

На правах рукописи



**Любавский Кирилл Константинович**

**Многокритериальные стабильно-эффективные  
компромиссы параметрической адаптации в  
многоканальной системе стабилизации беспилотного  
летательного аппарата**

Специальность 05.13.01 —  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технических системах)

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Воронов Евгений Михайлович**

Официальные оппоненты: **Литовченко Дмитрий Цезарьевич**,  
доктор технических наук, старший научный  
сотрудник,  
ОАО "Корпорация "Комета",  
начальник тематического конструкторского  
бюро, заместитель генерального директора

**Бегичев Юрий Иванович**,  
кандидат технических наук, старший науч-  
ный сотрудник,  
АО "РАА "Спецтехника",  
начальник отдела системотехники

Ведущая организация: ОАО "Государственный научно-исследова-  
тельный институт приборостроения"

Защита состоится «15» октября 2019 г. в 14 час. 30 мин. на заседании  
диссертационного совета Д212.141.02 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по  
адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Бау-  
мана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учре-  
ждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный  
пер., д.10, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.02.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ .

Телефон для справок: +7 (499) 263-65-77.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.141.02,  
кандидат технических наук, доцент



Муратов Игорь Валентинович

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Возрастающие требования точности, устойчивости, управляемости и быстродействия, предъявляемые к современным высокоманевренным средствам поражения, вызывают повышенный интерес исследователей к разработке методов параметрического синтеза систем управления с их реализацией в бортовом вычислительном комплексе летательных аппаратов, в том числе, систем стабилизации (ССт) углового положения БЛА нового поколения при наличии перекрестных связей и возмущений.

Подходы к исследованию многомерных и многосвязных систем данного класса освещаются в ряде работ Зубова Н. Е., Микрина Е. А., Филимонова Н. Б., Воронова Е. М., Асанова А. З., Ильясова Б. Г., Саитовой Г. А., Петунина В. И., Richter A., Fromion V., Scorletti G., а также трудах других отечественных и зарубежных авторов.

Учет полного технического описания компонентов многосвязной системы стабилизации с характерными нелинейными особенностями и существенным динамическим взаимовлиянием каналов неизбежно связан с проблематикой построения процедуры автоматизированной оптимизации структурно сложных нелинейных систем регулирования и управления на этапе предварительного проектирования в приложении к многоканальным ССт беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с перекрестными связями. Так, использование существующих методов расчета оптимальных параметров в многосвязных линейных системах затруднительно при исследовании высокоразмерных многокритериальных многосвязных систем (ММС) с *нелинейными* свойствами, что обуславливает потребность разработки автоматизированных подходов, ускоряющих процесс оптимизации при проектировании.

В то же время особенности проектирования и разработки реальной ССт делают необходимым для исследователя получение и использование полного трехканального описания нелинейной ССт, учитывающего полный набор перекрестных связей. Все отмеченное является актуальным при рассмотрении в данной работе методов проектирования ССт БЛА - малых авиационных средств поражения (МАСП).

Целью данной работы является разработка метода параметрического синтеза адаптивных многосвязных нелинейных систем на основе многокритериальной равновесно-арбитражной оптимизации и его применение в многоканальной системе стабилизации БЛА-МАСП с перекрестными связями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка многокритериально-оптимального (МКО) равновесно-арбитражного алгоритма с формированием вектора критериев, отражающего основные требования, предъявляемые к ССт.
2. Построение набора математических моделей ССт по степени упрощения с выявлением полного описания перекрестных связей.
3. Разработка методики оценки параметрической области технической устойчивости ССт на множестве опорных режимов по скоростному напору.
4. Внедрение эволюционных вычислительных методов для поиска решений многокритериальных задач параметрической настройки ССт БЛА.
5. Формирование структуры адаптивной системы по принципу табличной адаптации в зоне применимости БЛА, заданной в координатах высота – число Маха.

### **Научная новизна:**

1. Оценка степени взаимовлияния каналов с аналитическим выявлением полного описания перекрестных связей в математической модели трехканальной ССт БЛА.
2. Обобщение метода многокритериальной оптимизации на основе компромиссов в форме равновесно-арбитражного алгоритма, обеспечивающего предельную эффективность и итерационную балансировку каналов многосвязной ССт по эффективности с использованием равновесных игровых решений.
3. Подход к качественной оценке технической устойчивости ССт БЛА на основе последовательного расширения наилучших подобластей с применением генетических алгоритмов.
4. Методика многокритериальной адаптивной траекторной настройки вектора управляющих параметров нелинейной многосвязной системы.
5. Структуризация генетических алгоритмов с модификацией функции пригодности для параметрического синтеза МКО нелинейных многосвязных систем.
6. Формирование итеративного процесса уточнения поверхностей адаптации для полной модели ССт на основе начальных приближений на семействе моделей БЛА с упрощенной динамикой.

### **Практическая значимость**

1. Многокритериальная оптимизация вектора управляющих параметров ССт с учетом ограничений на множестве опорных режимов зоны применимости БЛА МАСП (в 23-х точках) с формированием рекомендаций по коррекции вектора оптимальных параметров трехканальной системы стабилизации ракеты в процессе полета по траектории (в форме бортовых параметрических поверхностей адаптации).

