$.

Передаточные функции $R_i^k(s)$ каждой из управляемых координат МСАУ при движении объекта на текущем режиме определяются из условия

$$R_i^k(s) = \frac{\Phi_{\text{жс}}^k(s)}{(1 - \Phi_{\text{жс}}^k(s)) \cdot W'_{ii}(s)}, \quad \text{где} \quad \Phi_{\text{жс}}^k(s) - \text{эталонная модель динамической}$$

характеристики на текущем режиме работы, $W'_{ii}(s)$ – идентифицированная по известным функциональным зависимостям ПФ объекта управления. Поскольку $W'_{ii}(s)$ является функцией параметров Ω , а каждый из алгоритмов R_i^k рассчитывается с учетом приближения $\Phi(j\omega)$ к ее эталонной модели на данном режиме работы, то задача параметрической коррекции алгоритмов регулирования сепаратных подсистем МСАУ при движении объекта на текущем режиме его работы решается путем расчета настраиваемых коэффициентов R_i^k в зависимости от параметров Ω .

Для компенсации различного рода неопределенностей, возникающих в процессе функционирования СДО, предложен алгоритм, в котором рассчитанное значение интегральной оценки ошибки адаптации J_l сепаратной подсистемы, где l – текущий шаг (итерация) выполнения алгоритма адаптации, рассматривается в качестве целевой функции, непосредственно зависящей от вектора настраиваемых коэффициентов:

$$J_l(K_l^a) = f_l(K_l^a), \quad (4)$$

где $K_l^a = \{K_{l,1}^a, \dots, K_{l,m}^a\}$ – вектор настраиваемых коэффициентов, m – число настраиваемых коэффициентов, при этом должно существовать такое число l^* для которого выполняется следующее условие:

$$J_l < J_{\min}, \quad \text{при любом } l > l^*, \quad (5)$$

где $J_{\min} > 0$ – заданное значение трубки точности задачи адаптации.

Сначала из условий: $J_l = \sum_{i=1}^s \delta(t_i)^2 / \sum_{i=1}^s X_m(t_i)$ и $\Delta_l = \sum_{i=1}^s \delta(t_i) / \sum_{i=1}^s X_m(t_i)$, где i –

номер текущего измерения; $\delta(t_i) = X(t_i) - X_m(t_i)$ – величина ошибки адаптации i -го измерения; s – количество измерений выходной координаты за одну итерацию работы алгоритма адаптации, вычисляются текущие интегральные оценки ошибки адаптации J_l и Δ_l сепаратной подсистемы.

Далее для текущего – l цикла алгоритма, решается задача поиска управляющего воздействия – вектора настраиваемых коэффициентов K_l^a регулятора $R_i^k(s)$ из условия:

$$K_l^a = \begin{cases} K_{l-1}^a(1 - sign(\Delta_l)\gamma_l J_l), & \text{при } J_l > J_{\min}; \\ K_{l-1}^a, & \text{при } J_l \leq J_{\min}, \end{cases} \quad (6)$$

где $sign(\Delta_l)$ – знак линейной интегральной оценки ошибки адаптации, указывающий направление изменения настраиваемого коэффициента для

компенсации накопленной ошибки адаптации; $\gamma_l = F(l)$ - нелинейная весовая функция, определяющая весовой коэффициент влияния величины J_l на расчетное значение K_l^a в зависимости от номера текущей итерации l процесса адаптации. Функция $F(l)$ выбирается разработчиком исходя из минимизации значения l^* при заданном J_{min} . В работе исследованы условия сходимости алгоритма адаптации, предложены критерии отключения замкнутого контура при расхождении алгоритма, основным из которых является постоянство направления (постоянство знака) градиента целевой функции $\nabla_{K^a} J_l(K_l^a)$ в процессе работы алгоритма адаптации.

Суть алгоритма адаптации МСАУ II класса заключается в приближении текущей частотной характеристики многомерной связи подсистем к ЭММС путем подключения дополнительных связей, определяемых априорно по алгоритму синтеза на основе анализа характеристических функций системы.

Синтез корректирующих связей многомерного регулятора МСАУ выполняется из условия равенства текущей и желаемой характеристических функций (вида $D(x) = 1 + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$): $D(x) = D^*(x)$, где $D^*(x)$ – желаемая характеристическая функция, при которой МСАУ на данном режиме статически и динамически устойчива и отвечает желаемым требованиям к качеству управления.

