

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.Е. Косенко
подпись инициалы, фамилия

«_ _ _» _____ 2022 г

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Красноярск 2022

Студенту: Коваленко Наталье Эдуардовне

фамилия, имя, отчество

Группа: КИ20-03-6М, направление (специальность) 27.04.03 «Системный анализ и управление», магистерская программа 27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов».

номер код наименование

Тема выпускной квалификационной работы: «Разработка метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата»

Утверждена приказом по университету от 02.11.2020 № 16948/с

Руководитель ВКР: Виктор Евдокимович Чеботарев, д-р техн. наук, доц., профессор МБК «Прикладная физика и космические технологии».

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР:

Наиболее частое применение электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата по сравнению с другими видами реактивных двигателей привело к появлению их широкой номенклатуры. В связи с чем возникает необходимость разработки метода определения эффективности применения того или иного двигателя в системе коррекции космического аппарата, и доказательство его применимости.

Перечень разделов ВКР.

- 1 Современные электрореактивные двигатели систем коррекций космического аппарата.
- 2 Разработка метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата.
- 3 Аналитическое исследование метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата.

Перечень графического материала:

Слайды презентации в количестве 16 шт.

Руководитель ВКР

подпись

В.Е. Чеботарев

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

Н.Э. Коваленко

инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата» (ЭРД в СК КА) содержит 73 страниц текстового документа, 18 использованных источников, 21 листов графического материала.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ, СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ, ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, КРИТЕРИЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Объект исследования – система коррекции космического аппарата.

Цель работы:

- доказать действенность разработанного метода определения технико-экономической эффективности применения ЭРД в СК КА.

В данной работе была изучена актуальность выбранной темы, произведен анализ основных технических и экономических показателей электрореактивных двигателей и установлена взаимосвязь между ними.

В результате исследования был разработан метод определения технико-экономической эффективности применения ЭРД в СК КА, который заключается в определении критерия, позволяющего сделать выбор оптимального с технической и экономической точек зрения ЭРД на этапе проектирования КА.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 Современные электрореактивные двигатели систем коррекций космического аппарата.....	10
1.1 Классификация космических аппаратов.....	10
1.2 Понятие системы коррекции космического аппарата.....	12
1.3 Классификация электрореактивных двигателей.....	14
1.4 Типы электрореактивных двигателей.....	17
1.4.1 Электротермические двигатели.....	17
1.4.2 Магнитогазодинамические двигатели.....	19
1.4.3 Электростатические двигатели.....	20
1.4.4 Импульсные двигатели.....	24
1.5 Обзор отечественных и зарубежных электрореактивных двигателей.....	27
2 Разработка метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата.....	35
2.1 Технические характеристики электрореактивных двигателей.....	35
2.2 Экономические характеристики электрореактивных двигателей.....	40
2.3 Технология определения характеристик электрореактивных двигателей.....	42
2.3.1 Основные требования для проведения испытаний по определению характеристик электрореактивных двигателей....	42
2.3.2 Последовательность проведения испытаний по определению обобщенных характеристик электрореактивных двигателей.....	43
2.4 Подготовка производства для применения технологии определения характеристик электрореактивных двигателей.....	45
2.4.1 Физические (фондовые) ресурсы.....	45
2.4.2 Организационные ресурсы.....	53

2.4.3 Трудовые ресурсы.....	54
2.5 Метод определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата.....	55
3 Аналитическое исследование метода определения технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей в системе коррекции космического аппарата.....	59
3.1 Определение критерия технико-экономической эффективности применения электрореактивных двигателей.....	59
3.2 Анализ взаимосвязи критерия технико-экономической эффективности с практикой использования двигателей.....	65
Заключение.....	69
Список сокращений.....	70
Список использованных источников.....	71

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении целевой задачи космического аппарата важную роль играют двигательные установки (ДУ) системы коррекции (СК) КА, представляющие собой совокупность реактивных двигателей, топливных баков с топливом и системы подачи топлива из баков двигателям. Реактивные двигатели из состава ДУ СК КА могут для своей работы использовать различные виды топлив, а реактивная сила в них может возникать вследствие преобразования различных типов энергии.

Различные типы реактивных двигателей предназначены для решения различных задач, связанных с эксплуатацией КА на орбите:

- корректировки ошибок орбиты КА после выведения его на целевую орбиту средствами выведения;
- довыведение КА на целевую орбиту с переходной;
- перевод КА между орбитами или между орбитальными точками на ГСО;
- удержание КА на орбите с заданными параметрами;
- разгрузка маховиков системы ориентации и стабилизации и т.д.

На сегодняшний день среди всех существующих типов реактивных двигателей для космических аппаратов (КА) лидирующее место по величине удельного импульса занимают электрореактивные двигатели (ЭРД), в связи с тем всё большее число производителей КА применяют ЭРД в качестве двигателей системы коррекции (СК) КА. Усиление интереса производителей КА к использованию ЭРД привело к появлению широкой номенклатуры ЭРД различных типов, что ставит перед разработчиками КА вопрос эффективности применения того или иного ЭРД в составе СК КА.