2. Формирование модифицированной итерационной процедуры повышения качества интерполяционных поверхностей управляющих параметров в БВК (бортовом вычислительном комплексе).
3. Получено два варианта реализации поверхностей адаптации в БВК с экономией по памяти или времени бортовых вычислений.
4. Разработан программный комплекс для автоматизированной параметрической оптимизации ССт БЛА противокорабельной ракеты (ПКР) с подключением библиотек генетических алгоритмов многокритериальной оптимизации с вынесением основных функциональных элементов в программный интерфейс.

**Методология и методы исследования.** Используются методы теории оптимального управления многообъектными многокритериальными системами (ММС) на основе стабильно-эффективных компромиссов (СТЭК), предельной эффективности по Парето, методы многокритериальной оптимизации, методы управления многосвязными системами, методы прикладной информатики и алгоритмические подходы механизма эволюционных адаптаций, методы проектирования систем стабилизации БЛА.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Формирование математической модели трехканальной ССт МАСП с анализом динамики объекта на основании полного набора перекрестных связей.
2. Разработка методики поиска многокритериально оптимальных решений на основе итерационной балансировки каналов по эффективности в точке уравнивания Нэша и последующим применением обобщенной арбитражной схемы для достижения предельной эффективности по Парето.
3. Двухэтапная вычислительная процедура оценки области технической устойчивости с получением набора интервальных ограничений.
4. Внедрение программного комплекса генетических алгоритмов с модифицированной функцией пригодности в структуру равновесно-арбитражного алгоритма.
5. Обеспечение адаптации многоканальной ССт по скоростному напору по схеме с разомкнутыми цепями настройки на зоне применимости МАСП.
6. Результаты многофакторного анализа эффективности ССт МАСП, с использованием полученных поверхностей адаптации.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается адекватностью составленной математической модели БЛА МАСП, корректность которой проверяется моделированием на опорных режимах, экспериментальными испытаниями в составе двухуровневой модели с подключением системы наведения БЛА, результатами многофакторного анализа.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2013);
- Одиннадцатый международный симпозиум «Интеллектуальные системы» (Москва, 2014);
- XVII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2015);
- Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» ГосНИИАС - РПКБ (Москва, 2015);
- IX Российская мультиконференция «Управление в морских и аэрокосмических системах» (Санкт-Петербург, 2016);
- XIX Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2017);
- XIII Всероссийское совещание по проблемам управления, ИПУ РАН (Москва, 2019).

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении хозяйственной темы с ОАО «Корпорацией «Тактическое ракетное вооружение»

#### **Личный вклад.**

- Автором проведен обзор и анализ проблематики параметрического синтеза многосвязных систем, отраженной в современных работах по этой теме;
- Автором сформирована двухэтапная процедура оценки области технической устойчивости ССт МАСП с использованием эволюционных вычислительных подходов;
- Автором разработан и отлажен программный комплекс многокритериальной оптимизации ССт МАСП с подключением и настройкой библиотек генетических алгоритмов, включающий пользовательский интерфейс для автоматизации запуска экспериментов;
- Автором проведена оптимизация и интерпретация результатов в соответствии с требованиями на множестве опорных режимов в зоне применимости МАСП;
- Автором предложен практически полезный итерационный подход повышения точности табличной адаптации.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 9 — в тезисах докладов, 1 — патент на полезную модель. Общий объем: 8,88 п.л./2,22 п.л.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации

составляет 235 страниц, включая 115 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 188 наименований.

## Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность и перспективность исследования многосвязных нелинейных систем регулирования и управления в приложении к системам стабилизации ЛА. Сформирована цель работы, ориентированная на обеспечение свойств адаптации к внешним условиям. Поставлены основные задачи для ее достижения. Излагается практическая значимость работы и элементы научной новизны. Приведены краткие характеристики глав и структура работы в целом.

В первой главе формируется обзор современных работ, отражающий особенности проектирования класса структурно-сложных многосвязных систем в рамках трех видов задач применения теории оптимального управления ММС: в условиях исходной структурной несогласованности, конфликта, неопределенности. Так, широкое распространение получил подход декомпозиции в линейных многосвязных системах с введением специальных корректирующих элементов для компенсации межканального взаимодействия и обеспечения автономности с последующим анализом составляющих подсистем. Приведены работы, в которых учет перекрестных связей без автономизации позволяет получить более точное решение задачи параметрического синтеза с сохранением исходной технической компоновки. Отдельно выделен подраздел, посвященный проблемам нелинейных многосвязных систем и применению подходов на основе линеаризации.

Приводится прикладной обзор работ, относящийся к проектированию различных систем управления полетом ЛА, в том числе ССт. Выделяется известный прием, связанный с изолированным рассмотрением продольного и бокового движений при принятии ряда допустимых упрощений.

В первой главе дана постановка основной задачи работы.

