

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Ляпин Никита Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА  
ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ  
ИГРОВОГО ПОДХОДА

Специальность

05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации  
(авиационная и ракетно-космическая техника)»

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2021 год

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: Евдокименков Вениамин Николаевич  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационно-управляющие комплексы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: Инсаров Вильям Викторович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ведущий инженер ГосНИИАС, Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»  
Михалев Иван Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения "46 Центральный научно-исследовательский институт" Министерства обороны Российской Федерации

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

Защита диссертации состоится «09» сентября 2021 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=121215](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=121215)

Автореферат разослан «    »                      2021 года.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.125.12  
д.т.н.



А.В. Старков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы и степень разработанности темы.** Современный этап развития беспилотных летательных аппаратов (БЛА) предполагает их активное использование для решения разнообразных целевых задач. Доля БЛА в структуре производства авиационных фирм постоянно растет, появляется большое количество разработчиков и производителей БЛА, занимающихся исключительно беспилотными аппаратами и системами.

Среди БЛА, ориентированных на выполнение оборонных задач, в настоящее время наибольшее распространение получили комплексы с БЛА, решающие задачи обнаружения и нанесения ударов по наземным объектам. Тем не менее, одним из приоритетных направлений развития беспилотной авиации является создание беспилотных истребителей, ориентированных на перехват пилотируемых и беспилотных воздушных целей.

Привлекательность данного направления обусловлена тем, что отсутствие летчика на борту БЛА позволяет существенно расширить его маневренные возможности за счет работы в более широком диапазоне допустимых скоростей и перегрузок, а также за счет использования более жестких вариантов непосредственного управления подъемной и поперечными аэродинамическими силами.

Работы в этом направлении активно ведутся как в России, так и за рубежом. Первое испытание, в котором новый БЛА выступал против двух истребителей-бомбардировщиков F4 «Фантом» авиации ВМС США, состоялось 10 мая 1971 года в районе острова Санта-Каталина у побережья Калифорнии. БЛА был вооружен управляемой ракетой (УР) с тепловой головкой самонаведения (ГСН) и УР с радиолокационной ГСН. Проведенные испытания подтвердили эффективность использования БЛА, как средства перехвата воздушных целей

Другой вариант беспилотного истребителя – это создаваемый на средства Агентства по перспективным оборонным разработкам (DARPA) аппарат «Перегрин UAV Киллер» (Peregrine UAV Killer). Задача перспективного БЛА – барражирование в назначенном районе и поиск БЛА противника с последующим их уничтожением.

В России также активно ведутся работы в области создания беспилотных истребителей, подтверждением чему служат многочисленные работы в данной предметной области.

Однако, несмотря на значительный интерес к проектам создания беспилотных самолетов-истребителей, их реализация осложняется в основном сложностью бортовых алгоритмов управления, способных мгновенно оценивать текущую полетную ситуацию и вырабатывать решения, обеспечивающие позиционное преимущество БЛА-перехватчика в воздушном бою с точки зрения последующего применения авиационных средств поражения (АСП).

**Целью настоящей работы** является расширение боевых возможностей беспилотной авиации за счет реализации функции перехвата воздушных целей на основе разработки алгоритма гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на этапе вывода в район применения авиационных средств поражения.

Сформулированная цель определяет необходимость постановки и решения актуальной **научной задачи** разработки алгоритма автоматического управления траекторией БЛА-перехватчика, обеспечивающего достижение этой цели с учетом ограничений, накладываемых на управление, возможностей АСП, располагаемых на борту БЛА, и его радиолокационных средств.

В соответствии с поставленной задачей проводились исследования по следующим **направлениям**:

- анализ существующих проектов в области создания беспилотных перехватчиков, а также состояние исследований в области разработки методов и алгоритмов управления БЛА;
- постановка научной задачи синтеза гарантирующего алгоритма управления траекторией движения БЛА-перехватчика в процессе боевого маневрирования на основе игрового подхода,
  - разработка математической модели рассматриваемого алгоритма,
  - разработка программного комплекса имитационного моделирования, обеспечивающего реализацию алгоритма гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика;
- имитационное моделирование полученного алгоритма с учетом ограничений на вектор управления;
- анализ результатов имитационного моделирования и формирование рекомендаций для бортовой реализации разработанного алгоритма.

**Объектом исследований** является БЛА, ориентированный на задачи перехвата воздушных целей.

**Предмет исследований** – алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на этапе вывода в район применения АСП.

Основным методом исследования является решение игровой задачи для класса линейных систем, оптимизируемых по квадратичному критерию, а также имитационное моделирование полученного алгоритма с учетом ограничений на вектор управления на основе использования разработанного программного комплекса.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на основе решения игровой задачи при заданной продолжительности процесса сближения, обеспечивающий тактическое преимущество БЛА-перехватчика в условиях воздушной дуэли.

- метод определения расчетной продолжительности процесса сближения противников из условия существования седловой точки в игровой задаче.

- алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на основе решения игровой задачи для ситуации, когда продолжительность процесса сближения не задана и определяется на борту БЛА исходя из минимальной и максимальной продолжительности процесса маневрирования игроков,

- алгоритм управления траекторией движения БЛА, обеспечивающий его уклонение от атаки воздушного противника,

- алгоритм управления траекторией движения БЛА, обеспечивающий реализацию маневра преследования воздушного противника.

- результаты исследований, отражающие влияние основных маневренных характеристик БЛА-перехватчика («приемистость», «скороподъемность», «поворотливость») на достижение позиционного преимущества в условиях воздушной дуэли, а также при выполнении маневров уклонения от атаки воздушного противника и его преследования.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

- метод решения задачи гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика в операции перехвата воздушной цели в случае, когда продолжительность процесса боевого маневрирования не задана и рассчитывается из условия существования седловой точки в игровой задаче. Предложенное решение основано на описании конфликтующих самолетов в пространстве относительных нормированных координат. Подобное представление позволило использовать известную структуру гарантирующего

управления для класса линейных динамических систем, оптимизируемых по квадратичному критерию.

- результаты комплексного исследования совместного влияния характеристик применяемых авиационных средств поражения и основных маневренных характеристик БЛА-перехватчика на достигаемое позиционное преимущество в условиях воздушной дуэли, а также в задачах «преследования – уклонения».

