

УДК 681.513.6

На правах рукописи

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

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

Научный руководитель:	Воронов Евгений Михайлович профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Официальные оппоненты:	Рыбников Сергей Игоревич профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Бегичев Юрий Иванович доцент, кандидат технических наук, начальник отдела системотехники АО «РАА Спецтехника».
Ведущая организация:	АО «МНПК «Авионика», г. Москва, ул. Образцова, д.7

Защита состоится 25 апреля 2017 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.02
кандидат технических наук, доцент



Муратов И.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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], 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 адаптации существующих оптических локационных систем для измерения относительного положения штанги и конуса.

По результатам обзора [1] 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;
- 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 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 «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 отказобезопасность разработанного алгоритма автоматического управления БЛА.
6. На основе подходов и процессов автоматизации управления БЛА в процессе дозаправки была повышена эффективность алгоритма ручного управления 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 испытаниями 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 двух международных и трех всероссийских конференциях и научно-технических форумах [2, 5-7, 9].

Личный вклад

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

1. автором проведен анализ существующих и перспективных методов измерения относительного положения заправляемого БЛА и танкера, существующих математических моделей процесса дозаправки как объекта управления, предложенных в отечественной и зарубежной литературе современных методов управления полетом БЛА на этапе сближения и стыковки;
2. автором разработаны нелинейная нестационарная математическая модель этапа сближения и стыковки заправляемого БЛА и танкера, функциональная схема и методика синтеза алгоритма автоматического управления БЛА на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе;
3. автором разработан алгоритм автоматического управления на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки БЛА и автором повышена эффективность алгоритма ручного управления МиГ-29К/КУБ;
4. автором разработана среда автоматизированного моделирования этапа сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе;
5. автором провел многофакторный анализ динамики движения заправляемого БЛА на этапе сближения и стыковки с учетом возмущающих воздействий различного характера, принял участие в проведении полунатурного моделирования и летных испытаниях режима ручного управления в процессе дозаправки топливом в воздухе КСУ-941(941УБ) самолета МиГ-29К/КУБ;

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 11 научных работ, из них 4 статьи – в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ (общий объем 4.125 п.л.)

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы, приложения. Общий объем 240 (включая 47 страниц приложения) страница, в том числе 94 рисунка, 9 таблица.

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 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и важность темы диссертационной работы, для чего проведен анализ преимуществ применения автоматической дозаправки в воздухе БЛА, определен круг нерешенных вопросов в данной области. Определена цель и сформулированы основные задачи диссертационной работы. Указаны методы проведения исследований. Представлены полученные в ходе выполнения работы основные научные и практические результаты, показана их значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Указывается количество публикаций, структура и объем диссертационной работы.

В первой главе проведен подробный обзор проведенных к настоящему моменту исследований в области дозаправки. Рассмотрены существующие подходы к формированию систем автоматического управления процессом дозаправки топливом в воздухе и достигнутые в данной области практические результаты. Обозначен круг нерешенных до настоящего момента проблем, препятствующих созданию отечественной системы автоматического управления БЛА в процессе дозаправки топливом в воздухе. Далее следует физическое описание и анализ особенностей процесса дозаправки топливом в воздухе, а также математическая постановка задачи автоматического управления БЛА на этапе стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе.

Процедура дозаправки топливом в воздухе может быть разделена на три этапа:

- этап сближения БЛА с танкером и стыковки;
- этап заправки и поддержания относительного положения БЛА и танкера;
- этап расстыковки и отхода.

В данной работе рассматривается этап сближения и стыковки (Рис. 1), на котором решается задача маневрирования с целью стыковки штанги с конусом дозаправки. При этом необходимо обеспечить ошибку не более 0.4 м в плоскости перпендикулярной оси конуса и рассогласование скорости штанги и конуса в пределах 1,2 ... 2,5 м/с. В качестве заправляемого БЛА и танкера рассматривается БЛА перспективной аэродинамической компоновки типа «Охотник» или «Скат». Тип системы дозаправки соответствует принятому в военно-воздушных силах России методу дозаправки штанга-конус. Геометрия расположения элементов системы дозаправки на танкере и заправляемом БЛА (Рис. 1) выбрана с учетом конструктивных особенностей рассматриваемого типа заправляемого БЛА и танкера, а также предложенных в ряде зарубежных работ подходов. Для минимизации вероятности столкновения заправляемого БЛА и танкера, на параметры движения БЛА (максимальные значения углов крен, тангажа, атаки, скольжения, вертикальной и боковой составляющей скорости) в процессе дозаправки топливом в воздухе накладываются дополнительные ограничения.

Полная математическая постановка задачи, включающая набор уравнений движения заправляемого БЛА и танкера (1), кинематические связи процесса сближения (2), текущие ограничения на параметры движения БЛА (3), терминальные ограничения на параметры взаимного положения штанги и конуса дозаправки – показатели качества (4). Отличительной особенностью задачи сближения и стыковки от задачи наведения является взаимное влияние составляющих вектора пространства состояния БЛА $\mathbf{x}_1(t)$ и танкера $\mathbf{x}_2(t)$.