Системы уравнений поступательного (1), (3) и вращательного (2), (4) формируют математическую модель БЛА. На основе уравнений пространственного движения (1)-(4), зависимостей коэффициентов аэродинамических сил и моментов, дифференциальной схемы рулей сформирована модель трехканальной ССт БЛА в блочно-функциональном виде (Рис. 1), учитывающая полный спектр перекрестных связей: аэродинамические, инерционные, перекрестные связи в составе дифференциальной схемы рулей.

Требуется определить параметры контуров стабилизации по каналам

- тангажа:  $K_{\omega z}$ ,  $K_{ny}$ ,  $K_{sny}$ ;
- рыскания:  $K_{\omega y}$ ,  $K_{nz}$ ,  $K_{snz}$ ;
- крена:  $K_{\omega x}$ ,  $K_{\gamma}$ ,  $K_{s\gamma}$ .

$$\begin{cases} m \cdot \left( \frac{dV_x}{dt} + \omega_y \cdot V_z - \omega_z \cdot V_y \right) = F_x \\ m \cdot \left( \frac{dV_y}{dt} + \omega_z \cdot V_x - \omega_x \cdot V_z \right) = F_y \\ m \cdot \left( \frac{dV_z}{dt} + \omega_x \cdot V_y - \omega_y \cdot V_x \right) = F_z \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J_x \cdot \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y) \cdot \omega_z \cdot \omega_y = M_x \\ J_y \cdot \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z) \cdot \omega_x \cdot \omega_z = M_y \\ J_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \cdot \omega_y \cdot \omega_x = M_z \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = V_x \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \psi + V_y \cdot (\sin \vartheta \cdot \sin \gamma - \sin \vartheta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \psi) + \\ + V_z \cdot (\sin \psi \cdot \cos \gamma + \sin \gamma \cdot \cos \psi \cdot \sin \vartheta) \\ \frac{dY}{dt} = V_x \cdot \sin \vartheta + V_y \cdot \cos \gamma \cdot \cos \vartheta - V_z \cdot \sin \gamma \cdot \cos \vartheta \\ \frac{dZ}{dt} = -V_x \cdot \sin \psi \cdot \cos \vartheta + V_y \cdot (\sin \gamma \cdot \cos \psi + \cos \gamma \cdot \sin \psi \cdot \sin \vartheta) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_y \cdot \sin \gamma + \omega_z \cdot \cos \gamma \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{\omega_y \cdot \cos \gamma - \omega_z \cdot \sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_x - \frac{\omega_y \cdot \cos \gamma - \omega_z \cdot \sin \gamma}{\cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta \end{cases} \quad (4)$$

Многокритериальные требования, типично предъявляемые к каналам ССт по точности, колебательности, быстродействию и устойчивости:

– Статическая точность

$$\begin{aligned} J_1^\vartheta &= (\varepsilon_{\text{ст } nz} - \varepsilon_{\text{ст } \text{треб } nz})^2; \\ J_1^\Psi &= (\varepsilon_{\text{ст } ny} - \varepsilon_{\text{ст } \text{треб } ny})^2; \\ J_1^\gamma &= (\varepsilon_{\text{ст } \gamma} - \varepsilon_{\text{ст } \text{треб } \gamma})^2; \end{aligned} \quad (5)$$

– Демпфирование колебаний

$$\begin{aligned} J_2^\vartheta &= (\sigma_{nz} - \sigma_{\text{треб } nz})^2, & J_3^\vartheta &= (\eta_{nz} - \eta_{\text{треб } nz})^2; \\ J_2^\Psi &= (\sigma_{ny} - \sigma_{\text{треб } ny})^2, & J_3^\Psi &= (\eta_{ny} - \eta_{\text{треб } ny})^2; \\ J_2^\gamma &= (\sigma_\gamma - \sigma_{\text{треб } \gamma})^2, & J_3^\gamma &= (\eta_\gamma - \eta_{\text{треб } \gamma})^2; \end{aligned} \quad (6)$$