**Обоснованность результатов** проведенных диссертационных исследований подтверждается:

- непротиворечивостью результатов, которые были получены в результате имитационного моделирования, известным результатам, представленным в существующих исследовательских работах,
- обширным и содержательным анализом предшествующих работ в исследуемой области,
- достаточной апробацией материалов диссертации на научно-технических конференциях и в опубликованных работах.

**Степень достоверности результатов** проведенных диссертационных исследований подтверждается:

- использованием корректных имитационных и математических моделей,
- правильным применением методов исследования и результатами имитационного моделирования.

**Научная значимость работы** состоит в совершенствовании алгоритмов управления траекторией БЛА-перехватчика в операции перехвата воздушной цели на основе известной структуры гарантирующего управления для класса линейных систем, оптимизируемых по квадратичному критерию.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в следующем:

- полученный алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА в операции перехвата воздушной цели позволяет увеличить позиционное преимущество БЛА с точки зрения последующего использования АСП;
- разработанный математический аппарат, использованный для решения задачи синтеза гарантирующего управления, позволяет на этапе проектирования сформулировать обоснованные требования к характеристикам применяемых АСП и бортового радиоэлектронного оборудования БЛА с учетом его маневренных возможностей.

**Результаты работы** докладывались на научно-технических конференциях различного уровня: 15-я Международная конференция «Авиация

и космонавтика» (г. Москва, 2016), Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция (г. Москва, 2017), XXII международная конференция «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, 2017), 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2017), XLIV Международная молодёжная научная конференция. «Гагаринские чтения – 2018» (г. Москва, 2018), 10-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2018), XII Мультиконференция по проблемам управления (г. Ростов-на-Дону, 2019), 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2019).

**Основные положения** диссертационной работы изложены в 5 статьях [1-5], из которых 4 работы [1-4], опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Кроме того, материалы диссертационного исследования представлены в сборниках докладов 8 конференций [6-13].

**Работа** состоит из введения, четырех глав и заключения.

**Структура работы:** 114 страниц основного текста, включая 22 рисунка, 10 таблиц, 47 формул и 59 наименований литературных источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится обоснование актуальности решаемой задачи, краткий обзор степени проработанности темы исследования, дается общая характеристика работы.

**В первой главе** представлен обзор современного состояния исследований в области беспилотной авиации. Показано, что функциональные возможности современных БЛА сопоставимы с возможностями пилотируемых летательных аппаратов (ЛА), что делает возможным их использование для решения разнообразных целевых задач, в том числе, для задач перехвата воздушных целей.

Приведен обзор современных БЛА, находящихся на вооружении РФ и США. Показано, что в настоящее время в мире ведутся активные работы по созданию перспективных БЛА, имеющих возможность нести на борту вооружение и предназначенных для ударов по наземным и воздушным стационарным и подвижным целям в условиях сильного противодействия сил противовоздушной обороны (ПВО) противника. При этом боевые беспилотные летательные аппараты играют одну из важнейших ролей в развитии военных отраслей различных стран. Кроме этого, БЛА интегрируются в системы

вооружения армий мира, как самостоятельные единицы, так и эффективное дополнение к пилотируемым комплексам.

Представлен анализ современных проектов в области создания беспилотных перехватчиков. В настоящее время для перехвата воздушных целей требуется создавать сверхманевренные летательные аппараты, которые способны изменять положение связанных осей в пространстве без изменения направления полета, а также выполнять маневры с существенно более сложными пространственными эволюциями за счет развитой механизации крыла, специальных органов управления подъемной и боковой силами и применения высокоэнергетических двигателей с управляемым вектором тяги. Результаты проведенных в Германии и США системных исследований и испытаний на полунатурном моделирующем комплексе показали, что сверхманевренный самолет эффективнее обычного в ближнем воздушном бою не менее, чем в два раза. Показано, что в настоящее время специалистами предпринимаются попытки использования БЛА в качестве истребителей перехватчиков. Однако, практическая реализация такой возможности осложняется отсутствием конструктивных алгоритмов управления такими БЛА.

Приведен обзор современного состояния в области разработки методов и алгоритмов управления БЛА. Показано, что все существующие подходы к разработке алгоритмов управления траекторией БЛА-перехватчика объединяет то, что они не учитывают объективно игровой характер задачи перехвата воздушной цели и основаны на применении БЛА-перехватчика, как зенитной ракеты. Учитывая преимущества и недостатки классических методов наведения и в связи с отмеченными особенностями разработки систем наведения нового поколения, а также отсутствием таких систем для БЛА-перехватчиков, для решения задачи диссертационной работы использовались методы теории оптимального управления и дифференциальных игр.

По результатам приведенного анализа сформулирована научная задача исследования. В рамках поставленной игровой задачи синтеза гарантирующего управления требуется разработать алгоритм управления траекторией БЛА-перехватчика в операции перехвата воздушной цели с учетом выполнения ряда задач:

- выбор времени боевого маневрирования на основе выбранного критерия оптимальности;
- учет ограничений на управление конфликтующих самолетов;
- оценка эффективности полученного решения игровой задачи

Основным критерием качества разработанного алгоритма является расстояние до «идеального» (с точки зрения последующего применения АСП) положения каждого из противников на момент окончания боевого маневрирования конфликтующих самолетов. Это расстояние отражено в величине терминальной составляющей квадратичного критерия, используемого для решения задачи.

Выбран основной инструмент исследования разрабатываемого алгоритма гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика – имитационное моделирование. Определен алгоритм, подлежащий разработке, а именно:

- алгоритм управления траекторией ЛА применительно к линейной модели его движения и квадратичному критерию в случае, когда продолжительность процесса боевого маневрирования не задана.

Разработанный алгоритм управления траекторией ЛА реализован в рамках созданного специализированного программного комплекса имитации процесса этапа вывода БЛА в зону возможных пусков АСП.

С помощью разработанного программного комплекса проведено: имитационное моделирование процесса боевого маневрирования БЛА в процессе перехвата воздушной цели, анализ полученных результатов моделирования и формирование рекомендаций по применению разработанного алгоритма гарантирующего управления.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели движения противоборствующих БЛА при выполнении операции перехвата воздушной цели.

