

На правах рукописи

ВАНИН Александр Викторович

**КООРДИНИРОВАННЫЕ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫЕ
КОМПРОМИССЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В ДВУХУРОВНЕВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ
СИСТЕМЕ «НАВЕДЕНИЕ-СТАБИЛИЗАЦИЯ»
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук *

Ванин

Москва, 2016

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

Научный руководитель: **Воронов Евгений Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Литовченко Дмитрий Цезарьевич**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, начальник тематического кон-
структорского бюро, заместитель генерально-
го ОАО «Корпорация «Комета»

Семенов Сергей Сергеевич
кандидат технических наук, ученый секретарь
секции НТС «Управляемые авиационные
бомбы», руководитель группы анализа и
перспективного проектирования
АО «ГНПП «Регион»

Ведущая организация: **Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А.А. Расплетина» (ПАО «НПО «Алмаз»)**

Защита состоится «28» февраль 2017 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сложность современных объектов управления, большое количество и противоречивость показателей эффективности обуславливают формирование многоуровневых многокритериальных систем управления с иерархической структурой. Повышение эффективности многоуровневых систем является необходимым при управлении сложными системами различной природы.

В частности, актуально развивать исследования иерархической задачи управления летательного аппарата в структуре: принятие решения (целераспределение) – управление (наведение) – регулирование (стабилизация), как единую многоканальную на каждом уровне сложную техническую систему (СТС) с поуровневой многокритериальной оптимизацией взаимодействующих каналов и межуровневой координацией.

Задача оптимизации управления СТС является актуальной, так как опирается на современную теорию оптимального управления многообъектными многокритериальными системами (ММС), которая базируется на комбинации методов классической теории управления и теории игр в форме стабильно-эффективных компромиссов (СТЭК), и развивает ее методы. В рамках основной части исследований управление СТС рассматривается как иерархическая игра со структурированными уровнями в форме ММС с межуровневой координацией. Для данного типа иерархических систем формируются методы получения управления СТС, что находит свое отражение в работах Зверева В.Ю., Воронова Е.М., Вайсборда Э.М., Жуковского В.И., Серова В.А., а также ряда других отечественных и зарубежных авторов. Развитие и применение иерархических подходов в сложных задачах управления позволяет повысить эффективность управления. Усложнение описания рассматриваемых СТС приводит к необходимости разработки методов координации многокритериальных задач с получением координированных стабильно-эффективных компромиссов (КОСТЭК) на всех уровнях иерархии.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование КОСТЭК оптимизации иерархических систем управления на основе иерархических уравниваний и методов оптимального управления ММС с применением результатов в двухуровневой многоканальной системе «наведение-стабилизация» беспилотного летательного аппарата (БЛА).

В достижения основной цели необходимо решить ряд задач:

- сформировать стратегию межуровневого координирования на основе обобщенного иерархического уравнивания по Штакельбергу;
- разработать методику получения КОСТЭК;

- разработать алгоритм оптимизации двухуровневой многоканальной системы «наведение-стабилизация» БЛА на основе КОСТЭК;
- получить решение линейно-квадратичной задачи многокритериального синтеза двухуровневой системы управления на основе КОСТЭК;
- разработать программные средства для исследования оптимальной двухуровневой многоканальной системы «наведение-стабилизация» БЛА;
- исследовать оптимальную двухуровневую многоканальную систему управления БЛА и провести многофакторный анализ ее эффективности на основе КОСТЭК.

Методы исследований. Проведенные в диссертационной работе разработки и исследования базируются на методах проектирования иерархических распределенных систем, теории оптимального управления ММС, методов исследования нелинейных непрерывных систем автоматического управления и современных методах математического моделирования.

Научная новизна работы. К числу новых научных результатов можно отнести:

1. Формирование стратегии межуровневого координирования на основе обобщения иерархического уравнивания по Штакельбергу;
2. Получение поуровневых Парето-оптимальных СТЭК на основе модифицированного равновесно-арбитражного алгоритма;
3. Методика оптимизации иерархической системы управления на основе разработанного алгоритма получения КОСТЭК;
4. Решение линейно-квадратичной задачи многокритериального синтеза двухуровневой системы управления на основе КОСТЭК;
5. Формирование математической двухуровневой многоканальной модели системы «наведение-стабилизация» БЛА с поуровневыми перекрестными связями;
6. Формирование свойств координирования нижнего уровня при оптимизации двухуровневой многоканальной системы «наведение-стабилизация» БЛА на основе КОСТЭК.

Практическая значимость работы заключается в том, что в рамках исследования системы наведения-стабилизации БЛА – малого авиационного средства поражения (МАСП) получены следующие результаты:

1. Сформирована двухуровневая многоканальная модель системы «наведение-стабилизация» МАСП с поуровневыми перекрестными связями;
2. Проведен анализ эффективности многокритериально-оптимальной иерархической системы наведения-стабилизации с учетом балансировки эффективности на основе поуровневых компромиссов и межуровневой координации;

3. Выполнен многофакторный анализ влияния краевых условий, ограничений на параметры системы наведения (СН) на результаты многокритериальной оптимизации двухуровневой системы наведения-стабилизации;
4. Сформированы дополнительные свойства координации адаптивной системы стабилизации (ССТ) оптимальной СН с коррекцией адаптивных коэффициентов ССТ;
5. Разработаны программные средства для исследования оптимальной двухуровневой многоканальной системы «наведение-стабилизация» МАСП;
6. Проведено исследование элементов реализации алгоритма оптимизации двухуровневой многоканальной системы «наведение-стабилизация» на борту МАСП.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационных исследований нашли применение в рамках НИОКР «Разработка методики оценки рациональных параметров и эффективности противозенитных маневров для противокорабельной ракеты» по хоздоговору с ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». Также, основные положения и результаты диссертационной работы были использованы в НИР «Разработка аппаратно-программного комплекса имитационного моделирования функционирования малогабаритных авиационных средств поражения (МАСП) и проведения анализа эффективности стабилизации, наведения и группового применения МАСП методом имитационного моделирования», выполняемой по хоздоговору с ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: Девятый международный симпозиум Интеллектуальные системы (Москва, 2010), XXXV академические чтения по космонавтике (Москва, 2011), Десятый международный симпозиум Интеллектуальные системы (Вологда, 2012), XV Международная конференция Проблемы управления и моделирования в сложных системах (Самара, 2013), XVI Международная конференция Проблемы управления и моделирования в сложных системах (Самара, 2014), XI 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).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, из них 3 работы – в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем опубликованных работ составляет 1,62 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы и приложения. Общий объем 203 страницы, в том числе 110 рисунков и 3 таблицы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Формирование математической двухуровневой многоканальной модели системы «наведение-стабилизация» МАСП с поуровневыми перекрестными связями;

