

На правах рукописи

ХАЛИКОВА Елена Анатольевна

**ЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА
ГЕТЕРОГЕННЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ИХ ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2010

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики
ГОУ 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. Казанского (Приволжского)
федерального университета

д-р физ.-мат. наук, проф.
МАЛИКОВ Рамиль Фарукович,
зав. каф. информационных
полиграфических систем и технологий
Башкирского государственного
педагогического университета

Ведущая организация ФГУП «Уфимское научно-производственное
предприятие «Молния»

Защита диссертации состоится « 12 » ноября 2010 г. в 10-00 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 « 1 » октября 2010 г.

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

В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В связи с возрастающей сложностью объектов управления и необходимостью получения оптимальных показателей качества в последнее время большую роль играют системы автоматического управления. Во многих практических случаях возникает необходимость автоматизировать не только отдельные объекты, процессы и операции, но и большие сложные комплексы, включающие в себя несколько автоматизированных подсистем, взаимодействующих друг с другом.

При функционировании таких сложных комплексов появляется необходимость учета взаимных связей, влияющих на протекание процессов управления и на повышение качества функционирования сложных технических объектов (СТО). Поэтому для совершенствования процессов управления в сложных системах следует использовать не только естественные, но и вводить искусственные взаимные связи.

Системы управления, в которых происходит регулирование более чем одной величины с помощью двух и более регулирующих органов, называются многосвязными системами автоматического управления (МСАУ). МСАУ широко распространены в различных областях техники: в электроэнергетических системах, состоящих из большого числа параллельно работающих генераторов электрической энергии; системах автоматического регулирования мощности атомных реакторов; следящих системах управления положением оси в азимутальной и вертикальной плоскостях; системах автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи; системах синхронизации винтов турбовинтовых авиационных двигателей; многодвигательных силовых установках летательных аппаратов; летательных аппаратах различного назначения (самолетах, вертолетах, ракетах, спутниках) и других сложных системах.

Характерным свойством МСАУ является присущая им многофункциональность, т.е. в процессе работы возможность изменения как компоновки системы (количественного и качественного состава взаимодействующих между собой сепаратных подсистем), так и динамических свойств самих сепаратных подсистем. Отмеченное свойство усложняет процесс проектирования МСАУ, поскольку меняется размерность математической модели в виде описывающей ее системы дифференциальных уравнений. Основная трудность при этом заключается в обеспечении устойчивости и желаемого качества функционирования как МСАУ в целом, так и её сепаратных подсистем.

Теоретические проблемы исследования сложных динамических систем рассматриваются в работах отечественных ученых: А. А. Красовского, Б. Н. Петрова, М. В. Меерова, О. С. Соболева, Б. П. Поляка, Я. З. Цыпкина, В. Т. Морозовского, П. И. Чинаева, Б. Г. Ильясова, И. И. Ахметгалеева, Г. Г. Куликова, Ю. М. Гусева, В. И. Васильева, В. Г. Крымского, В. Н. Ефанова, Ю. С. Кабальнова и других. Прикладные аспекты проектирования МСАУ ГТД разработаны в трудах А. А. Шевякова, Б. А. Черкасова, О. С. Гуревича, Т. С. Мартяновой, В. А. Боднера, Ф. А. Шаймарданова и других.

Анализ существующих методов исследования МСАУ показал, что наиболее приемлемыми для решения данной задачи являются частотные методы. Достоинства частотных методов анализа и синтеза в их простоте и наглядности, возможности описания динамических свойств МСАУ на уровне подсистем и элементов связи между ними. Особый интерес представляет обобщение частотных методов анализа и синтеза для МСАУ.

В основе исследований лежит частотный метод анализа и синтеза МСАУ, предложенный академиком Б. Н. Петровым и его учениками. Частотные методы были широко развиты в 40–50-х годах. Частотные методы позволяют определять такие важные параметры системы, как запасы устойчивости по модулю и по фазе. Эти значения являются существенными критериями работы одномерных систем, поэтому понятия запасов устойчивости системы должны быть обобщены и для многосвязных систем управления. Интерес к частотным методам угас из-за большой трудности при расчетах. Однако в 90-х годах с широким распространением компьютерной техники и созданием прикладного программного обеспечения (MatLab, MathCad и т.д.) вновь возросли возможности использования частотных методов, так как они в большой степени отражают физическое содержание решаемых задач.

Значительный интерес вызывают у исследователей вопросы функционирования сложных систем, содержащих в составе неустойчивые объекты. Такие МСАУ обладают рядом преимуществ по сравнению с системами, состоящими из устойчивых подсистем: значительное быстродействие, существенная экономия ресурсов, большее распределение параметров входящих в них элементов, ускоренный переход из одного состояния в другое.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является совершенствование частотных методов анализа и синтеза гетерогенных линейных многосвязных систем управления сложными техническими объектами, в том числе с неустойчивыми подсистемами, на основе оценки запасов устойчивости и оценка их эффективности на прикладных примерах.

Для достижения поставленной цели актуальным является решение следующих задач.

1. Разработать методы анализа устойчивости гетерогенной МСАУ.
2. Разработать метод оценки запасов устойчивости гомогенных и гетерогенных МСАУ по модулю и по фазе и на этой основе разработать методику синтеза гомогенной МСАУ из условия обеспечения запасов устойчивости.
3. Разработать метод синтеза МСАУ, содержащей динамически или статически неустойчивые подсистемы, и оценить влияние внешних возмущений на устойчивость синтезированной системы.
4. Разработать инженерную методику исследования и проектирования МСАУ ГТД, включающую разработанные методы проектирования многосвязных систем частотными методами, программное обеспечение для автоматизированной системы исследования, а также исследовать эффективность разработанной инженерной методики анализа и синтеза МСАУ применительно к ГТД.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории автоматического управления, методы системного анализа, методы теории функций комплексного переменного и функционального анализа, основы матричного исчисления и линейной алгебры и методы имитационного и математического моделирования.