Математическая постановка задачи предполагает представление конфликтующих ЛА, участвующих в воздушном бою, в виде материальных точек, состояние которых описывается 6-мерным вектором. Компоненты этого вектора представляют собой координаты  $X, Y, Z$ , задающие пространственное положение в стартовой системе координат, и три составляющих вектора скорости  $VX, VY, VZ$ .

Предполагалось, что между конфликтующими самолетами существует постоянный информационный контакт. Учитывая это, были введены следующие обозначения:

$$R(t) = \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \\ VX_a \\ VY_a \\ VZ_a \end{pmatrix} - \text{вектор текущего состояния собственного БЛА } a \text{ в стартовой}$$

системе координат OXYZ, связанной с аэродромом вылета.

$$S(t) = \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ VX_b \\ VY_b \\ VZ_b \end{pmatrix} \text{ вектор текущего состояния самолета противника } b \text{ в стартовой}$$

системе координат OXYZ.

$$C(t) = R(t) - S(t) = \begin{pmatrix} X_a - X_b \\ Y_a - Y_b \\ Z_a - Z_b \\ VX_a - VX_b \\ VY_a - VY_b \\ VZ_a - VZ_b \end{pmatrix} - \text{вектор, характеризующий текущее относительное}$$

состояние собственного самолета  $a$  и самолета противника  $b$ , который задает в шестимерном пространстве относительных параметров состояния противодействующих самолетов точку с координатами, определяемыми соответствующими компонентами вектора  $C(t)$ .

Введен вектор  $C^1$ , задающий желаемое состояние собственного БЛА относительно самолета противника на момент  $T$  завершения боевого маневрирования, при котором он занимает тактически выгодное положение относительно самолета противника с точки зрения преимущества в последующей ракетной атаке. Этот вектор фиксирует в пространстве относительных параметров точку, которая является «идеальной» с точки зрения интересов собственного самолета.

$$C^1 = R(T) - S(T) = \begin{pmatrix} X_a(T) - X_b(T) \\ Y_a(T) - Y_b(T) \\ Z_a(T) - Z_b(T) \\ VX_a(T) - VX_b(T) \\ VY_a(T) - VY_b(T) \\ VZ_a(T) - VZ_b(T) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Таким образом, цель управления собственным самолетом  $a$  представлена следующим выражением:

$$C(T) = (R(T) - S(T)) \rightarrow C^1, \quad (2)$$

где  $T$  – продолжительность процесса боевого маневрирования.

Аналогично записывается выражение, определяющее цель управления самолетом противника  $b$  в процессе боевого маневрирования:

$$C(T) = (R(T) - S(T)) \rightarrow C^2, \quad (3)$$

где  $C^2$  – вектор, задающий конечное состояние собственного самолета  $a$  относительно самолета противника  $b$ , при котором последний приобретает тактическое преимущество в последующей ракетной атаке. Очевидно, что точка, задаваемая компонентами вектора  $C^2$ , является «недопустимой» с точки зрения интересов управления собственным самолетом.

$$C^2 = R(T) - S(T) = \begin{pmatrix} X_a(T) - X_b^*(T) \\ Y_a(T) - Y_b^*(T) \\ Z_a(T) - Z_b^*(T) \\ VX_a(T) - VX_b^*(T) \\ VY_a(T) - VY_b^*(T) \\ VZ_a(T) - VZ_b^*(T) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Компоненты векторов  $C^1$ ,  $C^2$  выбираются на этапе предполетного планирования, учитывая тип летательного аппарата противника и собственного самолета, характеристик их ракетного вооружения, средств обнаружения и их динамических возможностей.

В рамках рассматриваемой постановки задачи управление маневрированием собственного самолета организовано таким образом, чтобы на интервале  $[0, T]$  обеспечить перевод текущей точки  $C(t)$  в «идеальную» точку  $C^1$ . С точки зрения интересов противника целью боевого маневрирования является перевод текущей точки  $C(t)$  в точку  $C^2$ . Иными словами, имеет место игровая задача, в которой участники преследуют собственные цели.

Введем вектор управления собственным БЛА  $U$ , компонентами которого являются ускорения по соответствующим осям стартовой системы координат:

$$U = \begin{pmatrix} u_1 = a_{Xa} \\ u_2 = a_{Ya} \\ u_3 = a_{Za} \end{pmatrix} \quad (5)$$

На управление наложены ограничения в виде неравенств:

$$\begin{pmatrix} a_{Xamin} \leq a_{Xa} \leq a_{Xamax} \\ a_{Yamin} \leq a_{Ya} \leq a_{Yamax} \\ a_{Zamin} \leq a_{Za} \leq a_{Zamax} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Вектор управления самолетом противника  $V$  имеет аналогичную структуру

$$V = \begin{pmatrix} v_1 = a_{Xb} \\ v_2 = a_{Yb} \\ v_3 = a_{Zb} \end{pmatrix} \quad (7)$$

и подчиняется ограничениям:

$$\begin{pmatrix} a_{Xbmin} \leq a_{Xb} \leq a_{Xbmax} \\ a_{Ybmin} \leq a_{Yb} \leq a_{Ybmax} \\ a_{Zbmin} \leq a_{Zb} \leq a_{Zbmax} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Тогда, модель, описывающая динамику изменения относительного состояния конфликтующих самолетов в процессе их боевого маневрирования может быть описана линейным дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dC(t)}{dt} = AC(t) + BU(t) + DV(t), \quad (9)$$

где:

$C(t)$  – вектор размерности  $6 \times 1$ , характеризующий текущее относительное состояние самолетов  $a$  и  $b$ ;

$A, B, D$  – постоянные матрицы коэффициентов со следующими элементами:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В дальнейшем составляющие ускорений собственного самолета определенные в стартовой системе координат могут быть пересчитаны с помощью матрицы направляющих косинусов, связывающей инерциальную и связанную системы, в компоненты ускорений в связанной системе координат, а, значит, в составляющие перегрузок по связанным осям, на основе которых и будут формироваться команды управления в процессе боевого маневрирования.