2. Разработка метода оптимизации иерархической системы управления динамическим объектом на основе КОСТЭК;

3. Разработка программно-алгоритмического обеспечения метода оптимизации управления МАСП как иерархической системой наведения–стабилизации с корректируемым двухканальным пропорциональным наведением МАСП для повышения эффективности МАСП и координации траекторной адаптации ССт МАСП;

4. Многокритериальный анализ влияния динамических свойств и условий полета МАСП на результаты оптимизации двухуровневой системы управления (СУ) с формированием элементов базы данных бортовой реализации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертационной работы, для чего проведен анализ современных тенденций в области управления сложными системами, указаны перспективы представления таких систем в виде многоуровневых объектов с иерархической структурой. Определена цель и сформулированы основные задачи диссертационной работы. Дается краткая аннотация всех разделов диссертационной работы.

В первой главе дан обзор существующих методов оптимизации иерархических СУ, указаны недостатки данных подходов при получении оптимального управления сложными системами, а также приводится вариант обобщения данных методов в случае представления каждого уровня иерархии в виде ММС.

В рамках данной главы анализируется возможность применения иерархических подходов к СУ БЛА, в качестве уровней иерархии в этом случае выступают двухканальная СН БЛА и трехканальная ССт с перекрестными связями, структурная схема которой дана на Рисунке 1. Замкнутая система в каналах наведения является координатором цели (КЦ) головки самонаведения (ГС) БЛА на основе двухосного силового гироскопического стабилизатора с передаточной функцией $W_r(s)$. Коэффициенты k_{kl} являются коэффициентами передачи двухканального чувствительного элемента КЦ. Сформиро-

ван облик объекта управления, СН и ССт. Движение БЛА можно разделить на движение центра масс (ЦМ) и движения вокруг ЦМ по углам тангажа ϑ ,

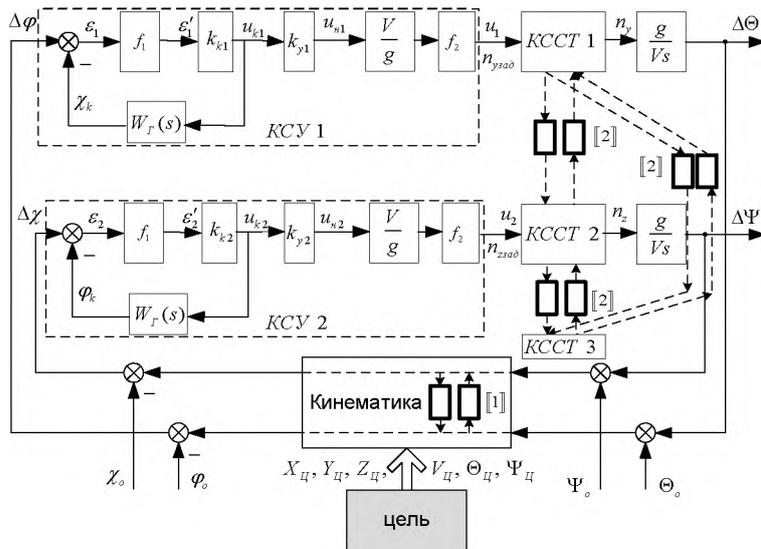


Рисунок 1. Структурная схема многоканальной системы «наведение–стабилизация» БЛА

рысканья ψ и крена γ с соответствующими воздействиями аэродинамического управления по перегрузкам в каналах управления направлением скорости центра масс по углу наклона траектории (Θ) и по углу поворота траектории (Ψ). Двухуровневая вариация математической модели многоканальной модели управления – регулирование БЛА с учетом пе-

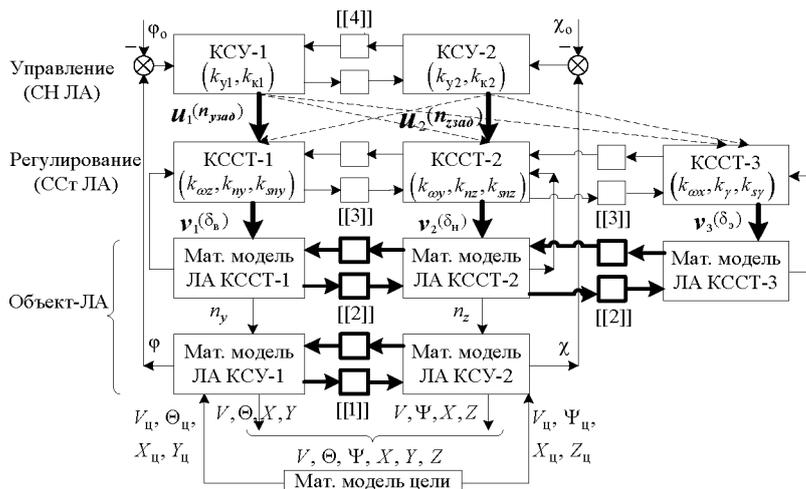


Рисунок 2. Двухуровневая математическая модель управления–регулирования трехканальной СУ БЛА на уровне СН u_l , имеющими смысл координации для уровня ССт, являются заданные перегрузки (1), зависящие от параметров $k_{yl}, k_{kl}, l=1,2$, или обобщенные законы управления.

$$\begin{cases} n_{y\text{зад}} = f_2 k_{\text{TC}} k_{y1} k_{k1} f_1 \times (\varphi - \varphi_k) V / g; \\ n_{z\text{зад}} = f_2 k_{\text{TC}} k_{y2} k_{k2} f_1 \times (\chi - \chi_k) V / g; \end{cases} (1);$$

$$\begin{cases} \dot{n}_{ys} = k_{sny} (n_y - n_{y\text{зад}}); \\ \dot{n}_{zs} = k_{snz} (-n_z + n_{z\text{зад}}); \end{cases} (2);$$

$$\dot{\gamma}_s = k_{s\gamma} (\gamma - \gamma_{\text{зад}});$$

рекrestных связей представлена на Рисунке 2.

