**Чеглаков Дмитрий Иванович. Адаптивное автоматическое управление полетом беспилотного летательного аппарата на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.01 / Чеглаков Дмитрий Иванович;[Место защиты: ФГБОУ ВПО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана], 2017.- 243 с.**

Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи УДК 681.513.6

Чеглаков Дмитрий Иванович

АДАПТИВНОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ

БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ЭТАПЕ СБЛИЖЕНИЯ И

СТЫКОВКИ ПРОЦЕССА ДОЗАПРАВКИ ТОПЛИВОМ В ВОЗДУХЕ

Специальность 05.13.01 -

Системный анализ, управление и обработка информации

(в технических системах)

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -Воронов Евгений Михайлович доктор технических наук, профессор

Москва-2017

2

**Оглавление**

Глава 1. Обзор исследований и постановка задачи автоматического управления

1.1 Обзор исследований по проблеме автоматизации дозаправки в воздухе

1. Подходы к формированию систем автоматического управления
2. Обзор натурных испытаний процесса автоматической дозаправки 20

1.2 Постановка задачи автоматического управления БЛА на этапе стыковки 25

1.2.2 Математическая постановка задачи автоматического управления

Глава 2. Разработка системы автоматического управления БЛА на этапе  
соли^ксния и стыковки с Тсінксиом при Д03с1пг)с1вкс топливом в воздухе т-1

2.2 Структуризация задачи с учетом терминальных требований к стыковке 42

2.2.1 Линеаризация модели ЛА с учетом особенностей задачи стыковки 42

**О О О \ *Т* ТТ4 тт л *л ел***

**О О О \ *Т Z.* о**

1. Специфика структуры алгоритмов управления БЛА на этапе
2. Формирование требований к быстродействию исследуемой системы 65
3. L1-адаптивное управление для скалярного случая как основа синтеза

2.5.1 Построение алгоритмов L1 на основе выходных параметров системы 71

**з**

*2.*6 Применение наблюдателей состояния в алгоритме управления БJIA 77

2.6.1 Преимущество применения наблюдателей состояния для определения

1. L1-адаптивное формирование управления в каналах стабилизации
2. Алгоритм отработки (стабилизации) заданного угла крена 93
3. Алгоритм компенсации рассогласования AY на конечном этапе
4. Алгоритм компенсации рассогласования AZ на конечном этапе
5. Алгоритм отработки АХзад и АХзад с использованием полученного

2.7.7 Синтез алгоритмов стабилизации AZ3{W и AZ3afl ПО

2.8 Выводы по главе 2 113

Глава 3. Разработка вычислительных систем и стендов ПНМ для

3.1 Учет возмущений и структурных особенностей нелинейных 3.3 Полунатурная и натурная проверка контура управления с

**О О 1 *ґ~\*** 1 **л г**

3.5 Выводы по главе 3 133

4 Глава 4. Многофакторный анализ разработанных алгоритмов

4.1 Математическое моделирование процесса стыковки с использованием

1. Проверка отработки и стабилизации заданной угловой скорости 137
2. Проверка отработки и стабилизации заданного углового положения 140
3. Анализ эффективности оценивания параметров АХ, AY, AZ
4. Проверка отработки вертикального, бокового и продольного

4.2 Проверка и эффективность практического применения с

Список литературы 174

Приложение 184

5

**Введение**

**Актуальность работы**

Работа посвящена обеспечению автоматического управления маневренным беспилотным летательным аппаратом (БЛА) в процессе дозаправки топливом в воздухе.

Дозаправка топливом в воздухе уже достаточно длительное время широко применяется для увеличения дальности полета на военных пилотируемых летательных аппаратах (ЛА). Возможность дозаправки ЛА в воздухе увеличивает его эффективность по нескольким важным направлениям: боевой радиус действия, время нахождения в воздухе, сокращение необходимых мест базирования. Поэтому обеспечение возможности дозаправки топливом в воздухе БЛА является необходимым требованием для его эффективного применения [1]. В США и ряде других стран НАТО исследования в области разработки систем, обеспечивающих автоматизацию процесса дозаправки топливом в воздухе, активно проводятся с 2000 г [1-4], что позволило достичь определенных результатов в ходе проведения летных испытаний. В России с 2011 года разрабатываются целый ряд тяжелых перспективных БЛА разведывательного и ударного назначения весом более пяти тонн: «Охотник», «Альтиус-М», но вопросу обеспечения автоматической дозаправки топливом в воздухе уделяется недостаточное внимание. Комплексы бортового оборудования БЛА типа «Охотник» и «Альтиус-М» позволяют выполнять автоматическую дозаправку топливом в воздухе, но нерешенными остаются два вопроса:

* разработки алгоритмов автоматического управления полетом БЛА в условия действия внешних возмущений (активный отказ исполнительных устройств, турбулентность и др.);
* разработки новой или адаптация существующих оптических локационных

6 систем для измерения относительного положения штанги и конуса.