На защиту выносятся

1. Методы анализа устойчивости гетерогенных МСАУ, основанные на сведении ее к гомогенным МСАУ.

2. Методы определения запасов устойчивости многосвязных систем управления по модулю и по фазе и метод синтеза гомогенных МСАУ из условия удовлетворения заданным запасам устойчивости по фазе и по модулю.

3. Метод синтеза МСАУ, содержащей динамически и статически неустойчивые объекты.

4. Инженерная методика исследования и проектирования МСАУ ГТД, включающая разработанные методы проектирования многосвязных систем частотными методами, программное обеспечение для автоматизированной системы исследования, реализующее эти методы, а также результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенных методов.

Научная новизна

1. Научная новизна частотного метода анализа устойчивости гетерогенных МСАУ заключается в корректном сведении ее различными способами к гомогенной МСАУ, что позволяет получить достаточные условия устойчивости исходной гетерогенной МСАУ.

2. Научная новизна предложенного метода оценки запасов устойчивости МСАУ заключается в нахождении критических точек характеристического уравнения связи и в оценке относительно них запасов по модулю и по фазе. На основе данного метода разработан метод синтеза гомогенных МСАУ из условия обеспечения необходимых запасов устойчивости, основанный на построении областей расположения корней характеристического уравнения с заданными запасами устойчивости по модулю и по фазе.

3. Научная новизна предложенного метода синтеза МСАУ, содержащей неустойчивые объекты и подсистемы, состоит во введении стабилизирующих неголономных связей между ними и в определении физической реализуемости рациональной структуры многомерного элемента связи, а также в оценке динамических свойств синтезированной системы.

Практическая ценность работы

Практическую значимость представляют следующие полученные результаты.

1. Разработанная инженерная методика исследования и проектирования МСАУ ГТД, которая позволяет: провести анализ устойчивости МСАУ, синтезировать МСАУ из условия обеспечения требуемых запасов устойчивости; сделать процедуру исследования МСАУ наглядной и информативной с точки зрения выбора параметров сепаратных подсистем, обеспечивающих заданные запасы устойчивости МСАУ ГТД по отдельным каналам регулирования.

2. Разработанное программное обеспечение для автоматизированного исследования и проектирования МСАУ ГТД, реализующее предложенные в работе методы.

3. Результаты проведенных экспериментальных исследований на примере МСАУ ГТД, которые подтверждают эффективность предложенных частотных методов анализа и синтеза многосвязных систем с использованием разработанного программного обеспечения.

Связь темы исследования с научными программами

Работа выполнена на кафедре технической кибернетики УГАТУ в рамках следующих грантов РФФИ: № 05-01-97906-р_агидель_а, № 05-08-18098-а, № 08-08-00774-а, № 08-08-97039-р_поволжье_а, № 09-08-00490-а. Работа связана с исследованиями по следующим темам: Программа № 16 РАН, 2004–2006 гг. «Проблемы анализа и синтеза интегрированных технических и социальных систем управления», 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 конференция по проблемам управления ИПУ РАН (Москва, 2006, 2009).

– Международная научно-техническая конференция «Мехатроника, автоматизация, управление» (Уфа, 2005, Санкт-Петербург, 2006, Таганрог, 2007, Дивноморское, 2009).

– IX–XI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2007–2009).

– V научная конференция «Управление и информационные технологии» (Санкт-Петербург, 2008).

– VII, X, XI Международный семинар «Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT)» (Уфа, 2005, Турция, 2008, Греция, 2009).

– IV Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Проблемы управления и информационные технологии» (Казань, 2008).

– I, III, IV, V всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» (Уфа, 2006, 2008–2010).

– Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2008, 2009).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы отражены в 24 публикациях, в том числе в 18 статьях, из них 2 – в изданиях, входящих в список ВАК, 6 трудах конференций, получено 1 свидетельство о регистрации программы.

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает введение, пять глав основного материала и библиографический список. Работа без библиографического списка изложена на 181 странице машинописного текста. Библиографический список включает 150 наименований.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность канд. техн. наук, доц., Саитовой Гузели Асхатовне за высококвалифицированную научную консультацию в области частотных методов исследования сложных динамических объектов и за оказанную помощь в выполнении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ особенностей управления сложными объектами на основе прогнозных оценок их состояний. Выявлены основные трудности решения задач прогнозирования состояния сложных объектов, обусловленные недостаточной изученностью механизмов, протекающих в системах и окружающей среде процессов; ограниченными возможностями проведения активных экспериментов; сложностью и нескоординированностью процессов сбора исходных данных, их недостаточной доступностью, а также рядом других причин. Выделены следующие задачи:

- 1) анализ устойчивости гетерогенных МСАУ;
- 2) нахождение запасов устойчивости МСАУ по модулю и по фазе;
- 3) синтез МСАУ из условия обеспечения требуемых запасов устойчивости по модулю и по фазе;
- 4) управление сложной системой, содержащей неустойчивые объекты.