При изменении условий функционирования объекта управления (изменении Ω), приводящих к рассогласованию текущей частотной характеристики многомерной связи подсистем и ЭММС, алгоритм адаптации, по заранее заданной функции переключения $F_{np}(\Omega)$, производит требуемое структурное преобразование многомерного регулятора $R^k(s)$. Такое преобразование осуществляется путем дискретного подключения/отключения элементов $R_{ij}^k(s)$ многомерного регулятора МСАУ, где i и j – номера подсистем между которыми вводится корректирующая связь.

Поскольку регуляторы $R^k(s)$ и $R_{ij}^k(s)$, решающие задачу приближения текущей частотной характеристики многомерной связи к ее ЭММС, на каждом режиме функционирования рассчитаны с учетом характеристик сепаратных подсистем $\Phi(j\omega)$, задача структурной адаптации всей МСАУ к новым внешним условиям, новому режиму работы считается выполненной.

В четвертой главе исследуется эффективность предложенных алгоритмов адаптации МСАУ СДО методами численного и имитационного моделирования на примере трехсвязной САУ ГТД, функционирующего в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета летательного аппарата. Исследуется работа системы в условиях неопределенности параметров ГТД, поскольку известно, что имеющиеся зависимости коэффициентов ПФ ГТД по формулам приведения, основанных на принципах газодинамического подобия, с изменением режимов работы двигателя и в зависимости от конкретного изделия достаточно сильно «расслаиваются», что приводит к значительному ухудшению качества управления.

Проведен анализ МСАУ двухвальным ТРДФ в крайних точках области функционирования двигателя – на максимальных скоростях и высотах полета ЛА. По результатам анализа сделан вывод о том, что исследуемая МСАУ ГТД принадлежит к многосвязным системам I класса. Синтезированы алгоритмы адаптивного управления двигателем по каждой из регулируемых координат.

Показан пример, имитирующий функционирование трехмерной МСАУ двухвального ТРДФ в широком диапазоне высот и скоростей полета в условиях неопределенности параметров его ПФ. На рисунке 2 представлены результаты, показывающие эффективность применения полученных алгоритмов управления.

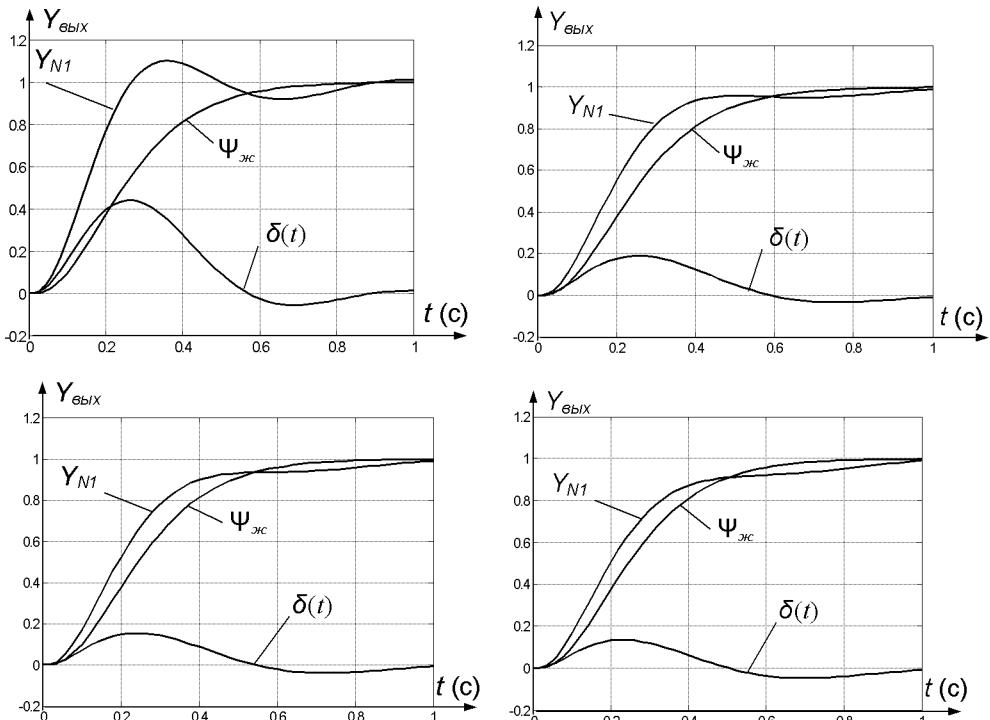


Рисунок 2. Процесс адаптации сепаратной подсистемы регулирования частоты вращения турбины низкого давления $N_{1\text{пр}}$ исследуемой МСАУ ГТД при 50% отклонении параметров передаточной функции объекта относительно параметров модели, идентифицированных по формулам приведения.