В условиях реальной воздушной дуэли параметры относительного движения БЛА-перехватчика и цели имеют естественные ограничения, задаваемые системой неравенств:

$$C_{imin} \leq C_i \leq C_{imax}, i = \overline{1,6} \quad (11)$$

где значения  $C_{imin}$ ,  $C_{imax}$  определяются динамическими возможностями противоборствующих самолетов и условиями видимости бортовых радиолокационных станций (РЛС), обеспечивающих получение информации о положении и скорости противника.

Аналогичные ограничения накладываются на управления:

$$u_{imin} \leq u_i \leq u_{imax}, v_{imin} \leq v_i \leq v_{imax}, i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

Наличие подобных ограничений позволяет осуществить переход к нормированным аналогам физических параметров относительного движения конфликтующих ЛА на основе линейного преобразования:

$$\tilde{C}_i(t) = \frac{C_i(t) - \frac{1}{2}(C_{imin} + C_{imax})}{\frac{1}{2}(C_{imax} - C_{imin})}, i = \overline{1,6} \quad (13)$$

С учетом перехода к нормированным векторам  $\tilde{C}(t), \tilde{U}(t), \tilde{V}(t)$  исходная модель (9) принимает вид:

$$\frac{d\tilde{C}(t)}{dt} = \tilde{A}\tilde{C}(t) + \tilde{B}\tilde{U}(t) + \tilde{D}\tilde{V}(t) + \tilde{H} \quad (14)$$

$$\tilde{A} = \Phi^C A (\Phi^C)^{-1}, \tilde{B} = \Phi^C B (\Phi^U)^{-1}, \tilde{D} = \Phi^C D (\Phi^V)^{-1}, \tilde{H} = \Phi^C (A \Gamma^C + B (\Phi^U)^{-1} \Gamma^U + D (\Phi^V)^{-1} \Gamma^V).$$

Модель (14) можно упростить, если ограничения на параметры относительного движения БЛА-перехватчика и цели, а также на управления задавать в виде

условий:  $|C_i| \leq C_{imax}, i = \overline{1,6}; |u_i| \leq u_{imax}, i = \overline{1,3}; |v_i| \leq v_{imax}, i = \overline{1,3}$ . Тогда векторы  $\Gamma^C, \Gamma^U, \Gamma^V$  становятся нулевыми и приведенная выше модель, описывающая изменение во времени нормированных параметров относительного движения БЛА-перехватчика и цели, принимает вид, аналогичный (9):

$$\frac{d\tilde{C}(t)}{dt} = \tilde{A}\tilde{C}(t) + \tilde{B}\tilde{U}(t) + \tilde{D}\tilde{V}(t) \quad (15)$$

В этом случае, компоненты вектора  $\tilde{C}^1, \tilde{C}^2$  задающие «идеальные» положения собственного БЛА и самолета противника (с точки зрения их интересов) относительно противника, определяются по формуле:

$$\tilde{C}^1 = \Phi^C C^1, \tilde{C}^2 = \Phi^C C^2 \quad (16)$$

Учитывая интересы игроков, в качестве критерия в рассматриваемой игровой задаче управления линейной динамической системой (15) предлагается использовать следующий критерий:

$$J(\tilde{U}, \tilde{V}) = \int_0^T (\tilde{U}^T(t)Q\tilde{U}(t) - \tilde{V}^T(t)W\tilde{V}(t))dt + \tilde{C}^T(T)(G^1 - G^2)\tilde{C}(T) + 2\tilde{C}^T(T)(G^2\tilde{C}^2 - G^1\tilde{C}^1) \quad (17)$$

$Q, W$  - положительно-определенные матрицы, предполагаемые заданными. Конкретные компоненты указанных матриц определяются на этапе предполетного планирования с учетом обеспечения ограничений на управление.

$G^1$  - весовая матрица, определяющая, насколько жестко должны выдерживаться требования по отдельным параметрам относительного движения БЛА-перехватчика для приведения в «идеальную» точку  $\tilde{C}^1$ . Весовая матрица  $G^2$  имеет аналогичный смысл для самолета-противника. Конкретные значения компонент этих матриц преимущественно зависят от типов АСП, расположенных на противоборствующих самолетах. За счет выбора элементов матриц  $G^1, G^2$  достигается адаптация алгоритмов траекторного управления самолетами, участвующими в воздушной дуэли с учетом особенностей располагаемых на них средств поражения.

В теории дифференциальных игр доказано, что для линейных систем с квадратичным критерием, какой является система (15) с критерием (17), седловая точка всегда существует, то есть существует решение, оптимальное с точки зрения интересов обеих конфликтующих сторон:

$$J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*) = \min_{\tilde{U}} \max_{\tilde{V}} J(\tilde{U}, \tilde{V}) = \max_{\tilde{V}} \min_{\tilde{U}} J(\tilde{U}, \tilde{V}) \quad (18)$$

В результате приходим к игровой задаче оптимального управления для линейной динамической системы с линейно-квадратичным критерием. Решение этой задачи достигается на основе метода динамического программирования Беллмана при условии, что время боевого маневрирования  $T$  задано. Это решение задается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \tilde{U}^*(\tilde{C}, t) &= -Q^{-1}B^T(P\tilde{C} + q), \\ \tilde{V}^*(\tilde{C}, t) &= -W^{-1}D^T(P\tilde{C} + q). \end{aligned} \quad (19)$$

Матрица  $P=P(t)$  размера  $(6 \times 6)$  и вектор  $q=q(t)$  размера  $(6 \times 1)$ , присутствующие в (18) определяются в результате решения дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned} \dot{P} &= -P\tilde{A} - \tilde{A}^T P + P(\tilde{B}Q^{-1}\tilde{B}^T + \tilde{D}W^{-1}\tilde{D}^T)P, \quad P(T) = G^1 - G^2, \\ \dot{q} &= ((\tilde{B}Q^{-1}\tilde{B}^T + \tilde{D}W^{-1}\tilde{D}^T)P - \tilde{A})^T q, \quad q(T) = G^2\tilde{C}^2 - G^1\tilde{C}^1. \end{aligned} \quad (20)$$

Проведен анализ поведения производной квадратичного критерия, на основе которого, учитывая требование существования седловой точки в игровой задаче, получено формализованное правило, позволяющее в зависимости от текущего состояния БЛА-перехватчика относительно цели  $\tilde{C}(t)$  выбирать

расчетную продолжительность процесса сближения  $T$ , для которой рассчитываются оптимальные законы управления конфликтующими самолетами:

$$T^* = \begin{cases} T_0, \frac{\partial J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_0} = 0 \\ T_{min}, \frac{\partial J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*, T)}{\partial T} \neq 0 \forall T \in [T_{min}, T_{max}], \frac{\partial J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_{min}} < 0; \\ T_{max}, \frac{\partial J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*, T)}{\partial T} \neq 0 \forall T \in [T_{min}, T_{max}], \frac{\partial J(\tilde{U}^*, \tilde{V}^*, T)}{\partial T} \Big|_{T=T_{max}} > 0 \end{cases} \quad (21)$$

Далее проведено имитационное моделирование процесса гарантирующего управления траекторией БЛА.