Многосвязные системы управления, в которых все связи между подсистемами осуществляются через многомерный объект, описываются следующими уравнениями движения:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(s) = \mathbf{W}(s)[\mathbf{U}(s) + \mathbf{F}(s)], \\ \mathbf{U}(s) = \mathbf{R}(s)[\mathbf{X}^0(s) - \mathbf{X}(s)], \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{X}^0(s)$, $\mathbf{X}(s)$, $\mathbf{U}(s)$, $\mathbf{F}(s)$ – векторы задающих, регулируемых, управляющих и возмущающих воздействий соответственно; $\mathbf{W}(s) = \|W_{ij}(s)\|_{n \times n}$ – матричная передаточная функция (МПФ) многомерного объекта по управляющим воздействиям; $R(s) = \text{diag}\{R_i(s)\}$, $i \in \overline{1, n}$ – МПФ сепаратных регуляторов, n – порядок системы. Структурная схема МСАУ, соответствующая уравнению (1), представлена на рис. 1.

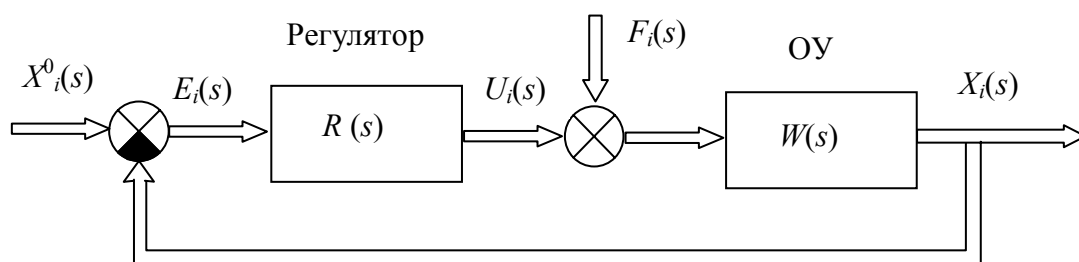


Рис. 1. Структурная схема МСАУ

Для всестороннего исследования МСАУ наиболее целесообразно применение подхода, предложенного академиком Б. Н. Петровым и продолженного в работе профессора Б. Г. Ильсова и его учеников. Данный подход предполагает описание многосвязной системы на уровне физических подсистем и многомерных элементов связи между ними.

В качестве индивидуальной (локальной) характеристики (ИХ) отдельной подсистемы рассматривается ее передаточная функция $\Phi_i(s)$ в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии, либо амплитудно-фазовая характеристика $\Phi_i(j\omega)$. Для МСАУ, представленной на рис. 1, передаточные функции индивидуальных характеристик подсистем имеют вид

$$\Phi_i(s) = \frac{x_i(s)}{x_i^0(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1 + R_i(s)W_{ii}(s)}. \quad (2)$$

Если все сепаратные подсистемы имеют идентичные характеристики, то есть для всех $i, j \in \overline{1, n}$, $\Phi_i(s) = \Phi_j(s)$, то МСАУ называется гомогенной, в противном случае – гетерогенной.

Рассмотрим сочетание k связанных между собой подсистем в полной МСАУ, состоящей из n подсистем, где через $\overline{m} = \overline{m_1, m_k}$, $m_1, m_k \in \overline{1, n}$ ($m_i < m_j$, $i, j \in \overline{1, n}$) обозначим каждое сочетание. Характеристикой многомерной относительной связи (ХС) между k подсистемами в полной МСАУ является значение

$$H_{\overline{m}} = \frac{\det[W_{ij}(s)\gamma_{ij}]_{k \times k}}{\det[W_{ij}(s)\delta_{ij}]_{k \times k}}, \quad k = \overline{2, n}, \quad i, j \in \overline{m}, \quad (3)$$

где $\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & i \neq j; \\ 0, & i = j, \end{cases} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, n}.$

Характеристическое уравнение МСАУ может быть представлено через ИХ подсистем и ХС между ними:

$$D(\Phi, H) = 1 + \sum_{\substack{i, j \\ i < j}}^{\binom{n}{2}} H_{ij} \Phi_i \Phi_j + \sum_{\substack{i, j, k \\ i < j < k}}^{\binom{n}{3}} H_{ijk} \Phi_i \Phi_j \Phi_k + \dots + H_n \prod_{i=1}^n \Phi_i = 0, \quad (4)$$

где $\binom{n}{k} = C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$.

Для гомогенных МСАУ вводится понятие обобщенной ХС, представляющей собой сумму элементов одного класса эквивалентности. Эта ХС представляет собой суммарную связь, создаваемую группой из k ($k \leq n$) подсистем. Обобщенная характеристика связи $H_k(s)$ в общем виде выражается формулой:

$$H_k(s) = \sum_{\overline{m}}^{\binom{n}{k}} H_{\overline{m}}(s), \quad k = \overline{2, n}. \quad (5)$$

С учетом (5) характеристическое уравнение (4) для гомогенной МСАУ запишется в виде:

$$D(\Phi, h) = 1 + H_2(s)\Phi^2(s) + H_3(s)\Phi^3(s) + \dots + H_n(s)\Phi^n(s) = 0. \quad (6)$$

Если связи между подсистемами голономные, то $H_m(s) = h_m$, где h_m – числовой коэффициент. Характеристическое уравнение гомогенной МСАУ с голономными связями имеет вид

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + \dots + h_n\Phi^n = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим уравнение

$$D(s, x) = 1 + h_2x^2 + \dots + h_nx^n = 0 \quad (8)$$

относительно переменной x , которое получается из уравнения (7) подстановкой $\Phi(s) = x$. Уравнение (8) называется *алгебраическим уравнением связи*.