По результатам обзора [1-47] зарубежных и отечественных работ следует

отметить следующие нерешенные задачи, которые сдерживают практическую

реализацию автоматического управления БЛА при дозаправке топливом в

воздухе:

* синтез алгоритма автоматического управления с учетом всех существенных возмущающих воздействий, действующих на заправляемый БЛА на этапе сближения и стыковки;
* формирование методики синтеза алгоритмов автоматического управления на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе, применение которой возможно в процессе выполнения опытно-конструкторских работ;
* обеспечения требуемой вероятности стыковки при наличии возмущающих воздействий (отказ органов управления ЛА, вихревое поле танкера, турбулентность атмосферы).

**Цель и задачи диссертации**

Цель диссертационной работы - разработка методики синтеза алгоритмов автоматического управления маневренным БЛА на этапах сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **основные задачи**:

* Провести анализ свойств многоэтапного процесса дозаправки как объекта управления с учетом особенностей поведения БЛА при дозаправке топливом в воздухе;
* Сформировать достаточный набор источников информации (измерительных систем);
* Разработать нелинейную математическую модель процесса дозаправки БЛА для разработки системы автоматического управления (САУ) и проведения имитационного моделирования;
* Определить и обосновать общую структуру алгоритмов САУ;

7

* Выполнить синтез алгоритмов управления с учетом предъявляемых требований;
* Реализовать разработанный алгоритм в виде программы для вычислительной машины бортового комплекса управления (ВМ БКУ);
* Провести полунатурное моделирование и летные испытания разработанной САУ с использованием летной лаборатории.

**Методы исследования**

В работе используются методы теории управления (частотные методы синтеза, методы адаптивного управления, методы формирования наблюдателей состояния), методы исследования на основе вычислительной среды Matlab/Simulink, методы программирования алгоритмов для БКУ. Для проверки результатов используются методики математического и полунатурного моделирования.

**Научная новизна результатов** К числу новых научных результатов относятся: 1. Разработка математической модели высокой размерности нелинейной

нестационарной задачи управления БЛА в многоэтапном процессе дозаправки. 2.Анализ исходной задачи управления БЛА для обеспечения сближения и

стыковки элементов системы дозаправки и проведение ее декомпозиции на

последовательный набор подзадач для подсистем БЛА на основе требований

малых отклонений для реализации дозаправки. 3.Формирование обобщенной структуры алгоритма автоматического управления

с учетом наиболее эффективного использования динамических свойств БЛА

для обеспечения успешной стыковки; 4.Синтез алгоритмов автоматического управления в задачах стабилизации

движения вокруг ц.м., минимизации отклонений при движении ц.м. БЛА с

использованием L1-адаптивных методик, в том числе:

* обоснованное ограничение размерности описания объекта управления на этапе синтеза L1-алгоритма;
* выбор параметров закона L1-адаптации в многоканальной системе на

8 основе требования близости амплитудно-фазовых частотных

характеристик приведенного контура управления и модели желаемой

динамики;

• обоснование возможности замены ПФ приведенного контура L1-

адаптивного управления ПФ модели желаемой динамики при проведении

последовательного синтеза алгоритмов управления БЛА.

5.Обеспечение баланса между минимизации фазового запаздывания и величиной

случайных ошибок на основе применения адаптивного наблюдателя состояния

при обработке информации от оптической локационной системы.

**Практическая ценность**

1. Разработан и подготовлен (в виде исходного кода) для реализации в БКУ

алгоритм автоматического управления БЛА типа «Охотник», обеспечивающий

высокую вероятность стыковки штанги и конуса при наличии внешних

возмущающих воздействий различного характера.

2.Создана среда имитационного моделирования, включающая математическую

модель этапа сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе,

нелинейные модели заправляемого БЛА, танкера, и разработанную САУ.

3.Исследован процесс отработки рассогласований положения штанги и конуса в

процессе дозаправки и выявлена эффективность разработанных алгоритмов

автоматического управления пространственной стыковкой.

4.Статистическое моделирование продемонстрировало высокую вероятность

стыковки, обеспеченную алгоритмом автоматического управления БЛА, и

позволило выбрать допустимый диапазон характеристик случайных внешних

возмущений, при которых обеспечивается требуемая вероятность стыковки.

5.Исследовано влияние вихревого поля танкера и возмущающего воздействия

типа отказ на эффективность управления БЛА в процессе стыковки.

Продемонстрирована отказобезопасноть разработанного алгоритма

автоматического управление БЛА.

6.На основе подходов и процессов автоматизации управления БЛА в процессе

дозаправки была повышена эффективность алгоритма ручного управления

9 МиГ-29К/КУБ, прошедшего весь цикл полунатурного моделирования и летных

испытаний, и внедренного в серийное производство.

