

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44

E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

ОГРН 1027739051779

ИНН 7701002520 КПП 770101001

25.10.2019 № 01.03-10/990

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Проректору по научной работе  
федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»  
(МАИ)

д.т.н., профессору Ю. А. Равиковичу

Уважаемый Юрий Александрович!

В ответ на Ваш исх. №010/1054 от 25.07.2019 направляем Вам отзыв ведущей организации на диссертацию Трифонова Максима Викторовича на тему «Синтез алгоритмов управления движением первой ступени ракеты-носителя для повышения эффективности пуска», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов».

Приложение: отзыв ведущей организации, 2 экземпляра на 7 листах А4 каждый экземпляр.

Первый проректор -  
проректор по научной работе  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

В.Н. Зимин

Исполнитель: Корянов В.В.  
+79167176253; +74992614590

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 05 11 20 19



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44  
E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)  
ОГРН 1027739051779  
ИНН 7701002520 КПП 770101001

25.10.2019 № 01.03-10/991

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор-проректор по научной  
работе федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский  
государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
д.т.н., с.н.с. Владимир Николаевич Зимин



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Трифонова Максима Викторовича на тему  
«Синтез алгоритмов управления движением первой ступени ракеты-носителя  
для повышения эффективности пуска», представленной на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – «Динамика,  
баллистика, управление движением летательных аппаратов»

### Актуальность темы диссертации

Современное состояние космонавтики и развитие космических исследований требуют повышения эффективности пуска ракеты-носителя (РН) в том числе за счет выполнения следующих мер:

- 1) увеличения эксплуатационного ресурса стартового комплекса и усовершенствование его конструкций;
- 2) возможности выполнения парных и кластерных запусков КА;
- 3) возможности запуска разнообразных КА, различающихся от пуска к пуску по конструктивно-компоновочным схемам и габаритно-массовым характеристикам;

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 2  
05 11 2019 г.

4) повышения массового совершенства РН;

5) повышения безопасности космонавтов и стартовых сооружений в случае наступления нештатных (аварийных) ситуаций на борту РН и некоторых других.

Автор диссертационного исследования Трифонов Максим Викторович предлагает реализацию некоторых из перечисленных мер путем совершенствования системы управления (СУ) движением РН. В диссертационной работе рассматриваются следующие актуальные задачи управления движением первой ступени РН.

1. На начальном участке полета, который соответствует высотам 0-300 метров, газодинамические струи двигателей РН оказывают тепловое воздействие на сооружения стартового комплекса. Для снижения такого воздействия и защиты стартовых сооружений целесообразно выполнить увод струй двигателей РН в заранее подготовленный сектор на стартовой плоскости.

2. В случае аварийного отключения одного из двигателей РН начинают действовать возмущающие сила и момент из-за потери тяги неисправного двигателя, смещающие РН в сторону отказавшего двигателя. Для безопасности стартовых сооружений необходимо осуществить увод РН в зону самоликвидации по заданной программе увода, сформированной с учетом расположения стартовых сооружений. А при наступлении такого отказа в первые секунды полета так же должно обеспечиваться требование безударности РН с кабель-заправочной башней.

3. При движении РН на участке максимальных скоростных напоров, который соответствует высотам 8000-12000 метров, РН испытывает повышенные нормальные перегрузки, а при использовании крупногабаритных головных обтекателей такие перегрузки возрастают. На этапе моделирования для более точного расчета нормальных перегрузок РН необходимо использовать уточненные модели случайных горизонтального ветра и вариаций плотности атмосферы, а для их снижения использовать алгоритмы управления угловым движением РН, учитывающие значения перегрузок при формировании команд управления.

Данная диссертационная работа посвящена формированию регуляторов СУ движением РН для решения вышеперечисленных задач управления движением первой ступени РН.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа содержит введение, пять глав и заключение.

Во введении дается обоснование актуальности работы и излагаются цели и задачи исследования, объект и предмет исследования, методы и научная новизна исследования, практическая значимость и апробация работы, а также достоверность полученных результатов и положения выносимые на защиту.

В Главе 1 дается обзор проблем управления на участке полета первой ступени РН и анализируются возможные методы синтеза алгоритмов управления. Обсуждается возможность решения некоторых задач управления движением РН с использованием теории аналитического конструирования регуляторов А.М. Летова (АКОР). Формулируется новая постановка задачи АКОР, ориентированная на формирование регуляторов СУ движением РН с учетом особенностей исследуемых в работе задач управления, и дается решение такой задачи АКОР. Приводится модель движения РН на участке полета первой ступени РН.

В Главе 2 решается задача увода струй двигателей РН от сооружений стартового комплекса по заданной программе увода. Для формирования регулятора СУ движением РН используется решение задачи АКОР, полученное автором в Главе 1.

В Главе 3 решается задача аварийного увода РН при отказе двигателя по заданной программе увода в зону самоликвидции. Для формирования регулятора СУ движением РН используется решение задачи АКОР, полученное автором в Главе 1.

В Главе 4 решается задача снижения нормальных перегрузок РН на участке максимальных скоростных напоров. Используется пропорционально-дифференциальный регулятор с дополнительной обратной связью по нормальной перегрузке. Обсуждается возможность снижения перегрузок путем перенастройки коэффициентов регулятора при использовании моделей случайных горизонтального ветра и вариаций плотности атмосферы в виде формирующих фильтров.