Эффективность – сложное и многогранное понятие, отражающее как соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами, так и стоимость процесса достижения результата, степень удовлетворенности

процессом, степень достижения результата и т.п.

Многоаспектность и системная сложность понятия эффективности предполагают включение в ее оценку различных эффектов – как технических, так и экономических. Поэтому, в связи с большим накопленным опытом проектирования, производства и применения ЭРД как у отечественных, так и у зарубежных производителей, выразившимся в возникновении широкой номенклатуры ЭРД различных типов и исполнений, возникает необходимость при проектировании СК КА учитывать не только технические, но и экономические критерии выбора ЭРД.

Такие технические параметры ЭРД, как масса, энергопотребление, тяга, удельный импульс, суммарный импульс определяют техническую эффективность применения ЭРД в СК КА, а такие, как стоимость производства двигателя, стоимость топлива, стоимость эксплуатации – экономическую эффективность применения ЭРД в СК КА. Совместная оценка технических и экономических параметров позволяет определить обобщённый технико-экономический эффект от использования в СК КА ЭРД нового типа или новой модификации, а также снизить риск избыточности технических характеристик или чрезмерной дороговизны модернизации СК КА.

Для упрощения анализа эффективности применения ЭРД в СК КА предложен обобщённый критерий, объединяющий ключевые технические и экономические параметры ЭРД и позволяющий оперативно проводить сравнение технико-экономической эффективности применения ЭРД в составе СК КА для различных типов и модификаций ЭРД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения таких задач развития КА, как увеличение срока активного существования, повышение надежности, оптимизация массы полезной нагрузки, тяговооруженности и энерговооруженности – перспективным направлением является внедрение ДУ на основе ЭРД.

ЭРД получили широкое применение в практической космонавтике и на отечественных КА, и на зарубежных КА. На основе таких параметров, как удельный импульс, тяга, масса можно определить техническую эффективность применения ЭРД в системе коррекции КА, однако, кроме преимуществ, ЭРД обладают определёнными недостатками, среди которых: высокие энергоёмкость, тепловая нагрузка на конструкцию КА, стоимость рабочего тела – ксенона, – а также проблемы обеспечения защиты КА от заряженной плазмы в процессе работы ЭРД. Кроме того, в связи с большим накопленным опытом проектирования, создания, применения ЭРД и у отечественных производителей, и у зарубежных производителей, выразившимся в существовании широкой номенклатуры различных типов и исполнений ЭРД, возникает необходимость учитывать и стоимостные критерии выбора ЭРД, такие, как стоимость топлива, стоимость двигателя, стоимость эксплуатации.

В данной работе предложен к использованию на этапе проектирования КА метод определения технико-экономической эффективности применения ЭРД в СК КА, который объединяет в себе и технические и экономические характеристики ЭРД.

Разработанный метод заключается в определении критерия технико-экономической эффективности. Аналитическое исследование данного метода подтвердило целесообразность применения результатов расчета данного критерия при выборе конкретного ЭРД для СК на этапе проектирования КА.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КА – космический аппарат;

СК – система коррекции;

ЭРД – электрореактивный двигатель;

ДУ – двигательная установка;

ЭНД – электронагревной двигатель;

ЭДД – электродуговой двигатель;

ТСД – торцевой сильноточный двигатель;

ТХД – торцевой холловский двигатель;

ЭСД – электростатический двигатель;

ДАС – двигатель с анодным слоем;

СПД – стационарный плазменный двигатель;

ИД – ионный двигатель;

ГРК – газоразрядная камера;

АИПД – абляционные импульсные плазменные двигатели;

ТИУ – тягоизмерительное устройство;

ГСО – геостационарная орбита;

НО – низкая или средняя орбита.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Desantis, D. Satellite Thruster Propulsion: H₂O₂ Bipropellant Comparison with Existing Alternatives [Электронный ресурс] / D. Desantis // ResearchGate.net is the professional network for scientists and researchers. - 2014. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/261288210_Satellite_Thruster_Propulsion-_H2O2_Bipropellant_Comparison_with_Existing_Alternatives/stats.

2 Fortescue, P. Spacecraft Systems Engineering (4th ed.) / P. Fortescue, G. Swinerd, J. Stark. – United Kingdom : John Wiley & song, 2011. — 724 p.

3 Важенин, Н.А. Ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической / Н.А. Важенин, В.А. Обухов, А. Плохих, Г.А. Попов. – Москва : Физматлит, 2012. – 432 с. ISBN 978-5-9221-1410-3.

4 Воробьев, Е.В. Проектирование транспортных средств специального назначения : учеб. пособие / Е.В. Воробьев, О.Е. Денисов, В.И. Кузнецов. – Москва : МАДИ, 2014. – 96 с.

5 Горшков, О.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда. – Москва : Машиностроение, 2008. – 280 с. ISBN 978-5-217-03440-6.

6 Григорьев, Ю.М. Обзор состояния и тенденции развития электрореактивных двигателей за рубежом / Ю.М. Григорьев, П.А. Ермошкин // Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – 2017. - №1. - С. 204-205.

