

Масса спутников, предназначенных для работы на геостационарной орбите, увеличивается с каждым годом, а энергетические возможности современных средств выведения, использующих в своем составе термохимические двигатели большой тяги, возможности которых близки к своему пределу. Особенно актуальна эта проблемы для отечественных космодромов, которые находятся вдали от экватора Земли.

Одним из решений проблемы является использование более эффективных двигателей, работающих на других физических принципах. К таким двигателям относятся электрореактивные двигатели (ЭРД), обладающие высокой скоростью истечения рабочего тела и поэтому более экономичны с точки зрения требуемых запасов топлива, но обладают малой тягой. Поэтому выведение КА с помощью таких двигателей возможно только на достаточно высоких орбитах, где притяжение Земли существенно ниже, чем на поверхности.

Таким образом, при использовании электрореактивной двигательной установки выведение осуществляется по комбинированной схеме, которая предполагает на первом этапе формирование последней ступенью ракеты-носителя или разгонным блоком промежуточной орбиты, а на втором – довыведение полезной нагрузки на целевую орбиту. Такая схема является компромиссной и позволяет использовать достоинства перелетов с большой тягой (короткое время выведения) и перелетов с малой тягой (большая масса ПН). Это позволяет в более продолжительные, но приемлемые, сроки вывести на орбиту ПН большей массы по сравнению с традиционными схемами.

Такие схемы были реализованы, например, АО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнёва» при выведении КА серии «Экспресс», на которых была установлена маршевая ЭРДУ для довыведения КА на конечном участке выведения. Такое решение позволило вывести КА большей массы по сравнению с традиционной схемой выведения. Недостатками установки ЭРДУ на КА являются необходимость проектирования ЭРДУ для каждого конкретного КА.

В диссертационной работе Русских А.С. для реализации комбинированной схемы выведения предлагается включить в состав космической транспортной

системы (КТС) автономное средство выведения –МТА с ЭРДУ, который будет универсален по отношению к ПН и позволит выводить различные КА. Дополнительным достоинством такого решения является возможность установки на КА большего количества целевой аппаратуры или увеличения его срока активного существования за счет размещения дополнительных запасов топлива для коррекции орбиты. Учитывая долгий срок службы компонентов бортовых систем МТА, целесообразно проектировать многоразовый МТА.

Проектирования КА, использующих ЭРД в составе маршевой двигательной установки, проводятся путём математического моделирования с использованием сложных вычислительных алгоритмов. Поэтому разработка методики проектирования МТА с ЭРДУ, которая систематизировала бы результаты проектно-баллистической оптимизации межорбитальных перелётов с двигателями большой и малой тяги и давала бы готовые проектные варианты МТА в виде трехмерной электронной модели является **актуальной задачей** и представляет значительный научный и практический интерес для повышения эффективности транспортных операций в космосе.

2. Оценка содержания работы и личный вклад автора

Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 99 наименований. Общий объем диссертации составляет 172 страницы машинописного текста, включая 19 таблиц и 64 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследований, описывается современное состояние проблемы, излагается научная новизна работы.

В первой главе рассмотрены проблемы создания космической транспортной системы, включающей ракету-носитель, химический разгонный блок (ХРБ) и межорбитальный транспортный аппарат с электроракетной двигательной установкой.

Во второй главе предложена методика выбора оптимальных параметров комбинированной схемы выведения и проектных параметров МТА с ЭРДУ, обеспечивающих максимум выводимой ПН на ГСО. На примере КТС,

включающей ракету-носитель «Ангара-А5» и разгонный блок ДМ, получены баллистические параметры перелета и проектные параметры МТА с ЭРДУ, среди которых выделено множество Парето-решений, которые показали возможность значительного увеличения массы выводимой ПН по сравнению со схемой выведения только РН и РБ, в том числе с учетом многократного использования МТА.

В третьей главе показаны структурно-параметрический синтез МТА с ЭРДУ, рассмотрены три варианта компоновки и выбран наиболее удовлетворяющий заданным требованиям, который предполагает рациональное разделение конструкции МТА на два отсека: многократный приборно-агрегатный (ПАО) и одноразовый (сменный) топливный (ТО). При такой компоновке дорогостоящие агрегаты и аппаратура размещаются в ПАО и могут быть использованы многократно в течение срока их службы, а сменный топливный отсек избавляет от необходимости в КА-заправщике.