Эффективность гарантирующего управления оценивалась по тому позиционному преимуществу, которое приобретает БЛА-перехватчик после завершения его вывода в зону применения АСП. Для этого в момент завершения процесса сближения  $T$  рассчитывались расстояния  $d_1(T), d_2(T)$ , характеризующие в пространстве нормированных относительных координат близость каждого из конфликтующих самолетов до соответствующей «идеальной» точки, перемещение в которую обеспечивает ему тактическое преимущество с точки зрения последующего применения средств поражения. Эти расстояния представляют собой терминальные компоненты критерия.

$$\begin{aligned} d_1(T) &= (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1)^T G^1 (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1), \\ d_2(T) &= (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^2)^T G^2 (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^2). \end{aligned} \quad (22)$$

Соотношение  $d_1(T) < d_2(T)$  указывает на то, что БЛА-перехватчик получает тактическое преимущество с точки зрения последующей ракетной атаки.

Проведено две серии вычислительных экспериментов. В первой серии (рис. 1а) БЛА-перехватчик и самолет противника использовали оптимальные законы управления, рассчитываемые с помощью (19). Во второй серии экспериментов (рис. 1б) управление БЛА-перехватчиком по-прежнему формировалось на основе (19), но соперник использовал управление  $\tilde{V}^*(C)$ , рассчитанное для продолжительности процесса боевого маневрирования  $T$ , отличной от расчетной, определяемой из условия существования седловой точки.

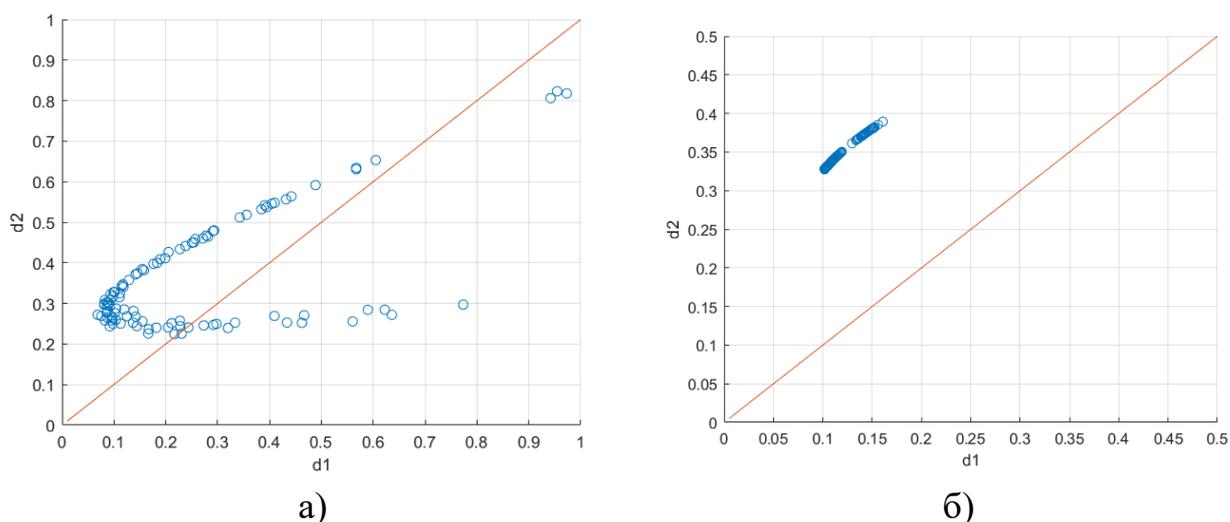


Рис. 1 - Значения  $d_1(T^*), d_2(T^*)$ , отражающие положение

противоборствующих самолетов относительно «идеальных», с учетом их интересов, точек

В наиболее тяжелой ситуации (рис. 1а), когда противник придерживается оптимальной стратегии управления, в 81% случаях БЛА-перехватчик, тем не менее, приобретает тактическое преимущество по сравнению с самолетом противника. Рис. 1б показывает, что любое отклонение соперника от оптимальной стратегии приводит к тому, что в 100% случаях собственный БЛА-перехватчик получает тактическое преимущество с точки зрения последующего применения АСП, независимо от начального состояния конфликтующих ЛА.

Таким образом, любое отклонение самолета противника от гарантирующей стратегии управления приводит к тому, что БЛА-перехватчик на этапе его вывода в область применения средств поражения приобретает позиционное преимущество, что делает его шансы в воздушной дуэли предпочтительными.

**В третьей и четвертой главах** описаны практически значимые частные случаи представленной во второй главе задачи гарантирующего управления для варианта воздушной дуэли.

Первый из них - минимаксная оптимизация маневров преследования противника. Подобная задача возникает тогда, когда в качестве воздушной цели выступает, например, разведывательный БЛА, ориентированный на поиск наземных целей.

Математическая постановка имеет аналогичную структуру приведенной в главе 2 задачи. Учитывая тот факт, что у противника отсутствуют АСП, критерий оптимальности принимает следующий вид:

$$J(\tilde{U}, \tilde{V}) = \int_0^T (\tilde{U}^T(t) Q \tilde{U}(t) - \tilde{V}^T(t) W \tilde{V}(t)) dt + (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1)^T G^1 (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1) \quad (23)$$

Соответственно оптимальные управления конфликтующих ЛА рассчитываются на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \dot{P} &= -P\tilde{A} - \tilde{A}^T P + P(\tilde{B}Q^{-1}\tilde{B}^T + \tilde{D}W^{-1}\tilde{D}^T)P, \quad P(T) = G^1, \\ \dot{q} &= ((\tilde{B}Q^{-1}\tilde{B}^T + \tilde{D}W^{-1}\tilde{D}^T)P - \tilde{A})^T q, \quad q(T) = -G^1 C^1. \end{aligned} \quad (24)$$

Целью имитационного моделирования процесса сближения самолетов, участвующих в воздушном бою, являлась оценка позиционного преимущества, которое приобретает БЛА-перехватчик в зависимости от его маневренных возможностей.