В Главе 5 представлены результаты имитационного моделирования движения РН. Разработанные алгоритмы в предшествующих главах для решения задач увода ракетных струй, аварийного увода РН и снижения нормальных перегрузок РН исследуются в составе более точной модели возмущенного движения РН. Для имитации случайных горизонтального ветра и вариаций плотности атмосферы использованы модели формирующих фильтров, сформированные в Главе 4.

В заключении сделаны выводы по результатам диссертационного исследования.

### **Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов в диссертации**

1. Разработанные методики и алгоритмы управления исследованы в составе детальной модели движения РН методами имитационного моделирования. Проводится сравнение основных численных результатов диссертационной работы, полученных на упрощенных моделях движения РН, с результатами имитационного моделирования.

2. Автор в диссертационном исследовании использует хорошо формализованный, апробированный математический аппарат. Численные результаты, полученные разными методами анализа, сравниваются между собой.

3. Автор имеет 3 публикации в научных журналах и один патент на изобретение. Результаты диссертационного исследования неоднократно докладывались на всероссийских и международных научных конференциях.

### **Новизна научных положений и выводов в диссертации**

1. Решена задача оптимального управления, как задача АКОР с управляемым выходом. При постановке данной задачи учтены особенности задач управления движением РН на участке полета первой ступени: вектор выходов зависит от вектора управления и в правой части уравнения вектора состояния учитывается детерминированный вектор входов.

2. Разработана методика формирования алгоритма управления уводом струй РН в заданном направлении, как задачи АКОР с управляемым выходом.

3. Разработана методика формирования алгоритма управления аварийным уводом РН при отказе двигателя, как задачи АКОР с управляемым выходом.

4. Разработана методика формирования алгоритма управления угловым движением РН для снижения нормальных перегрузок, испытываемых РН на участке максимальных скоростных напоров с учетом размеров головного обтекателя и случайных атмосферных возмущений.

5. Структура и коэффициенты регуляторов, в том числе принятые в составе разработанной имитационной модели движения РН, для решения задач увода струй ракетных двигателей, аварийного увода РН и снижения нормальных перегрузок РН на участке максимальных скоростных напоров.

### **Практическая значимость диссертации**

1. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проектировании систем управления перспективных РН, а также при модернизации существующих.

2. Получены решения, позволяющие использовать разработанные методики и алгоритмы управления для решения задач увода струй ракетных двигателей, аварийного увода РН и снижения нормальных перегрузок РН. Решение сформулированной задачи АКОР представляет практический интерес для широкого круга специалистов, занимающихся разработкой алгоритмов управления различных типов динамических объектов.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Системный анализ и управление» МАИ.

### **Замечания и вопросы**

1. В тексте автореферата и диссертации неоднократно делается акцент на применение квадратичного критерия качества управления, однако отсутствует пояснение к преимуществам/недостаткам использования такого критерия при решении задач управления движением РН на участке полета первой ступени.

2. В математических моделях движения РН в качестве возмущений не учитываются разбросы геометрических, аэродинамических и массово-инерционных характеристик аппарата.

3. При решении задачи управления аварийным уводом РН основным выходом системы является некоторая характерная точка РН. Как оценивалось выполнение требования безударности РН с кабель-заправочной башней?

4. Математическая модель горизонтального ветра в виде формирующего фильтра второго порядка не учитывает сдвиговую составляющую изменения скорости ветра.

5. В задаче снижения нормальных перегрузок РН проводилось ли сравнение численных результатов параметра нагружения  $Q$ , рассчитываемых методом уравнений моментов с методом имитационного моделирования?

Следует отметить, что указанные замечания и возникшие уточняющие вопросы не снижают общего высокого научного уровня работы, а также теоретической и практической значимости полученных результатов в диссертационном исследовании автора.

### **Заключение**

Диссертационная работа Трифонова Максима Викторовича на тему «Синтез алгоритмов управления движением первой ступени ракеты-носителя для повышения эффективности пуска» выполнена на хорошем техническом уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу на актуальную тему. Основные научные результаты диссертации отражены в рецензируемых изданиях. По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований, теоретической и практической значимости, а также оформлению и содержанию работа соответствует всем требованиям п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Трифонов Максим Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором кафедры СМ-3 «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) Бетановым Владимиром Вадимовичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры СМ-3 «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), протокол № 3 от «09» октября 2019 года.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Почтовый адрес организации:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул, д.5, стр. 1.

Телефон: +7(499)263-6391.

Адрес электронной почты: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru).

Сайт: <http://www.bmstu.ru>

Первый заместитель заведующего кафедрой СМ-3  
«Динамика и управление полетом ракет  
и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
к.т.н., доцент

Корянов Всеволод Владимирович  
25.10.2019

Профессор кафедры СМ-3  
«Динамика и управление полетом ракет  
и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
д.т.н., профессор

Бетанов Владимир Вадимович  
25.10.2019

Почтовый адрес составителя:  
105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10.  
Телефон: +7 (499) 261-45-90.  
Адрес электронной почты: [kafsm3@bmstu.ru](mailto:kafsm3@bmstu.ru).

Подписи к.т.н., доцента Корянова Всеволода Владимировича и д.т.н.,  
профессора Бетанова Владимира Вадимовича заверяю:

Руководитель научно-учебного комплекса «Специальное машиностроение»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
д.т.н., профессор



Калугин Владимир Тимофеевич  
25.10.2019