

На правах рукописи

**СПОКОЙНЫЙ Иван Александрович**

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ  
МНОГОПРОГРАММНОГО ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ  
В ОПТИМАЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДАХ НАВЕДЕНИЯ**

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

*Спокой*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2018

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 кафедры «Системы  
автоматического управления»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Литовченко Дмитрий Цезарьевич**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник тематического конструкторского бюро, заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «Комета»  
**Борзунов Аркадий Васильевич**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию, АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»

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

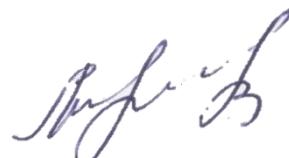
Защита состоится « 2 » октября 2018 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613 м.

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, 2-я Бауманская улица д.5., стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.141.02  
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Получение оптимального управления в обратных связях (позиционного управления) остается одной из важнейших задач теории управления. Тем не менее подходы, существующие в современной теории управления, в основном предлагают решения данной задачи лишь для относительно простых систем с одним критерием оптимизации. Для сложных нелинейных многомерных многосвязных динамических систем, к которым предъявляется много требований, практически не существует универсальных подходов синтеза позиционного управления, обеспечивающих эффективное функционирование системы сразу по всем критериям оптимизации в широком диапазоне начальных условий и ограничений.

Не менее важным является совершенствование подходов к повышению эффективности наведения летательных аппаратов (ЛА) на основе разработки многокритериально-оптимальных нелинейных методов наведения, так как известные методы наведения, например, самонаведения, были сформированы в конце пятидесятых годов прошлого века на основе линейно-квадратической задачи оптимального управления, учитывающей главным образом точность наведения.

В диссертационной работе предлагается базовый для повышения эффективности наведения метод многокритериального синтеза позиционного управления на основе достижений в области многопрограммной позиционной стабилизации в классе линейных и нелинейных систем. Методологические основы метода получены в работах Воронова Е.М. и Спокойного И.А. в результате обобщения подходов Зубова В.И., Смирнова Н.В., Соловьевой И.В., Габасова Р.Ф. по формированию компонент многопрограммного позиционного управления (МПУ), стабилизирующих траекторию объекта с МПУ относительно набора оптимальных программных траекторий, придавая им асимптотические свойства на конечном интервале времени. Обобщение заключается в способе получения стабилизирующих компонент МПУ на основе синергетического подхода формирования «притягивающих многообразий» введением экспоненциально устойчивых макропеременных метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) по Колесникову А.А., а также в обеспечении многокритериального качества программных траекторий. Метод не содержит проблемы сходимости, формирует универсальное аналитическое решение  $u(x,t)$ , единообразное по

структуре на множестве начальных условий.

*Целью диссертационной работы* является разработка методики многокритериального синтеза позиционного управления нелинейными динамическими объектами в реальном времени на основе теории многопрограммной стабилизации и синергетических подходов и её применение для формирования многокритериально-оптимального нелинейного метода наведения авиационных средств поражения.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующего ряда задач:

1. Анализ существующих методов получения позиционного управления, подходов многокритериальной оптимизации и методов наведения ракет.
2. Разработка методики синтеза многокритериально-оптимального позиционного управления на основе многопрограммной стабилизации.
3. Постановка многокритериальной задачи наведения на цель и формирование математической модели пространственного движения малогабаритного авиационного средства поражения (МАСП), описывающей движение центра масс с учетом детализации описания аэродинамических сил и ограничений.
4. Получение структуры позиционного управления в форме аналитических зависимостей от текущего состояния и параметров опорных программных траекторий, позволяющих синтезировать закон управления ракеты в режиме реального времени.
5. Исследование и применение известных подходов, а также разработка новых методов получения многокритериально-оптимальных программных управлений и траекторий.
6. Разработка программно-алгоритмического обеспечения и оценка работоспособности предложенного метода синтеза позиционного управления в задаче наведения МАСП на цель.
7. Многофакторный анализ многокритериально-оптимального нелинейного комбинированного метода наведения МАСП, формирование общих рекомендаций по использованию разработанного метода синтеза позиционного управления в широком классе сложных нелинейных динамических систем.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались современные методы многокритериальной теории оптимального управления, методы теории многопрограммного синтеза, синергетические подходы управления сложными системами, теория и

методы наведения ЛА, методы нелинейного программирования.