Критерий устойчивости гомогенных МСАУ. Для устойчивости линейных гомогенных МСАУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) $\Phi(j\omega)$, $\omega \in (-\infty, +\infty)$, построенный на плоскости корней уравнения связи (8), не охватывал ни один из его корней.

В дальнейшем в работе используется данный подход как наиболее отвечающий решениям поставленных задач.

Во второй главе предложены модифицированные частотные критерии устойчивости гомогенных МСАУ, позволяющие достаточно просто определить устойчивость систем высокого порядка и большой размерности.

Отобразим комплексную плоскость ПФ замкнутой системы $\Phi(j\omega)$ на комплексную плоскость ПФ разомкнутой системы $W(j\omega)$: $\Phi(j\omega) \rightarrow W(j\omega)$. Из соотношения $\Phi(j\omega) = W(j\omega)/(1 + W(j\omega))$, получим $W(j\omega) = \Phi(j\omega)/(1 - \Phi(j\omega))$. Корни характеристического уравнения связи (8) x_i , $i = \overline{1, n}$ переводятся в некоторые точки комплексной плоскости $x_i^* = x_i/(1 - x_i)$, $i = \overline{1, n}$. Назовем эти значения *модифицированными корнями характеристического уравнения связи*.

Модифицированный критерий устойчивости относительно ПФ разомкнутой подсистемы. Если гомогенная многосвязная система состоит из подсистем, устойчивых в разомкнутом состоянии, то для устойчивости положения равновесия этой системы необходимо и достаточно, чтобы АФХ разомкнутой подсистемы $W(j\omega)$, при $\omega \in (-\infty, +\infty)$ не охватывала ни один из модифицированных корней x_i^* , $i = \overline{1, n}$.

Графическое представление модифицированного критерия устойчивости гомогенных МСАУ показано на рис. 2 на примере анализа устойчивости системы, состоящей из 10 однотипными подсистемами при различных значениях характеристики многомерной связи между подсистемами.

Годограф подсистемы $W(j\omega)$ построен при значениях $\omega \in (0, +\infty)$. Звездочками обозначены корни характеристического уравнения связи неустойчивой системы; треугольниками – корни уравнения устойчивой системы. При этом каждая из 10 подсистем в составе МСАУ имеет 3 порядок, при анализе устойчивости векторно-матричными методами необходимо было бы решить уравнение 30-го порядка. Предложенный модифицированный критерий устойчивости

используется в дальнейшем при нахождении запасов устойчивости гомогенной МСАУ по модулю и по фазе.

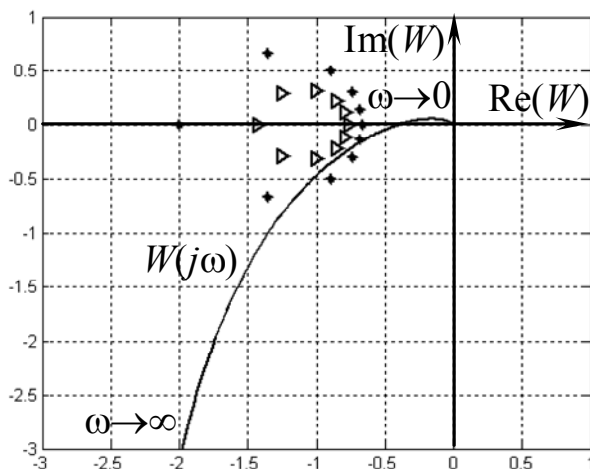


Рис. 2. Взаимное расположение годографа передаточной функции $W(j\omega)$ и модифицированных корней характеристического уравнения связи

Представлены методики исследования устойчивости многосвязных гетерогенных систем управления методом сведения к эквивалентным гомогенным МСАУ и в использовании критерия устойчивости гомогенных МСАУ.

Достаточное условие устойчивости гетерогенной МСАУ. Пусть гомогенная МСАУ, состоящая из подсистем с АФХ $\Psi(s)$, устойчива. Гетерогенная МСАУ состоит из n различных подсистем с АФХ $\Phi_i(s)$, $i = \overline{1, n}$. Тогда для устойчивости гетерогенной МСАУ достаточно, чтобы часть годографа $\Psi(j\omega)$, лежащая в нижней полуплоскости, полностью включала в себя части годографов подсистем $\Phi_i(j\omega)$, $i = \overline{1, n}$, также лежащие в нижней полуплоскости. При этом связи между подсистемами остаются неизменными.

В случае гетерогенной МСАУ с неголономными связями, имеющей полную структуру или близкую к ней, рационально сводить задачу анализа устойчивости к исследованию гомогенной МСАУ с неголономными связями. Сначала для передаточной функции подсистем строится аппроксимирующая функция $\Psi(s)$. Относительно функции $\Psi(s)$ записывается характеристическое уравнение МСАУ. Далее рассматривается характеристическое уравнение связи относительно переменной x , которое получается из характеристического уравнения МСАУ подстановкой $\Psi(s) = x$. К исследованию полученной системы может быть применен критерий устойчивости гомогенных МСАУ с неголономными связями. Однако следует учитывать, что полученное условие устойчивости относится к аппроксимирующей функции, следовательно является достаточным условием устойчивости. В общем случае характеристическая функция для гетерогенной МСАУ имеет вид:

$$D(s) = 1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = 1 + \sum_{k=2}^n S_k = 0,$$

где S_k – k -й класс эквивалентности, представляющий собой множество взаимосвязанных k из n подсистем и равный:

$$S_k = \sum_{C_n^k} H_m(s) \Phi_i(s) \dots \Phi_k(s).$$

МСАУ может содержать небольшое количество элементов каждого класса (т. е. множеств взаимосвязанных k из n подсистем), при этом слагаемые в характеристическом уравнении значительно отличаются друг от друга по сложности характеристик связи. В этом случае целесообразно рассмотреть все слагаемые $H_m(s) \Phi_i(s) \dots \Phi_k(s)$ по отдельности. Для каждого такого элемента необходимо вычислить результирующую функцию: $\Psi_m(s) = \sqrt[m]{H_m(s) \Phi_i(s) \dots \Phi_k(s)}$.