На основе предложенных алгоритмов синтеза управляющей части МСАУ с перестраиваемой структурой предложены решения, позволяющие проектировать многофункциональные МСАУ ГТД с изменяемой компоновкой.

Решены прикладные задачи синтеза корректирующих связей МСАУ двухвальным ТРДФ, подключаемых при изменении компоновки системы. В рамках решения поставленной задачи исследованы следующие компоновки системы автоматического управления двигателем:

- 1) $\langle N_{1\text{пр}} \rightarrow G_T; \pi_T^* \rightarrow F_C; T_3^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$; 2) $\langle N_{1\text{пр}} \rightarrow G_T; T_3^* \rightarrow F_C; \pi_T^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$;
- 3) $\langle T_3^* \rightarrow G_T; N_{1\text{пр}} \rightarrow F_C; \pi_T^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$.

При этом базовой компоновкой системы служила: $\langle N_{1\text{пр}} \rightarrow G_T; \pi_T^* \rightarrow F_C; T_3^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$, сменяется в процессе функционирования системы на компоновки $\langle N_{1\text{пр}} \rightarrow G_T; T_3^* \rightarrow F_C; \pi_T^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$, $\langle T_3^* \rightarrow G_T; N_{1\text{пр}} \rightarrow F_C; \pi_T^* \rightarrow G_{T\Phi} \rangle$, при которых МСАУ оказывалась неустойчивой. В результате включения в систему синтезированных корректирующих связей становится возможным обеспечить желаемый вид частотных характеристик системы, а следовательно,

удовлетворить требованиям к обеспечению устойчивости системы и величине ее запасов, что подтверждает рисунок 3.

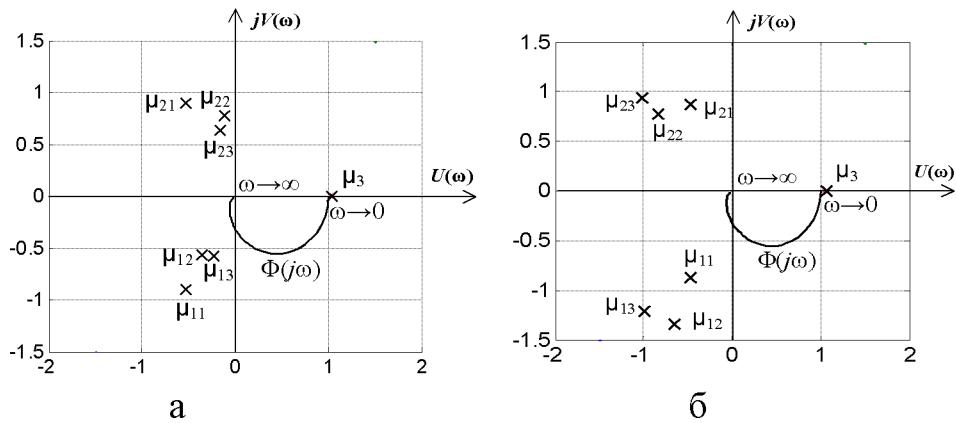


Рисунок 3. Частотные характеристики (годографы) сепаратных подсистем $\Phi(j\omega)$ и характеристики связей (корни) $\mu_i(j\omega)$ МСАУ ГТД при компоновке: а) 2; б) 3.

Показано, что использование в базе знаний адаптивной МСАУ ГТД синтезированных регуляторов сепаратных подсистем совместно с дополнительными корректирующими связями позволяет строить многофункциональные САУ ГТД с изменяемыми компоновками без потери не только устойчивости системы в целом, но и качества управления по каждой из регулируемых координат.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В работе поставлена и решена актуальная задача построения адаптивных МСАУ СДО на основе частотных методов. В ходе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Предложена концепция построения и анализа адаптивных МСАУ СДО, основанная на теоретико-множественном подходе к описанию многосвязных систем на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними. Предложена классификация многосвязных систем по степени изменения их системных частотных характеристик, а также структура, позволяющая реализовать адаптацию МСАУ различных классов к изменениям условий и режимов функционирования СДО.

2. Разработан алгоритм структурно-параметрической адаптации МСАУ I класса к непрерывно изменяющимся условиям функционирования СДО в условиях неопределенности, основанный на приближении индивидуальных характеристик сепаратных подсистем к их эталонным моделям.

