ХАІ ОДЕРЖАНО
«09» 09 2020р.
№ рСВР-В-3
Підпис

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

про дисертаційну роботу Погудіна Андрія Володимировича «Формування динамічних характеристик електронагрівної рушійної установки для космічного буксира», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 - Енергетичне машинобудування.

Актуальність теми дисертації.

1.1. Сьогодні використання малих космічних апаратів (МКА) стає все більш актуальним завдяки використанню сучасної техніки та технологій. Але завдяки цьому, де більш актуальною стає задача саме виведення МКА на орбіту функціонування. Так для виведення групи супутників можна використовувати кінцеву ступінь ракети носія, або розгінний блок, або космічний буксир. Для кожного окремого випадку слід вибрати, що найбільш доцільно використовувати. У випадку, коли час створення угрупування МКА не є первинним має сенс використовувати електрорушійну установку на космічному буксирі, це дає ряд переваг, а саме суттєву економію робочого тіла, та тривалий час функціонування буксира, що розширює можливості його використання в місії.

1.2. Існує декілька видів електроракетних установок, серед яких слід виділити електронагрівні ракетні установки (ЕНРУ), як більш прості та потужні. Також ЕНРУ мають саму малу ціну тяги серед усіх електроракетних установок. Але використання ЕНРУ має ряд недоліків, одним з яких є час підготовки до запуску. Цей недолік обумовлено конструкцією та принципом дії ЕНРУ. Тому для використання ЕНРУ на космічному буксирі стає актуальна задача, а саме скорочення тривалості підготовки ЕНРУ до запуску.

1.3. Отримані автором результати дисертації використовувались при виконанні науково-дослідних робіт у Національному аерокосмічному університеті ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», у відділенні Міжгалузевого науково-технічного центру космічної енергетики й двигунів кафедри космічної техніки і нетрадиційних джерел енергії № 402 і за договором №402-16-2018 «Проведення завершальній довідних випробувань двигунів и АРУ в цілому. Проведення ресурсних випробувань парогенератора, двигуна. Поставка МПЗС »

2. Аналіз змісту дисертації. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

2.1. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка складається з анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновку, списків використаних джерел по кожному розділу та додатків.

У *вступі* здобувач обґрунтував актуальність теми дослідження й науково-прикладної задачі, сформулював мету, задачі, об'єкт, предмет і методи дослідження, показав наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також навів інформацію щодо впровадження, апробації та публікації результатів дослідження.

У *першому* розділі розглянуто класифікацію КА. Завдяки розвитку нових технологій МКА отримано нові можливості для застосування. Визначені завдання для застосування МКА. В наслідок проведеного огляду предметної галузі й існуючих підходів до формування групи МКА за допомогою КБ можна зробити такі висновки:

1) запуск МКА стикається з труднощами у вигляді вартості запусків МКА, самостійне виведення МКА є економічно недоцільним, що призводить до запусків МКА в складі групи, або пусків у вигляді доповнень до основних супутників;

2) тривалість виведення МКА на орбіту грає не останню роль, що на пряму пов'язано з кількістю РТ, яке необхідно також виводити на орбіту для подальшого використання МКА;

3) обладнання МКА власною рушійною установкою призводить до збільшення його маси і вартості такого запуску, проте в процесі експлуатації такий вид МКА має здатність здійснювати орбітальні переходи і підтримку, корекцію орбіти;

4) серед різних типів рушійних установок найкращих показників витрати РТ займають ЕРД;

5) останнім часом гостро стоїть питання деорбітації МКА після виконання поставлених завдань, тому що число космічного сміття з кожним роком зростає, викликаючи ряд труднощів при експлуатації сучасних МКА.

У *другому* розділі автором проведено:

1) аналіз вимог до ЕРД і визначені характеристики ЕРРУ для МКА з масами від 50 до 500 кг в залежно від вимог до орієнтації точності корекції МКА типу виконавчих органів, логіки керування;

2) проведено аналіз можливості застосування ЕРД на КБ, визначені найбільш ефективні типи ЕРД в залежності від поставленого завдання;

3) проведено огляд можливостей функціонування ЕРД, визначено їх переваги і слабкі сторони, обґрунтовано використання ЕНД як найближчих до ХРД серед ЕРД здатних в найкоротші терміни вирішувати задачу виведення за допомогою КБ;

4) проведено аналіз вимог до ЕНРУ, що накладаються на рушійну установку, поставлені завдання моделей керування ЕРРУ на КБ, поставлені завдання щодо аналізу ефективності застосування ЕНД встановленої на КБ;

5) проведено розрахунок робочих параметрів орбіти, аналіз траси КБ, чисельні обчислення висотної корекції орбіти, отримані залежності збільшення орбіти в залежності від маси КБ, отримана залежність часу роботи ЕНРУ від опорної орбіти КБ, отримана залежність зміни способу орбіти в рамках одного витка від маси КБ;

6) розроблено концепцію використання ЕНРУ на космічному буксирі для виведення групи МКА;

7) наведено структурну та пневмогідравлічну схеми ЕНРУ, розкрито принцип її роботи, наведено опис елементів, що входять до складу ЕНРУ.