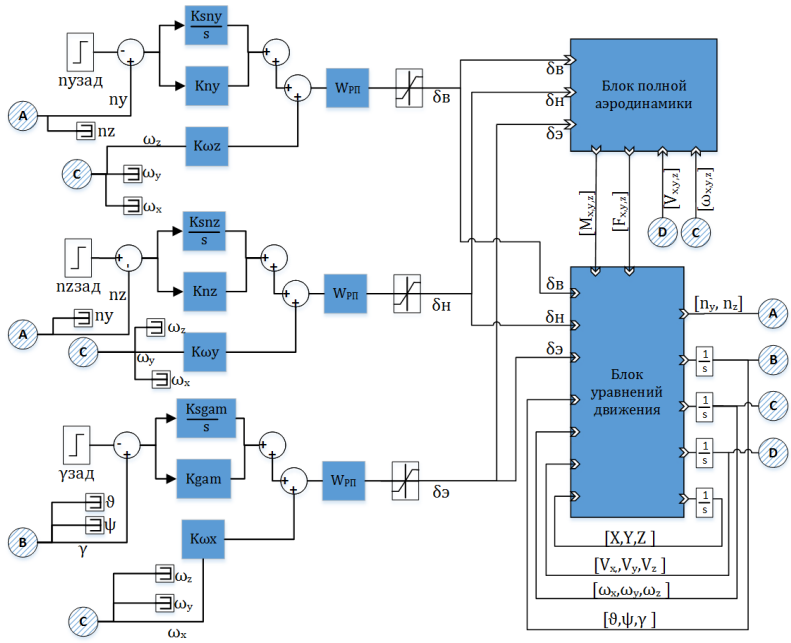


Рис. 1 — Трехканальная ССт БЛА

– Время переходного процесса

$$\begin{aligned}
 J_4^\vartheta &= (t_{nz} - t_{\text{треб } nz})^2; \\
 J_4^\psi &= (t_{ny} - t_{\text{треб } ny})^2; \\
 J_4^\gamma &= (t_\gamma - t_{\text{треб } \gamma})^2;
 \end{aligned} \tag{7}$$

– Устойчивость

$$\begin{aligned}
 J_5^\vartheta &= (K_{\omega z} - K_{\omega z \text{ треб}})^2 + (K_{ny} - K_{ny \text{ треб}})^2 + (K_{sny} - K_{sny \text{ треб}})^2; \\
 J_5^\psi &= (K_{\omega y} - K_{\omega y \text{ треб}})^2 + (K_{nz} - K_{nz \text{ треб}})^2 + (K_{snz} - K_{snz \text{ треб}})^2; \\
 J_5^\gamma &= (K_{\omega x} - K_{\omega x \text{ треб}})^2 + (K_\gamma - K_{\gamma \text{ треб}})^2 + (K_{s\gamma} - K_{s\gamma \text{ треб}})^2;
 \end{aligned} \tag{8}$$

Векторный показатель эффективности ССт после нормирования показателей (5) - (8) и скаляризации вектора в каждом канале:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi^\vartheta \\ \Phi^\psi \\ \Phi^\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^1 \\ \Phi^2 \\ \Phi^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^5 \alpha_j^\vartheta \cdot J_j^\vartheta \\ \sum_{j=1}^5 \alpha_j^\psi \cdot J_j^\psi \\ \sum_{j=1}^5 \alpha_j^\gamma \cdot J_j^\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^5 \alpha_j^1 \cdot J_j^1 \\ \sum_{j=1}^5 \alpha_j^2 \cdot J_j^2 \\ \sum_{j=1}^5 \alpha_j^3 \cdot J_j^3 \end{bmatrix} \rightarrow \min \tag{9}$$

При этом динамические характеристики ЛА и значения показателей могут значительно варьироваться от режимов полета и параметров атмосферы, заданных в широких диапазонах области применимости в координатах высота – число Маха.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритмического обеспечения, составляющего научную новизну исследования.

**1.** Предлагается двухэтапная процедура оценки параметрической области технической устойчивости  $\mathbb{Q}$  и опорной точки, выраженной вектором требуемых значений параметров для построения критерия (8). При этом вместо существующих трудоемких исследований устойчивости нелинейных систем с аналитическим выявлением многомерной области устойчивости  $\mathbb{S}$  развивается подход обеспечения технической устойчивости с инженерной оценкой  $\mathbb{Q} \cap \mathbb{S} \neq \emptyset$ .

*На первом этапе* осуществляется поиск начального приближения области  $\mathbb{Q}$  модифицированным методом Хука-Дживса, состоящим из фаз исследующего поиска и поиска по образцу.

*На втором этапе* происходит расширение исходной предпосылки формированием целевой функции, характеризующей запас работоспособности системы в виде интегральной квадратической ошибки и степени колебательности:

$$\forall \mathbf{q} \in \mathbb{Q} : \begin{cases} \mathbf{F}_{\text{инт}}(\mathbf{q}) \leq \mathbf{C}_{\text{инт}}; \\ \mathbf{F}_{\text{колеб}}(\mathbf{q}) \leq \mathbf{C}_{\text{колеб}}, \end{cases} \quad (10)$$

Рабочая область варьируемых параметров  $\mathbb{Q}$  ищется в виде системы функциональных неравенств:

$$\mathbb{Q} = \{\mathbf{q} \in E^r \mid \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}\} \quad (11)$$

с подключением генетических алгоритмов.

**2.** Разрабатывается эволюционный метод многокритериальной оптимизации на основе стабильно-эффективного компромисса.

Трехканальная система стабилизации ЛА с требованиями по точности, перерегулированию, времени переходного процесса и устойчивости в каждом канале представляет собой типичную многообъектную (многоканальную) многокритериальную систему в условиях исходной структурной несогласованности.

Постановка задачи оптимизации ММС содержит четыре компоненты:

- математическая модель ММС с выбором описания и управляющих сил;
- векторный целевой показатель;
- характер коалиционных объединений;
- принцип конфликтного взаимодействия на основе стабильности и эффективности.