Разработан алгоритм структурной адаптации МСАУ II класса к непрерывно изменяющимся условиям функционирования СДО, в том числе, при которых система теряет устойчивость. Алгоритм основан на приближении текущей частотной характеристики многомерной связи к ее эталонной модели.

Разработан алгоритм синтеза связей в многомерном регуляторе на основе анализа характеристических функций из условия приближения текущей частотной характеристики многомерной связи к ее эталонной модели.

Разработан алгоритм синтеза связей в многомерном регуляторе из условия устойчивости МСАУ, позволяющий получать область варьирования параметров

синтезируемых связей с целью повышения качества управления по каждой из регулируемых координат системы.

3. Разработана инженерная методика анализа и синтеза МСАУ ГТД, адаптивных к изменению высот и скоростей полета (в том числе в условиях, когда известные зависимости между параметрами двигателя по формулам приведения сохраняются только качественно), включающая разработанные методику и алгоритмы структурной и параметрической адаптации корректирующего устройства МСАУ I класса. Использование предложенной методики для типовых инженерных работ по анализу и синтезу МСАУ ГТД высокоманевренных ЛА позволяет снизить временные затраты на их выполнение в среднем на 20–30 %.

4. Исследована эффективность предложенных алгоритмов адаптации МСАУ СДО методами численного и имитационного моделирования. Разработана методика построения 2- и 3-мерных адаптивных МСАУ ГТД, функционирующих в широком диапазоне изменения высот и скоростей полета ЛА, в условиях неопределенности параметров его передаточной функции. Применение разработанных алгоритмов адаптации позволяет обеспечить в условиях моделируемых примеров требуемую величину запасов устойчивости, качество управления по регулируемым координатам: ($t_p = t_{\text{преб}} \pm 0.2$ с, $\sigma = 0\%$), а также уменьшить интегральную оценку ошибки адаптации в 3,5 ($J = 0,2\%$) и 10 ($J = 0,6\%$) раз при 20% и 50% отклонениях параметров ПФ ГТД от их расчетных величин.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Об одном подходе к построению адаптивных многосвязных систем автоматического управления сложным динамическим объектом / Б. Г. Ильясов, Г. А. Сайтова, А. Ш. Назаров // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2010. № 8. С. 13–20.

В других изданиях

2. Концепция проектирования адаптивных многосвязных САУ газотурбинных двигателей / Б. Г. Ильясов, Г. А. Сайтова, А. Ш. Назаров // Мехатроника, автоматизация и управление: матер. II Рос. мультиконф. по проблемам управления. СПб.: изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 219–222.

3. Многорежимный адаптивный регулятор для САУ авиационными газотурбинными двигателями / А. Ш. Назаров // Мавлютовские чтения: матер. Всерос. молодежн. науч. конф. сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2008. Т. 3. С. 224–225.

4. Метод построения адаптивной многосвязной САУ сложным динамическим объектом / А. Ш. Назаров // Мавлютовские чтения: матер. Всерос. молодежн. науч. конф. сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 3. С. 223–224.

5. Построение адаптивной многосвязной системы автоматического управления на основе частотного метода / Б. Г. Ильясов, Г. А. Сайтова, А. Ш.

Назаров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XI Междунар. конф. Самара: Самарск. науч. центр РАН, 2009. С. 117–123.

6. Формирование стабилизирующих связей между сепаратными подсистемами в адаптивных многосвязных системах автоматического управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Сайтова, А. Ш. Назаров // Мехатроника, автоматизация и управление: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог: изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 59–61.

7. Синтез многорежимного адаптивного регулятора ГТД на основе анализа частотных характеристик / А. Ш. Назаров // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. IV Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 381–385.

8. Алгоритм синтеза регулятора адаптивной многосвязной системы автоматического управления на основе анализа характеристических функций / Б. Г. Ильясов, Г. А. Сайтова, А. Ш. Назаров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XII Междунар. конф. Самара: Самарск. науч. центр РАН, 2010. С. 187–195.

9. Адаптивное управление сложным динамическим объектом типа ГТД на основе частотных методов с явной эталонной моделью / А. Ш. Назаров // Новые решения и технологии в газотурбостроении: сб. тез. докл. М.: ЦИАМ, 2010. С. 48–51.

10. Метод стабилизации многосвязной системы автоматического управления с изменяемой структурой многосвязного регулятора / А. Ш. Назаров // Актуальные проблемы науки и техники: сб. тр. V Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 237–240.

Диссертант

А. Ш. Назаров

НАЗАРОВ Анвар Шамильевич

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
АДАПТИВНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ

Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 30.06.2011. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.- изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 213

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12