Коэффициенты передачи устройства выработки команд каналов СУ (КСУ- l) $k_{yl}, l=1,2$, определяют качество метода пропорционального самонаведения. Управляющими сигналами

Описание каналов ССт (КССТ), связанных с объектом управления, представлено в виде (2)-(4), где управляющими сигналами v_i являются углы поворота рулей БЛА (Рисунок 2), которые являются обобщенными или задан-

$$\begin{cases} \omega_{z \text{ зад}} = n_{ys} + k_{ny}(n_y - n_{y \text{ зад}}); \\ \omega_{y \text{ зад}} = n_{zs} + k_{nz}(-n_z - n_{z \text{ зад}}); \\ \omega_{x \text{ зад}} = \gamma_s + k_\gamma(\gamma - \gamma_{\text{зад}}); \\ \ddot{\delta}_B = \frac{\omega_{z \text{ зад}} + k_{\omega z} \omega_z - 2T_{\text{РП}} \xi_{\text{РП}} \dot{\delta}_B - \delta_B}{T_{\text{РП}}^2}; \\ \ddot{\delta}_H = \frac{\omega_{y \text{ зад}} + k_{\omega y} \omega_y - 2T_{\text{РП}} \xi_{\text{РП}} \dot{\delta}_H - \delta_H}{T_{\text{РП}}^2}; \\ \ddot{\delta}_\Theta = \frac{\omega_{x \text{ зад}} + k_{\omega x} \omega_x - 2T_{\text{РП}} \xi_{\text{РП}} \dot{\delta}_\Theta - \delta_\Theta}{T_{\text{РП}}^2}; \end{cases} (4).$$

ными функциями параметров - коэффициентов обратных связей ССт: коэффициенты датчиков линейных ускорений k_{ny}, k_{nz} , коэффициенты дифференцирующих гироскопов $k_{\omega x}, k_{\omega y}, k_{\omega z}$ и коэффициент свободного гироскопа k_γ , коэффициенты пропорционально-интегрального регулятора для обнуления статической ошибки по положению k_{sny}, k_{snz}, k_{sy} .

Требования на уровне подсистемы

наведения, подлежащие минимизации:

- максимизация скорости $J_{Ц11}(t_k) = -V_y^2(t_k); J_{Ц12} = -(V_x^2(t_k) + V_z^2(t_k));$
- векторный промах, который не должен превышать полуметра $J_{Ц21}(t_k) = (Y_{ц} - Y(t_k))^2; J_{Ц22}(t_k) = (X_{ц} - X(t_k))^2 + (Z_{ц} - Z(t_k))^2;$
- качество наведения, характеризуемое требуемыми углами подлета к цели. Требуется вывести БЛА в плоскость БЛА-цель (по углу Ψ). Цель охраняется системой ПВО, и хотя в данной работе конфликт не рассматривается, но учитывается желаемое направление подлета к цели близкое к вертикальному (требование по углу Θ), с учетом особенностей зоны поражения ПВО

$$J_{Ц31}(t_k) = \left(\Theta(t_k) + \frac{\pi}{2} \right)^2; J_{Ц32}(t_k) = \left(\Psi(t_k) - \arcsin \frac{(Z_{ц} - Z(t_0))}{\sqrt{(X_{ц} - X(t_0))^2 + (Z_{ц} - Z(t_0))^2}} \right)^2$$

Эффективность функционирования каждого канала ССт оценивается известным векторным показателем эффективности, учитывающим статическую точность, колебательность, быстродействие, устойчивость.

Во второй главе разрабатывается метод оптимизации иерархических СУ на основе КОСТЭК. Предложенная комплексная оптимизация формируется на основе комбинации трех итерационно связанных этапов: этап проектирования структур иерархических распределенных систем управления (ИРСУ) для выбора оптимальной функциональной структуры ИРСУ-АСУ (облика АСУ); этап оптимизации ММС на уровнях в структуре облика ИРСУ на СТЭК с балансировкой (уравновешиванием) подсистем-каналов на каждом уровне в процессе оптимизации ММС по эффективности или потерям; этап оптимизации межуровневой координации с приоритетом — «правом первого хода» каждого верхнего уровня в ИРСУ – АСУ. Данная кон-

цепция позволяет сформулировать определение обобщенного оптимального управления в ИРСУ – АСУ и сформировать структуру алгоритма оптимизации ИРСУ (Рисунок 3).

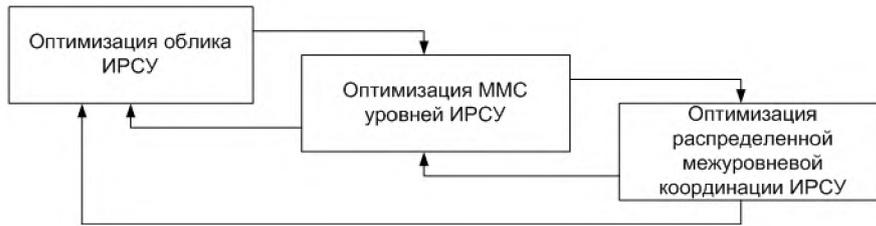


Рисунок 3. Структура метода трехэтапной итерационно связанной оптимизации ИРСУ

Оптимальный облик в общем случае выбирается на основании последовательной процедуры многокритериальной оптимизации облика ИРСУ

по схеме: оптимальная функциональная – оптимальная организационная – оптимальная техническая структуры. В рамках исследования функциональный облик двухуровневой многоканальной СУ БЛА выбран на основе практической задачи (Рисунок 2). Формируется итерационная связанная процедура оптимизации управления на основе равновесно-арбитражного алгоритма (РАА) на ММС-уровнях и алгоритма получения межуровневых координаций на основе обобщенного иерархического равновесия иерархической дифференциальной игры по Штакельбергу (ИРИДИШ). При обобщении данной двухэтапной методики ИРИДИШ-РАА формируются оптимальные законы координации и исполнительного управления с последующим выбором параметров, обеспечивающих балансировку и Парето-оптимальность координации и исполнения на основе РАА СТЭК. Сигналы $u_l, l=1,2$ обеспечивают межуровневую координацию между уровнем управления и стабилизации, а $v_i, i=1,2,3$ обеспечивают исполнительное управление.