**Научная новизна** результатов диссертации представлена:

- многокритериальным синтезом позиционного управления нелинейными динамическими системами;
- формированием асимптотических свойств многокритериально-оптимальных программных траекторий на основе устойчивых макропеременных метода АКАР синергетической теории управления;
- технологией многокритериальной оптимизации на основе МПУ и желаемого вида траектории;
- разработкой комбинированного метода наведения авиационных средств поражения с многокритериально-оптимальным нелинейным методом наведения (МОН МН) на первом участке полета и с самонаведением на втором.

**Практической значимостью** работы является:

- повышение эффективности функционирования МАСП на основе учета вектора требований и полученного позиционного управления, обеспечивающего субоптимальность на множестве начальных условий;
- программное обеспечение для синтеза закона наведения, позволяющее получить базу данных опорных траекторий и оценить потенциальные возможности новых разрабатываемых образцов авиационных средств поражения (АСП);
- результаты многофакторного анализа, в рамках которого исследовалось влияние ветровых возмущений, подвижности цели, наличие комбинированной системы навигации на качество разработанного метода пространственного наведения МАСП;
- исследование, показывающее возможность бортовой реализации МОН МН в БВК МАСП.

**Внедрение результатов работы.** Практическая часть исследований диссертационной работы получена в рамках НИР «Разработка аппаратно-программного комплекса имитационного моделирования функционирования малогабаритных авиационных средств поражения и проведения анализа эффективности стабилизации, наведения и группового применения МАСП методом имитационного моделирования», выполняемой по хоздоговору с ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» в 2014-2016 гг.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы

докладывались и обсуждались на пяти конференциях:

Первый международный симпозиум «Современные аспекты фундаментальных наук» (Москва, 2013); 7-ая Российская мультиконференция по проблемам управления «Управление в морских и аэрокосмических системах» (Санкт-Петербург, 2014); XI международный симпозиум «Интеллектуальные системы» (Москва, 2014); Вторая Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами» ГосНИИАС - РПКБ (Москва, 2015); 9-ая Российская мультиконференция по проблемам управления «Управление в морских и аэрокосмических системах» (Санкт-Петербург, 2016).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, из них 3 работы – в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем опубликованных работ составляет 2,37 п.л.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, заключения, списка используемой литературы и приложения. Общий объем работы составляет 222 страниц, содержит 105 рисунков и 22 таблицы.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика многокритериального синтеза управления для нелинейных объектов в форме многопрограммного позиционного управления.
2. Многокритериально-оптимальный закон пространственного наведения на примере конкретного образца МАСП.
3. Технология многокритериальной оптимизации на основе желаемого вида траектории и МПУ.
4. Программно-алгоритмическое обеспечение комбинированного метода пространственного траекторного управления (наведения) на основе многопрограммного позиционного управления.
5. Результаты многофакторного анализа работоспособности и эффективности разработанного двухэтапного метода пространственного наведения, в рамках которого выявлено его преимущество по сравнению с известными методами; выполнена адаптация при маневрирующей цели и наличии ветра; исследована возможность бортовой реализации, а также получена модификация терминального самонаведения с использованием синергетического подхода АКАР и модели учета возмущений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, для чего проведен анализ существующих подходов синтеза оптимального управления в обратных связях, подходов многокритериальной оптимизации и методов наведения ракет. Отмечается, что на данный момент практически нет универсальных подходов синтеза для линейных и нелинейных систем различной структуры, обеспечивающих возможность получения многокритериально-оптимального управления сложными динамическими объектами в реальном времени при ограниченных вычислительных мощностях в широком диапазоне возможных начальных условий.

В качестве другой важной проблемы указывается необходимость совершенствования методов наведения, способных учитывать наиболее полное описание модели движения, а также множество важных целевых требований, обеспечивающих успешное преодоление СПВО и предельно эффективное поражение цели.

Определена цель, сформированы основные задачи диссертационной работы. Даётся краткая аннотация всех разделов.

**В первой главе** обсуждаются современные подходы получения позиционного управления. К ним относятся метод синтеза программно-корректируемого управления, метод синтеза нелинейными неопределенными системами с квадратичным критерием, синтез на основе генетического программирования, метод синтеза позиционного управления на основе многопрограммной стабилизации. Перспективным направлением является четвертый подход, направленный на получение универсальной структуры позиционного управления на основе набора заранее полученных на множестве начальных условий программных управлений и соответствующих им траекторий, которые выполняют роль практического расширения класса «притягивающих» многообразий – аттракторов по Г. Никольсу, И. Пригожину.