Маневренные возможности БЛА-перехватчика оценивались по следующим тактически значимым показателям, рассчитанным в инерциальной системе координат:

- приемистость, характеризующая оперативность разгона БЛА до необходимой скорости; влияние проявляется через величину осевого ускорения  $a_x$ ;
- скороподъемность, определяющая маневренность БЛА в вертикальной плоскости; влияние проявляется через величину нормального ускорения  $a_y$ ;
- поворотливость, отражающая способность БЛА выполнять горизонтальные маневры; влияние проявляется через величину бокового ускорения  $a_z$ .

Для исследования влияния тактически значимых показателей маневренности на достижение позиционного преимущества в условиях ближнего воздушного боя проведено 3 серии имитационных экспериментов. Каждая серия включала в себя моделирование 100 траекторий движения противников, соответствующих различным случайно выбираемым начальным состояниям  $C(0) \in W_C$  для выбранных значений отношения  $U_{\max}/V_{\max} = k, k = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5$ . Значение  $k < 1$  указывает на то, что БЛА-перехватчик обладает маневренным преимуществом по исследуемому показателю. Значение  $k = 1$  – признак того, что конфликтующие БЛА обладают сопоставимыми маневренными возможностями по исследуемому показателю;  $k > 1$  указывает на маневренное преимущество БЛА-противника. При этом предполагалось, что при исследовании конкретного тактически значимого показателя БЛА-перехватчик и самолет противника обладают сопоставимыми маневренными возможностями по другим тактически значимым показателям. В результате были получены реализации  $d_j = (\tilde{C}^j(T^*) - \tilde{C}^1)^T G^1 (\tilde{C}^j(T^*) - \tilde{C}^1)$ ,

количественно выражающие степень близости самолета-истребителя до «идеальной» точки в момент завершения процесса маневрирования. Серым цветом выделена область тактического преимущества БЛА-перехватчика.

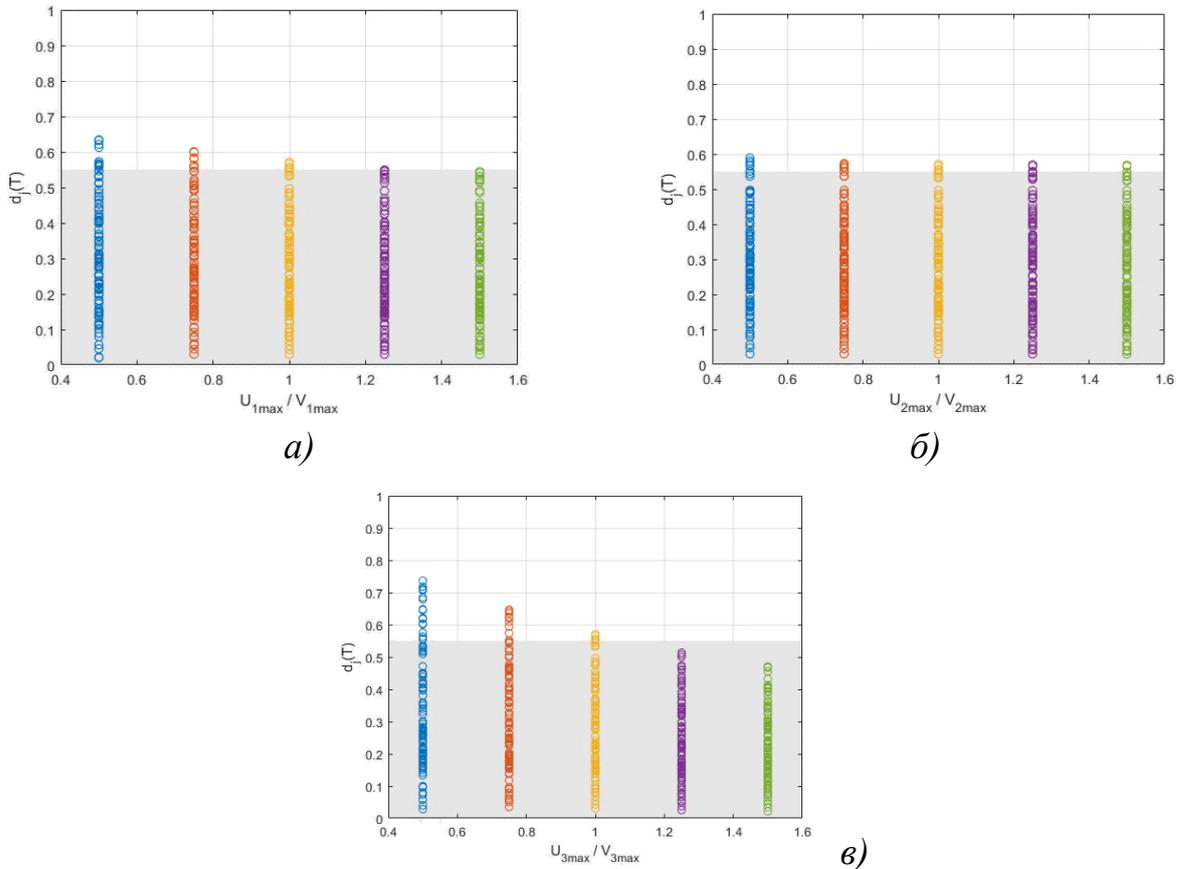


Рис. 2 - Графики влияния приемистости (а), скороподъемности (б) и поворотливости (в) собственного БЛА по сравнению с БЛА противника на достигаемое им позиционное преимущество при выполнении маневра преследования воздушной цели

Анализ зависимостей  $d_j(U_{imax}/V_{imax})$  (рис. 2) позволяет утверждать, что использование описанного алгоритма гарантирующего управления, независимо от относительного начального состояния цели и БЛА-перехватчика, при сопоставимости их маневренных возможностей в 96% случаях обеспечивает приведение атакующего самолета в зону возможных пусков АСП. Заметим, что увеличение на 30% значений тактических показателей, отражающих маневренные возможности самолета-истребителя по сравнению с целью, приводит к тому, что во всех случаях, вне зависимости от начального положения цели относительно атакующего самолета, обеспечивается его приведение в зону возможных пусков УР с тепловой головкой самонаведения (ГСН).

