

АНОТАЦІЯ

Погудін А. В. Формування динамічних характеристик електронагрівної рушійної установки для космічного буксира. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування», за галуззю знань (14 Електрична інженерія) – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» МОН України, Харків, 2020.

Основні результати дослідження:

Проведено аналіз розвитку та перспектив виведення групи малих космічних апаратів відповідно до виконуваних ними завдань у космічному просторі. З'ясовано, що застосування космічного буксира з електронагрівною рушійною установкою в сучасних дослідженнях космічного простору є перспективним завданням, яке включає в себе дотримання вимог зміни орбітальної позиції, відносно опорної, з допустимим неузгодженням кутового положення вектору тяги, часом роботи і обмеженням за вартістю маневру, відповідно до цільового призначення. Основною вимогою до формування є створення орбітальних позицій супутників в групі, що не мають рушійних установок, з відповідними кеплеровими елементами і орбітальним часом. Аналіз зроблено за розглядом використання і застосування базових космічних платформ, які являють собою кінцеву сукупність службових підсистем, необхідних для виконання певного завдання в космічному просторі. Найбільш масовою серед них є платформа під загальним терміном «CubeSat». Умови формування передбачають орбітальний маневр космічного буксира за допомогою рушійної установки до досягнення заданої позиції і відокремлення окремих супутників при формуванні групи. Встановлено, що важливим при застосуванні на буксирі електронагрівної рушійної установки є час підготовки до запуску, який пов'язаний з динамікою теплової підготовки бака з робочим

тілом, парогенератора, двигуна, це має бути узгоджено з живленням від бортової енергетичної установки. Таким чином, поставлена **науково-практична задача** скорочення тривалості підготовки до запуску електронагрівної рушійної установки при використанні на космічному буксирі є актуальною.

Проведено огляд можливостей ракетних двигунів при застосуванні на космічному буксирі. З'ясовано, що перельоти можна здійснювати одноступінчастим комірним буксиром з хімічним ракетним двигуном, одноступінчастим комірним буксиром з електроракетним двигуном.

Проведено аналіз вимог до електроракетного двигуна та його вибору при застосуванні космічного буксира, а також аналіз можливості застосування електроракетних двигунів як безпосередньо на малих космічних апаратах, так і на буксирі.

Проведено розрахунок робочих параметрів орбіти з визначенням траси космічного буксира за обертами, що дає можливість встановити точки маневру, а також енергетичні характеристики буксиру, що характеризують залежність зміни висоти і нахилу орбіти від маси космічного буксира та значення початкового орбітального положення, що дозволило розробити концепцію використання електронагрівної рушійної установки на космічному буксирі.

Розроблено математичну модель електронагрівної рушійної установки космічного буксиру, що представляє собою систему диференціальних рівнянь та передавальних функцій з початковими та граничними умовами. Проведено чисельне моделювання у середовищі MathLab та отримано рішення, що показують можливість попередньої оцінки часу введення установки в дію для своєчасного запуску до виконання маневру. Розглянуто можливість реалізації моделі у бортовому контролері рушійної установки на прикладі Arduino, шляхом введення створеного автором алгоритму запуску-зупинки двигуна.

Проведено перевірку адекватності моделі електронагрівної рушійної установки за результатами фізичного експерименту, що проводився на

експериментальній моделі електронагрівної рушійної установки з використанням стендової бази СВ-10К Міжгалузевого науково-технічного центру космічної енергетики і двигунів кафедри 402 Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ».

Вдосконалено методи і розроблено засоби експериментальних досліджень електронагрівних двигунів космічних апаратів, а саме методу вимірювання тяги, методу вимірювання витрати робочого тіла, методу вимірювання потужності, що подається на нагрівачі двигуна, парогенератора і баку та методу вимірювання вакууму в камері проведення експерименту.

Проведено аналіз обмежуючих факторів при керуванні електроракетним двигуном. Розроблено алгоритм керування електроракетним двигуном, на основі моделювання першого запуску установки з мінімізацією часу підготовки і зменшенням витрат робочого тіла та енергії.