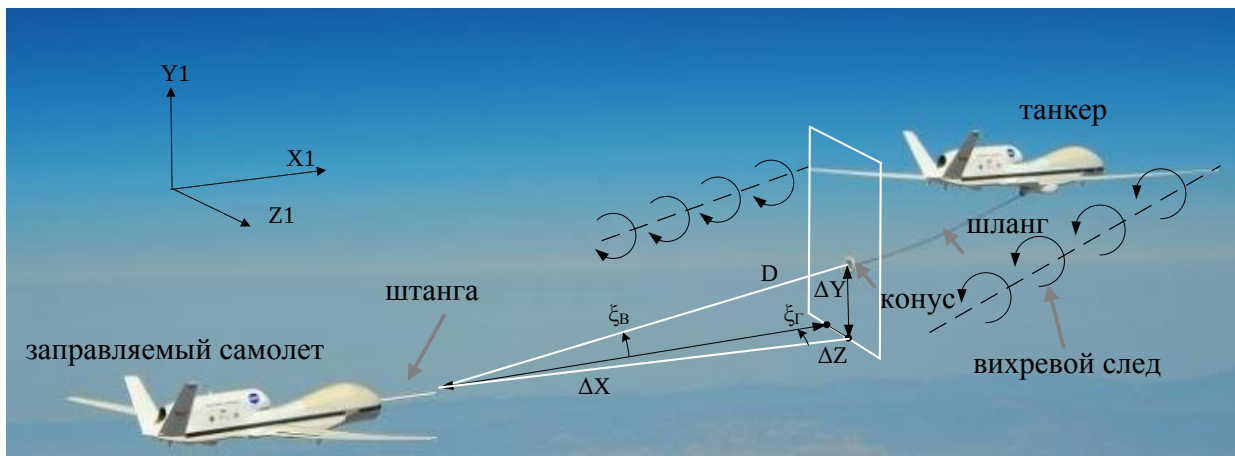


Рис. 1. Расположение танкера и заправляемого БЛА (на примере БЛА "Global Hawk") на этапе сближения и стыковки.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1(t) = \mathbf{f}_1(t, \mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \mathbf{u}_1(t), \mathbf{d}_1(t)) \\ \dot{\mathbf{x}}_2(t) = \mathbf{f}_2(t, \mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \mathbf{u}_2(t), \mathbf{d}_2(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{f}_3(t, \mathbf{x}_1(t), \mathbf{u}_1(t), \mathbf{d}_1(t), \mathbf{x}_2(t), \mathbf{u}_2(t), \mathbf{d}_2(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Delta X = X^{\text{кон}} - X^{\text{шт}}; \\ \Delta Y = Y^{\text{кон}} - Y^{\text{шт}}; \\ \Delta Z = Z^{\text{кон}} - Z^{\text{шт}}; \\ \Delta V_x = V_x^{\text{кон}} - V_x^{\text{шт}}; \\ \Delta V_y = V_y^{\text{кон}} - V_y^{\text{шт}}; \\ \Delta V_z = V_z^{\text{кон}} - V_z^{\text{шт}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} |\gamma| \leq 10^\circ, \\ |\beta| \leq 3^\circ, \\ |\Delta\vartheta| \leq 5^\circ \\ |\Delta\psi| \leq 5^\circ \\ |\Delta\alpha| \leq 5^\circ \\ |V_y| \leq 10 \text{ м/с} \\ |\Delta V| \leq 25 \text{ м/с} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta X_g = 0; \\ \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta Z^2} \leq 0.4; \\ 1.2 \leq \Delta V_x \leq 2.5; \\ |\Delta V_y| \leq 1; \\ |\Delta V_z| \leq 1; \end{cases} \quad (4)$$

В формулах 1-4 имеются следующие обозначения: $\mathbf{x}_1(\mathbf{t}), \mathbf{u}_1(\mathbf{t}), \mathbf{d}_1(\mathbf{t})$ - вектора состояния, управления, возмущения заправляемого БЛА, $\mathbf{x}_2(\mathbf{t}), \mathbf{u}_2(\mathbf{t}), \mathbf{d}_2(\mathbf{t})$ - вектора состояния, управления, возмущения танкера, $\mathbf{y}(\mathbf{t})$ - выходной вектор объекта управления, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - рассогласование текущего положения штанги и конуса в нормальной подвижной системе координат (НПСК) [м], $X^{\text{кон}}, Y^{\text{кон}}, Z^{\text{кон}}$ - координаты конуса в НПСК [м], $X^{\text{шт}}, Y^{\text{шт}}, Z^{\text{шт}}$ - координаты конца штанги в НПСК [м], $V_x^{\text{кон}}, V_y^{\text{кон}}, V_z^{\text{кон}}$ - скорость перемещения конуса в НПСК [м/с], $V_x^{\text{шт}}, V_y^{\text{шт}}, V_z^{\text{шт}}$ - скорость перемещения штанги в НПСК [м/с], $\Delta V_{xg}, \Delta V_{yg}, \Delta V_{zg}$ - скорость изменения рассогласования текущего положения штанги и конуса в НПСК [м/с], $\gamma, \beta, \vartheta, \psi, \alpha, V_y, V$ - углы крена, скольжения, тангажа, рысканья, атаки, вертикальная и линейная скорость заправляемого БЛА.