Приведена классификация и представлены наиболее известные в настоящее время методы многокритериальной оптимизации (МКО) программных управлений. Отмечено, что помимо относительной сложности и проблемы выбора ограниченного количества параметров и дискретизации их по времени при параметризации программного управления, от которой часто зависит возможность получения того или иного решения, у большинства рассмотренных методов МКО имеется ряд недостатков применительно к задаче получения на множестве начальных

условий полного набора многокритериально-оптимальных программных управлений и траекторий. К ним относятся: длительное время поиска одного оптимального решения; сложность настройки алгоритмов автономного поиска для разных начальных условий; негарантированность того, что получаемое решение является достаточно близким к оптимальному, а не просто субоптимальным в рамках выбранных условий поиска.

В последней части главы обсуждается проблема наведения. Описывается сложность процесса наведения, дается классификация методов и типов систем наведения, общий список требований, предъявляемый к современным системам. Отмечается, что для достижения зоны действия системы самонаведения с наилучшими показателями качества, необходимо использовать более совершенные методы наведения, в основу которых положена многокритериальная оптимизация и адаптивность к множеству возможных начальных условий и возмущениям в процессе полета.

**Во второй главе** излагаются теоретические основы методики синтеза многокритериально-оптимального позиционного управления, базирующиеся на многопрограммной стабилизации в форме МПУ и получение стабилизирующих компонент на основе синергетического подхода АКАР А.А. Колесникова. Формируется обобщенный алгоритм.

Вначале формулируется общая постановка задачи синтеза оптимального позиционного управления нелинейным динамическим объектом. Далее приводится *определение* многокритериальной многопрограммной стабилизации.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad \mathbf{u} \in \mathbf{U} \quad (1)$$

**1.** Пусть система (1) описывает движение некоторого управляемого объекта, где  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  –  $n$ -мерный вектор системы,  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_r)^T$  –  $r$ -мерный вектор управления, непрерывная функция за исключением конечного множества точек меры ноль;  $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \in C(R^1 x R^n x R^r)$  – непрерывная вектор-функция.

**2.** Сформирован вектор показателей – критериев

$$\mathbf{J} = (J_1 \dots J_l) \rightarrow \text{extr}_{\mathbf{u}}. \quad (2)$$

**3.** Для системы (1) на основе вектора-критериев (2) заранее решаются некоторые специальные задачи программного управления, то есть строятся  $N$  программных движений  $\mathbf{x}_1(t), \dots, \mathbf{x}_N(t)$  на множестве начальных условий  $\mathbf{x}_1(t_0), \dots, \mathbf{x}_N(t_0)$ , которые обеспечиваются многокритериально-

оптимальными программными управлениями  $u_1(t), \dots, u_N(t)$ .

Задача заключается в получении для исходной системы (1) позиционного управления

$$u = u(x, t), \quad (3)$$

которое формирует траекторию  $x(t)$  объекта (1), обладающую на множестве начальных условий субоптимальными свойствами по вектору (2) на основе обеспечения устойчивости по Ляпунову синтезируемой траектории  $x(t)$  относительно каждой из  $x_k(t)$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

Управление (3), обладающее описанными свойствами, называют многопрограммным стабилизирующим.

В настоящее время в теории многопрограммного позиционного управления в работах Зубова В.Н. и Смирнова Н.В. решена задача многопрограммной стабилизации для линейных и некоторых нелинейных систем. При этом многопрограммное управление имеет вид интерполяционного полинома Лагранжа–Сильвестра. В своей диссертационной работе Соловьева И.В. обобщила это представление к форме МПУ на конечном интервале  $[t_0, t_k]$ :

$$u(x, t) = u_m(x, t) + \sum_{k=1}^N v(y_k(t)), \quad y_k = x - x_k, \quad t_0 \leq t \leq t_k, \text{ где} \quad (7)$$

$$\dot{y}_k(t) = G_k(y_k(t), v(y_k(t))), \quad y_k(t_0) = y_{0k} \neq 0, \quad t_0 \leq t \leq t_k, \quad k = \overline{1, N} \quad (8)$$

— оператор системы в отклонениях относительно одной из заданных траекторий  $x_k(t)$ ;  $v(y_k(t))$  — стабилизирующая компонента МПУ, обеспечивающая устойчивость нулевого решения (8) (управление стабилизирующее траекторию МПУ  $x(t)$  относительно  $x_k(t)$  или, другими словами, обеспечивающее асимптотические свойства заданной траектории  $x_k(t)$ );

$$u_m(x, t) = \sum_{k=1}^N u_k(t) \prod_{s=1, s \neq k}^N \frac{(x(t) - x_s(t))^2}{(x_k(t) - x_s(t))^2}, \quad u_m(x_k, t) = u_k(t) \quad (9)$$

— многопрограммное управление без свойств стабилизации.

