

## **Отзыв**

официального оппонента на диссертацию Бумая Андрея Юрьевича на тему «Формирование оптимальной траектории и синтез алгоритмов управления беспилотным летательным аппаратом при облете запретной зоны», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (промышленность).

**1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите.** Содержание диссертации соответствует отрасли «Технические науки». Область исследований соответствует:

п. Ш. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»,

п. Ш. 3 «Критерии, модели описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»,

п. Ш. 4 «Методы и алгоритмы решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»,

п. Ш. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем»

паспорта специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации, утвержденного приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 23.12.2022 № 462.

**2. Актуальность темы диссертации.** Подавляющее большинство современных беспилотных летательных аппаратов (БЛА), широко применяемых в различных областях народного хозяйства, имеют режимы непосредственного дистанционного управления оператором и автопилотирования по заданной программе. Перспективные образцы БЛА в своей информационно-вычислительной системе должны обладать опциями (возможностями) формирования на борту БЛА прогнозируемой траектории полета on-line с последующим внесением корректив в настройки автопилота. Аппарат проектирования подобных систем не развит и представлен отдельными разрозненными теоретическими выкладками. Поэтому, тема диссертации является актуальной, и направлена на создание новых методов анализа и синтеза адаптивных систем управления, алгоритмов планирования траекторий полёта БЛА с учетом наличия запретных зон, других ограничений и оптимизации полетных ресурсов (времени, расстояния, энергии и др.) Применение таких методов и алгоритмов на этапе предварительного проектирования систем управления БЛА позволит повысить эффективность разрабатываемых БЛА, а также сократить время и другие ресурсы на их разработку.

**3. Степень новизны результатов и научных положений, которые выносятся на защиту.** Соискателем ученой степени вынесены на защиту следующие положения:

1) Методика определения оптимальных значений параметров траектории пролета БЛА через заданные точки пространства при облете запретных зон.

2) Методика поэтапного аналитического синтеза закона управления БЛА на основе методов модального управления, включающая аналитический синтез математической модели автопилота БЛА на этапе эскизного проектирования.

3) Метод комплексирования данных от сенсоров системы управления БЛА на основе использования их математических моделей (фильтров Калмана) и нового критерия оптимизации, названного «максимум апостериорного правдоподобия», позволяющего получить более точную оценку навигационных параметров, используемых для управления БЛА.

4. Методика оценки выполнения заданных ограничений на траекторию полета БЛА в виде вероятности попадания БЛА в запрещенную для полетов область пространства и нахождения в ней в течение определенного времени, не превышающего допустимого значения.

Все научные результаты, выносимые на защиту, имеют научную новизну и обладают качественными и/или количественными преимуществами по сравнению с известными аналогами (прототипами).

**4. Обоснованность и достоверность основных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Основные результаты, выводы и рекомендации, полученные и сформулированные соискателем в диссертации, научно обоснованы и аргументированы. Теоретические положения, а также практические результаты диссертационного исследования основываются на фундаментальных и прикладных трудах отечественных и зарубежных ученых в области математического моделирования и робототехники, что подтверждается ссылками по тексту диссертационной работы. Предложенные соискателем методы и алгоритмы анализа и синтеза системы управления БЛА сводятся к известным общепризнанным положениям теории автоматического управления, статистической динамики систем и обработки информации. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты исследованы с применением компьютерных моделей.

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы опубликованы в научной печати апробированы на республиканских и международных научных конференциях. Положения, выносимые на защиту, прошли практическую апробацию. Получен акт внедрения результатов научных исследований, приведенных в диссертационной работе в заключительном отчете ОКР «Шторм» по заданию 8 ГНТП «Роботизированные комплексы и авиакосмические технологии», 2016–2020 годы и ГНТП «Роботизированные комплексы и системы», 2021–2025 годы, на Республиканском унитарном предприятии «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси.

Все это дает основание признать достаточную степень достоверности результатов проведенного соискателем исследования.



## **5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию.**

*Научная значимость* результатов диссертации заключается в получении новых знаний в области построения систем и моделирования алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами.

Предложенные методики и алгоритмы, в отличие от известных формируют траекторию движения БЛА, с учетом ряда пространственных и (других) информационных ограничений.

*Практическая значимость* результатов состоит в возможности их использования при разработке новых систем управления БЛА и другими робототехническими системами.

Полученные результаты внедрены и используются в Республиканском унитарном предприятии «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси, что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследования.

*Экономическая значимость результатов.*

Применение полученных в диссертационной работе результатов позволяет сократить сроки разработки систем управления БЛА за счет применения новых математических моделей методов и алгоритмов.

*Социальная значимость результатов.*

Полученные результаты внедрены и используются в образовательном процессе Белорусского национального технического университета. Кроме того, они могут использоваться в образовательном процессе других учебных заведений при изучении дисциплин, связанных с направлением робототехники, мехатроники и автоматизации технологических процессов и производств.

**6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.** Все основные результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в научной печати. Всего опубликовано 13 печатных научных работ: 6 статей в рецензируемых журналах перечня ВАК Республики Беларусь (в соавторстве), 2 работы в сборниках материалов научных конференций, а также 5 тезисов докладов. Суммарный объем всех авторских публикаций составляет 3,9 авторских листа.

Следует выделить следующие наиболее значимые публикации соискателя:

1) Бумай, А. Ю. Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А. Ю. Бумай, А. А. Лобатый, Д. Цзюнь // Докл. БГУИР. – 2019. – № 7–8 (172). – С. 50–57.