В четвёртой главе предложена технология создания электронной трёхмерной модели в системе автоматизированного проектирования PTC Creo, основанная на методе нисходящего проектирования. Результаты разработки электронной модели можно сделать вывод о возможности реализации конструкции МТА с требуемыми проектными параметрами.

В заключении сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

Личный вклад автора заключается в проведении теоретических исследований, сформулированы общие и частные проблемы исследования, разработан общий алгоритм проектирования и алгоритмы решения частных задач, основные научные результаты получены автором самостоятельно, выполнен анализ и обобщены результаты работы.

Диссертация написана ясным научным языком, содержание ее глав логически взаимосвязано и в полном объеме раскрывает постановку, методы и алгоритмы поставленных задач.

Материалы исследования достаточно полно изложены в 8 работах, опубликованных автором по теме диссертации, в том числе в двух статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и одна – в научном издании, индексируемом базой Scopus, что соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней. Результаты диссертационного исследования также прошли апробацию на конференциях.

3. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика проектирования нового типа средств выведения – многоразового межорбитального транспортного аппарата с электроракетной двигательной установкой, включающая методики оптимизации баллистических параметров комбинированных схем выведения, выбора оптимальных проектных параметров и синтеза проектного облика МТА.

2. Разработана методика структурно-параметрического синтеза МТА с ЭРДУ, учитывающая возможности многоразового применения и геометрические ограничения, накладываемые другими составными частями космической транспортной системы.

3. Разработана технология создания электронной модели МТА в системе автоматизированного проектирования с заданными параметрами и действующими ограничениями.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением системного подхода к выбору оптимальных проектно-баллистических параметров перелёта с КА с ЭРДУ, использованием известных методов расчета перелетов с двигателями большой и малой тяги, методов решения многокритериальных задач оптимизации, метода нисходящего проектирования для разработки алгоритма формирования проектного облика МТА.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования методики при проектировании МТА с ЭРДУ и формировании его проектного облика в виде электронной трехмерной модели, в которой реализованы требуемые проектные параметры и удовлетворяющей геометрическим ограничениям, накладываемым другими составными частями КТС; полученных численных результатах возможности значительного увеличения массы выводимой полезной нагрузки по сравнению с традиционной схемой выведения ПН на ГСО разгонным блоком.

Теоретическая значимость состоит в применении методов расчета движения с большой и малой тягой, выбора оптимальных баллистических параметров перелета и проектных параметров МТА, сформулированы цели, задачи, требования и ограничения проектных параметров, в рамках которых осуществляется проектирование МТА с ЭРДУ для выведения МТА на ГСО.

4. Замечания по автореферату и диссертации:

1) в работе отсутствует оценка запасов топлива, требуемых для ориентации и стабилизации МТА в течение активного участка полета и для приведения ПН в заданную точку ГСО;

2) разработанная электронная модель позволяет более точно оценить массу конструкции компонентов и конструкции МТА, поэтому следовало бы провести уточнение расчетов.

Несмотря на отмеченные недостатки, данные замечания *не снижают* общей высокой оценки проведенных научных исследований. Они могут рассматриваться в качестве рекомендаций для дальнейших исследований.

5. Общее заключение по диссертационной работе

Диссертация Русских А.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполнена на высоком уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной, и соответствует паспорту специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Отзыв рассмотрен на расширенном заседании кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» (протокол заседания от 28 января 2025г. №1).

Представленная диссертационная работа «Методика проектирования межорбитального транспортного аппарата с электроракетной двигательной установкой для комбинированных схем выведения на геостационарную орбиту» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (ред. от 28.08.2017), а также соответствует требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденного Приказом Минобрнауки России от 10.11.2017 №1093 к оформлению диссертаций.

Автор диссертационной работы Русских Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов.

Отзыв ведущей организации подготовил:

Профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика» СамГТУ

П.К. Кузнецов

Подпись д.т.н., профессора. Кузнецова
Павла Константиновича
заверяю
Главный ученый секретарь ФБГОУ
ВО СамГТУ, д.т.н.



Ю.А. Малиновская
04.02.2025

Сведения о ведущей организации:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Почтовый адрес:

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, Д. 244
тел.: +7 (846) 278-43-53, e-mail: upd@samgtu.ru