Получение  $v(y_k(t))$  для каждого  $k = \overline{1, N}$  формирует векторную асимптотику  $x_k(t)$ ,  $k = \overline{1, N}$  на  $[t_0, t_k]$ , как «притягивающего» многообразия для траектории  $x(t)$ , соответствующей МПУ (7).

Следующая часть главы посвящена краткому описанию синергетического подхода АКАР и его применению в задачах синтеза

позиционного управления. Построение скалярных регуляторов методом АКАР основывается на введении вектора макропеременных  $\psi = (\psi_1(x), \psi_2(x), \dots, \psi_p(x))$ , последовательности инвариантных многообразий  $\psi_i = 0, i = \overline{1..p}$  поникающейся геометрической размерности и последующей поэтапной декомпозиции исходной динамической системы. В таком случае изображающая точка системы, начав двигаться из произвольного начального состояния, последовательно перемещается от одной поверхности притяжения к другой, пока не попадет на финишную поверхность вида  $\psi_1 = 0 \rightarrow \psi_2 = 0 \rightarrow \dots \rightarrow \psi_p = 0$  при  $t \rightarrow t_k$ .

За основу разрабатываемого подхода принимается многопрограммная структура, представленная в виде МПУ (7) на конечном интервале времени  $[t_0, t_k]$ . Обобщение решения задачи синтеза многокритериально-оптимального позиционного управления заключается в следующих основных положениях:

1. Каждая программная (**опорная**) траектория  $x_k(t)$  из всего набора решений  $k = \overline{1, N}$  получается таким образом, что или она сама является многокритериально-оптимальной для заданного начального условия  $x_{k0}$ , или при «притяжении» к ней из этого же начального условия синтезируемая траектория обладает свойствами многокритериальной эффективности.

2. Стабилизирующие свойства МПУ для  $x_k(t)$  формируются на основе синергетического подхода формирования необходимых условий обеспечения «притягивающих многообразий»  $y_k(t_k) = 0, k = \overline{1, N}$  введением экспоненциально устойчивых макропеременных  $\psi_i(t) = y_{ki}(t), i \in [1, n]$ ,  $T_i \dot{\psi}_i + \psi_i = 0$  метода агрегированных регуляторов (АКАР).

3. Решение, получаемое на основе МПУ для начальных условий из некоторой окрестности  $O_\varepsilon(x) = \{x : \exists x_{k0} : |x_0 - x_{k0}| < \varepsilon\}$ , будет многокритериально субоптимальным, что следует из асимптотической устойчивости  $x_k(t), k = \overline{1, N}$ , каждой из которых обладает этим свойством в соответствии с положением 1.

На основе этого обобщения предлагается следующий алгоритм многокритериально-оптимального синтеза (АМС) позиционного управления (Рис.1):

- Получение стабилизирующих компонент (СК) МПУ — определение аналитических зависимостей  $v(y_k(t))$  от текущего состояния объекта управления с использованием притягивающих многообразий

$\psi_i = 0$ ,  $i = \overline{1..p}$ , придающих асимптотические свойства опорным программным траекториям и значений параметров сходимости  $T_i$ .

- Многокритериальная оптимизация программных управлений и траекторий (МКО ПУТ) — получение минимально-необходимого набора программных траекторий, обеспечивающего эффективность работы системы для предполагаемого диапазона начальных условий.
- Определение правил выбора опорных траекторий и формирование условий применимости для полученного набора программных траекторий.

