

Державне підприємство «Конструкторське Бюро «Південне»
ім. М. К. Янгеля»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Спірін Єгор Володимирович

УДК 621.455.4

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ НА МЕТАЛЕВІЙ ПЛАЗМІ З КЕРОВАНОЮ ВАКУУМНОЮ ДУГОЮ

Спеціальність 134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Є. В. Спірін

Науковий керівник: Володимир НАДТОКА,
кандидат технічних наук.

Дніпро 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Спірін Є. В. «Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою» - Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 – «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» (013 – Механічна інженерія) – Державне підприємство «Конструкторське Бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, 2026 р.

Підготовка здійснювалась у виробничо-експериментальному відділі Державного підприємства «Конструкторське Бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Дисертаційна робота відноситься до області ракетно-космічної техніки і спрямована на розробку та дослідження принципів створення електричних ракетних двигунів нового покоління, робота яких заснована на використанні потоків металеві плазми.

Актуальність роботи.

Рушійні установки, які надають імпульс руху ракеті за допомогою хімічних реакцій палива досить потужні та ефективні для забезпечення доступу до космосу із Землі, але недостатньо ефективні для тривалих космічних польотів. Оскільки під час космічних польотів запас енергоносіїв обмежений, електричні двигуни стають все більш затребуваними, тому що електроживлення можна відновлювати за рахунок сонячної енергії, а це означає, що поки є сонячне світло, джерело живлення електричних двигунів не вичерпається.

Значну увагу конструкторів ракетно-космічної техніки привертають плазмові ракетні двигуни, зокрема двигуни на металевій плазмі. Такі ракетні двигуни можуть бути використані для відведення космічного сміття, а також для корекції орбіти нано- та мікросупутників.

Ефективним методом перетворення металу в потоки плазми та їх прискорення є використання електричних розрядів, зокрема вакуумно-дугового розряду. На даний час вакуумно-дугові випарники, в яких метал катоду перетворюється в потоки металеві плазми, широко використовують для нанесення вакуумно-дугових покриттів, а також для покращення фізико-механічних властивостей поверхні деталей, які працюють в екстремальних умовах. Однак, потоки плазми вакуумно-дугового розряду можна використати не тільки для одержання вакуумно-дугових покриттів, але й для створення реактивної тяги.

Вакуумно-дуговий реактивний двигун на металевій плазмі (ВДРДМП) – це новий клас електричних рушійних установок, в яких іонізація металу та прискорення іонів здійснюється в області катодних плям вакуумного дугового розряду за рахунок процесів, які протікають в самому розряді. Такі двигуни можуть працювати без спеціальних систем іонізації та прискорення іонів. Для роботи вакуумно-дугового ракетного двигуна не потрібне газове або рідке ракетне паливо, нейтралізатори, нагрівачі, високовольтна електроніка, сильні електричні або магнітні поля.

В науково-технічній літературі описані різні конструкції електричних ракетних двигунів на металевій плазмі, але основна увага при їх розробці була спрямована на створення імпульсних двигунів малої потужності, які призначені для використання в мікросупутниках. У вказаних ракетних двигунах малої тяги використовуються вакуумно-дугові розряди тривалістю від кількох мікросекунд до кількох мілісекунд. Вказані значення імпульсів зумовлені тим, що в цих конструкціях використовуються індуктивні джерела живлення розряду, або джерела живлення розряду з конденсаторами порівняно невеликої ємності.

Вакуумно-дугові розряди постійного струму або розряди секундної тривалості практично не розглядались для використання в двигунах на металічній плазмі, оскільки для цього необхідні потужні джерела енергії, які можна було б встановлювати на борту космічних апаратів. Нещодавній прогрес у галузі високоефективних сонячних елементів та інших систем енергопостачання (у тому числі

мініатюрних ядерних систем, придатних для використання в ракетно-космічній техніці) відродив інтерес до потужних рушійних систем на основі вакуумно-дугового розряду.

Імпульсні вакуумно-дугові ракетні двигуни розвивають дуже низьку тягу (від одиниць мікроньютонів до одиниць міліньютонів), та мають невелику масу електроду, який використовується для одержання потоку плазми (від одиниць до десятків грамів), тому вони можуть бути використані лише в системах орієнтації наносупутників (маса 1-10 кг) та мікросупутників (маса 10-100 кг).