Далее для всех найденных результирующих функций строится аппроксимирующая функция $\Psi(s)$, к которой возможно применить достаточное условие устойчивости гетерогенных МСАУ.

Сформулирован критерий устойчивости гетерогенных МСАУ общего вида, использование которого возможно в случаях сильно разреженных матриц многомерных элементов связи. Предложен подход к исследованию гетерогенных МСАУ с кольцевой структурой, основанный на применении критерия устойчивости гетерогенных МСАУ. Разработан метод анализа устойчивости гетерогенных МСАУ как с голономными, так и с неголономными связями. Данный подход позволяет достаточно эффективно решать не только задачу анализа устойчивости данного класса систем, но и синтеза из условия устойчивости.

В третьей главе предложен подход к оценке запасов устойчивости гомогенной МСАУ. Показана целесообразность оценки запасов устойчивости по модулю и по фазе относительно АФХ как разомкнутой, так и замкнутой подсистемы. Оценка запасов устойчивости является важным показателем при анализе влияния изменения параметров системы на ее устойчивость.

В классической теории управления запас устойчивости одномерной замкнутой системы определяют по удалению амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы от точки $(-1; j0)$. Запас устойчивости по модулю одномерной системы определяет дополнительное усиление, которое приведет замкнутую систему в состояние критической устойчивости. Целесообразно ввести подобное определение для МСАУ таким образом, чтобы оно не противоречило приведенной формулировке для одномерной системы.

Запас устойчивости по модулю гомогенной МСАУ – это число, на которое должен быть умножен коэффициент усиления разомкнутой подсистемы, чтобы МСАУ оказалась на границе устойчивости.

Постановка задачи. Пусть гомогенная МСАУ состоит из устойчивых подсистем, разомкнутые передаточные функции которых равны $W(s)$. Необходимо найти запас устойчивости по модулю относительно разомкнутой подсистемы с использованием модифицированных корней, то есть вычислить такой предельный коэффициент усиления разомкнутой подсистемы \tilde{K} , чтобы МСАУ оказалась на границе устойчивости.

Пусть каждая разомкнутая подсистема имеет передаточную функцию $W(s)$, тогда передаточная функция подсистемы с граничным коэффициентом \tilde{K} будет равна $\tilde{W}(s) = \tilde{K}W(s)$. Для определения запаса устойчивости гомогенной МСАУ по модулю необходимо найти такой предельный коэффициент усиления \tilde{K} разомкнутой подсистемы $W(s)$, чтобы амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы $\tilde{W}(s)$ проходила через один из модифицированных корней характеристического уравнения связи, не охватывая при этом другие.

Используя замену $s = j\omega$, перейдем к частотной переменной ω . На комплексной плоскости построим годограф функции $W(j\omega)$ и модифицированные корни x_i^* , $i = \overline{1, n}$ уравнения связи, вычисленные по методике, приведенной в главе 2. Проведем прямые, проходящие через начало координат и модифицированные корни. Обозначим расстояния от начала координат до пересечения прямых с годографом $W(j\omega)$ через β_i , $i = \overline{1, n}$ (рис. 3).

Тогда $\tilde{K} = \min\{|x_i^*|/\beta_i\}$, $i = \overline{1, n}$. Так как МСАУ по условию устойчива, то $|x_i^*| > \beta_i$, поэтому для $\forall i, i = \overline{1, n}$ выполняется неравенство: $|x_i^*|/\beta_i > 1$. Значит, значение предельного коэффициента должно удовлетворять следующему требованию: $\tilde{K} > 1$. Кроме того, из всех возможных значений \tilde{K} , найденных для всех модифицированных корней x_i^* , $i = \overline{1, n}$ уравнения связи, необходимо выбрать наименьший.

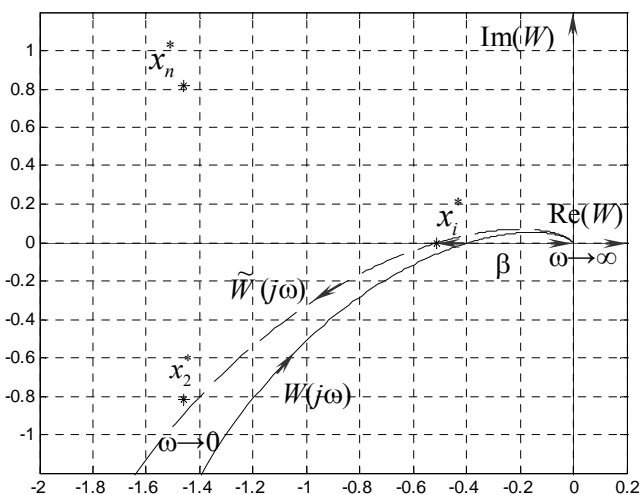


Рис.3. Определение запаса устойчивости МСАУ по модулю

Установлено, что запас устойчивости гомогенной МСАУ по модулю не может превышать собственный запас устойчивости по модулю сепаратной подсистемы, работающей в автономном режиме.