Учитывая специфику аэродинамической компоновки заправляемого БЛА, определяется набор управляющих сил и моментов, их связь с управляющими параметрами.

Задачей исследования является выбор структуры алгоритмов управления и векторов управляющих параметров таких, что обеспечивается управление БЛА на этапе сближения и стыковки с танкером при текущих (3) и терминальных (4) в момент стыковки ограничения вектора состояния.

Во второй главе выполняется системный анализ процесса дозаправки, формируется методика синтез алгоритмов автоматического управления и обработки информации (Рис. 2).

Прежде всего, производится переход к линейной модели объекта управления (заправляемого БЛА) с учетом текущих ограничений (3), что в свою очередь позволяет использовать все преимущества синтеза алгоритмов управления в классе линейных систем. Линейная модель заправляемого БЛА дополняется с учетом аэродинамического взаимовлияния с танкером дозаправки (6), (7): $dF_X^{\Delta X}$ - коэффициент обратной связи, отражающий увеличение лобового в зависимости от расстояния между БЛА и танкером, $M_x^{\delta 3} \cdot \Delta Z$ - возмущающий момент по крену в зависимости от бокового рассогласования между положением

БЛА и танкера.



Рис. 2 Последовательность решения задач анализа, управления и обработки информации

Далее, с учетом специфики задачи дозаправки, выделяются три этапа процесса подхода и стыковки заправляемого БЛА и танкера: выравнивание с танкером, выравниванием со средним положением конуса, стыковка штанги и конуса. На основе уравнений кинематических связей (8) обосновывается необходимость использования различных методов компенсации рассогласования $\Delta Y, \Delta Z, \Delta X$ на этапах выравнивания с танкером и средним положением конуса (при управлении центром масс) и на этапе стыковки (при управлении движением вокруг центра масс).

$$\begin{cases} \dot{\omega}_x = M_x^{\omega_x} \cdot \omega_x + M_x^{\delta_{\Theta}} \cdot \delta_{\Theta} + 0.25 \cdot M_x^{\delta_3} \cdot \Delta Z \\ \dot{\gamma} = \omega_x - \omega_y \cdot \vartheta \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{X} = V \\ \dot{V}_X = \frac{1}{m} [P - dF_X^V \cdot V - dF_X^V \cdot \Delta X] \end{cases} \quad (7) \quad \begin{cases} \Delta X = X^T - X^{\text{БЛА}}; \\ \Delta Y = Y^T + Y^K - Y^{\text{БЛА}} - X_C^{\text{шт}} \cdot \vartheta; \\ \Delta Z = Z^K - Z^{\text{БЛА}} - X_C^{\text{шт}} \cdot \psi; \end{cases} \quad (8)$$

В системе (8) исключены постоянные составляющие и имеются следующие обозначения: $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - рассогласования в положении штанги и конуса, $X^{\text{БЛА}}, Y^{\text{БЛА}}, Z^{\text{БЛА}}$ - координаты БЛА в НПСК, X^T, Y^T, Z^T - координаты БЛА в НПСК, Y^K, Z^K - координаты конуса в нормальной системе координат (СК), связанной с центром масс танкера, $X_C^{\text{шт}}$ - продольная координата штанги в СК, связанной с центром масс БЛА.

На основе на трех этапов сближения и стыковки и с учетом системы (8)

формируется набор задач автоматического управления:

- отработка и стабилизация заданного значения угловой скорости крена;
- отработка и стабилизация заданного значения угловой скорости тангажа;- продольная координата штанги;
- отработка и стабилизация заданного значения угловой скорости рысканья;
- отработка и стабилизация заданного значения угла крена;
- отработка и стабилизация заданного значения скорости изменения вертикального рассогласования;
- отработка и стабилизация заданного значения скорости изменения бокового рассогласования;
- отработка и стабилизация заданного значения скорости изменения продольного рассогласования;
- минимизация вертикального рассогласования с помощью изменения угла тангажа в момент стыковки;
- минимизация бокового рассогласования с помощью изменения угла рысканья в момент стыковки;
- минимизация вертикального рассогласования в процессе выравнивания;
- минимизация бокового рассогласования в процессе выравнивания;
- минимизация продольного рассогласования в процессе выравнивания.

На основе набора задач автоматического управления формируется алгоритм автоматического управления (Рис.3) на этапе сближения и стыковки.