Протягом останніх кількох років з'явилися публікації, в яких описані електричні ракетні двигуни на металевій плазмі з тягою близько десяти міліньютонів. Такі двигуни мають значно ширший спектр використання. Відомі конструкції таких двигунів включають декілька однакових блоків (від двох до восьми), змонтованих в єдину систему. Кожен блок включає в себе металевий катод та систему електроживлення. Катоди можуть бути циліндричними (діаметр 30-60 мм) або прямокутними (близько 20 x 50 мм) і масою декілька сотень грамів. У зв'язку з тим, що в цих конструкціях двигунів катодні плями вакуумно-дугового розряду переміщуються по поверхні катодів хаотично, ерозія їх поверхні вкрай нерівномірна, що значно знижує можливий ресурс роботи вакуумно-дугового ракетного двигуна. Збільшення площі поверхні катодів приводить до ще більшої нерівномірності ерозії. Ресурс роботи вакуумно-дугових двигунів має велике значення, особливо для тривалих космічних польотів.

Актуальність теми дослідження зумовлена тим, що вакуумно-дугові плазмові двигуни, використання яких в ракетно-космічній техніці стрімко розвивається, мають незначний ресурс роботи. В дисертації досліджені принципи забезпечення рівномірного випаровування катодів вакуумно-дугових двигунів керованим переміщенням катодних плям по поверхні катоду, яке забезпечує підвищення їх ресурсу роботи, що є актуальною проблемою.

Метою дисертаційної роботи є розробка наукових принципів проектування вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою та встановлення залежності реактивної тяги від параметрів розряду при функціонуванні вакуумно-дугового розряду в квазістаціонарному діапазоні тривалості імпульсу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку науково-технічних задач:

1. Провести аналіз рівня розробки реактивних двигунів на металевій плазмі.
2. Визначити принципові шляхи підвищення технічних характеристик вакуумно-дугових плазмових двигунів, у тому числі підвищення їх ресурсу роботи, використання нових типів джерел живлення, використання магнітного поля для керування переміщенням катодних плям дугового розряду, розробка надійних систем ініціювання розряду.
3. Розробити концептуальні схеми та конструкторську документацію на експериментальні реактивні двигуни на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою.
4. Виготовити експериментальні зразки вакуумно-дугових плазмових двигунів з керованою вакуумною дугою, системи їх електроживлення, забезпечити програмування системи керування переміщенням катодних плям, розробити та виготовити експериментальне обладнання для проведення досліджень.
5. Дослідити характеристики вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою при різній напруженості і конфігурації магнітного поля, різних параметрах системи енергоживлення, різних конструкціях катоду, аноду та системи створення магнітного поля.
6. Встановити закономірності впливу параметрів вакуумного дугового розряду (величина розрядного струму, тривалість імпульсу), напруженості та конфігурації магнітного поля на величину реактивної тяги.

7. Розробити рекомендації по створенню вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою.

Об'єкт дослідження: процес створення реактивної тяги за допомогою вакуумно-дугового розряду з керованим переміщенням катодних плям.

Предмет дослідження: експериментальні вакуумно-дугові реактивні двигуни на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою.

Методи дослідження: бібліографічний аналіз науково-технічної літератури, а також інформаційних матеріалів в базах даних та в Інтернеті, гравіметричний метод вимірювання тяги, магнітометричні методи дослідження магнітного поля, електричні вимірювання вольт-амперних характеристик.

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків і списку використаної літератури. Вона містить 128 сторінок машинописного тексту, включає 61 рисунок і 8 таблиць. Список літератури налічує 59 найменувань.

У вступі здійснено обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження, акцентовано увагу на її актуальності, визначено основну мету роботи, сформульовано завдання, що потребують вирішення для досягнення поставлених цілей. Зазначено наукову новизну результатів та практичну значимість роботи.

У першому розділі проведено аналіз літератури за темою дисертаційного дослідження. Проведено аналіз існуючих типів ракетних двигунів малої тяги, зокрема, вакуумно-дугових реактивних двигунів на металевій плазмі та на основі цього аналізу визначені принципові шляхи підвищення технічних характеристик вакуумно-дугових плазмових двигунів. Розглянуто фізичні принципи вакуумно-

дугового розряду та його використання для створення реактивної тяги. Розглянуті відомі конструкції вакуумно-дугових реактивних двигунів та їх системи енергоживлення. Висвітлені проблемні питання вакуумно-дугових двигунів та напрями їх вирішення.

