

## ОТЗЫВ

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

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время ракеты-носители (РН) широко применяются для доставки полезной нагрузки в космос. Одной из ключевых проблем является сохранение уровня надежности пусковых работ в условиях ужесточения требований по их стоимости и конструктивным особенностям.

Автор диссертации, Трифонов Максим Викторович, предлагает решить данную проблему путем наложения дополнительных условий на систему управления (СУ) движением РН в целях повышения уровня безопасности сооружений стартового комплекса, а также надежности РН при движении на участке максимальных скоростных напоров. Такой способ решения проблемы с использованием СУ движением РН несомненно имеет ряд преимуществ над известными пассивными способами защиты стартового комплекса, такими как применение сверхпрочных и теплостойких материалов в конструкциях стартовых сооружений или использование вспомогательных средств при старте РН для снижения ее теплового воздействия.

Для решения задач управления движением РН на участке полета первой ступени целесообразно разрабатывать соответствующие алгоритмы управления. Среди различных методов синтеза управления, метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), берущий начало в фундаментальных работах А. М. Летова, является хорошо формализованной теорией, позволяющей формировать одновременно структуру и параметры регулятора для выполнения заданной программы управления. Автор предлагает рассмотреть модификацию классической задачи АКОР, соответствующую

исследуемой проблеме, и построить на участке максимальных скоростных напоров оптимальный регулятор с полной обратной связью.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа Трифонова Максима Викторовича хорошо структурирована и включает в себя введение, пять глав и заключение.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель, задачи, объект и предмет исследования, представлены сведения о научной новизне, практической значимости, апробации результатов исследования, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту. Дано обоснование выбора метода АКОР для решения конкретных задач управления движением РН на участке полета ее первой ступени, рассматриваемых в работе.

Первая глава посвящена обзору известных проблем управления РН на участке полета первой ступени и методов аналитического конструирования управляющих воздействий. В данной главе формулируется и решается задача оптимального управления, названная автором диссертации задачей АКОР с управляемым выходом. Обсуждается пример нахождения оптимального управления системой 1-го порядка с использованием полученного решения. Приведено описание используемых систем координат и математической модели движения РН на участке полета первой ступени.

Во второй главе решается задача увода струй двигателей РН. Для конструирования СУ движением РН применяется оптимальное управление, полученное в результате решения задачи АКОР в первой главе. Автор предлагает заданную программу увода струй, к которой должен приблизиться сформированный оптимальный регулятор. Численное моделирование подтверждает эффективность полученных результатов при решении задачи увода струй двигателей РН по заданной программе увода.

В третьей главе решается задача аварийного увода РН в случае отказа двигателя. Для формирования стратегии управления движением РН применяется



решение из главы 1. Автором были исследованы различные варианты неисправностей двигателя из заданного диапазона и выбран наихудший, тем самым по существу применен минимаксный подход – при наихудшем сценарии выполняется поиск наилучшего решения. Численные результаты решения задачи подтверждают эффективность разработанного алгоритма управления.

Четвертая глава посвящена решению задачи управления РН на участке максимальных скоростных напоров. Исследуется движение РН в конфигурации с крупногабаритным обтекателем в возмущенной атмосфере. Модели горизонтального ветра и вариаций плотности атмосферы построены в предположении случайности указанных возмущений. В данной главе проведен статистический анализ возмущенного движения на участке максимальных скоростных напоров методом уравнений моментов.

В пятой главе дается описание имитационной модели для проверки эффективности методик и алгоритмов управления, разработанных в главах 2 – 4. Численные результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенных алгоритмов управления при случайных атмосферных возмущениях.

В заключении сделаны выводы о результатах, полученных в диссертации.

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

Автор при формировании математической модели движения РН и моделей атмосферных возмущений использует общепринятые стандартизированные материалы, в числе которых ГОСТ 20058-80, ГОСТ 4401-81, а также апробированный в научной практике математический аппарат.

Разработана имитационная модель, представляющая собой достаточно полную и детальную модель движения РН на участке полета первой ступени. Результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность разработанных алгоритмов управления и методик.

Результаты диссертационного исследования Трифонова Максима Викторовича опубликованы в авторитетных журналах, рекомендованных ВАК, а также представлены и обсуждены на конференциях регионального и международного форматов.

### **Новизна научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе**

1. Сформулирована и решена задача оптимального управления, соответствующая целям исследования. Задача имеет ряд особенностей, достаточно редко встречающихся в имеющейся технической литературе.
2. С использованием полученных результатов решены задачи увода струй двигателей РН и аварийного увода РН при отказе двигателя.
3. Решена задача снижения нормальных перегрузок РН в условии ее полета с крупногабаритным обтекателем при моделировании атмосферных возмущений в виде случайных функций.
4. Разработана новая детальная модель движения первой ступени РН при воздействии случайных атмосферных возмущений и решена задача имитационного моделирования для оценки эффективности разработанных методик и алгоритмов.

### **Практическая значимость**

Предлагаемые автором методики и алгоритмы управления могут быть интересны при проектировании СУ перспективными коммерческими РН.

Полученное в работе решение задачи оптимального управления линейной нестационарной системой по квадратичному критерию может быть использовано для конструирования СУ различными типами динамических объектов, как в области авиационно-космической техники, так и за ее пределами.

Модели горизонтального ветра и вариаций плотности атмосферы могут быть использованы при моделировании движения различных типов ЛА на атмосферном участке для проверки эффективности предлагаемых решений.



## Замечания

1. В первой главе работы формулируется детерминированная математическая модель исследуемого процесса управления, а в главах 4 и 5 обсуждается возможность моделирования внешних возмущений при помощи элементов теории случайных процессов. В связи с этим возникает вопрос о возможности привлечения стохастической теории динамических систем и теории оптимального управления такими системами к решению основных задач диссертационного исследования. Данный вопрос в работе никак не изучен.
2. В теоретической части диссертации (глава 1) на функцию управления не накладывается геометрических ограничений, а в практической части работы (главы 2 и 3) роль управлений играют углы отклонения сопел РН. При этом их возможный выход за пределы допустимых значений не обсуждается.
3. Постановка задачи оптимального управления в главе 1 сформулирована недостаточно строго: ничего не сказано о степени информированности управляющего устройства о текущем состоянии системы (после чего решается задача с полной обратной связью), а кроме этого не дано никаких комментариев относительно отличий ошибки слежения в конечный момент времени от динамической ошибки слежения на всем остальном интервале.
4. Решаемую в работе проблему оптимального управления предлагается назвать новым термином «задача АКОР с управляемым выходом». Однако данная задача не является новой для математической теории управления. В результате целесообразность введения нового термина вызывает сомнения.

Необходимо отметить, что все вышеперечисленные замечания не снижают научную ценность представленной диссертационной работы.

## Заключение о соответствии диссертационной работы установленным требованиям

Считаю, что по актуальности и по полноте решения поставленной задачи, научному уровню и степени новизны результатов, полученных лично автором, представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), то есть удовлетворяет всем требованиям ВАК, 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».

### Официальный оппонент

Царьков Кирилл Александрович

кандидат физико-математических наук  
по специальностям 05.13.18, 05.13.01,  
старший научный сотрудник лаборатории  
«Математических методов исследования  
оптимальных управляемых систем  
им. В.Ф. Кротова» ИПУ РАН  
117997, Россия, г. Москва ул. Профсоюзная, д. 65,  
тел.: +7 (495) 334-91-59,  
e-mail: k6472@mail.ru.

10.10.2019



Подпись Царькова Кирилла Александровича заверяю:

*Заведующий отделом кадров  
ИПУ РАН г-жа И.А. Таврилова*