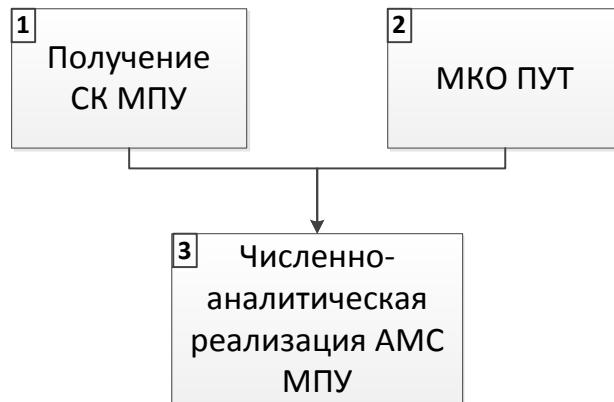


Рис. 1. Структура алгоритма многокритериального синтеза МПУ

Чтобы определить вид **стабилизирующей компоненты**  $v(y_k(t))$  исходная система (1) представляется в виде системы в отклонениях (8) относительно  $k$ -ой опорной траектории. Для сходимости  $y_k(t) = \mathbf{x} - \mathbf{x}_k$  к нулю, в соответствии с методом АКАР, вводятся дополнительные агрегированные макропеременные  $\psi_i(t) = \varphi_i(y_{k1}, \dots, y_{kn})$  и «притягивающие многообразия»  $\psi_i(t_k) = 0$ , устойчивость которых обеспечивается функциональными уравнениями  $T_i \dot{\psi}_i + \varphi(\psi_i) = 0$ . Если в качестве агрегированной макропеременной выбрать  $\psi_i(t) = y_{ki}(t)$ , а в качестве функции  $\varphi(\psi_i) = \psi_i$ , то отклонение  $i$ -ого параметра от  $k$ -ой опорной траектории будет подчиняться следующему уравнению

$$T_i \dot{y}_{ki}(t) + y_{ki}(t) = 0, \quad t \in [t_0, t_k], \quad \psi_i(t_k) = 0, \quad (10)$$

где  $T_i$  — параметр сходимости, определяющий желаемую скорость сближения с опорной траекторией с учетом динамических свойств системы.

Выражая производную  $\dot{y}_{ki}(t)$  из (10) и заменяя ее в составе системы (8), получаем выражение для определения стабилизирующей компоненты в зависимости от отклонения:  $v_i = f(y_{ki}(t))$ .

**В третьей главе** проводится многокритериальный синтез нелинейного закона наведения для конкретного образца МАСП с комбинированной системой наведения: на первом этапе полета управление осуществляется на основе методики, предложенной во второй главе, а на втором этапе используется метод самонаведения.

В постановке задачи формулируется математическая модель пространенного движения в форме нелинейной системы дифференциальных уравнений, выбираются критерии оптимизации, определяются функциональные ограничения.

Описание пространственного движения центра масс МАСП имеет вид следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} x_7 \dot{x}_1 = P - X_A - x_7 g \cdot \sin x_2; & x_7 x_1 \dot{x}_2 = Y_A - x_7 g \cdot \cos x_2; \\ x_7 x_1 \cos x_2 \dot{x}_3 = Z_A; & \dot{x}_4 = x_1 \cdot \sin x_2; \\ \dot{x}_5 = x_1 \cdot \cos x_2 \cos x_3; & \dot{x}_6 = -x_1 \cdot \cos x_2 \sin x_3; & \dot{x}_7 = f_m(t), \end{cases} \quad (14)$$

где  $x_1 = V$  — скорость;  $x_2 = \Theta$  — угол наклона траектории;  $x_3 = \Psi$  — угол пути (угол поворота траектории);  $x_4 = H$  — высота полета;  $x_5 = D$  — горизонтальная дальность до цели;  $x_6 = Z_g$  — поперечная координата;  $x_7 = m$  — масса;  $P = f_P(t)$  — тяга двигателя;  $f_m$  — функция изменения массы МАСП для конкретного типа двигателя;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $X_A, Y_A, Z_A$  — аэродинамические силы, формирующиеся согласно следующим соотношениям:

$$X_A = C_{xa} \cdot q \cdot S; \quad Y_A = C_{ya} \cdot q \cdot S; \quad Z_A = C_{za} \cdot q \cdot S;$$

$$C_{ya} = \frac{n_y \cdot m \cdot g}{q \cdot S}; \quad C_{za} = \frac{n_z \cdot m \cdot g}{q \cdot S}; \quad C_{\Sigma}a = \sqrt{C_{ya}^2 + C_{za}^2}; \quad C_{xa} = f_{Cx}(C_{\Sigma}a);$$

$S$  — площадь поверхности крыльев МАСП;  $q$  — скоростной напор;  $n_y$  и  $n_z$  — управляющие нормальная и боковая перегрузки, подлежащие формированию при наведении МАСП на цель. На среднеквадратическое значение аэродинамического коэффициента налагается ограничение в виде:  $|C_{\Sigma}a| < 5,3$ .

Предполагается, что МАСП относится к классу воздух–земля, запускаемое с боевого вертолета, с начальной массой около 100 кг и предназначено для поражения танковых группировок или других единиц малоподвижной техники. Поэтому в качестве критериев оптимизации

выбираются

$$J_1 = V_T \rightarrow \max_u; J_2 = \Delta R \rightarrow \min_u; J_3 = T_f \rightarrow \min_u; J_4 = |\Theta_T - \Theta_{\text{зад}}| \rightarrow \min_u,$$

где  $V_T$  – скорость подлета к цели;  $\Delta R$  – величина промаха;  $T_f$  – время полета до цели;  $\Theta_T$  – угол подлета к цели,  $\Theta_{\text{зад}}$  – заданное значение угла подхода.