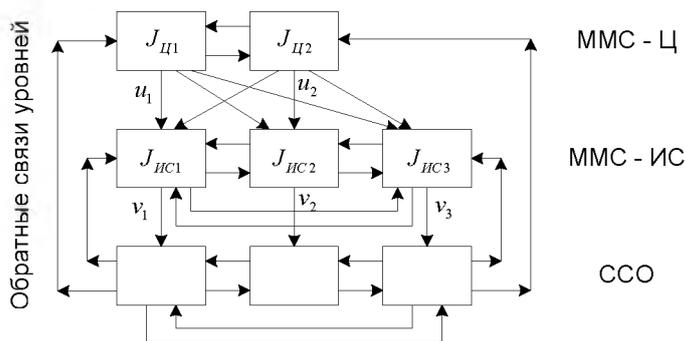


Рисунок 4. Структурная схема двухуровневой трехподсистемной ИДИ.

В отличие от известных результатов и в соответствии со структурным обликом рассматриваемой задачи (Рисунок 2) верхний уровень представляет собой структурированную ММС с исходной структурной несогласованностью (см. Рисунок 4).

На Рисунке 4 введены обозначения: верхний уровень: ММС–центр; нижний уровень: ММС–исполнительная система (ММС–ИС); структурно-сложный объект (ССО). ССО имеет математическую модель $\dot{x} = f(t, x, v, u)$, $x(t_0) = x_0$, $\dim x = n$, где v — исполнительное управление с распределенным

исполнением, а \mathbf{u} – управление-координация ММС-Ц. Структурно и функционально связанные задачи ММС-Ц и ММС-ИС характеризуются критериями эффективности (5) и без ограничения общности постановки имеют вид (6).

$$J_{\Pi lm} = J_{\Pi lm}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), l = \overline{1,3}, m = \overline{1,2}; J_{\text{ИС}ij} = J_{\text{ИС}ij}(\mathbf{v}, \mathbf{u}), i = \overline{1,4}, j = \overline{1,3}. \quad (5)$$

$$J_{lji} = \Phi_{lji}(\mathbf{x}, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} f_{lji}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}) dt, l = \Pi : j = \overline{1,3}, i = \overline{1,2}; l = \text{ИС} : j = \overline{1,4}, i = \overline{1,3}. \quad (6)$$

Определение. Структурные свойства иерархического равновесного решения двухуровневой ИДИ с обобщением стратегии Штакельберга составляют трехэтапную процедуру получения обобщенного управления (\mathbf{u}, \mathbf{v}) .

На первом этапе ММС-Центр на «правах первого хода» сообщает ММС-ИС свою координацию в форме закона-стратегии $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) \in \mathbf{U}$ для каждой позиции из множества $\{t, \mathbf{x}\}$.

На втором этапе на уровне ММС-ИС формируется отображение $\mathbf{R} : \mathbf{U} \rightarrow \mathbf{V}$ такое, что при каждом фиксированном $\mathbf{u} \in \mathbf{U}$

$$\max_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} \varphi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \dots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{v})) = \varphi_{\text{ИС}}(J_{\text{ИС}1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), \dots, J_{\text{ИС}3}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})). \quad (7)$$

На третьем этапе, который развивает стратегию Штакельберга и обобщает ИРИДИШ, ММС-Ц выбирает решение

$$\max_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} \varphi_{\Pi}(J_{\Pi 1}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}), J_{\Pi 2}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru})) = \varphi_{\Pi}(J_{\Pi 1}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}), J_{\Pi 2}(\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru})). \quad (8)$$

Конкретный вид функции φ_{Π} и $\varphi_{\text{ИС}}$ определяется как балансировка эффективности подсистем Ц и ИС на множестве степеней конфликтности подсистем ММС-Ц и ММС-ИС соответственно.

Набор $\{\mathbf{u}^r, \mathbf{Ru}\}$ определяется как *иерархическое равновесие в иерархической дифференциальной игре по Штакельбергу (ИРИДИШ)*.

Методика формирования обобщенного управления двухуровневой системой на основе ИРИДИШ в бескоалиционном варианте балансировки ММС уровней. На втором этапе вводится в рассмотрение отображение, имеющее смысл уравнивания по Нэшу $\mathbf{v}^r = \mathbf{Ru}$.

$$\mathbf{Ru} \parallel v_i = \begin{cases} v_1, R_2 \mathbf{u}, R_3 \mathbf{u} & \text{при } i = 1; \\ R_1 \mathbf{u}, v_2, R_3 \mathbf{u} & \text{при } i = 2; \\ R_1 \mathbf{u}, R_2 \mathbf{u}, v_3 & \text{при } i = 3; \end{cases} \quad \mathbf{Ru} = (R_1 \mathbf{u}, R_2 \mathbf{u}, R_3 \mathbf{u}) = (v_1^r, v_2^r, v_3^r), \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2).$$

В соответствии со вторым этапом получения ИРИДИШ (7) при условии, что $\varphi_{\text{ИС}}$ реализует операцию бескоалиционной конфликтной ситуации, на уровне ММС-ИС формируются отображения $R_i : \mathbf{U} \rightarrow v_i^r, i = \overline{1,3}$, такие что

$$J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru}) = \max_{v_i \in V_i} J_{\text{ИС}i}(\mathbf{u}, \mathbf{Ru} \parallel v_i), i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Далее в соответствии с третьим этапом (8) формируется фц

$$J_{цл}(\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}^r) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \| u_l, \mathbf{R}(\mathbf{u} \| u_l)) = \max_{u_l} J(\mathbf{u} \| u_l, \mathbf{v}^r(\mathbf{u} \| u_l)), l = \overline{1, 2}, \quad (11)$$

где $\mathbf{u}^r = (u_1^r, u_2^r)$; $\mathbf{u} \| u_l = \begin{cases} u_1, u_2^r & \text{при } l = 1; \\ u_1^r, u_2 & \text{при } l = 2. \end{cases}$

На основе (10), (11) на связанных втором и третьем этапе вводятся в рассмотрение функции Гамильтона-Келли. В соответствии со вторым (7) и третьим (8) этапом получения обобщенного ИРИДИШ, решая уравнения Гамильтона-Келли можно получить иерархическое равновесное решение $\{\mathbf{u}^r, R_1\mathbf{u}, R_2\mathbf{u}, R_3\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u}^r, \mathbf{R}\mathbf{u}\}$.