В результаті виконання робіт в *третьому* розділі:

1) проведено вибір робочого тіла для ЕНРУ, обрано аміак;

2) побудовано математичну модель БРУ по кожному елементу окремо, а саме:

- математична модель системи електроживлення;
- математична модель бака;
- математична модель парогенератора;
- математична модель двигуна;

3) обрано метод вирішення математичної моделі БРУ;

4) розглянуто експериментальну установку для дослідження процесів в електронагрівній рушійній установці;

5) наведено порядок проведення експериментів та проведено обробку експериментальних результатів;

6) отримано оцінку адекватності математичної моделі підготовки до запуску електронагрівної рушійної установки та фізичних експериментів.

Четвертий розділ дисертації присвячено застосуванню математичної моделі для розробки алгоритму першого запуска електронагрівної рушійної установки на космічному буксирі:

1) відповідно до конструкції ЕНРУ розроблено алгоритм підготовки до першого запуску ЕНРУ, що включає в себе процедури нагріву бака, нагріву парогенератора, нагріву двигуна;

2) після аналізу створеного алгоритму було запропоновано скоротити час запуску БРУ за рахунок підняття потужності, що подається на елементи нагріву бака, парогенератора та двигуна;

3) побудовано циклограми підготовки БРУ до роботи, циклограма підняття потужності нагрівача бака, циклограма одночасного нагріву декількох елементів конструкції БРУ і підвищення потужності нагрівача, при збереженні постійної потужності, що надається СЕЖ космічного буксира;

4) запропоновано рекомендації, що до вдосконалення ЕНРУ в складі КБ.

Висновки містять розгорнутий перелік основних результатів та рекомендацій отриманих в дисертації.

Додатки містять список публікацій здобувача, акти відповідних впроваджень результатів дисертації, результати експериментальних робіт, технічну специфікацію елементів засобів експерименту.

2.2. В цілому наукові результати є належним чином обґрунтовані та впровадження результатів в практику промислового підприємства ДК «КБ «Південне»» і наукових установ; використанням достатньо значного списку джерел за темою дисертації; відповідністю предметної спрямованості дисертаційного дослідження паспорту наукової спеціальності 142 - Енергетичне машинобудування

3. Наукова новизна одержаних результатів

3.1. Підтверджую, що наукову новизну одержаних результатів дисертаційної роботи Погудіна А.В. складають:

1) *вдосконалено* математичну модель процесу підготовки електронагрівної рушійної установки до запуску, яка отримана на базі математичних рівнянь, що описують динамічні характеристики установки, з урахуванням теплообміну та динамічних характеристик системи електрозабезпечення; зазначена модель вперше дозволила виконати аналіз впливу діючих факторів на тривалість підготовки електронагрівної рушійної установки до запуску;

2) *набули подальшого розвитку* методи визначення витратно-тягових характеристик електронагрівної рушійної установки, які дозволили визначити та керувати тягою та витратою робочого тіла електронагрівної рушійної установки за рахунок застосування тензометричного тягоміра на підвісі з підвищеною дискретизацією і мінімальною апертурою, використання ресиверу великого об'єму, що підвищує точність вимірювання витрат робочого тіла, а також використання чотиризондового методу вимірювання вживаної потужності нагрівачів рушійної установки з високою швидкодією.

3.2. Вважаю, що наукові результати здобувача є вагомим внеском у розвиток використання ЕНРУ на КБ для вирішення задач в космічному просторі. Розроблені методи та програмні засоби надають нові можливості в дослідженні процесів що протікають в ЕНРУ, а також дозволяють отримувати необхідні дані з мінімальними часовими і вартісними витратами.

4. Практична цінність одержаних результатів та їх подальше використання

4.1. Розроблено рекомендації щодо застосування електронагрівної рушійної установки зі скороченням тривалості попередньої підготовки бортової рушійної установки, для використання на космічних буксирах для виведення груп малих космічних апаратів шляхом орбітальних переходів від наперед заданої опорної орбіти до необхідних орбітальних позицій, ці рекомендації можуть бути застосовані для використання та підвищення якості проектів зі створення супутникових угруповань у доробках ДП «КБ «Південне»» за космічною програмою України.

4.2. Розроблено концепцію використання електронагрівних рушійних установок на космічних буксирах для виведення груп малих космічних апаратів від опорної орбіти до необхідних орбітальних позицій, яка також може бути використана у зазначених проектних роботах.