На первом шаге синтеза на основе описания (8) и выражений (11) получаются стабилизирующие компоненты МПУ и проводится исследование для определения параметров сходимости  $T_{2k}, T_{4k}, T_{3k}, T_{6k}$  при отсутствии и наличии ветра. Аналитический вид стабилизирующих компонент в продольном и боковом каналах имеет вид (15) и (16) соответственно.

$$\vartheta_{H\_k} = \frac{x_1(x_{2k}^* - x_2)}{g \cdot T_{2k}} + \cos x_2 - \cos x_{2k}^*, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x_{2k}^* &= \arcsin \left( \left( -\frac{y_{4k}}{T_{4k}} + x_{1k} \cdot \sin x_{2k} \right) \middle/ x_1 \right); \\ \vartheta_{Z\_k} &= \frac{x_1 \cos x_2 \left[ \arcsin \left( \frac{\frac{y_{6k}}{T_{6k}} + x_{1k} \cdot \cos x_{2k} \sin x_{3k}}{x_1 \cos x_2} \right) - x_3 \right]}{g \cdot T_{3k}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, многопрограммное позиционное управление для нормальной перегрузки  $n_y(\mathbf{x})$  и боковой  $n_z(\mathbf{x})$  согласно (7) представляется формулами (17), (18).

$$n_y(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N n_{y\_k}(t) \prod_{s=1, s \neq k}^N \frac{(x_4(t) - x_{4s}(t))}{(x_{4k}(t) - x_{4s}(t))} + \sum_{k=1}^N \vartheta_{H\_k}; \quad (17)$$

$$n_z(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^N n_{z\_k}(t) \prod_{s=1, s \neq k}^N \frac{(x_6(t) - x_{6s}(t))}{(x_{6k}(t) - x_{6s}(t))} + \sum_{k=1}^N \vartheta_{Z\_k}. \quad (18)$$

Следующим шагом синтеза управления является получение полного набора МКО ПУТ, в рамках которого была предложена новая перспективная технология многокритериальной оптимизации на основе желаемого вида траектории и МПУ, позволяющая перейти в меньшее пространство поиска неизвестных параметров, за счет чего значительно упрощается алгоритм и время поиска оптимальных решений.

Идей подхода является поиск опорной траектории в форме некой потенциальной кривой, предположительно являющейся оптимальным

видом, обеспечивающим наилучшие результаты по заданным терминальным критериям оптимизации. Для выбранной траектории решается обратная задача, то есть определяются соответствующие данной траектории управляющие воздействия и остальные параметры состояния системы как функции от времени. Далее на основе полученного решения в качестве опорной траектории для тех же начальных условий определяется решение на основе МПУ, которому соответствует вектор критериев оптимизации. С использованием этого подхода осуществлена оптимизация в продольном и боковом каналах управления.

Далее предлагаются правила выбора опорных траекторий и алгоритм для определения условий применимости. Приводятся примеры моделирования процесса наведения для различных начальных условий пуска, показывающие работоспособность полученного закона наведения.

В заключительной части главы приводится описание программно-алгоритмического обеспечения методики многокритериального синтеза позиционного управления на основе МПУ, а также рассматривается возможность реализации данного метода на бортовом вычислительном комплексе МАСП.

**В четвертой главе** проведено исследование эффективности полученного закона наведения МАСП.

В результате анализа влияния ветровых возмущений в боковом канале и сравнения закона наведения на основе МПУ с методом пропорционального наведения показано, что предложенный метод наведения в боковом канале на первом участке полета незначительно улучшает получаемый результат. Это объясняется тем, что основной задачей управления в боковой плоскости на первом этапе наведения является разворот ракеты на малоподвижную цель, что по энергетическим затратам гораздо меньше, чем затраты на управление в вертикальной плоскости (набор высоты, горизонтальный полет, обеспечение необходимой точности и угла подхода). Кроме того, в случае использования МПУ в боковом канале необходимо получить в несколько раз больше опорных траекторий и их запомнить, чем в случае оптимизации только одного продольного канала. Поэтому в качестве закона наведения для данной задачи в боковом канале может быть использовано пропорциональное наведение.

Высоко маневрирующая цель, наличие ветра значительно затрудняют возможность точного попадания в цель. В связи с этим на заключительном

участке самонаведения предложено формировать значения управляющих перегрузок на основе формул, выведенных с использованием подхода АКАР и модели учета возмущений, представляющей собой формулу для расчета скорости, вызываемой всеми возмущающими факторами в проекции на какую-либо ось.