Обобщением функций фц и фис, повышающим эффективность обобщенного ИРИДИШ, является предложенная равновесно-арбитражная алгоритмическая структура оптимизации, которая формирует СТЭК. Так для формирования фис на итерации второго этапа РАА-ИРИДИШ определяется $\mathbf{v}^r = \mathbf{R}\mathbf{u}$ как равновесное решение при фиксированном \mathbf{u} , а затем в соответствии с арбитражной схемой Нэша (12) определяется $\mathbf{v} = \mathbf{v}_{AC}(\mathbf{u})$. При этом \mathbf{v}_{AC} находится на Парето-множестве итерационного фронта Парето $J_{ис}$.

$$J_{ис}^{AC} = \prod_i (J_{исi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - J_{исi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r)) \longrightarrow \max_{\mathbf{v}} \quad (12)$$

Может быть показано, что $J_{ис}^{AC}(\mathbf{u}, \mathbf{v}_{AC})$ на итерации РАА-ИРИДИШ дает предельный по эффективности результат в точке фронта Парето самой близкой к $J_{ис}(\mathbf{u}, \mathbf{v}^r)$.

Аналогичный результат формирования фц имеет место на итерации третьего этапа РАА-ИРИДИШ. Таким образом, алгоритм РАА-ИРИДИШ дает двойное обобщение известного алгоритма ИРИДИШ с централизованным верхним уровнем.

Как известно, при нелинейном описании задачу получения законов $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, $\mathbf{v}(\mathbf{x})$ аналитически решить невозможно. В связи с этим в работе исследованы следующие варианты решения задачи оптимального управления иерархической системой:

1. Решена задача синтеза оптимального закона управления ИРС в линейно-квадратичной постановке;

2. В практических задачах при заданном техническом облике системы на обоих уровнях иерархии для управляющих воздействий могут быть использованы функциональные зависимости от состояния и параметров. На основании этих зависимостей сформированы и решены параметризованные задачи получения обобщенного управления по Штакельбергу и его равновесно-арбитражного обобщения.

3. В полученной задаче параметрической оптимизации ИРСУ используются результаты Воронова Е.М., Серова В.А., Любавского К.К. адаптивной параметрической оптимизации ССт по скоростному напору на основе РАА, что значительно упрощает решение задачи оптимизации ИРСУ.

Согласно п.3 при реализации ИРИДИШ или ИРИДИШ-РАА каждому итерационному решению на уровне наведения с известными результатами по скоростному напору формируется отклик в виде равновесных или равновесно-арбитражных оптимальных параметров ССт соответственно.

Вариант 1. В рамках реализации первого варианта разработан алгоритм решения задачи аналитического синтеза оптимального закона обобщенного управления двухуровневой системы в линейно-квадратичной постановке, который без ограничения общности результата дан в форме получения ИРИДИШ.

Для этого необходимо привести описание модели к следующему виду

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{B}_{Ц1}(t)u_1 + \mathbf{B}_{Ц2}(t)u_2 + \mathbf{B}_{ИС1}(t)v_1 + \mathbf{B}_{ИС2}(t)v_2 + \mathbf{B}_{ИС3}(t)v_3, \quad (13)$$

где \mathbf{u} — управление-координация ММС–Ц: $\mathbf{u} \in \mathbf{U} = \mathbf{U}_1 \times \mathbf{U}_2$, $u_l \in \mathbf{U}_l \subset \mathbf{E}^{m_l}$, $l = \overline{1,2}$; \mathbf{v} — исполнительное управление ММС–ИС: $\mathbf{v} \in \mathbf{V} = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 \times \mathbf{V}_3$, $v_i \in \mathbf{V}_i \subset \mathbf{E}^{m_i}$, $i = \overline{1,3}$; \mathbf{x} — вектор состояния ССО, $\mathbf{x} \in \mathbf{E}^n$, а матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} являются функциями параметров.

Критерии эффективности подсистем ММС–Ц и ММС-ИС, связанных через ССО (13) имеют вид (14), (15)

$$J_{Цl}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k)C_l\mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} \left[\mathbf{x}^T \mathbf{Q}_l(t)\mathbf{x} + u_l^T \mathbf{D}_l(t)u_l \right] dt, \quad l = 1, 2. \quad (14)$$

$$J_{ИСi}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{x}^T(t_k)C_i\mathbf{x}(t_k) + \int_{t_0}^{t_k} \left[\mathbf{x}^T \mathbf{Q}_i(t)\mathbf{x} + 2\mathbf{u}^T \mathbf{P}_i(t)v_i + v_i^T \mathbf{D}_i(t)v_i \right] dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (15)$$

где $\mathbf{u}^T \mathbf{P}_i(t) = \left[u_1^T \mathbf{P}_{i1}(t) + u_2^T \mathbf{P}_{i2}(t) \right]$ — влияние координации в показателях.

На основании описания ССО в виде (13), а также критериев эффективности на каждом уровне иерархии (14), (15) формируется система матричных уравнений (16), решение которой позволяет получить вид оптимальных управляющих воздействий (17), (18) на уровнях иерархии.