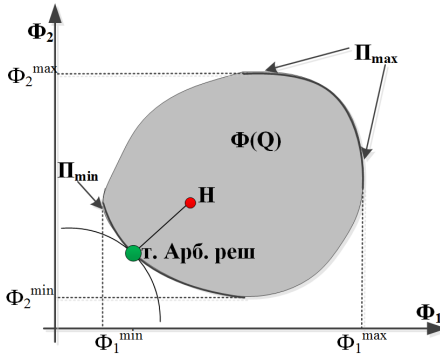


Рис. 2 — Геометрическая иллюстрация фронта Парето и равновесно-арбитражного решения для двухканальной системы Н - точка равновесия по Нэшу,  $\Pi_{\max}$ ,  $\Pi_{\min}$  - Парето области по максим. и миним., Арб. Реш – арбитражное решение Нэша

Определяется равновесное решение, которое уравнивает (балансирует) многокритериальную эффективность многосвязных каналов, а затем на основе равновесной точки ( $q^r$ ) по Нэшу ищется наиболее близкая на фронте Парето.

Для трехканальной ССт определение равновесия превращается в следующую систему неравенств при  $q^i \in Q$ :

$$\begin{cases} \Phi^1(q^1, q^{r,2}, q^{r,3}) \geq \Phi^1(q^{r,1}, q^{r,2}, q^{r,3}) \\ \Phi^2(q^{r,1}, q^2, q^{r,3}) \geq \Phi^2(q^{r,1}, q^{r,2}, q^{r,3}) \\ \Phi^3(q^{r,1}, q^{r,2}, q^3) \geq \Phi^3(q^{r,1}, q^{r,2}, q^{r,3}) \end{cases} \quad (12)$$

На Рис. 2 приведена иллюстрация компромисса (точки арбитражного решения), которая формируется на основе полученного равновесия по Нэшу модификации арбитражной схемы Нэша (13)

$$\Phi_A = [\Phi^1(q) - \Phi^1(q^r)] \cdot [\Phi^2(q) - \Phi^2(q^r)] \cdot [\Phi^3(q) - \Phi^3(q^r)] \rightarrow \min_q \quad (13)$$

Структура трехэтапного алгоритма равновесно-арбитражной многокритериальной оптимизации ММС (на примере нелинейной многосвязной (НМ) ССт в любом фиксированном режиме по высоте/скорости БЛА в зоне приземления):

1 этап Получение начальных приближений параметров системы стабилизации в каждом канале ССт без учета перекрестных связей

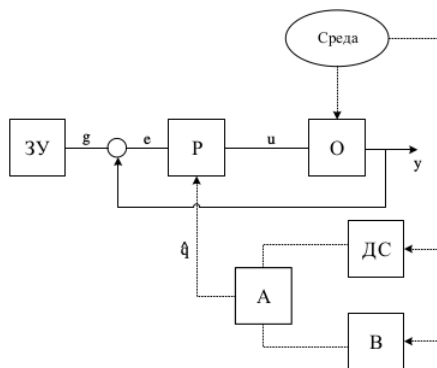
2 этап Нахождение балансирующего параметрического решения НМ ССт на основе равновесия по Нэшу

3 этап Парето-оптимизация параметрического решения НМ ССт и поиск компромисса с использованием арбитражной схемы Нэша

**3.** Произведена адаптация эволюционных подходов в форме равновесно-арбитражной структуры, использующих необходимые и достаточные условия  $\varepsilon$ -оптимальности по Парето и  $\varepsilon$ -равновесия по Нэшу.

Рис. 3 — Интерпретация адаптивной системы с разомкнутыми цепями настройки:

**ЗУ** – задающее устройство, **Р** – регулятор, **О** – объект управления, **А** – адаптор, **ДС**, **В** – различные датчики, в примере датчик скорости, высотомер



Разработанный комплекс алгоритмов сформировал эффективный инструмент преодоления проблемы преждевременной сходимости и мультимодальности показателей эффективности каналов стабилизации.

Базовая структура генетического алгоритма многокритериальной оптимизации состоит из генерации начальной популяции, *многокритериальной* оценки приспособленности тестовых точек особей модифицированной функцией пригодности, применения операторов репродукции, генетического разнообразия и редукции.

4. Проведена линеаризация методом вариаций уравнений движения ЛА на возмущенной опорной траектории с полным выявлением перекрестных связей между каналами. Получены уточненные передаточные функции ЛА в каналах тангажа, рыскания, крена операторным методом с учетом выявленных перекрестных связей.

5. Для обеспечения адаптивности НМ ССт МАСП по скоростному напору используется подход табличной адаптации (gain scheduling), когда в адапторе отсутствует информация о выходной характеристике регулируемого объекта и происходит предварительное составление семейства регуляторов, сконструированных для работы в рамках определенных режимов полета (Рис. 3).