Проведен сравнительный анализ полученного комбинированного метода наведения в продольном канале с методом программного автономного наведения алгоритма оптимального траекторного управления (АОТУ) для модели управляемого средства поражения (УСП) на основе комбинации ПИД-регулятора и пропорционального наведения, который показал, что применение МПУ является более простым способом синтеза закона наведения и обеспечивает более высокие показатели эффективности.

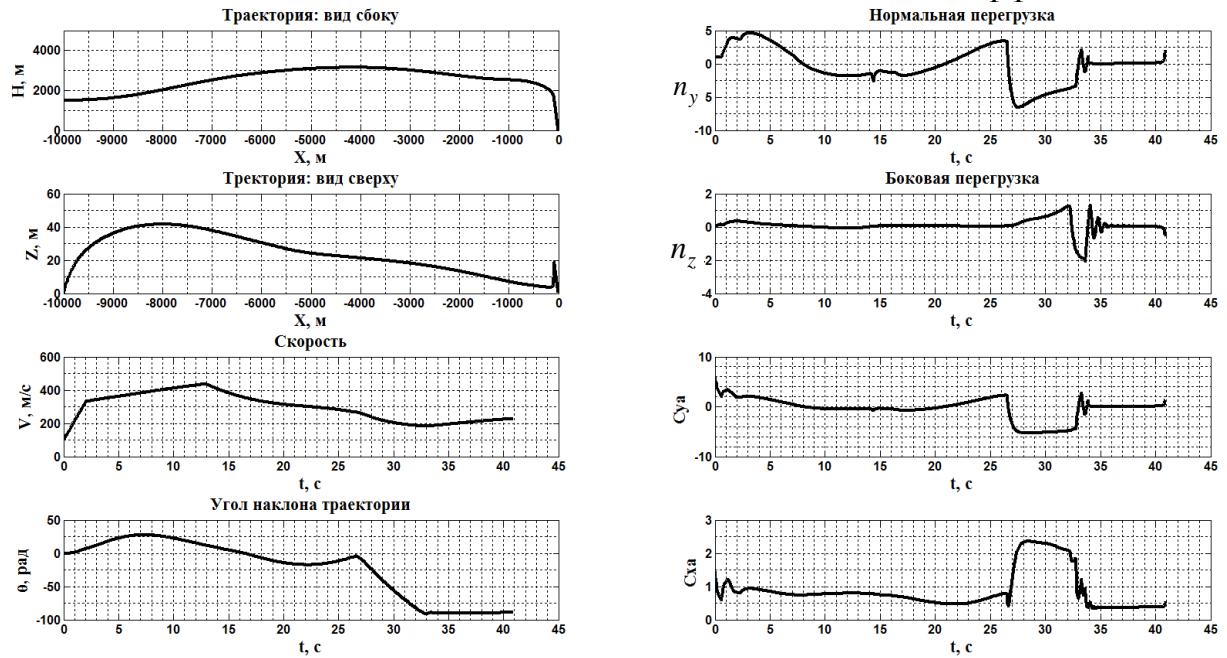


Рис.2. Графики параметров движения МАСП для начального условия  $V_0 = 100 \text{ м/с}$ ,  $\psi_0 = 0^\circ$ ,  $H = 1500 \text{ м}$ ,  $D = -10000 \text{ м}$   
при подвижной цели ( $V_x^t = 10 \text{ м/с}$ ,  $V_z^t = 15 \text{ м/с}$ )