Аналогично, опираясь на понятие запаса устойчивости по фазе одномерной системы, вводится понятие запаса устойчивости по фазе гомогенной МСАУ с голономными связями.

Рассмотрено построение области расположения корней характеристического уравнения связи гомогенной МСАУ с заданными запасами устойчивости

по модулю и по фазе. Предложена методика синтеза гомогенной МСАУ из условия обеспечения требуемых запасов устойчивости за счет формирования коэффициентов связи между подсистемами. На основе критерия устойчивости гомогенных МСАУ можно достаточно просто спроектировать коэффициенты связей между подсистемами, обеспечивающие устойчивость системы с заданными запасами по модулю и по фазе.

Постановка задачи. Синтезировать многомерные голономные связи между подсистемами гомогенной МСАУ с определенной передаточной функцией подсистем, чтобы система функционировала с заданными запасами устойчивости по модулю и по фазе.

Методика решения задачи синтеза заключается в последовательном выполнении следующего алгоритма.

1. На комплексной плоскости построить годограф заданной передаточной функции $\Phi(j\omega)$ замкнутой сепаратной подсистемы при изменении ω от 0 до $+\infty$.

2. Построить область G_1 , соответствующую расположению корней характеристического уравнения связи МСАУ с заданным запасом по модулю.

3. Аналогично построить область G_2 , в которой гомогенная МСАУ обладает заданным запасом по фазе.

4. Найти пересечение областей $G = G_1 \cap G_2$, полученная область G является областью устойчивости МСАУ с заданными запасами.

5. В области G расположить корни характеристического уравнения x_i , $i = \overline{1, n}$, таким образом, чтобы выполнялось условие: $\sum_{i=1}^n (1/x_i) = 0$.

6. Вычислить характеристики связи h_i , $i = \overline{2, n}$, коэффициенты связей k_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$. Провести моделирование синтезированной МСАУ, оценить качество переходных процессов в режиме управления.

7. Если качество переходных процессов неудовлетворительно, то вернуться к пункту 5 и выбрать другое расположение корней. Повторить процедуру синтеза.

8. Если качество переходных процессов удовлетворительно, то синтез на этом завершен.

Показан подход к оценке запасов устойчивости гетерогенной МСАУ, состоящей из разнородных подсистем. Представлена разница между методиками нахождения запасов устойчивости для гомогенных и гетерогенных МСАУ и их отличительные особенности.

В четвертой главе проведена классификация задач управления неустойчивыми объектами в зависимости от типа неустойчивости. Рассмотрены способы введения стабилизирующих связей в зависимости от исходных объектов и существующих взаимоотношений между ними.

Предложен подход, позволяющий формировать структуру и определять параметры связей между неустойчивыми подсистемами для обеспечения устойчивости многосвязной системы в целом. Проанализировано решение задачи формирования устойчивой МСАУ из неустойчивых подсистем за счет введения искусственных перекрестных связей, а не за счет изменения структуры самих

подсистем. Приведена методика определения характеристик компенсирующих связей, которая заключается в выполнении следующего алгоритма.

1) Рассмотрим характеристическое уравнение системы $D(H, s)$, состоящей из заданных подсистем с искомой характеристикой связи $H(s)$.

2) Сформируем желаемое характеристическое уравнение $D^*(H^*, s)$ устойчивой МСАУ, например, состоящей из устойчивых подсистем с передаточной функцией $\Phi^*(s)$ и желаемой характеристикой связи $H^*(s)$.

3) Искомая характеристика связи $H(s)$ определяется из равенства нулю разности этих уравнений: $D^*(H^*, s) - D(H, s) = 0$.

Таким образом, характеристика связи зависит от выбора желаемого характеристического уравнения связи, которое задается из условия устойчивости. При этом невозможно указать граничные значения коэффициентов характеристики связи, т.е. синтезированная система является заведомо устойчивой с заданными запасами устойчивости.

Синтезированная характеристика связи может быть получена при различных структурах перекрестных связей. Распределение связей не изменяет вид характеристического уравнения (МСАУ останется устойчивой), но влияет на качество переходных процессов. Качественные характеристики МСАУ могут определяться на этапе выбора желаемой передаточной функции и на этапе распределения характеристики связей между перекрестными связями. Поэтому в дальнейшем для качественного функционирования системы необходимо решить задачи: задачу определения структуры желаемого характеристического уравнения системы; задачу оптимизации связей между подсистемами.

Сформулирован критерий устойчивости гомогенной МСАУ, состоящей из статически неустойчивых подсистем. Эффективность разработанного подхода подтверждена результатами моделирования. Предложена процедура формирования многомерных связей в многосвязной системе управления неустойчивыми объектами, которая обеспечивает устойчивость многосвязной системы в целом даже с учетом наличия малых параметров, связанных с введением неголономных связей. Проанализированы возможности улучшения качества переходных процессов в синтезированной МСАУ при различных распределениях связей между объектами.

В пятой главе представлено программное обеспечение, позволяющее выполнять анализ и синтез гомогенных линейных и нелинейных МСАУ. Предложенное программное средство имеет возможность моделировать процесс функционирования МСАУ, оценивать устойчивость многосвязных систем управления, определять запасы устойчивости гомогенной МСАУ по модулю и по фазе, проводить синтез как линейных, так и нелинейных систем.