Далее рассмотрен еще один частный случай задачи гарантирующего управления траекторией БЛА - выполнение маневра уклонения от воздушного

противника. Подобная задача возникает тогда, когда собственный разведывательный БЛА, решающий задачи поиска наземных целей, подвергается атаке воздушного противника. Цель управления – обеспечение такого положения атакуемого БЛА относительно противника, при котором снижается эффективность применения противником АСП (стрелкового, пушечного или ракетного вооружения).

Математическая постановка имеет аналогичную структуру приведенной в главе 2 задачи. Учитывая тот факт, что у собственного БЛА отсутствуют АСП, критерий оптимальности принимает следующий вид:

$$J(\tilde{U}, \tilde{V}) = \int_0^T (\tilde{U}^T(t) Q \tilde{U}(t) - \tilde{V}^T(t) W \tilde{V}(t)) dt + (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1)^T G^1 (\tilde{C}(T) - \tilde{C}^1) \quad (25)$$

Оптимальные управления конфликтующих ЛА рассчитываются на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \left( (\tilde{B} Q^{-1} \tilde{B}^m + \tilde{D} W^{-1} \tilde{D}^m) P - \tilde{A} \right)^m q, \quad q(T) = G C \\ \dot{P} &= -P \tilde{A} - \tilde{A}^m P + P (\tilde{B} Q^{-1} \tilde{B}^m + \tilde{D} W^{-1} \tilde{D}^m) P, \quad P(T) = G; \end{aligned} \quad (26)$$

Для исследования влияния тактически значимых показателей маневренности на достижения позиционного преимущества в условиях ближнего воздушного боя проведено 3 серии имитационных экспериментов. Каждая серия включала в себя моделирование 100 траекторий движения противников, соответствующих различным случайно выбираемым начальным состояниям для выбранных значений отношения  $U_{\max}/V_{\max} = k, k = 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5$ . В результате получены реализации  $d_j = (\tilde{C}^j(T^*) - \tilde{C}^*)^m G (\tilde{C}^j(T^*) - \tilde{C}^*)$ , количественно выражающие степень близости БЛА-перехватчика до «идеальной» для него точки  $\tilde{C}^*$  в момент завершения процесса маневрирования. Серым цветом выделена область тактического преимущества самолета противника.

Анализ зависимостей (рис. 3) позволяет утверждать, что использование алгоритма гарантирующего управления, независимо от относительного начального состояния атакуемого БЛА и БЛА-перехватчика при сопоставимости их маневренных возможностей, обеспечивает позиционное преимущество атакуемого БЛА. При этом в наибольшей степени на позиционное преимущество, приобретаемое атакуемым БЛА, оказывает такой тактический показатель, как поворотливость, т.е. способность атакуемого БЛА выполнять горизонтальные маневры.