Описана поэтапная методика построения структуры и поверхностей адаптора, обеспечивающая многокритериальную настройку параметров в обратных связях контуров стабилизации по схеме с разомкнутыми цепями настройки:

*Этап 1.* Выбор структуры адаптора (**А** Рис. 3)

*Этап 2.* Определение оптимальных параметров регуляторов (**Р** Рис. 3) контуров стабилизации на опорном режиме на модели ССт с упрощенной аэродинамикой

*Этап 3.* Составление поверхностей адаптации в форме аппроксимированных функциональных зависимостей

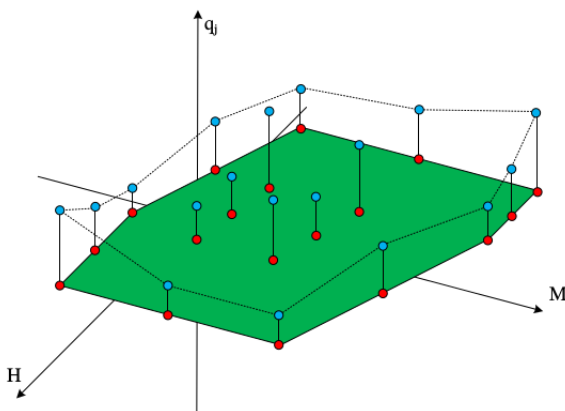


Рис. 4 — Иллюстрация к постановке задачи векторной интерполяции. ● — опорный режим  $(M, H)$  в зоне применимости, ● — полученное оптимальное значение  $q_j^{opt}$ , пунктирной линией обозначена интерполирующая зависимость  $f_{q_j}(M, H)$

*Этап 4.* Апробация полученных зависимостей коэффициентов адаптации на полной модели с полным учетом аэродинамики

**Третья глава** посвящена основным техническим особенностям программных средств для исследования стабильно-эффективных компромиссов и реализации метода в БВК МАСП.

Рассмотрены основные функциональные компоненты разработанного программного комплекса в MATLAB и особенности программной реализации генетического алгоритма многокритериальной оптимизации и поиска равновесия по Нэш.

Представлен подход векторной интерполяции полученных многокритериально-оптимальных решений методом Клафа-Точера как функциональных зависимостей высоты и числа Маха. Необходимо определить такой набор независимых друг от друга функций  $f_{q_j}(M, H)$ ,  $j = \overline{1, 9}$ , который максимально приближает к многокритериально оптимальным значением коэффициентов адаптации  $q_j^{opt}$  в произвольной точке зоны применимости  $(M, H)$  (Рис. 4)

Для чего выполняется:

- первоначальная триангуляция рассеянного множества базовых точек - разбиение множества базовых точек на симплексы треугольной формы, избегая вытянутые, протяженные треугольники;
- построение бикубических полиномов Бернштейна-Безье в каждом треугольнике с использованием оценок значения частных производных.

Предложено два варианта бортовой реализации табличной адаптации, базирующейся на многокритериально-оптимальных решениях, с преимуществом по памяти или объему требуемых вычислений:

- составление многомерной таблицы поиска;

- заложение бикубических полиномов как функциональных зависимостей в БВК.

В **четвертой главе** приведены результаты многофакторного анализа эффективности ССт МАСП на зоне применимости Рис. 6.

1. Проводится верификация многокритериально оптимальных поверхностей адаптации путем последовательного поочередного варьирования коэффициентов в опорном режиме с наблюдением за переходными характеристиками и значениями показателей.

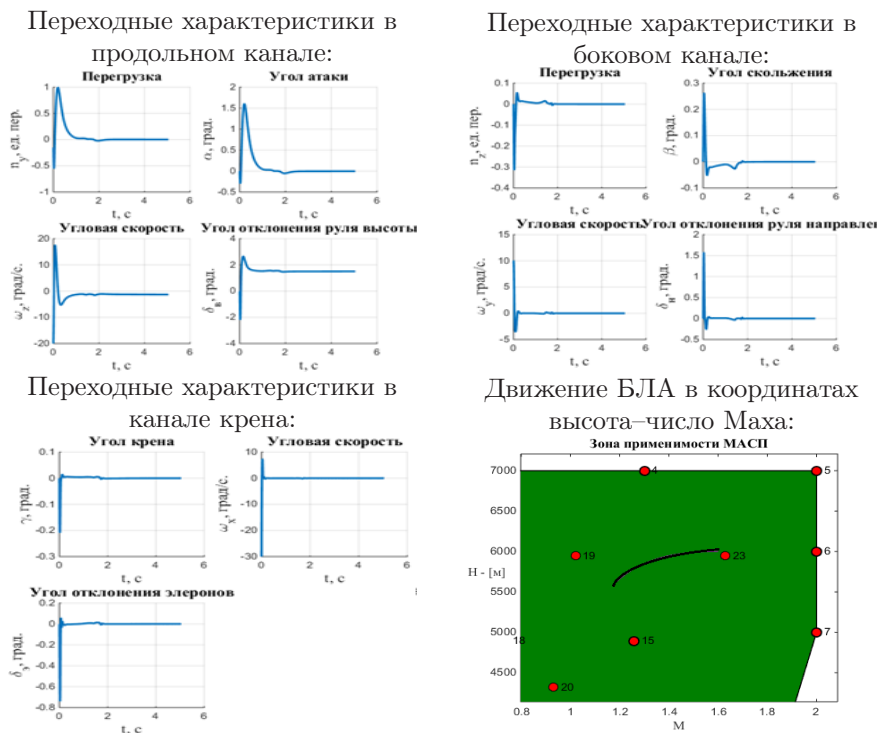


Рис. 5 — Результат апробации поверхностей адаптации в точке  $\{M = 1,6, H = 6000\text{м}\}$

2. Осуществляется апробация поверхностей, полученных векторной интерполяцией результатов равновесно-арбитражной балансировки, на полной модели ССт МАСП Рис. 5.