В конце главы проводится анализ сформированного метода наведения на множестве начальных условий с учетом адаптации для терминального самонаведения. Результаты моделирования подтверждают многокритериальную эффективность разработанного оптимального нелинейного метода наведения для всего диапазона начальных условий, а также возможность обеспечения точного попадания при условии маневрирующей цели и сильного ветра. Пример реализации процесса наведения показан на Рис. 2.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен обзор и анализ проблем, связанных с получением многокритериально-оптимального позиционного управления, современных методов наведения авиационных средств поражения. Получена обобщенная классификация современных подходов МКО программных управлений.
2. Сформирована методика и разработан алгоритм многокритериального синтеза позиционного управления в форме МПУ для нелинейных объектов с обобщением подхода многопрограммной стабилизации на основе аналитического конструирования агрегированных регуляторов А.А. Колесникова.
3. Разработан многокритериально-оптимальный комбинированный двухэтапный метод пространственного нелинейного наведения конкретного образца МАСП:
  - а) сформирована нелинейная математическая модель пространственного траекторного управления с учетом ограничений и вектора критериев;
  - б) получен аналитический вид стабилизирующих компонент МПУ и проведено исследование для определения параметров сходимости к инвариантным многообразиям при отсутствии и наличии ветра;
  - в) предложены правила выбора опорных траекторий–асимптот и реализован алгоритм для определения условий применимости.
4. Разработана новая перспективная технология многокритериальной оптимизации на основе желаемого вида траектории и МПУ, позволяющая перейти в меньшее пространство поиска неизвестных параметров, что значительно упрощает алгоритм и время поиска оптимальных решений.
6. На основе многопрограммного позиционного управления разработано программно-алгоритмическое обеспечение метода пространственного траекторного управления МАСП в проекциях на продольный и боковой каналы.
7. Проведен многофакторный анализ разработанного метода пространственного наведения МАСП, в рамках которого
  - а) выявлена работоспособность МОН МН в функции изменения краевых условий, ограничений на множество вариантов ранжирования векторных требований по промаху, углу подлета к цели, терминальной скорости при подвижной и малоподвижной цели;
  - б) исследован приоритет по эффективности продольного канала наведения МАСП при терминальном характере критериев данной задачи и

малоподвижной цели;

в) выявлена близость результатов в боковом канале наведения МАСП при ветровых возмущениях применения на этапе автономного полета полученного МОН МН и пропорционального наведения, что позволяет упростить переход к самонаведению на втором этапе полета;

г) осуществлена адаптация метода наведения для случая маневрирующей цели и наличия ветра, в результате которой значения управляющих перегрузок на заключительном участке самонаведения предложено формировать с использованием синергетического подхода АКАР и модели учета возмущений, представляющей собой однотактовый прогноз значения скорости, вызываемой всеми возмущающими факторами в проекции на какую-либо ось;

д) выполнено сравнение и исследовано преимущество по эффективности полученного МОН МН с АОТУ для модели УСП;

ж) предложен подход, позволяющий учесть особенности комбинированной системы навигации при использовании МПУ.

8. Проведен анализ результатов моделирования на множестве начальных условий, подтверждающий работоспособность и многокритериальную эффективность разработанного комбинированного оптимального нелинейного метода наведения.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

В качестве расширения темы предлагается применение полученного метода наведения на полной модели пространственного движения, учитывающей угловое движение ЛА и ограничения на отклонения рулей управления, а также проработка практической реализации предложенного подхода наведения в бортовом вычислительном комплексе.

## **РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Воронов Е.М., Серов В.А., Спокойный И.А. Оптимальное нелинейное наведение на основе алгоритма многокритериального синтеза многопрограммного позиционного управления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. №3. С. 54-72. С. 54-72 (1,2 п.л.)
2. Многокритериально-оптимальный нелинейный метод пространственного наведения / И.А. Спокойный [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. №6. С. 126-139. (0,86 п.л.)
3. Воронов Е.М., Спокойный И.А. Многокритериальная оптимизация на

основе желаемого вида траектории и многопрограммного позиционного управления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. №2. С. 87-97. (0,62 п.л.)

4. Воронов Е.М., Спокойный И.А., Серов В.А. Многокритериальный синтез позиционного управления продольным движением ЛА с нелинейной моделью 6-ого порядка на основе метода многопрограммной стабилизации // Современные аспекты фундаментальных наук. Труды первого международного симпозиума. М.: НИУ МГОУ. 2013. С. 223-228. (0,42 п.л.)
5. Многокритериальный синтез многопрограммного позиционного управления летательным аппаратом / И.А. Спокойный [и др.] // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014). 7-я Российская мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. СПБ.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор». 2014. С. 600-607. (0,5 п.л.)
6. Многокритериальный синтез многопрограммного позиционного наведения беспилотного летательного аппарата / И.А. Спокойный [и др.] // Интеллектуальные системы. Труды одиннадцатого международного симпозиума. Под ред. К.А. Пупкова. М., 2014. С. 287-291. (0,31 п.л.)
7. Многокритериальный оптимальный нелинейный метод наведения на основе многопрограммного позиционного управления / И.А. Спокойный [и др.] // Вторая Всероссийская научно-техническая конференция. Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. Тезисы докладов. М.: ООО «Научтехлитиздат». 2015. С. 69-71. (0,19 п.л.)
8. Воронов Е.М., Репкин А.Л., Спокойный И.А. Многокритериально-оптимальный нелинейный метод двухканального наведения управляемых средств поражения с учетом комбинированной системы наведения и ветровых возмущений // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). 9-я Российская мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. СПБ: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2016. С. 443-452. (0,66 п.л.)