Для обеспечения эффективного управления движением вокруг центра масс заправляемого БЛА, производится синтез алгоритмов отработки и стабилизации заданных угловых скоростей $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ на основе структуры L1-адаптивного управления (Рис.4). L1-адаптивная система управления относится к классу сигнальных систем прямого действия с идентификатором, но ее существенным отличием от аналогичных систем является наличие фильтра низких частот, ограничивающего частотный диапазон управляющего сигнала. При управлении движением вокруг центра масс $r(t) = \omega_{xзад}, \omega_{yзад}, \omega_{zзад}, y(t) = \omega_x, \omega_y, \omega_z, d(t)$ - аддитивное возмущение, учитывающее особенности динамики рулевого привода, нелинейные свойства объекта управления и внешние возмущения.

Структура адаптивного контура управления (Рис. 4) включает в себя следующие элементы: наблюдатель состояния, включающий желаемую модель динамики, закон адаптации, закон управления. Модель желаемой динамики $M(p)$ выбирается на основе требования быстродействия и качества переходных процессов для обеспечения стыковки штанги и конуса дозаправки. ПФ фильтра $S(p)$ выбирается исходя из требования устойчивости L1-контура управления. Коэффициент Γ выбирается исходя из требований близости амплитудно-фазовых частотных характеристик приведенного L1-контура и модели желаемой динамики (Рис.5).

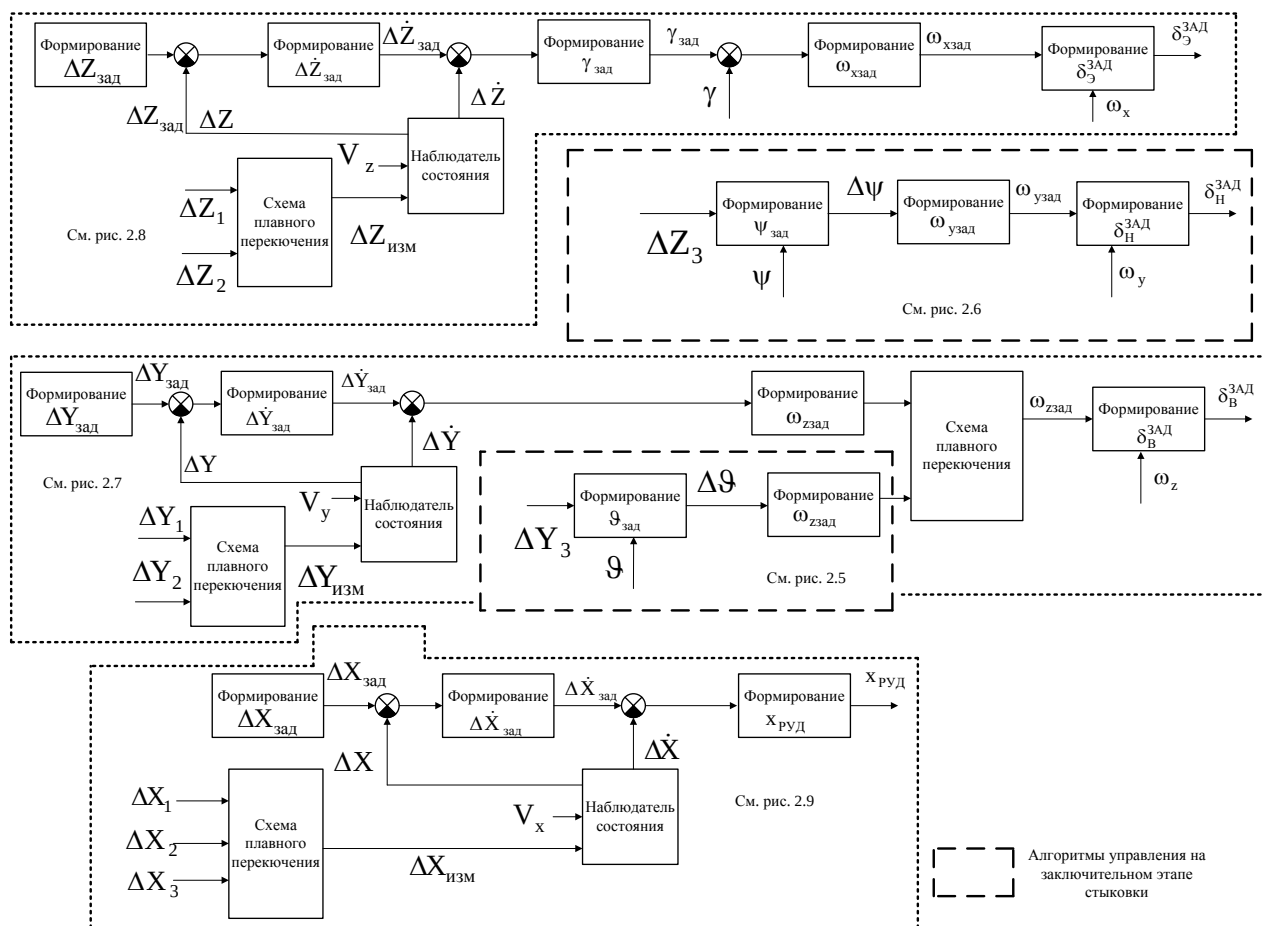


Рис. 3 Структура автоматического управления БЛА на этапе сближения и стыковки с танкером в процессе дозаправки топливом в воздухе