3. Предлагается итерационная процедура повышения качества поверхностей адаптации в наиболее критичных областях зоны применимости.

4. Оценивается воздействие ветровых возмущений управляемость и динамические характеристики ССт с предварительно полученным оптимальными коэффициентами.

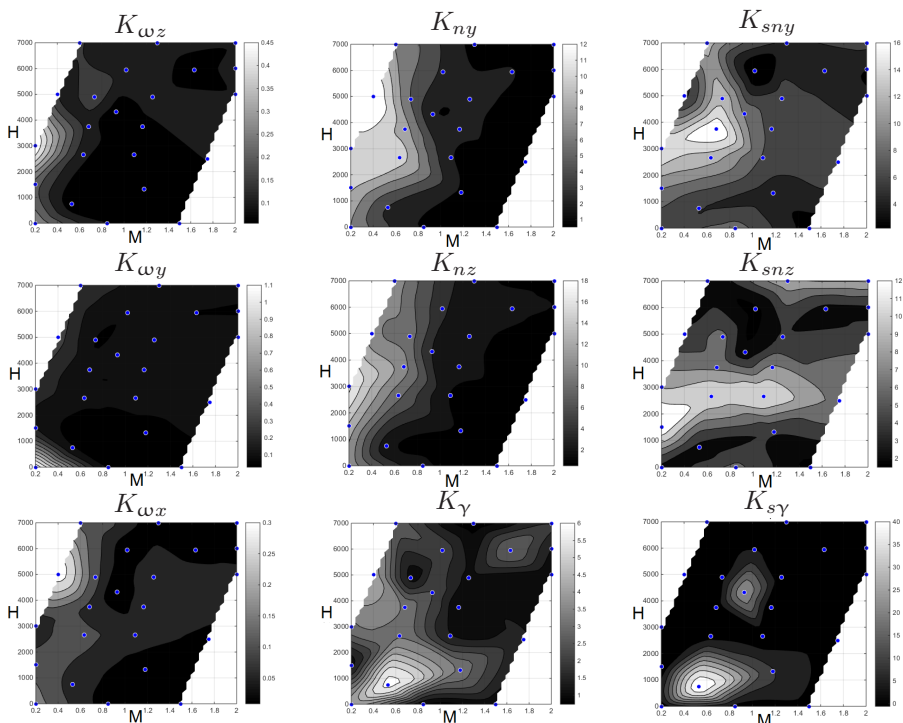


Рис. 6 — Результат построения бортовых поверхностей адаптации для 23-х оптимальных режимов по высоте (H) и числу Маха (M)

В **приложении** приводится анализ амплитудных характеристик передаточных функций ЛА полученных с учетом выявленных перекрестных связей в каналах тангажа, рыскания крена; а также результаты решения тестовых задач для генетического алгоритма многокритериальной оптимизации и формирования рабочих областей варьируемых параметров.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты работы:

1. Сформирована математическая модель трехканальной ССт с перекрестными связями в трех различных вариациях по степени упрощения: полная нелинейная модель трехканальной ССт, нелинейная модель с упрощенной динамикой и линеаризованный вариант с аналитическим выявлением перекрестных связей. Полная модель включает наиболее общий спектр перекрестных связей: аэродинамические, инерционные, перекрестные связи в составе дифференциальной схемы рулей.

2. Формализована и разработана двухэтапная вычислительная технология, позволяющая определить область технической устойчивости в пространстве управляющих параметров для заданных параметров траектории (М, Н).
3. Разработан метод многокритериальной оптимизации нелинейных многосвязных систем в форме равновесно-арбитражной структуры, использующий концепцию стабильно-эффективных компромиссов ММС и позволяющий получать параметрические решения, балансирующие подсистемы по эффективности.
4. Генетические алгоритмы многокритериальной оптимизации адаптированы на предварительных и основной стадиях метода для поиска равновесных глобально эффективных решений, настроенных на специфику рассматриваемой задачи.
5. Использование практически полезной схемы с разомкнутыми цепями настройки обеспечивается адаптивность исследуемой ССт по скоростному напору на зоне применимости (адаптор производит табличную адаптацию в зависимости от внешних условий полета).
6. Особенности выбранной методики локальной векторной интерполяции, состоящей из этапа триангуляции разреженного набора опорных режимов и интерполяции каждого элемента полиномами Бернштейна-Безье, позволяют построить автоматизированный итерационный процесс уточнения поверхностей адаптации в критичных подобластях зоны применимости.
7. Поставленная задача многокритериальной оптимизации согласно вектору требований ССт поставлена и решена на базе 23-х опорных режимов в рабочей зоне применимости МАСП (достаточных для качественной интерполяции), построены поверхности адаптации. Показано, что добавление новых режимов (от 16 до 23) в рамках итерационного процесса позволяет улучшить процессы стабилизации нелинейной ССт с полной аэродинамикой.
8. Проведен многофакторный анализ эффективности оптимальной ССт МАСП, включающий исследование влияния ветровых возмущений, который показывает работоспособность полной трехканальной системы.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

