

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Козина Филиппа Александровича** «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Актуальность диссертационной работы** обусловлена тем, что в настоящее время при решении задач группового полета космических аппаратов, включая инспекцию, стыковку, и увод мусора с орбиты, все чаще используются наноспутники. Исследование работоспособности алгоритмов управления для подобных аппаратов можно провести на стенде с аэродинамическим столом. При проведении подобных экспериментов актуальной проблемой является необходимость учета в моделях особенностей конструкции стенда, создающего обезвешивающее давление. В частности, для модели движения важно учитывать неравномерность потока воздуха, создающего воздушную подушку, и отклонение вектора нормали к плоскости стола от вектора ускорения свободного падения. Для моделирования работы навигационной системы необходимо учесть точность определения положения макетов на столе, а для системы вентиляторных двигателей необходимо учитывать особенности создаваемого управляющего ускорения в зависимости от подаваемого на них управления. Учет этих особенностей позволяет с достаточной точностью обеспечивать управление движением макетов по заданной траектории на столе, что в свою очередь позволяет проводить исследование характеристик работы алгоритмов управления групповым полетом. Таким образом, диссертационная работа Ф.А. Козина, посвященная созданию программно-алгоритмических средств для проведения экспериментального исследования алгоритмов управления относительным движением наноспутников, является, безусловно, актуальной.

**Научная новизна работы** заключается в предложенных моделях и результатах экспериментов. А именно, улучшенная модель тяги вентиляторных двигателей позволила с более высокой точностью, по сравнению с представленной в литературе моделью, провести лабораторные исследования управляемого движения. Получены новые результаты по исследованию алгоритмов стыковки с макетом космического мусора, которые позволили выявить область их работоспособности.

**Достоверность и обоснованность** научных положений и созданных в диссертации математических моделей подтверждается строгостью использования методов теоретической и небесной механики, математического анализа и математической статистики. Утверждения о точности моделей иллюстрируются сравнением данных расчетов с данными экспериментов. Результаты валидации моделей, разработанных автором, свидетельствуют о достоверности описанных в диссертации результатов. Достоверность также подтверждается результатами исследования работоспособности ряда алгоритмов управления для решения задач осмотра, стыковки и увода космического мусора. Основные результаты работы докладывались на ряде российских и международных конференций. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ (6 публикаций — в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ).

**Теоретическая и практическая значимость** проведенных соискателем работ выражается в развитии методического аппарата экспериментальных исследований: предложенные модели движения макетов на аэродинамическом столе, тяги вентиляторных двигателей и навигационной системы позволяют исследовать работоспособность алгоритмов управления КА в плоскости орбиты в задачах группового полёта.

Практическую значимость работы определяет зарегистрированный комплекс программ, в котором воплощены разработанные алгоритмы. При помощи созданного программного комплекса можно проводить валидацию алгоритмов группового полета для будущих миссий наноспутников. Так, с использованием стенда было проведено исследование управляемого движения КА для разрабатываемой миссии по наблюдению за объектом космического мусора.

**Оценка содержания работы и ее завершенности.** Диссертация содержит 134 страницы текста, включая 83 рисунка и 8 таблиц, и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 79 наименований. Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертационного исследования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, проведен обзор существующих стендов и применяемых в них системах, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы четыре основных полученных результата, которые выносятся на защиту, а также кратко изложено содержание работы.

В главе I представлен экспериментальный стенд, изложены используемые подходы к проектированию алгоритмов управления в космосе на алгоритмы управления на стенде. Описаны разработанные модели навигационной системы, движения на столе и вентиляторных двигателей. Настроенные модели позволяют с высокой точностью совершать движение макета по заданной траектории на столе. При калибровке моделей применяются алгоритмы на основе фильтра Калмана и метода Ньютона. Разработанная методика позволяет провести валидацию моделей с помощью сравнения результатов расчетов откалиброванных по экспериментам моделей с результатами валидирующего эксперимента.

В главе II представлено описание созданного программного комплекса для управления стендом. Приведено описание системной архитектуры, позволяющей проводить на одном стенде различные эксперименты, в том числе эксперименты по стыковке с использованием алгоритма на основе метода виртуальных потенциалов и по стыковке с использованием алгоритма на основе решения матричного уравнения Риккати. Описаны подробности реализации вспомогательного эксперимента по оценке возмущений, действующих на макеты, с использованием алгоритма на основе фильтра Калмана и вспомогательного эксперимента по оценке параметров модели вентиляторных двигателей.

В главе III изложена методика интерпретации результатов основных экспериментов по исследованию алгоритмов управления относительным движением макетов, которая позволила провести валидацию представленных в работе алгоритмов. Для алгоритмов на основе метода виртуальных потенциалов и на основе SDRE были исследованы границы применимости и показано, что алгоритмы неработоспособны при заданных параметрах эксперимента при угловой скорости вращения макета космического мусора составляющей 18 градусов в секунду. В ходе проведения экспериментов по валидации моделей стенда были получены оценки параметров тяги вентиляторных двигателей, позволяющих успешно проводить основные эксперименты. Также в главе представлены результаты лабораторного исследования двух алгоритмов по управлению макетом космического аппарата в задаче наблюдения и увода макета космического мусора.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## **Замечания по диссертационной работе**

1. В предложенных моделях рассматриваются только возмущения, зависящие от положения объектов на столе. Возмущения, зависящие от скорости движения, автором не рассматриваются, хотя их учет, как представляется, мог бы повысить эффективность алгоритмов коррекции.

2. В тексте диссертации вектор управляющих ускорений имеет разную размерность. Например в формуле (1.4) его размерность равна двум - учитываются только поступательные ускорения, а в формуле (1.10) размерность равна трем. Из текста диссертации не ясно учитывалось ли автором угловое управляющее ускорение, поскольку в расшифровке формулы (1.10) вектор управляющих ускорений не раскрыт.

3. Насколько можно понять из описания разработанного программного комплекса, автор не использовал для его работы операционные системы реального времени. В тексте диссертации нет комментариев относительно допустимости такого решения. Не ясно также, как осуществлялась привязка экспериментов к реальному времени в процессе протоколирования результатов экспериментов.

4. В работе все рассматриваемые погрешности указаны в тексте диссертации в абсолютных, а не в относительных величинах, что затрудняет оценку точности алгоритмов.

5. К тексту диссертации имеются редакционные замечания, затрудняющие восприятие работы: имеются опечатки, например, у рисунков 3.18 и 3.19 подпись является одинаковой; используются нестандартные термины, в частности использован англоязычный термин «актюатор» вместо эквивалентного отечественного термина «исполнительное устройство».

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Козина Ф.А.

### **Заключение**

Учитывая вышеизложенное, объем выполненного исследования, основные выводы, научно-практическую значимость и новизну результатов, считаю, что диссертация Козина Филиппа Александровича «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе» соответствует пунктам 1, 3, 4 и 5 научной специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу. Диссертация содержит новые научно-обоснованные результаты, внедрение которых окажет существенный вклад в развитие методов наземной



экспериментальной отработки наноспутников. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Представленная работа полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (Постановление Правительства 842 от 24 сентября 2013 г.). Автор диссертационной работы Козин Филипп Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор  
кафедры аэрокосмических систем  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский  
государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет)»,  
профессор

Георгий Александрович Щеглов

04.07.2023

Подпись Г.А. Щеглова заверяю



Почтовый адрес: 105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1.  
Телефон: +7 (499) 263-63-10.  
e-mail: shcheglov\_ga@bmstu.ru.