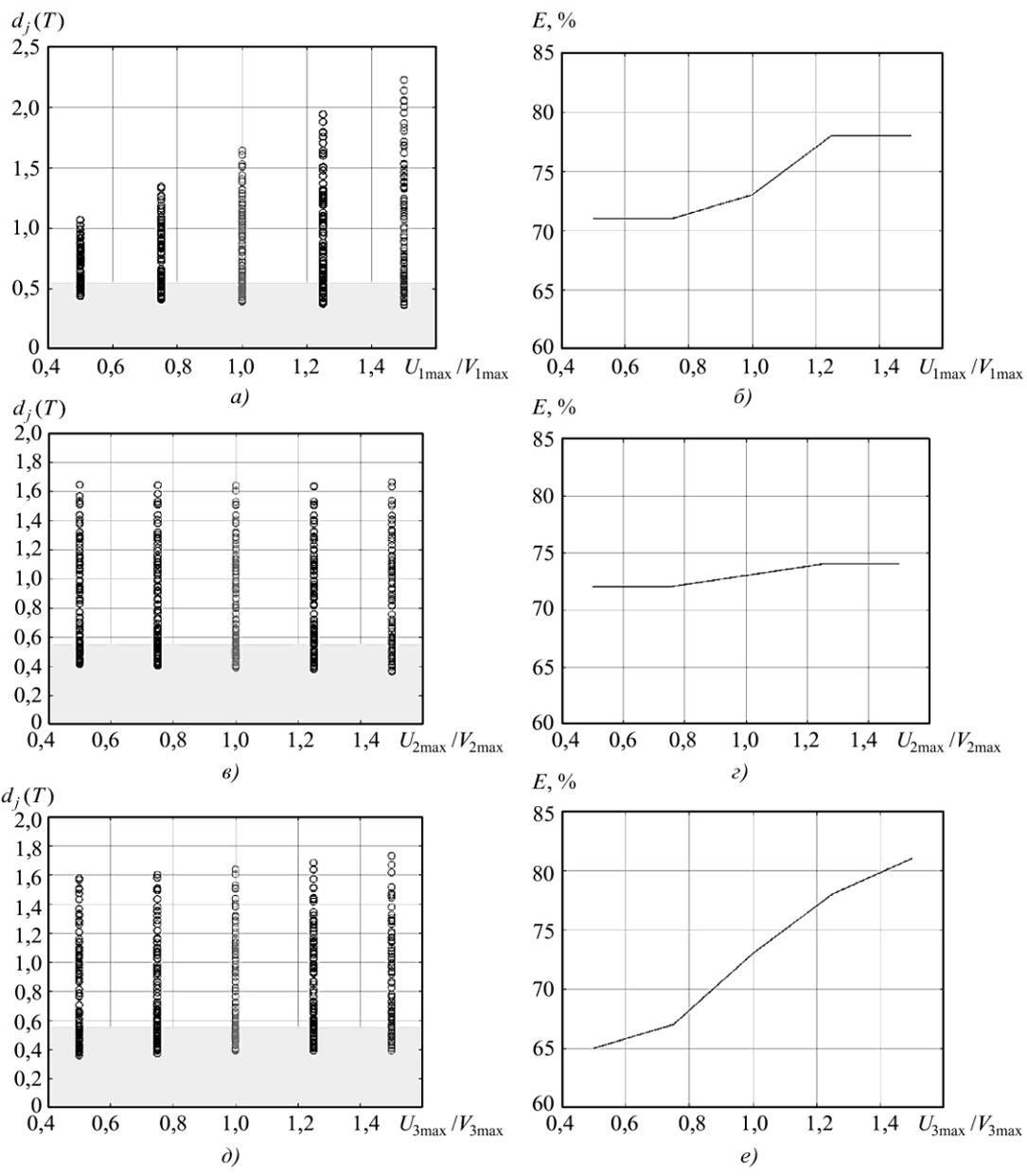


Рис. 3 - Графики влияния приемистости (а, б), скороподъемности (в, з) и поворотливости (д, е) собственного БЛА по сравнению с самолетом противника на достигаемое им позиционное преимущество при выполнении маневра уклонения от воздушной цели

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача разработки гарантирующего алгоритма управления траекторией БЛА-перехватчика в операции перехвата воздушной цели.

Основные научно-методические и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Рассмотрены современные тенденции развития беспилотных ЛА и возможность их использования в качестве перехватчиков воздушных целей. Проведен анализ существующих подходов к разработке алгоритмов управления траекторией БЛА - перехватчика, а также современного состояния исследований в области перехвата воздушных целей.

2. Сформулированы техническая и математическая постановки задачи синтеза гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика, основанное на представлении процесса маневрирования игроков, участвующих в воздушной дуэли, в 6-мерном пространстве относительных координат. Предложена структура критерия оптимальности управления. Показано, что в рамках подобного представления задача поиска управления траекторией движения БЛА может быть интерпретирована как задача синтеза гарантирующего управления для линейной динамической системы

3. Разработан метод определения расчетной продолжительности процесса сближения противников из условия существования седловой точки в игровой задаче.

4. Разработаны следующие алгоритмы:

- алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на основе решения игровой задачи при заданной продолжительности процесса сближения, обеспечивающий тактическое преимущество БЛА-перехватчика в условиях воздушной дуэли.
- алгоритм гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика на основе решения игровой задачи для ситуации, когда продолжительность процесса сближения не задана и определяется на борту БЛА исходя из минимальной и максимальной продолжительности процесса маневрирования игроков
- алгоритм управления траекторией движения БЛА, обеспечивающий реализацию маневра преследования воздушного противника
- алгоритм управления траекторией движения БЛА, обеспечивающий его уклонение от атаки воздушного противника.

5. Проведено имитационное моделирование процесса боевого маневрирования конфликтующих ЛА, позволившее оценить эффективность разработанных алгоритмов с учетом разнообразия применяемых авиационных средств поражения, располагаемых на БЛА, и тактически значимых показателей маневренности (приемистость, скороподъемность, поворотливость).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Н.А. Ляпин, В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков.* Гарантирующее управление траекторией беспилотного летательного аппарата при сближении с маневрирующей воздушной целью. Известия РАН. «Теория и системы управления». №5, 2018. с. 42-57.

2. *Н.А. Ляпин, В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков.* Исследование маневров уклонения беспилотного летательного аппарата от атаки воздушного противника на основе игрового подхода. «Вестник компьютерных и информационных технологий» №10, 2019. С.21-31

3. *Н.А. Ляпин.* Оценка влияния авиационных средств поражения на эффективность гарантирующего алгоритма управления беспилотным летательным аппаратом в операции перехвата воздушной цели. «Научно-технический вестник Поволжья». № 9, 2020. С. 11-14

4. *Н.А. Ляпин, В.Н. Евдокименков.* «Минимаксная оптимизация маневров преследования противника в условиях ближнего воздушного боя». Электронный журнал «Труды МАИ». № 106 (июль 2019 г.).

5. *Lyapin Nikita Aleksandrovich; Evdokimenkov Veniamin Nikolayevich.* “Assessment of the Air-launched Weapons Impact on the Effectiveness of the Unmanned Aerial Vehicle Control Guaranteeing Algorithm during the Air Target Interception”. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9243877> (дата обращения: 12.11.2020).

6. *Н.А. Ляпин.* «Разработка гарантирующего алгоритма управления траекторией БЛА-перехватчика». Сборник трудов: 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» -2016. Тезисы. с. 457-458.

7. *Н.А. Ляпин.* «Исследование эффективности гарантирующего алгоритма управления траекторией БЛА-перехватчика». Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017.

8. *Н.А. Ляпин.* «Гарантирующее управление беспилотным летательным аппаратом в операции перехвата воздушной цели». XXII международная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: Тезисы докладов.- М.: Изд-во МАИ, 2017.- 228с.: ил. 2-9 июля 2017 г. Евпатория. с.141-143.

9. *Н.А. Ляпин.* «Разработка динамической имитационной модели системы: БЛА-перехватчик – БЛА-противник». Сборник трудов: 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» -2017. 20-24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. М.: Люксор, 2016. с. 333-335.

10. *Н.А. Ляпин.* «Исследование условий существования седловой точки в задаче гарантирующего управления траекторией БЛА-перехватчика». XLIV Международная молодёжная научная конференция. «Гагаринские чтения – 2018». Сборник тезисов докладов. Том 1: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018, с. 317.

11. *Н.А. Ляпин.* «Гарантирующее управление траекторией беспилотного летательного аппарата при сближении с маневрирующей воздушной целью». 10-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. с. 215.

12. *В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себряков, Н.А. Ляпин.* «Алгоритмы и программно-математическое обеспечение бортовой компоненты распределенной системы интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов». Сборник трудов: XII Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019), Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019, с.141-144.

13. *Н.А. Ляпин.* «Исследование маневров уклонения беспилотного летательного аппарата от атаки воздушного противника на основе игрового подхода». Сборник трудов: 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» -2019. 18-22 ноября 2019 г. Москва. Тезисы. – Типография «Логотип», 2019. с. 167-168, 469