Рис.4. Структура L1-адаптивного контура управления

L1-адаптивный алгоритм управления полностью компенсирует неучтенные в линейной модели неучтенные динамические свойства объекта управления, которые в задаче дозаправки включают: аэродинамическое взаимодействие заправляемого БЛА и танкера дозаправки,

нелинейные особенности динамики исполнительных устройств системы управления. Для сохранения невысокой размерности объекта управления в процессе дальнейшего обобщенного синтеза в данной работе осуществляется обоснованная (Рис. 5) замена приведенной ПФ L1-контура управления, ПФ модели желаемой динамики в ограниченном частотном диапазоне.

Для обеспечения эффективного управления движением центра масс обосновывается необходимость применения адаптивных наблюдателей

состояния, обеспечивающих баланс между минимизацией фазового запаздывания и влиянием случайных ошибок измерения в процессе определения оценок $\Delta\dot{Y}_{\text{оц}}$, $\Delta\dot{Z}_{\text{оц}}$, $\Delta\dot{X}_{\text{оц}}$ скоростей изменения рассогласований (относительных скоростей) $\Delta\dot{Y}$, $\Delta\dot{Z}$, $\Delta\dot{X}$. Определение оценки осуществляется на основе измеренных значения рассогласования $\Delta X_{\text{изм}}$ и скорости движения БЛА V_x .

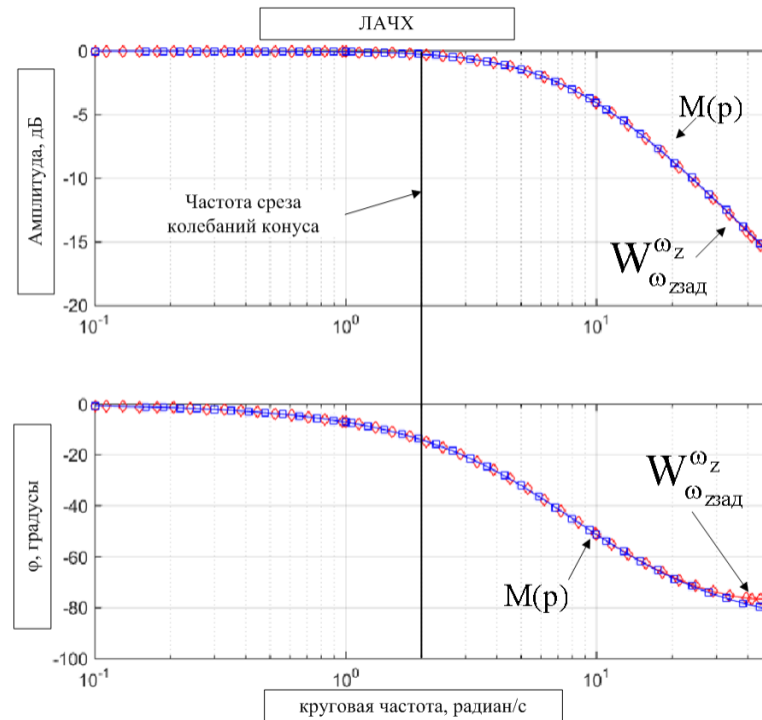


Рис. 5. АЧХ L1 контура угловой скорости ω_z и модели желаемой динамики
Отличительными свойствами предложенного адаптивного наблюдателя являются:

- наблюдатель производит оценку внешнего возмущения $V_x^{\text{кон}}$ (скорости движения конуса), а не переменной пространства состояния БЛА;
- синтез наблюдателя производится с учетом включения в его состав дополнительного фильтра, обеспечивающего требуемое снижение влияния случайных ошибок;
- для обеспечения баланса между минимизацией фазового запаздывания и влиянием случайных ошибок осуществляется изменение коэффициента невязки и постоянной времени фильтра в процессе оценивания.

Применение адаптивных наблюдателей состояния позволяет снизить требования к оптической системе измерения рассогласований в положении штанги и конуса. Как следствие снижается стоимость системы автоматической дозаправки.