7 Гусев, Ю.Г. Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе [Электронный ресурс] / Ю.Г. Гусев, А.В. Пильников // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. - № 60. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35385>.

8 Егорычев, В.С. Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей [Электронный ресурс] : электрон.учеб. пособие / В.С. Егорычев. – Самара :

Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

9 Назаров, В.Ю. Краева Ракетные двигатели космических аппаратов : учеб.пособие / В.Ю. Назаров, М.В. Журавлев, Е.М. Краев. – Красноярск :Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2015. – 200 с.

10 Рыжков, В.В. Двигательные установки и ракетные двигатели малой тяги на различных физических принципах для систем управления малых и сверхмалых космических аппаратов / В.В. Рыжков, А.В. Сулинов // Вестник самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. - №4. – С. 115-128.

11 Чеботарев, В.Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб.пособие / В.Е. Чеботарев, В.Е. Косенко. – Красноярск : Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2011. - 488 с. ISBN 978-5-86433-510-9.

12 Патент № 2202773 Российская Федерация, МПК G 01 L 5/00, G 01 M 15/00. Устройство по определению тяги и составляющих вектора тяги электрореактивного двигателя и способ испытаний : № 2001100751/28 : заявл. 09.01.2001 : опубл. 20.04.2003 / Гниздор Р.Ю., Гопанчук В.В. – 12 с.

13 Патент № 2729857 Российская Федерация, МПК B64G 7/00 (2006.01). Вакуумная установка для испытаний электрических ракетных двигателей : № 2020102717 : заявл. 23.01.2020 : опубл. 12.08.2020 / Воронов А.С., Троицкий А.А. – 14 с.

14 Патент № 2561801 Российская Федерация, МПК G01M 15/00 (2006.01). Способ испытания ЭРД и стенд для его реализации : № 2014129363/06 : заявл. 16.07.2014 : опубл. 10.09.2015 / Белогуров А.И., Дронов П.А. – 6 с.

15 Патент № 121868 Российская Федерация, МПК F02K 9/96 (2006.01). Испытательный стенд : № 2012128673/28 : заявл. 10.07.2012 : опубл. 10.11.2012 / Козлов В.И., Лёб Х. – 20 с.

16 Российская Федерация. Приказ Минтруда России. Об утверждении основных требований к порядку разработки и содержанию правил и инструкций по охране труда, разрабатываемых работодателем : Приказ Минтруда России №

772н от 29.10.2021: [Зарегистрировано в Минюсте России 26.11.2021 № 66015].
– Москва : 2021. – 7 с.

17 Gnizdor, R. The research of the modified SPT-70 thruster parameters and characteristics. [Электронный ресурс] / R.Gnizdor, A.Markov, O.Mitrofanova, D.Semenenko // The 36th International Electric Propulsion Conference. University of Vienna. – Austria. – 2019. – Режим доступа: <https://national.spacegrant.org/index22.html#austria>.

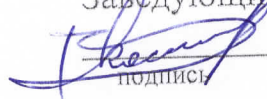
18 Салмин, В.В. Расчёт проектно-баллистических характеристик и формирование проектного облика межорбитальных транспортных аппаратов с электрореактивной двигательной установкой с использованием информационных технологий: учеб. пособие / В.В. Салмин, А.С. Четвериков, М.Ю. Гоголев. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2019. – 196 с. ISBN 978-5-7883-1435-8.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт космических и информационных технологий
институт

Межинститутская базовая кафедра
«Прикладная физика и космические технологии»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


подпись

В.Е. Косенко

инициалы, фамилия

«24» июня 2022 г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка метода определения технико-экономической эффективности
применения электрореактивных двигателей в системе коррекции
космического аппарата»
тема

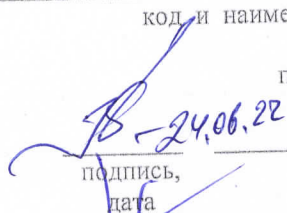
27.04.03 «Системный анализ и управление»

код и наименование направления

27.04.03.06 «Основы проектирования космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

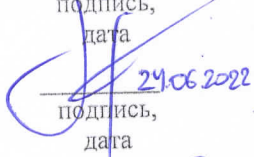

подпись, 24.06.22
дата

профессор МБК «Прикладная физика и
космические технологии»,
д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев

инициалы, фамилия


Выпускник


подпись, 24.06.2022
дата

Н.Э. Коваленко

инициалы, фамилия

Рецензент

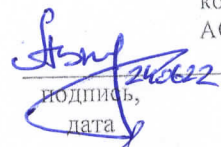

подпись, 24.06.2022
дата

Начальник группы проектирования и
эксплуатации систем коррекции АО
«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва
должность, ученая степень

А.А. Пац

инициалы, фамилия

Консультант


подпись, 24.06.22
дата

Начальник группы отдела разработки
баллистического и навигационного обеспечения
космических аппаратов и космических систем,
АО «Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва
должность, ученая степень

А.А. Внуков

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, 24.06.22
дата

профессор МБК «Прикладная физика и
космические технологии»,
д-р техн. наук, доцент
должность, ученая степень

В.Е. Чеботарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2022