4.3. На базі Міжгалузевого науково-технічного центру «Космічна енергетика та двигуни» розроблено експериментальне обладнання для вимірювання тяги електронагрівного двигуна у вакуумній камері, а також

пристрої вимірювання витрат робочого тіла і визначення потужності, яка подається на нагрівальні елементи рушійної установки;

4.4. Розроблено алгоритм підготовки до запуску електронагрівної рушійної установки для скорочення етапу запуску двигуна з урахуванням потужності системи електропостачання космічного буксира і з опробуванням до реалізації на універсальному контролері, поєднаному з експериментальною електронагрівної рушійної установки.

5. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу результатів в опублікованих працях.

5.1. *Оформлення дисертації.* Дисертаційну роботу викладено на 215 сторінках друкованого тексту, з них 113 сторінок основного тексту 70 рисунків, та 15 таблиць. Оформлення дисертації відповідає усім необхідним атестаційним вимогам.

5.2. *Дотримання вимог академічної доброчесності*. Проведена перевірка дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність роботи. По всьому тексту дисертації простежується авторський стиль. У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела.

5.3. *Повнота викладу результатів в опублікованих працях.* Основні результати повно відображено у 8 наукових публікаціях. Автором опубліковано 5 статей - у наукових фахових виданнях України, 2 - у виданнях включених до міжнародної наукометричної бази Scopus і 1 - у виданнях включених до міжнародної наукометричної бази Web of science. Автором опубліковано 2 тези доповідей у матеріалах міжнародних конференцій: «6-я Международная конференция Космические технологии: настоящее и будущее» (Україна, м. Дніпро, 2017 р.); «7-я Международная конференция Космические технологии: настоящее и будущее» (Україна, м. Дніпро, 2019 р.); "Всеукраїнська науково-технічна конференція Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017", (Україна, м. Харків, 2017 р.).

Автором написано 2 роботи без співавторів.

У публікаціях, які написані у співавторстві, здобувачу належать такі результати: розгляд особливостей групи МКА, що дозволяє визначити коло вирішуваних завдань; класифікація групи МКА, що дає можливість відокремити ряд підзадач і обґрунтувати необхідність застосування рушійних установок на окремих мікро-супутниках і формалізації типів двигунів для космічного буксира; математичний опис формування групи МКА; аналіз інформації щодо характеристик ЕРД, визначення основних напрямків їх вдосконалення; виявлення діапазону застосування ЕРД при вирішенні типових завдань в космічному просторі; вибір варіантів рушійних установок орієнтації, стабілізації і корекції групи МКА; розробка алгоритму, щодо підготовки робочого тіла до запуску ЕНРУ; розробка алгоритму роботи

маніпулятора, що може виконувати захват МКА для подальшої деорбітації, а також досліджено можливості використання Arduino Leonardo у складі ЕНРУ; розробка методу створення групи малих безпілотних літальних апаратів на основі моделі інтенсивності заявок пуасонівського процесу і моделі побудови випадкового геометричного графа; формування методу вимірювання тяги двигуна, як основної характеристики в сталому і перехідному режимі, методу визначення витрати робочого тіла, корелює з тягою, методу вимірювання параметрів електроспоживання - струмів, напруги, потужності в статиці і динаміці..

6. Зауваження щодо змісту дисертації:

Недостатньо детально розглянуто гостре питання деорбітації малих космічних апаратів після виконання поставлених завдань. Не дана оцінка можливості застосування космічного буксира з ЕНРУ.

7. Висновки.

7.1. Представлена дисертація є завершеною науковою працею, у якій отримано нові наукові обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано наукове завдання скорочення тривалості підготовки ЕНРУ до запуску. Було проведено експериментальні дослідження.

7.2. Одержані наукові та практичні результати є вагомим внеском у розвиток математичного моделювання динамічних процесів в ЕНРУ та методів отримання експериментальних даних з ЕНРУ. Зміст роботи відповідає спеціальності 142 - Енергетичне машинобудування.

7.3. Отже, дисертаційна робота за ступенем актуальності обраної теми, обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизни, повноти викладу в наукових публікаціях, відсутності порушень академічної доброчесності, цілком відповідає вимогам пунктів 9-12 Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 року №167, а її автор – Погудін Андрій Володимирович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 - Енергетичне машинобудування.

Професор кафедри кафедри проектування
та конструкцій літальних апаратів
Дніпровського національного університету
Імені Олеся Гончара
доктор технічних наук, професор М.М. Дронь
«_7___» вересня 2020 р.

Підпис Дроня М. М. завіряю
Вчений секретар ДНУ ім. О. Гончара Т.В. Ходанен