Элементы всех матриц непрерывны при $t \in [t_0, t_k]$; матрицы C_l, C_i , $l=1,2$, $i=1,2,3$ постоянны; матрицы C_l, C_i , $\mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i$, $\mathbf{Q}_l, \mathbf{Q}_i$, $l=1,2$, $i=1,2,3$ симметричны, а матрицы $\mathbf{D}_l, \mathbf{D}_i$, $l=1,2$, $i=1,2,3$ определено отрицательны, поэтому обратные матрицы являются невырожденными.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{K}}_{iu_l} + \mathbf{K}_{iu_l}^T \left[\mathbf{A} - \mathbf{M}_l \mathbf{K}_{u_l} - \mathbf{M}_p \mathbf{K}_{u_p} - \bar{\mathbf{B}}_1 \boldsymbol{\Theta}_{1u} - \bar{\mathbf{B}}_2 \boldsymbol{\Theta}_{2u} \right] - \mathbf{K}_{ju_l}^T \bar{\mathbf{B}}_j \boldsymbol{\Theta}_{ju} - 2\mathbf{M}_l^T \boldsymbol{\Theta}_{iu} - \\ \quad - 2\bar{\mathbf{P}}_{il} \mathbf{K}_{u_l} - 2\bar{\mathbf{P}}_{ilp} \mathbf{K}_{u_p} = 0, \mathbf{K}_{iu_l}(t_k) = 0, i, j = 1, 2, i \neq j, l, p = 1, 2, l \neq p; \\ \dot{\boldsymbol{\Theta}}_l + 2\boldsymbol{\Theta}_l \left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1 \hat{\mathbf{K}}_1 \boldsymbol{\Theta}_1 - \mathbf{M}_2 \hat{\mathbf{K}}_2 \boldsymbol{\Theta}_2 - \bar{\mathbf{B}}_1 \boldsymbol{\Theta}_{1u^r} - \bar{\mathbf{B}}_2 \boldsymbol{\Theta}_{2u^r} \right) - \boldsymbol{\Theta}_l \hat{\mathbf{K}}_l^T \mathbf{D}_l \hat{\mathbf{K}}_l \boldsymbol{\Theta}_l = 0, \\ \quad \boldsymbol{\Theta}_l(t_k) = \mathbf{C}_l, l = 1, 2; \\ \dot{\boldsymbol{\Theta}}_i + 2\boldsymbol{\Theta}_i \left(\mathbf{A} - \mathbf{M}_1 \mathbf{K}_{u_1} - \mathbf{M}_2 \mathbf{K}_{u_2} - \bar{\mathbf{B}}_j \boldsymbol{\Theta}_j \right) - \left(\mathbf{K}_{u_1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i1} \mathbf{K}_{u_1} + \mathbf{K}_{u_2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i2} \mathbf{K}_{u_2} \right) - \\ \quad - \left(\mathbf{K}_{u_1}^T \bar{\mathbf{P}}_{i12} \mathbf{K}_{u_2} + \mathbf{K}_{u_2}^T \bar{\mathbf{P}}_{i12} \mathbf{K}_{u_1} + \mathbf{K}_{u_1}^T \mathbf{L}_{i1} \boldsymbol{\Theta}_i + \mathbf{K}_{u_2}^T \mathbf{L}_{i2} \boldsymbol{\Theta}_i + \boldsymbol{\Theta}_i \mathbf{L}_{i1}^T \mathbf{K}_{u_1} \right) - \\ \quad - \boldsymbol{\Theta}_i \mathbf{L}_{i2}^T \mathbf{K}_{u_2} - \boldsymbol{\Theta}_i \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{Q}_i + \mathbf{Q}_i = 0, \boldsymbol{\Theta}_i(t_k) = \mathbf{C}_i, i, j = \overline{1, 3}, i \neq j, \end{array} \right. \quad (16)$$

где $\boldsymbol{\Theta}_i = \boldsymbol{\Theta}_{iu^r}$; $\mathbf{K}_{u_l} = \hat{\mathbf{K}}_l \boldsymbol{\Theta}_l$; $\hat{\mathbf{K}}_l = \mathbf{D}_l^{-1} \left(\mathbf{M}_l^T + 0,5 \cdot \mathbf{K}_{1u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_1 + 0,5 \cdot \mathbf{K}_{2u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_2 \right)$;

$\mathbf{M}_l = \mathbf{V}_{ИС1} \mathbf{D}_{ИС1}^{-1} \mathbf{P}_{l1}^T + \mathbf{V}_{ИС2} \mathbf{D}_{ИС2}^{-1} \mathbf{P}_{2l}^T + \mathbf{V}_{ИС3} \mathbf{D}_{ИС3}^{-1} \mathbf{P}_{3l}^T - \mathbf{V}_{Цл}$; $\bar{\mathbf{B}}_i^T = \bar{\mathbf{B}}_i, i = \overline{1, 3}$;

$\bar{\mathbf{B}}_i = \mathbf{V}_{ИСi} \mathbf{D}_{ИСi}^{-1} \mathbf{V}_{ИСi}^T$, $\bar{\mathbf{P}}_{ij} = \mathbf{P}_{ij} \mathbf{D}_{ИСi}^{-1} \mathbf{P}_{ij}^T$, $i, j = \overline{1, 3}$; $\bar{\mathbf{P}}_{i12} = \mathbf{P}_{i1} \mathbf{D}_{ИСi}^{-1} \mathbf{P}_{i2}^T$, $\bar{\mathbf{P}}_{i21} = \bar{\mathbf{P}}_{i12}^T, i = \overline{1, 3}$;

$\mathbf{L}_{ij} = \mathbf{P}_{ij} \mathbf{D}_{ИСi}^{-1} \mathbf{V}_i^T$, $\mathbf{L}_{ji} = \mathbf{L}_{ij}^T$, $i, j = \overline{1, 3}, l = 1, 2$.

Допустимые структуры управлений u_l , v_i подсистем ММС–Ц и ММС–ИС ограничены функциями вида $u_l(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{ul}(t) \mathbf{x}$, $v_i(t, \mathbf{x}) = \mathbf{K}_{vi}(t) \mathbf{x}$, $l = 1, 2$, $i = 1, 2, 3$ где матрицы \mathbf{K}_{ul} и \mathbf{K}_{vi} непрерывны.

$$u_l^r(t, \mathbf{x}) = \mathbf{D}_l^{-1} \left(\mathbf{M}_l^T + 0,5 \cdot \mathbf{K}_{1u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_1 + 0,5 \cdot \mathbf{K}_{2u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_2 + 0,5 \cdot \mathbf{K}_{3u_l}^T \bar{\mathbf{B}}_3 \right) \boldsymbol{\Theta}_l \mathbf{x}, l = 1, 2. \quad (17)$$

$$v_i^r(t, \mathbf{x}) = \mathbf{R}_i \mathbf{u} = -\mathbf{D}_{ИСi}^{-1} \left[\mathbf{P}_i^T \mathbf{u}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{V}_{ИСi}^T \boldsymbol{\Theta}_{iu} \mathbf{x} \right], i = \overline{1, 3}; \mathbf{u}(t, \mathbf{x}) = \mathbf{u}^r(t, \mathbf{x}) \quad (18)$$

Данные решения определяют ИРИДИШ в двухуровневой системе из ММС–Ц и ММС–ИС в рамках линейно-квадратичной постановки.

Полученные оптимальные законы управления на уровнях наведения и стабилизации являются функциями от времени, вектора состояний и параметров на каждом из уровней $u_l = u_l(\mathbf{k}, t, \mathbf{x})$, $v_i = v_i(\mathbf{k}, t, \mathbf{x}, \mathbf{u})$, $l = 1, 2$, $i = 1, 2, 3$. Данный факт позволяет получить Парето-оптимальные значения параметров на равновесно-арбитражной схеме Нэша.