**Достоверность результатов**

Достоверность результатов в части алгоритма автоматического управления подтверждена математическим моделированием с применением нелинейной модели, в которой учтены все существенные особенности аэродинамики, источников информации, динамики движения элементов системы дозаправки.

Достоверность результатов в части алгоритма ручного управления подтверждается результатами математического и полунатурного моделирования, летными испытания самолета МиГ-29К/КУБ и использованием алгоритма в составе программного обеспечения системы электро-дистанционного управления серийных самолетов МиГ-29К/КУБ. Методы, примененные при синтезе внутреннего контура алгоритма автоматического управления аналогичны методам, использованным для алгоритма ручного управления. Поэтому можно считать, что алгоритм автоматического управления прошел частичную проверку в ходе летных испытаний.

**Внедрение результатов**

Результаты диссертации использованы в программном обеспечении комплексной системы управления КСУ-941(941УБ) для улучшения характеристик устойчивости управляемости самолетом в режиме «Дозаправка», что подтверждено актом о внедрении. Режим работы комплексной системы управления КСУ-941(941УБ) «Дозаправка» успешно прошел заводские и государственные испытания и рекомендован для использования в серийных самолетах. Также, основные положения и результаты диссертационной работы были использованы в НИР «Охотник-Б», выполняемой филиалом ПАО «Компания Сухой» «ОКБ Сухого».

**Апробация**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и научно-технических форумах: 1. 15-я Международная конференция Авиация и космонавтика (Москва, 2016).

10 2. 11-я Международная конференция Авиация и космонавтика (Москва, 2012).

3.Всероссийский молодежный научно-технический форум «Молодежь и будущее

авиации и космонавтики» (Москва, 2012). 4. IX всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы

совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем

летательных аппаратов» (Москва, 2012). 5.Всероссийский молодежный научно-технический форум «Молодежь и будущее

авиации и космонавтики» (Москва, 2010). 6. 1-я всероссийская конференции «Инновации в авиастроении» (Казань, 2010). **Публикации**

Основные результаты работы изложены в 6 статьях, из них 4 опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 5 докладах международных и всероссийских конференций.

**Положения, выносимые на защиту** 1. Декомпозиция исходной задачи управления БЛА обеспечения сближения и

стыковки элементов системы дозаправки на последовательный набор подзадач

для подсистем БЛА на основе требований малых отклонений для реализации

дозаправки. 2.Синтез алгоритмов управления БЛА на этапе сближения и стыковки в процессе

дозаправки по разработанной методике, включающей:

* обобщенный синтез алгоритмов автоматического управления в задачах стабилизации движения вокруг центра масс, минимизации отклонений при движении центра масс БЛА с использованием L1-адаптивных методик;
* обеспечение баланса между минимальным фазовым запаздыванием и влиянием случайных ошибок на основе применения адаптивного наблюдателя состояния, для оценки внешнего возмущающего воздействия.

3.Реализация управления заправляемым БЛА по разработанным алгоритмам с обеспечением заданной вероятности успешной стыковки при наличии внешних

11 возмущений.

4.Повышение эффективности алгоритмов ручного управления МиГ-29К/КУБ по

разработанной методике на основе подходов и процессов автоматизации

управления БЛА на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки.

**Основные результаты работы**

1.Ha основе анализа особенностей задачи управления заправляемого БЛА на этапах выравнивания и стыковки, сформирована общая структура алгоритма управления для обеспечения автоматической дозаправки топливом в воздухе.

173 2. На основе обобщенных данных о поведении системы шланг-конус выработаны

требования к качеству переходных процессов в системе автоматического

управления БЛА на этапе стыковки; 3.На основе теории L1-адаптивного управления проведен синтез алгоритмов

автоматической стабилизации заданных значений угловых скоростей и

продольной скорости движения БЛА. 4.Применение методов L1-адаптивного управления позволило:

* получить гарантированный результат в части устойчивости и качества переходных процессов в системе автоматического управления БЛА на этапе стыковки;
* учитывать нелинейные динамические свойства рулевого привода и аэродинамическое взаимовлияние заправляемого БЛА и танкера в качестве возмущающего воздействия, в достаточной мере компенсируемого свойствами L1-контура управления;
* В ходе синтеза алгоритмов управления, включающих L1-контур, заменить приведенную передаточную функцию L1-контура, передаточной функцией модели желаемой динамики, что значительно упростило процедуру синтеза;

5.Для обеспечения эффективного маневрирования заправляемого БЛА на этапе выравнивания в алгоритме автоматического управления применен адаптивный наблюдатель состояния, обеспечивающий баланс между минимизацией фазового запаздывания и влиянием случайных ошибок измерения.