Розроблено рекомендації, що до подальшого розвитку та використання електронагрівної рушійної установки.

Наукова новизна роботи:

а) *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;

б) *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 швидкістю.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

а) 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;

б) 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;

в) 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;

г) 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 електронагрівною рушійною установкою.

Ключові слова: космічний буксир, електроракетна рушійна установка, електронагрівна рушійна установка, бортова рушійна установка, електронагрівний двигун, методи вимірювання.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Погудин, А. В., & Губин, С. В. (2017). Обзор характеристик и методов создания группировки малых космических аппаратов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, (75), 57-67.
2. Погудин, А. В., & Губин, С. В. (2017). Особенности рационального управления двигательных установок для формирования спутниковой группировки. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, (78), 74-82.
3. Погудин, А. В. (2019). Математическое моделирование электронагревной двигательной установки в формировании микро спутниковой группировки. *Авиационно-космическая техника и технология*, (3), 45-51.
4. Погудин, А. В. (2019). Математическое моделирование электронагревного двигателя на этапе запуска. *Авиационно-космическая техника и технология*, (5), 4-11.
5. Погудин, А. В., & Губин, С. В. (2020). Минимизация времени подготовки рабочего тела к запуску двигательной установки с электронагревным двигателем. *Авиационно-космическая техника и технология*, (1), 4-11.

6. Kritskiy, D., Pohudina, O., Koba, S., Kritskaya, O., & Pohudin, A. (2020). Automation of the Manipulator. In *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* (pp. 126-138). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_12
7. Pohudina, O., Kritskiy, D., Koba, S., & Pohudin, A. (2020). Assessing Unmanned Traffic Bandwidth. In *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* (pp. 447-458). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_38
8. Pohudin, A., et al. (2020) Methods and means of the electrothermal arcjet thrusters of spacecraft. *Ukrainian metrological journal* (pp. 24-34).
DOI: 10.24027/2306-7039.1.2020.204197, відповідно до фахового видання України, категорія «А», згідно наказу МОН від 2.07.2020 №886.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

9. Погудин, А. В. (2017) Обоснование выбора среды моделирования электропитания электронагревного двигателя малых космических аппаратов. *Збірник матеріалів конференції “Всеукраїнська науково-технічна конференція Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017”*, (1), 220.
10. Погудин А. В., & Губин С. В. (2017) Обзор характеристик и методов создания группировки малых космических аппаратов 6-я *Международная конференция Космические технологии: настоящее и будущее*, 41.
11. Погудин А. В. Применение космического буксира с электронагревным двигателем для повышения эффективности формирования группировки малых космических аппаратов (2019) 7-я *Международная конференция Космические технологии: настоящее и будущее*, 41.

SUMMARY

Pohudin A.V. Formation of dynamic characteristics of electric ohmic propulsion system. Qualified scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in the specialty 142 "Power Engineering", in the field of knowledge (14 Electrical Engineering) - National Aerospace University. Zhukovsky M. E. "Kharkov Aviation Institute" MES of Ukraine, Kharkov, 2020.

The main results of the study:

The analysis and development of the development of a group of small spacecraft in accordance with their tasks in outer space was carried out. It is found that the use of space tugboat with electric ohmic propulsion system in modern space exploration is a promising task, which includes compliance with the requirements of changing the orbital position, relative to the support, with the permissible mismatch of the angular position of the thrust vector, the time of operation and the restriction on weight according to the purpose. The basic requirement for the formation is the creation of orbital positions of satellites in the group without propulsion systems, with the corresponding Keplerian elements and orbital time. The analysis is based on consideration of the use and application of basic space platforms, which represent the finite set of service subsystems required to perform a specific task in outer space. The most popular among them is the platform under the general term "CubeSat". Formation conditions involve the orbital maneuvering of a space tugboat by means of a propulsion device until reaching a predetermined position and the separation of individual satellites when forming a group. It has been found that when preparing for the start-up and shut-down of the electric propulsion system, it is important that the start-up and shut-down times are related to the thermal dynamics of the preparation of the working fluid with the power supply from the on-board power plant. Thus, the scientific and practical task of reducing the duration of preparation for the launch of the electric heating propulsion system when used on a space tug is relevant.