Вариант 2. В качестве математического описания БЛА используется нелинейная модель движения БЛА. Структуры функций управления заданы как функции параметров $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{k}, t, \mathbf{x})$ и $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{k}, t, \mathbf{x}, \mathbf{u})$ (см. (1)-(4)). Разрабатывается метод параметрической оптимизации ИРСУ. Решения задачи оптимизации ИРСУ сводится к нахождению оптимальных значений параметров в ММС на уровне СН и уровне ССт с межуровневой параметрической балансировкой по эффективности на основе оптимальной межуровневой координации методами ИРИДИШ или ИРИДИШ-РАА.

В соответствии со вторым (7) и третьим (8) этапом ИРИДИШ на каждой итерации применяется РАА (19), (20) Парето-оптимизации.

$$\Phi_{\text{H}}^{\text{AC}} = \prod_i^2 \left[J_{\text{H}}^i(k_{\text{H}}^r) - J_{\text{H}}^i(k_{\text{H}}) \right] \rightarrow \max_{k_{\text{H}}} , J_{\text{H}}^i(k_{\text{H}}) \leq J_{\text{H}}^i(k_{\text{H}}^r); k_{\text{H}i} = (k_{y_i}, k_{k_i}), i = 1, 2; \quad (19)$$

$$\Phi_{\text{CT}}^{\text{AC}} = \prod_i^3 \left[J_{\text{CT}}^i(k_{\text{CT}}^r) - J_{\text{CT}}^i(k_{\text{CT}}) \right] \rightarrow \max_{k_{\text{CT}}} , J_{\text{CT}}^i(k_{\text{CT}}) \leq J_{\text{CT}}^i(k_{\text{CT}}^r); i = \overline{1, 3} \quad (20)$$

где $k_{\text{CT}1} = (k_{\text{oz}}, k_{\text{ny}}, k_{\text{sny}})$, $k_{\text{CT}2} = (k_{\text{oy}}, k_{\text{nz}}, k_{\text{snz}})$, $k_{\text{CT}3} = (k_{\text{ox}}, k_{\text{y}}, k_{\text{sy}})$.

Равновесная точка определяется с применением алгоритма Хука-Дживса.

Вариант 3. Используются результаты алгоритма трехканальной параметрической стабилизации с адаптацией по скоростному напору. Обеспечиваются дополнительные свойства межуровневой координации, которые заключаются в коррекции параметров адаптивной стабилизации по скоростному напору оптимальной СН для обеспечения более высокого качества ССт.

В третьей главе приведены разработанные программные комплексы для исследования задач, позволяющие получить оптимальные параметры на уровнях иерархии, и осуществить моделирование системы при различных краевых условиях и ограничениях. Разработан человеко-машинный интерфейс программы в среде Matlab для многофакторного анализа задачи оптимизации. В данной главе исследуется возможность бортовой реализации иерархического оптимального управления БЛА-МАСП на основе формирования элементов базы данных оптимальных параметров по набору краевых условий и текущих ограничений при наведении МАСП.

В четвертой главе приведены результаты моделирования и многофакторного анализа эффективности оптимальной двухуровневой системы «наведение-стабилизация» МАСП на основе КОСТЭК в варианте 3. Пример решения задачи синтеза в линейно-квадратичной постановке на малом интервале времени приведен в приложении.

Исследование осуществлялось при различных начальных условиях пуска и заданных координатах цели. Описание параметров ССт с адаптацией по скоростному напору задается в виде: эмпирически полученных зависимостей параметров от скоростного напора, или в виде многомерных интерполяционных поверхностей как функций числа Маха и высоты полета на области применения МАСП, полученных в результате интерполяции по опорным точками с оптимальными значениями параметров.

Многофакторное исследование показало, что без балансировки каналов в двухуровневой системе «наведение-стабилизация» и без обеспечения ме-

журовневой координации эффективность иерархической системы наведения-стабилизации уступает результатам, полученным в варианте 3.

В процессе многофакторного анализа выявлено, что при использовании оптимальных параметров ССт с адаптацией по скоростному напору на области применения МАСП из-за недостаточного числа точек для интерполяции, вызванного ограничениями при бортовой реализации, возникают участки, когда качество стабилизации падает. Для повышения качества стабилизации вводятся ограничения на значения параметров ССт: $k_{\omega z} \geq 0,02$, $k_{n_y} \geq 0,2$, $k_{s_{ny}} \geq 0,2$, $k_{\omega y} \geq 0,02$, $k_{n_z} \geq 0,2$, $k_{s_{nz}} \geq 0,2$, $k_{\omega x} \geq 0,02$, $k_{\gamma} \geq 0,2$, $k_{s_{\gamma}} \geq 0,2$.

В качестве дополнительных свойств координации осуществляется наведение на цель с изменением траекторных свойств для обхода окрестности точки, несоответствующей требуемому качеству стабилизации. Данный принцип реализации траекторной безопасности позволяет улучшить качество стабилизации путем усиления координации верхнего уровня. Далее приведены сравнительные результаты моделирования без учета траекторной безопасности (Рисунок 5, а) и с ее обеспечением (Рисунок 5, б). В варианте (а) качество стабилизации не является удовлетворительным. Введение дополни-

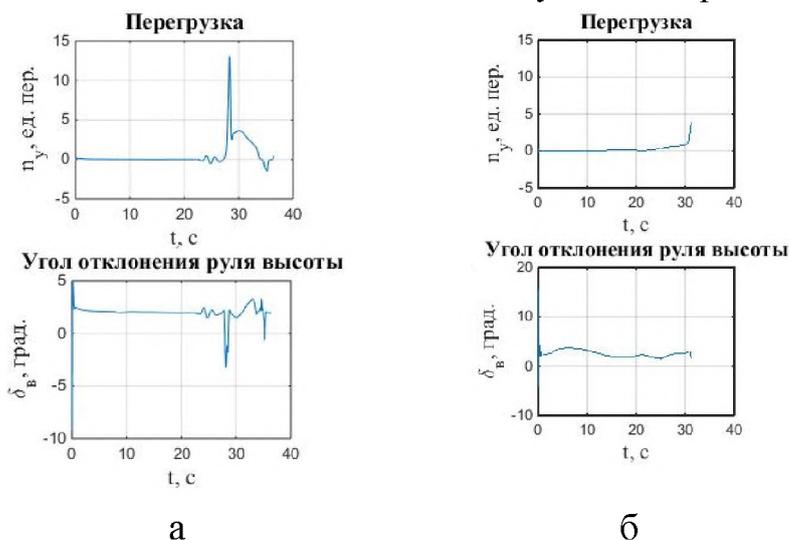


Рисунок 5. Параметры продольного канала в вариантах (а), (б). Точка старта: $X_0=0$ м, $Y_0=5000$ м, $Z_0=0$ м.