В третьей главе представлены программно-аппаратные средства для исследования разрабатываемой системы автоматического управления БЛА в процессе дозаправки, реализации результатов в БКУ (в том числе статистического) моделирования и оценки эффективности алгоритмов автоматического управления БЛА на этапе стыковки. Общая структура

программного комплекса имитационного моделирования процесса дозаправки топливом в воздухе включает:

- подпрограмму управления процессом моделирования;
- подпрограмму записи параметров моделирования;
- подпрограмму обработки результатов моделирования;
- модель БЛА, которая включает аэродинамические характеристики, уравнения пространственного движения с учетом турбулентности воздушных масс, алгоритмы системы автоматического управления, характеристики датчиков пространственного положения, рулевых приводов, оптической локационной системы, силовой установки (реактивного двигателя);
- модель танкера дозаправки, которая включает аэродинамические характеристики, уравнения пространственного движения с учетом турбулентности воздушных масс, алгоритмы системы автоматического управления, характеристики датчиков пространственного положения, рулевых приводов, силовой установки (реактивного двигателя);

Практическое применение разработанных алгоритмов автоматического управления в процессе дозаправки БЛА в воздухе заключается в доработке L1-алгоритма с целью снижения требований к вычислительным ресурсам ВМ БКУ и последующей реализацией алгоритма автоматического управления заправляемого БЛА на этапе сближения и стыковки на языке Си для загрузки в ВМ БКУ.

Для обеспечения проверки эффективности подходов автоматического управления БЛА в ходе полунатурного моделирования и летных испытаний выполнены следующие работы:

- алгоритм ручного управления МиГ-29К/КУБ в режиме «Дозаправка» улучшен с применением ряда результатов по автоматизации управления БЛА;
- доработана математическая модель МиГ-29К/КУБ с учетом особенностей процесса дозаправки топливом в воздухе;
- доработано программное обеспечение стенда полунатурного моделирования (ПНМ) МиГ-29К/КУБ: системы записи и визуализации параметров, системы имитации отказов, устройства сопряжения оборудования.

В четвертой главе проведен многофакторный анализ полученной системы автоматического управления сближения и стыковки, включающий:

- исследование контура стабилизации заданной угловой скорости;
- исследование контура стабилизации заданных углов крена, тангажа и рысканья;
- исследование функционирования наблюдателей состояния;
- исследования процесса стыковки как процесса минимизации вертикального, бокового и продольного рассогласования;
- статистическое моделирование процесса стыковки при различных амплитудах колебаний конуса и нескольких уровнях интенсивности турбулентности;
- исследование влияния вихревого поля танкера на процесс сближения и стыковки;
- исследование поведения системы управления при возмущающих воздействиях

типа отказ исполнительных устройств системы управления.

В процессе многофакторного анализа выявлена работоспособность алгоритмов на основе L1-адаптивного управления при отработке и стабилизации заданной угловых скоростей ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) и заданного углового положения в каналах крена, тангажа и рысканья. Например, для каналов крена (Рис.6) и тангажа (Рис. 7) имеет место близость переходного процесса угловой скорости (текущая ω) и реакции модели желаемой динамики $M(p)$ при различных типах заданного сигнала.

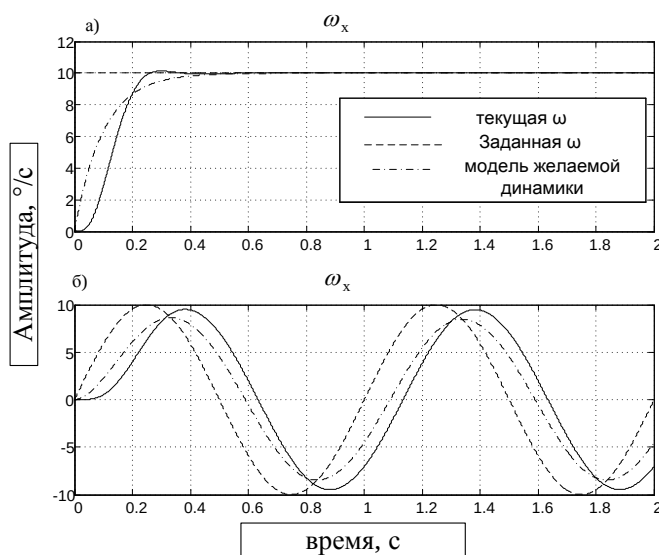


Рис. 6. Угловая скорость крена при ступенчатом (а) и синусоидальном (б) входном сигнале

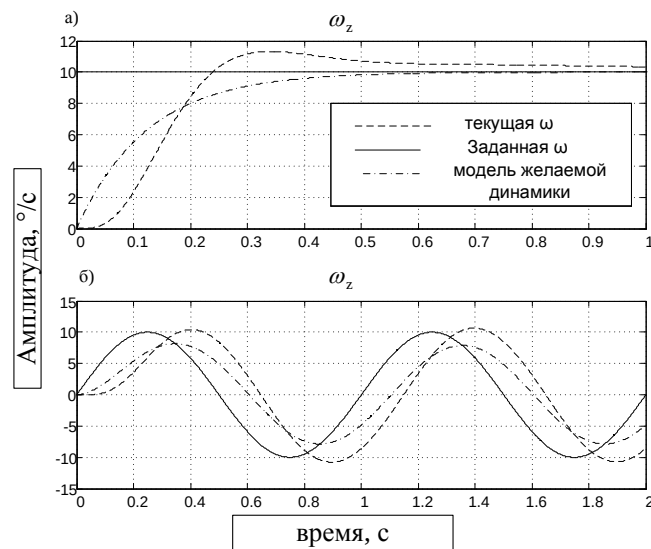


Рис. 7. Угловая скорость тангажа при ступенчатом (а) и синусоидальном (б) входном сигнале

Исследован процесс отработки рассогласований положения штанги и конуса в процессе дозаправки и выявлена эффективность разработанных алгоритмов автоматического управления пространственной стыковкой, в том числе эффективность режима адаптации в наблюдателе состояния для минимизации запаздывания и влияния случайных возмущений.