2) Бумай, А. Ю. Вероятностный анализ попадания беспилотного летательного аппарата в запретную зону / А. Ю. Бумай, А. А. Лобатый, Ю. Ф. Яцына, В. Ю. Степанов // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2019. – № 4. – С. 46–54.

3) Бумай, А. Ю. Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов / А. Ю. Бумай, А. А. Лобатый // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2020. – № 1. – С. 24–32.

4) Бумай, А. Ю. Поэтапный аналитический синтез математической модели автопилота беспилотного летательного аппарата / А. Ю. Бумай, А. А. Лобатый, С. С. Прохорович // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 1. – С. 21–28.

Автореферат корректно и точно отражает содержание диссертационной работы.

### **7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.**

Структура диссертации соответствует логике изложения материала. Текст представлен грамотно, достаточно иллюстрирован и наглядно отражает решаемые задачи. Выводы по каждой из глав и заключение по всей диссертации отражают основные результаты и положения работы. При этом диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК Республики Беларусь, а также соблюдены ограничения на их объемы.

### **8. Замечания по диссертации**

1) Аналитический обзор проведен в повествовательном ключе и не показано место полученных результатов в системе знаний исследуемой предметной области. Обзор в части подраздела 1.1 представляется избыточным. В подразделе 1.3 для наглядности, не представлены сводные сравнительные таблицы достоинств и недостатков анализируемых методов формирования траекторий.

2) Во 2-й главе не представлено сравнение траекторий полета БЛА, сформированных по методике соискателя с известными методами, например, рассмотренными в аналитической части. Нет достаточного объема исследований, демонстрирующих оптимальность траектории при оптимальном управлении. Также не показано, как летно-технические характеристики БЛА влияют на результаты математического моделирования.

3) Названия разделов подразделов 2.1 и 2.2 не в полной мере отражают их содержание.

4) Графики на рис.2.5 стр.64 требуют дополнительного разъяснения.

5) В 3-й главе не приведены сравнительные результаты комплексирования данных от конкретных сенсоров, устанавливаемых на борту БЛА.

6) Приведенные в 4-й главе графики изменения вероятностей носят иллюстративный качественный характер, не давая представления о влиянии на эффективность применения БЛА размеров и формы запретной для полетов зоны.

7) В диссертации не приведена линеаризованная математическая модель движения БЛА, которая необходима для оценки эффективности по предлагаемой методике.



8) По тексту диссертации встречаются не корректные в научном плане, громоздкие обороты и термины, например, «стохастическая постановка задачи, «статистические цели».

**9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.** Содержание диссертационной работы, используемые соискателем методы исследования и интерпретации полученных результатов, опубликованные результаты свидетельствует о том, что научная квалификация соискателя Бумая Андрея Юрьевича соответствует ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (промышленность).

**10. Заключение.** Диссертационная работа соискателя ученой степени Бумая Андрея Юрьевича, подготовленная самостоятельно, под руководством доктора технических наук, профессора Александра Александровича Лобатого, является завершенной, квалификационной научной работой, содержание которой соответствует требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (промышленность). При этом, отмеченные недостатки в основном носят методический характер, не являются существенными и не влияют на значимость результатов исследования.

Полученные соискателем результаты включают:

1) Методики и алгоритмы определения оптимальных значений параметров движения БЛА при автоматическом формировании траектории облета запретных зон, отличающиеся аналитическим решением задачи оптимизации при задании запретной зоны в виде координат точек пространства, через которые должна проходить траектория БЛА, позволяющие учесть динамические характеристики БЛА и обеспечить экономию энергетических затрат на управление.

2) Методику поэтапного аналитического синтеза математической модели автопилота БЛА в виде закона управления, который при определенных ранее параметрах требуемой траектории полета, обеспечивает выполнение необходимых требований к устойчивости и динамической точности управления БЛА.

3) Методику комплексирования данных, получаемых с бортовых сенсоров (датчиков) БЛА, в условиях наличия неопределенностей в информации, на основе алгоритмической фильтрации данной информации и предложенного критерия максимума апостериорного правдоподобия, позволяющую повысить точность оценивания параметров, используемых для управления БЛА.

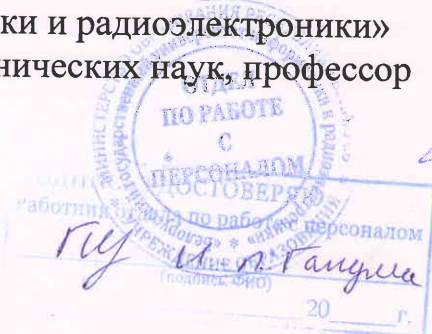
4) Общую методику оценки эффективности применения БЛА, отличающуюся учетом стохастических условий постановки задачи и

возможных случайных факторов, позволяющую при однократном интегрировании системы дифференциальных уравнений для вероятностных моментов оценить вероятность попадания БЛА в запретную зону и невыхода из нее в течении заданного времени, характеризующего инерционность соответствующих контролирующих систем.

Считаю, что соискатель Бумай Андрей Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук за новые, научно обоснованные методики и алгоритмы формирования оптимальной траектории и синтеза системы управления беспилотным летательным аппаратом при облёте запретных зон, использование которых обеспечивает решение важной прикладной задачи упрощения проектирования и повышения эффективности перспективных БЛА, предназначенных для решения народнохозяйственных и специальных задач.

Официальный оппонент

профессор кафедры электронных  
вычислительных машин учреждения  
образования «Белорусский  
государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»  
доктор технических наук, профессор



 М. М. Татур  
«16» октября 2023 г.

Совет по защите  
диссертаций при БГУИР  
«18» октября 2023 г.  
Вх. № 05.02-11/200