В работе рассмотрена модель двухвального ТРДФ, который описывается следующими уравнениями:

$$X_{n_1}(s) = W_{11}(s)X_{G_{TO}}(s) + W_{12}(s)X_{F_C}(s) - W_{13}(s)X_{G_{T\Phi}}(s);$$

$$X_{\pi_T}(s) = W_{21}(s)X_{G_{TO}}(s) + W_{22}(s)X_{F_C}(s) - W_{23}(s)X_{G_{T\Phi}}(s);$$

$$X_{T_4^*}(s) = W_{31}(s)X_{G_{TO}}(s) - W_{32}(s)X_{F_C}(s) + W_{33}(s)X_{G_{T\Phi}}(s),$$

где n_1 – частота вращения турбокомпрессора низкого давления, π_T – степень понижения давления на турбине, T_4^* – температура газов за турбиной, $G_{ТО}$ – расход топлива в основной камере сгорания, F_C – площадь сечения реактивного сопла, $G_{ТФ}$ – расход топлива в форсажной камере сгорания, $X_{n_1}(s)$, $X_{\pi_T}(s)$, $X_{T_4^*}(s)$ – относительные отклонения соответствующих координат.

Проведен анализ устойчивости двусвязных САУ ГТД с различными программами управления: $G_T \rightarrow n_1$, $F_C \rightarrow \pi_T$ и $G_T \rightarrow n_1$, $G_{ТФ} \rightarrow T_4^*$ с использованием разработанных критериев устойчивости гетерогенной МСАУ. Показано расположение критических коэффициентов усиления и предельных дополнительных фаз подсистем САУ с программой управления $G_T \rightarrow n_1$, $G_{ТФ} \rightarrow T_4^*$. Определены запасы устойчивости по модулю и по фазе рассматриваемых систем, а также влияние изменения параметров регуляторов на запасы устойчивости. Например, исходный регулятор канала $G_{ТФ} \rightarrow T_4^*$ имеет передаточную функцию

$$R_3(s) = \frac{6(0,65s + 1)}{s(0,1s + 1)}, \text{ измененный} - R_3(s) = \frac{6(0,3s + 1)}{s(0,1s + 1)}.$$

График зависимости граничного коэффициента усиления K_3 подсистемы по каналу $G_{ТФ} \rightarrow T_4^*$ от граничного коэффициента усиления K_1 первой подсистемы по каналу $G_T \rightarrow n_1$ представлен на рис. 5. (пунктирной линией построен график зависимости $K_3(K_1)$ исходной системы, сплошной линией – измененной системы).

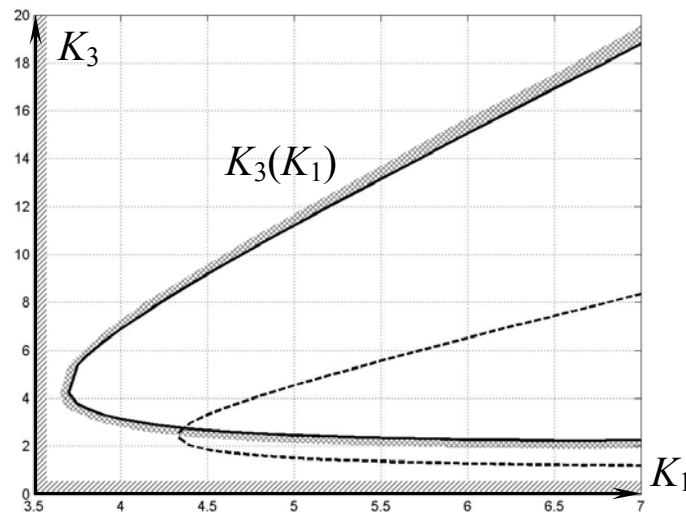


Рис. 5. Зависимость граничных коэффициентов усиления подсистем при изменении параметров регулятора

Проведен анализ устойчивости трехсвязных САУ ГТД с различными программами управления и определены значения запасов устойчивости.

Продемонстрированы методы коррекции показателей качества: введение компенсирующей связи между подсистемами, то есть усиление влияния одного канала на другой посредством усложнения регулирующего механизма, и введение производной по регулируемой координате с помощью дополнительных неединичных отрицательных обратных связей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе предложены частотные методы исследования гомогенных и гетерогенных линейных многосвязных систем управления сложными техническими объектами. Разработаны модифицированные критерии устойчивости гомогенных МСАУ, которые в некоторых случаях упрощают решение задачи анализа и синтеза. Использование модифицированного критерия устойчивости гомогенной МСАУ позволяет исследовать, насколько система удалена от границы устойчивости, определять частотные критерии качества системы. Разработаны методы анализа устойчивости гетерогенной МСАУ, которые заключаются в корректном сведении ее различными способами к гомогенной МСАУ: на основе использования аппроксимации АФХ подсистем и на основе выделения базовой передаточной функции из множества передаточных функций подсистем.

2. Разработан метод оценки запасов устойчивости МСАУ, который заключается в нахождении критических точек характеристического уравнения связи и в оценке относительно них запасов устойчивости по модулю и по фазе. Предложены методы оценки запасов устойчивости гетерогенной МСАУ, которые основаны на понятии граничных коэффициентов усиления подсистем и на понятии предельных дополнительных фаз. Разработан метод синтеза гомогенной МСАУ из условия обеспечения заданных запасов устойчивости за счет формирования коэффициентов связи между подсистемами. Предложенный метод позволяет формировать характеристики связи и коэффициенты связей между подсистемами с учетом удаленности АФХ от границы устойчивости. Показано формирование связей из условия выполнения заданных запасов устойчивости МСАУ с различными структурами.