Из графиков переходных процессов (Рис. 8) следует, что в момент стыковки обеспечивается выполнение терминальных ограничений (1).

Статистическое моделирование продемонстрировало высокую вероятность стыковки ($P > 0,8$), обеспеченную алгоритмом автоматического управления БЛА, и позволило выбрать допустимый диапазон характеристик случайных внешних возмущений, при которых обеспечивается требуемая вероятность стыковки.

В рамках имитационного моделирования исследовано влияние вихревого поля танкера и возмущающего воздействия типа отказ на эффективность управления БЛА в процессе стыковки.

При маневрировании заправляемого БЛА вблизи танкера дозаправки отказ одного из исполнительных устройств системы управления, сопровождаемый кратковременным отклонением органа управления, может привести к катастрофическим последствиям. Как видно из Рис. 9 на 80с моделирования

имитируется отказ рулевого привода с отклонением правого элерона. Автоматическое управление БЛА обеспечивает не только компенсацию возмущающего воздействия, но и успешную стыковку (Рис.10).

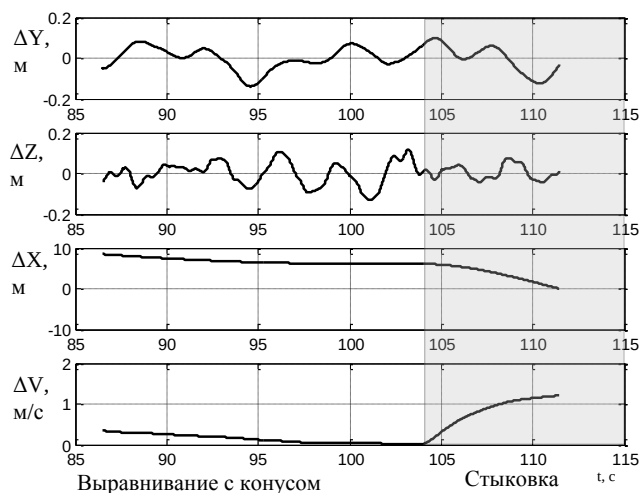


Рис. 8.Изменение ΔX , ΔH , ΔZ на этапах выравнивания со средним положением конуса и стыковки