В качестве расширения темы предполагается:

- ускорение проведения вычислений в опорных режимах путем реорганизации структуры ГАМО в асинхронной или параллельной форме
- выбор опорных режимов на зоне применимости (или в границах отдельной фигуры разбиения) на основе кластеризации по информации о изменении аэродинамических характеристик



- применение нейро-сетевого регулятора или прогнозирующих моделей в сочетании с табличными интерполированными значениями

### **Работы по теме диссертации**

1. Многокритериальная параметрическая оптимизация трехканальной системы стабилизации летательного аппарата с перекрестными связями / К.К. Любавский [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. №3. С. 16-36 (1,75 п.л./0,44 п.л.)
2. Оптимизация иерархической системы «наведение-стабилизация» летательного аппарата с адаптацией системы стабилизации / К.К. Любавский [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. 2015. №4. С. 13-33 (1,75 п.л./0,35 п.л.)
3. Многокритериальный синтез законов траекторной адаптации параметров трехканальной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата / К.К. Любавский [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. 2016. №3. С. 24-41 (1,49 п.л./0,37 п.л.)
4. Патент №142322 Российская Федерация, Автоматизированная система многокритериального выбора параметров трехканальной системы стабилизации летательного аппарата с перекрестными связями / Воронов Е.М., Любавский К.К., Сычев С.И.; заявитель и патентообладатель Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. - № 2013143383; опублик. 22.05.2014; приоритет от 26.09.2013.
5. Многокритериальная оптимизация сложной трехканальной системы стабилизации летательного аппарата в форме равновесно-арбитражного компромисса / К.К. Любавский [и др.] // Труды XV Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 208-217 (0,5 п.л./0,1 п.л.)
6. Любавский К.К. Многокритериальная оптимизация трехканальной многосвязной системы стабилизации летательного аппарата». Доклад, Труды XI симпозиума «Интеллектуальные системы // Труды XI симпозиума «Интеллектуальные системы», INTELS 2014 – Российский университет дружбы народов (РУДН). 2014. С. 291-297 (0,38 п.л.)
7. Реализация сложной двухуровневой системы «наведение-стабилизация» летательного аппарата на основе учета параметрических взаимосвязей подсистем и предварительной адаптации системы стабилизации по наведению / К.К. Любавский [и др.] // Труды XVII Международной конференции «Проблемы управления

- и моделирования в сложных системах» - Самара: Институт проблем управления сложными системами РАН. 2015. С. 561-570 (0,81 п.л./0,2 п.л.)
8. Гибридная вычислительная технология многокритериальной оптимизации процессов стабилизации и управления в условиях конфликта и неопределённости / К.К. Любавский [и др.] // Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» - ГосНИИАС М.: ООО «Научтехлитиздат». 2015. - С. 55-58 (0,25 п.л./0,06 п.л.)
  9. Исследование структуры оптимальной взаимосвязи высокоточной траектории противокорабельной ракеты с динамическими свойствами перекрестных каналов наведения и оптимальной трехканальной системы стабилизации / К.К. Любавский [и др.] // Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» - ГосНИИАС М.: ООО «Научтехлитиздат». 2015. 308 с. - С. 60-63 (0,25 п.л./0,06 п.л.)
  10. Многокритериальная оптимизация трехканальной системы стабилизации противокорабельной ракеты с учетом динамического влияния ее перекрестных связей / К.К. Любавский [и др.] // Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» - ГосНИИАС М.: ООО «Научтехлитиздат». 2015. - С 71-74 (0,25 п.л./0,06 п.л.)
  11. Современные направления развития теории управления в задачах стабилизации, наведения и группового противодействия авиационно-ракетных и морских объектов и их групп / К.К. Любавский [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС 2016). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2016. - С 11-21 (0,69 п.л./0,06 п.л.)
  12. Координация в задаче оптимизации иерархической системы «наведение-стабилизация» малогабаритного авиационного средства поражения с оптимальной адаптацией системы стабилизации / К.К. Любавский [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС 2016). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2016. - С. 464-470 (0,44 п.л./0,06 п.л.)
  13. Адаптация результатов многокритериальной оптимизации трехканальной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата / К.К. Любавский [и др.] // Труды XIX Международной конференции «Проблема управления и моделирования в сложных системах». Самара: Институт проблем управления сложными системами РАН. 2017. С 83-91. (0,32 п.л./0,08 п.л.)

*Любавский Кирилл Константинович*

Многокритериальные стабильно-эффективные компромиссы параметрической адаптации в многоканальной системе стабилизации беспилотного летательного аппарата

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_