Координаты цели: $X_K=4500$ м, $Y_K=0$ м, $Z_K=500$ м. позволяет повысить качество наведения.

тельных ограничений на уровне ССт влечет за собой реализацию дополнительной координации на уровне СН, что позволяет улучшить качество ССт (Рисунок 5, б). Векторный промах в варианте (б) уменьшается (Таблица 1). Следовательно, повышение качества стабилизации позво-

Таблица 1.
Значения промаха, требуемых углов, и скоростей.

	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	Ψ , °	Θ , °	V_x , м/с	V_y , м/с	V_z , м/с
Без ограничений	0,467	-0,389	0,236	-7,4	-57	327,4	2,53	0,29
С ограничениями	0,203	-0,211	0,132	-9,4	-59	331,5	14,3	4,63

По результатам компьютерного моделирования процесса наведения БЛА на цель подтверждается целесообразность применения предложенного алгоритма оптимизации ИРСУ на основе КОСТЭК.

В общих выводах по работе изложены основные результаты диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложении представлены дополнительные материалы, не вошедшие в основную текст работы и включающие: исходные коды программ алгоритма оптимизации ИРСУ динамическим объектом на основе КОСТЭК.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформирована математическая модель двухуровневой многоканальной иерархической системы управления МАСП с перекрестными связями.

2. Разработан метод оптимизации иерархической системы управления динамическим объектом на основе КОСТЭК.

3. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение метода оптимизации управления высокоманевренным МАСП с иерархической системой наведения–стабилизации с двухканальным пропорциональным наведением МАСП для повышения эффективности МАСП и координации траекторной адаптации ССт МАСП.

4. Проведено исследование процессов оптимального управления с применением метода оптимизации иерархической системы наведения–стабилизации МАСП с приближенным и оптимальным вариантами адаптивных связей параметров ССт.

5. Данный способ получения оптимального управления иерархической системой наведения-стабилизации позволяет контролировать скорость изменения скоростного напора во время полета с целью повышения качества стабилизации МАСП.

6. Проведен многофакторный анализ общих свойств методики на примере исследования двухуровневой системы управления МАСП, который показал:

а) использование метода оптимизации иерархической системы управления динамическим объектом на основе КОСТЭК дает положительные результаты; полученные управления обладают координационными свойствами и сбалансированы на уровнях ММС, что видно при сравнении результатов моделирования с результатами, полученными без применения алгоритма на основе КОСТЭК;

б) использование оптимального описания адаптивных связей ССт позволяет получить лучшее качество ССт;

в) наведение на цель с изменением траекторных свойств позволяет учесть ограничения на параметры ССт и повысить качество стабилизации, что от-

ражает повышение координационных свойств СН и ССт при реализации метода оптимизации ИРСУ на основе КОСТЭК.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В качестве расширения темы предполагается создание перспективного алгоритма КОСТЭК для трехуровневой многоканальной иерархической системы «целераспределение – наведение - стабилизация» группировки ЛА.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации-наведения летательного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. Спецвыпуск № 6. С. 19-42. (1,5 п.л./0,35 п.л.)
2. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления структурно сложными системами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/it/nav/1080.html>. (0,37 п.л./0,06 п.л.)
3. Оптимизация иерархической системы «наведение-стабилизация» летательного аппарата с адаптацией системы стабилизации / Ванин А.В. [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 4. С. 13-33. (1,25 п.л./0,25 п.л.)
4. Структурный синтез и иерархическое уравнивание в интеллектуальных системах управления / Ванин А.В. [и др.] // Интеллектуальные системы: Труды Девятого международного симпозиума. М.: РУСАКИ. 2010. С. 33-38. (0,37 п.л./0,06 п.л.)
5. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Метод оптимизация управления иерархической системы наведения-стабилизации беспилотного летательного аппарата // Интеллектуальные системы: Труды Десятого международного симпозиума/ Под ред. Пупкова К.А. М.: РУСАКИ, 2012. С. 328-331. (0,25 п.л./0,1 п.л.)
6. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Алгоритм наведения-стабилизации летательного аппарата в форме двухуровневой иерархической структуры // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXV академических чтений по космонавтике. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2011. С. 507. (0,06 п.л./0,02 п.л.)
7. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической многоканальной системе стабилизации-наведения летательного аппарата // Труды XV Международной конференции

- «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский научный центр РАН. 2013. С. 217–223. (0,44 п.л./0,15 п.л.)
8. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Синтез оптимального управления двухуровневой многоканальной системы управления летательного аппарата на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский научный центр РАН. 2014. С 52-60. (0,56 п.л./0,19 п.л.)
9. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация иерархических многоуровневых систем управления на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов // Труды XI Международного симпозиума «Интеллектуальные системы 2014». М.: Изд-во РУДН. 2014. С.11-15. (0,31 п.л./0,11 п.л.)
10. Синтез оптимального управления двухуровневой многоканальной системы управления летательного аппарата на основе координированных стабильно-эффективных компромиссов / Ванин А.В. [и др.] // Труды XVII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Самарский научный центр РАН. 2015. (0,63 п.л./0,16 п.л.)
11. Исследование структуры оптимальной взаимосвязи высокоманевренной траектории противокорабельной ракеты с динамическими свойствами перекрестных каналов наведения и оптимальной трехканальной системы стабилизации / Ванин А.В. [и др.] // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. Тезисы докладов. М.: ООО «Научтехлитиздат». 2015. С. 60-63. (0,25 п.л./0,05 п.л.)
12. Современные направления развития теории управления в задачах стабилизации, наведения и группового противодействия авиационно-ракетных и морских объектов и их групп / Ванин А.В. [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС 2016). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2016. 488 с. С. 11-21 (0,69 п.л./0,06 п.л.)
13. Координация в задаче оптимизации иерархической системы «наведение-стабилизация» малогабаритного авиационного средства поражения с оптимальной адаптацией системы стабилизации/ Ванин А.В. [и др.] // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС 2016). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2016. 488 с. С. 464-470 (0,44 п.л./ 0,06 п.л.)