A glance was made over the capacities of rocket engines during stagnation on a tug boat. It's explained that shifting is possible with a single-stage commercially available tug with a chemical missile thruster, a one-stage commercially available tug with an electric rocket thruster.

An analysis was made of the electric rocket engine and the same vibration during a stowed tug boat, as well as an analysis of the possibility of electric rocket propulsion systems were always on a small spacecraft, so on a tug boat.

The working parameters of the orbit were calculated with the determination of the space of the tugboat by rotation, which made it possible to set the maneuver points, as well as the energy characteristics of the tugboat, which characterize the dependence of the change of altitude and inclination of the orbit on the mass of the space boat and the value of the initial orbital position, which allowed to develop the concept electric ohmic propulsion system in space tugboat.

A mathematical model of the electronic heating installation of a space tug has been scattered, which is a system of differentiation and transmission functions with cob and boundary minds. A numerical model was carried out at the middle of MathLab and a clear decision was made to show the possibility of a forward estimate of the hour the unit was put into operation for an immediate launch before the weekend maneuver. We can see the possibility of realizing the model for the on-board controller of the thruster installation on the Arduino application, using the method introduced by the author of the engine-start-up engine shut-off algorithm.

The adequacy of the model of the electric propulsion plant according to the results of the physical experiment was conducted, which was carried out on the experimental model of concept electric ohmic propulsion system using the bench base SV-10K of the Inter-branch Scientific and Technical Center of Space Energy and Engines of the Department 402 of the National Aerospace University. Zhukovsky M. E. "KhAI".

The methods and experimental means of experimental research of spacecraft electric motors have been improved, namely the method of measuring thrust, the method of measuring the flow of the working fluid, the method of measuring the power supplied to the engine of the engine, the steam generator and the tank, and the method of measuring the vacuum in the chamber.

The analysis of limiting factors in the control of a rocket engine is carried out. An algorithm for controlling a rocket motor is developed based on the simulation of the first start-up of the plant with minimization of preparation time and reduction of the working fluid and energy costs.

Recommendations for the further development and use of the electric propulsion system have been developed.

Scientific novelty of the work:

a) the mathematical model of the process of preparation of the electric heating propulsion system for start-up *is improved*, which is obtained on the basis of mathematical equations describing the dynamic characteristics of the installation, taking into account heat exchange and dynamic characteristics of the power supply system; this model for the first time allowed to perform an analysis of the influence of current factors on the duration of preparation of the electric heating propulsion system for start-up;

b) methods for determining the cost-traction characteristics of the electric heating propulsion system were further developed, which allowed to determine and control the thrust and flow of the working body of the electric heating propulsion system through the use of a strain gauge on a suspension with high sampling and minimum aperture. measurement of working fluid costs, as well as the use of a four-probe method of measuring the used power of the heaters of the propulsion system with high speed.

The practical significance of the results obtained:

a) developed recommendations for the use of electric heating propulsion system, launched in a minimum time, for use on space tugs used to bring groups of small spacecraft by orbital transitions from a predetermined reference orbit to the required orbital positions, these recommendations can be applied to use and increase the quality of projects for the creation of satellite groups in the works of SE "CB" South "" under the space program of Ukraine;

b) the concept of using electric heating propulsion systems on space tugs to bring groups of small spacecraft from the reference orbit to the required orbital positions, which can also be used in these design works;

c) on the basis of the Interdisciplinary Scientific and Technical Center "Space Energy and Engines" developed experimental equipment for measuring the thrust of

the electric motor in a vacuum chamber, as well as devices for measuring the flow of the working fluid and determining the power supplied to the heating elements of the propulsion system;

d) developed an algorithm to prepare for the start of the electric heating propulsion system for the minimum time to reduce the stage of starting the engine taking into account the power supply system of the space tug and testing for implementation on a universal controller combined with experimental electric heating propulsion system.

Keywords: space tugboat, electro rocket propulsion system, electric ohmic propulsion system, onboard propulsion system, electric heating engine, measurement methods.