3. В работе предложено решение задачи формирования структуры многосвязной системы управления, состоящей из неустойчивых объектов. Для решения этой задачи проведена классификация задач управления неустойчивыми объектами в зависимости от типа неустойчивости. Разработан метод синтеза МСАУ, содержащей динамически или статически неустойчивые подсистемы, основанный на введении стабилизирующих связей. Использование предложенного метода синтеза увеличивает возможности использования статически или динамически неустойчивых объектов. Предложена процедура формирования многомерных связей в многосвязной системе управления неустойчивыми объектами, которая позволяет повышать качество переходных процессов при различных распределениях связей между объектами.

4. Разработана инженерная методика исследования и проектирования МСАУ ГТД, включающая разработанные методы проектирования многосвязных систем частотными методами и программное обеспечение для автоматизированной системы исследования. Предложенное программное средство имеет возможность моделировать процесс функционирования МСАУ, оценивать устойчивость многосвязных систем управления, определять запасы устойчивости гомогенной МСАУ по модулю и по фазе. Представлены математические модели двух- и трехсвязных САУ ГТД, на примере которых проведен анализ устойчивости МСАУ ГТД с различными программами управления. Показано распо-

ложение критических коэффициентов усиления и предельных дополнительных фаз подсистем. Определены запасы устойчивости по модулю и по фазе рассматриваемых систем. Рассмотрено влияние изменения параметров регуляторов на запасы устойчивости. Показано, что коррекция показателей качества путем введения компенсирующей связи между подсистемами и путем введения производной по регулируемой координате с помощью дополнительных неединичных отрицательных обратных связей позволяет повысить запасы устойчивости МСАУ ГТД для различных программ управления ГТД.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Концепции организации многосвязного управления и структуры многосвязных систем / Б. Г. Ильясов, Е. В. Денисова, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8. С. 3–8.

2. Анализ запасов устойчивости гомогенных многосвязных систем управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Известия РАН. ТиСУ. 2009. № 4. С. 4–12.

В других изданиях

3. Синтез нелинейной однотипной МСАУ из условия устойчивости / Б. Г. Ильясов, Е. В. Денисова, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Вопросы управления и проектирования в информационных и кибернетических системах : межвуз. науч. сб. Уфа : УГАТУ, 2005. С. 188–197.

4. Анализ устойчивости гетерогенных МСАУ частотным методом / Б. Г. Ильясов, Е. В. Денисова, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Мехатроника, автоматизация, управление : матер. II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Уфа : УГАТУ, 2005. Т. 1. С. 98–103.

5. Информационные технологии проектирования систем управления на основе частотных методов / Б. Г. Ильясов, Е. В. Денисова, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Компьютерные науки и информационные технологии (CSIT'2005). 7-й Междунар. сем. Уфа-Ассы : УГАТУ, 2005. Т. 2. С. 155–159. (Статья на англ. яз.).

6. Критерий устойчивости одного класса однотипных МСАУ / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. В. Денисова, Е. А. Халикова // Мехатроника, автоматизация и управление. матер. 1-й Российск. мультikonф. по проблемам управления. СПб : ЛЭТИ, 2006. С. 26–29.

7. Анализ устойчивости гетерогенных многосвязных систем автоматического управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Мехатроника, автоматизация, управление : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. С. 76–80.

8. Абсолютная устойчивость гомогенных нелинейных многосвязных систем / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. IX Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2007. С. 140–144.

9. Анализ запасов устойчивости гомогенных многосвязных систем автоматического управления / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. X Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2008. С. 143–148.
10. Определение запасов устойчивости гомогенной МСАУ с голономными связями / Е. А. Халикова // Проблемы управления и информ. технологии. матер. IV Всерос. шк.-сем. молодых ученых. Казань : КГТУ, 2008. С. 326–330.
11. Программное обеспечение для моделирования многосвязных систем с использованием частотных методов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Компьютерные науки и информационные технологии : 10-й Междунар. сем. Анталия, Турция, 2008. Т. 1. С. 74–77 (Статья на англ. яз.).
12. Определение критического коэффициента однотипной МСАУ с голономными связями / Е. А. Халикова // Информатика, управление и компьютерные науки : сб. ст. 3-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Диалог, 2008. Т. 1. Актуальные проблемы в науке и технике. С. 511–516.
13. Синтез гомогенных многосвязных систем управления из условия качества / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Управление и информационные технологии : докл. 5-й науч. конф. СПб : ЛЭТИ, 2008. С.138–143.
14. Программное обеспечение для моделирования сложных объектов / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Компьютерные науки и информационные технологии : матер. XI Междунар. конф. Анталия, Турция, 2008. Т. 1. С. 74–77 (Статья на англ. яз.)
15. Анализ периодических движений нелинейных однотипных МСАУ с неголономными связями / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // сб. тр. 4-й Междунар. конф. по проблемам управления. М. : РАН ИПУ, 2009. С. 464–470.
16. Исследование многосвязных систем управления методом аппроксимации передаточных функций подсистем / Е. А. Халикова // Актуальные проблемы в науке и технике : сб. ст. 4-й Всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : Диалог, 2009. Т. 1. С. 532–536.
17. Многосвязное управление неустойчивыми подсистемами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Пробл. управления и моделирования в сложных системах : тр. XI Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2009. С. 110–116.
18. Формирование структуры связи многосвязного управления неустойчивыми объектами / Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, Е. А. Халикова // Мехатроника, автоматизация, управление : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 62–64.

ХАЛИКОВА Елена Анатольевна

ЧАСТОТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА
ГЕТЕРОГЕННЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ИХ ЗАПАСОВ УСТОЙЧИВОСТИ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 27.09.2010. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл.печ.л. 1,0. Усл.кр.-отт. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 402

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