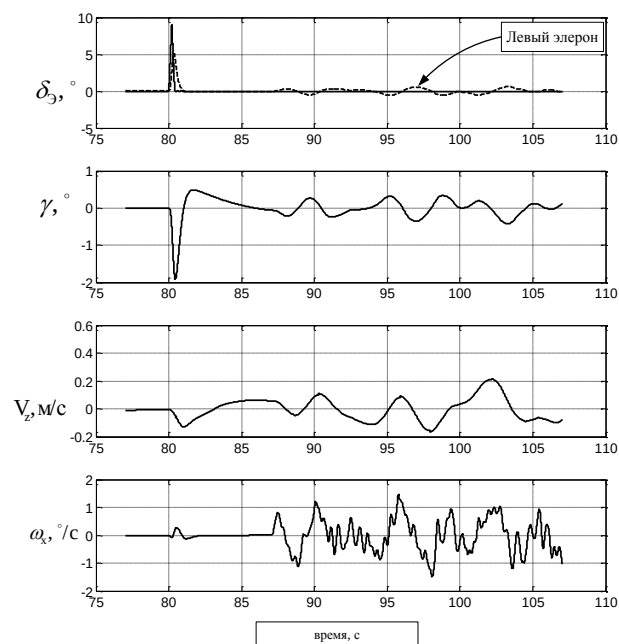


Рис. 9. Реакция на отказ элерона на динамику процесса дозаправки

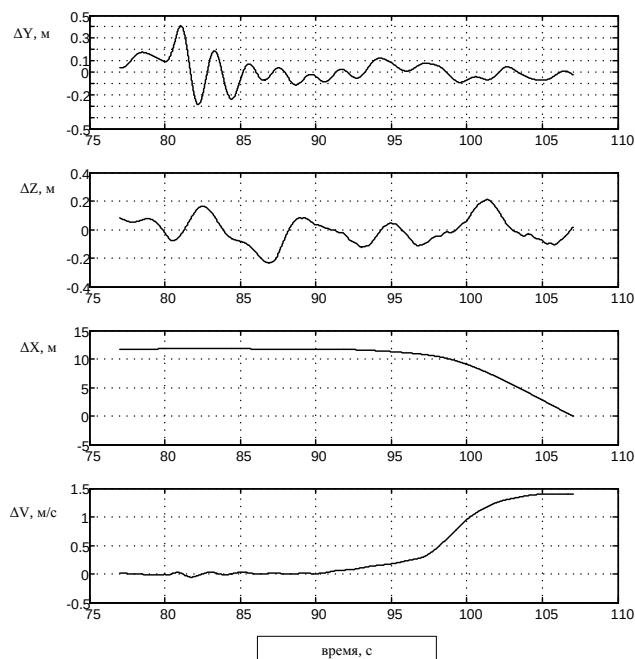


Рис. 10. Процесс стыковки при наличии отказа элерона

Более подробно положительные результаты представлены в [2-4].

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

В приложении представлены дополнительные материалы, не вошедшие в основной текст работы и включающие: исходные данные в части описания

аэродинамического влияния танкера на заправляемый БЛА, исходные коды программ алгоритма автоматического управления БЛА, математической модели процесса дозаправки, записи и анализа данных для стенда ПНМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа особенностей задачи управления заправляемого БЛА на этапах выравнивания и стыковки, сформирована общая структура алгоритма управления для обеспечения автоматической дозаправки топливом в воздухе.
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 сформирована методика синтеза синтез алгоритмов автоматической стабилизации заданных значений угловых скоростей и продольной скорости движения БЛА, которая позволила:
 - получить гарантированный результат в обеспечении 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.
4. 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.
5. Разработан и подготовлен для реализации в БКУ алгоритм автоматического управления БЛА «Охотник» в процессе дозаправки топливом в воздухе.
6. Многофакторный анализ подтвердил, что разработанный алгоритм обеспечивает высокую вероятность стыковки элементов системы дозаправки при наличии внешних возмущений различного характера.
7. На основе подходов и процессов автоматизации управления БЛА в процессе дозаправки был модифицирован алгоритм ручного управления МиГ-29К/КУБ, прошедший весь цикл полунатурного наземного моделирования и летных испытаний, и внедренный в серийное производство.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Доработка алгоритма автоматического управления заправляемым БЛА для обеспечения этапов перекачки топлива и отстыковки от танкера дозаправки;
2. Разработка алгоритма построения оптимальных траекторий движения беспилотного танкера дозаправки топливом в воздухе.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чеглаков Д.И. История исследований в области автоматизации процесса дозаправки топливом в воздухе летательных аппаратов //Альманах Новый Университет (технические науки). 2011. №4.С. 34-47. (1п.л./1 п.л.)
2. Орлов С.В., Чеглаков Д.И. Алгоритм комплексной системы управления самолета МиГ-29К/КУБ в режиме дозаправка топливом в воздухе // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: Тез. докл. Всерос. конф. Москва 2010. С. 62. (0,25п.л./0,125 п.л.)
3. Орлов С.В., Чеглаков Д.И. Алгоритм комплексной системы управления самолета МиГ-29К/КУБ в режиме дозаправка топливом в полете // Труды МАИ: электрон. журн. 2011. № 45.URL:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25528> (1 п.л./0,5 п.л.)
4. Чеглаков Д.И. Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе // Альманах Новый Университет (технические науки). 2011. №2.С. 34-39. (0,5/0,5 п.л.)
5. Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Чеглаков Д.И. Применение наблюдающих устройств в алгоритме автоматического управления самолета при дозаправке топливом в воздухе // Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов: Тез. докл. Всерос. конф. Москва 2012.С. 82-86. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
6. Чеглаков Д.И. Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: Тез. докл. Всерос. конф. Москва 2012. С.47. (0,125п.л.)
7. Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Чеглаков Д.И. Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе // Авиация и космонавтика 2012: Тез. докл. Междунар. конф. Москва 2012. С. 330-331. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
8. Чеглаков Д.И. Управление маневренным самолетом при дозаправке топливом в воздухе // Наука и образование: электрон. журн. 2013.URL:
<http://technomag.bmstu.ru/doc/500331.html>
9. Оболенский Ю.Г., Похваленский В.Л., Чеглаков Д.И. Алгоритм автоматического управления летательным аппаратом при дозаправке топливом в воздухе// Труды МАИ: электрон. журн. 2013. № 65. URL:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35966>.
doi:10.7463/0113.0500331 (1 п.л./0,5 п.л.)
10. Воронов Е.М., Чеглаков Д.И. Адаптивное управление БЛА в процессе дозаправки топливом в воздухе // Авиация и космонавтика 2016: Тез. докл. Междунар. конф. Москва 2016. С. 431-433. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
11. Воронов Е.М., Оболенский Ю.Г., Чеглаков Д.И. Адаптивное автоматическое управление БЛА на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2016. № 2. С. 1-23. (1,25 п.л./0,5 п.л.).