У другому розділі описане експериментальне обладнання та методика проведення досліджень. Приведені характеристики вакуумного експериментального стенду та розробленого додаткового оснащення для проведення досліджень. Описане розроблене електрообладнання для живлення вакуумно-дугового двигуна, вибір методу програмування системи керування переміщенням катодних плям вакуумно-дугового розряду по поверхні катода та система вимірювання та реєстрації параметрів вакуумно-дугових плазмових двигунів.

У третьому розділі викладені результати розробки та дослідження експериментального вакуумно-дугового плазмового двигуна з керованою дугою з дисковим катодом. Приведена концептуальна схема двигуна з дисковим катодом та конструкція розробленого експериментального двигуна з дисковим катодом, викладені результати дослідження магнітної системи керування катодними плямами дугового розряду та експериментальні результати дослідження параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна з керованою дугою з дисковим катодом.

У четвертому розділі викладені результати розробки та дослідження експериментального вакуумно-дугового двигуна з керованою дугою зі спіральним катодом. Приведена концепція створення двигуна зі спіральним катодом та розглянуто кілька варіантів його концептуальних конструкцій. Описана конструкція розробленого експериментального двигуна з керованою дугою зі спіральним катодом. Приведені експериментальні результати дослідження параметрів вакуумно-дугового двигуна з керованою дугою зі спіральним катодом.

У п'ятому розділі викладені рекомендації по розробці вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою дугою та рекомендації щодо систем енергозабезпечення для їх коректної роботи.

Наукова новизна результатів, отриманих автором, полягає у наступному:

1. **Вперше запропоновано та науково обґрунтовано принцип організації робочого процесу у вакуумно-дугових двигунах шляхом програмованого примусового переміщення катодних плям по складних спіральних траєкторіях на дискових та спіральних катодах, що, на відміну від традиційних схем, забезпечує керовану інтегральну ерозію всієї поверхні катода та підвищення його експлуатаційного ресурсу.**

2. **Удосконалено фізико-технічні підходи до керування траєкторією руху катодних плям, а саме: за рахунок комбінованого магнітного поля (соленоїда та постійного магніту) для дискових катодів та за рахунок використання топології власного магнітного поля розряду для спіральних катодів. Це дозволило реалізувати замкнені та саморегульовані цикли переміщення зони генерації плазми.**

3. **Дістали подальшого розвитку уявлення про взаємозв'язок між електрофізичними параметрами дугового розряду та інтегральними тяговими характеристиками вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі, що дозволило встановити аналітичні залежності величини тяги від динаміки струму у вакуумно-дуговому розряді.**

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Створено вакуумний стенд, який включає в себе системи електроживлення вакуумно-дугових двигунів, системи управління переміщенням катодних плям, які реалізовані на програмованому логічному контролері LOGO! 0BA8 M 24CE фірми Siemens та систему реєстрації параметрів роботи двигунів.

2. Розроблені, виготовлені та випробувані експериментальні зразки двигунів з керованою вакуумною дугою з дисковим та спіральним катодами.

3. На основі проведених досліджень розроблено практичні рекомендації для інженерної розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів з керованою вакуумною дугою та систем їх електроживлення.

4. Експериментально досліджено закономірності переміщення траєкторії катодних плям вакуумно-дугового розряду за допомогою керованого змінного магнітного поля арочної конфігурації.

Результати роботи прийнято до використання у ДП «КБ «Південне», підготовлена заявка на винахід (заявка № П27-1 від 20.04.2026 р.).

Основні наукові результати дисертаційної роботи **опубліковано** у 6 наукових працях, зокрема у 3 наукових статтях, з яких 3 статті опубліковано у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б», та у матеріалах 3 наукових конференцій.

Ключові слова: ракетно-космічна техніка, реактивний двигун малої тяги, космічний апарат, космічне сміття, електричний ракетний двигун, вакуумно-дуговий розряд, плазма, магнітне поле, вакуумна камера, випарник, вакуумно-дугові покриття, фізико-механічні властивості, ракетне паливо, програмування, поверхня.

ABSTRACT

Spirin, Ye. V. *Development and Research of Metal-Plasma Jet Engines with Steered Vacuum Arc*. Qualification scientific paper in the form of a manuscript.

Dissertation for a degree of Doctor of Philosophy in specialty 134 – Aviation, Rocketry, and Space Technology (013 – Mechanical Engineering), Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, 2026.

The practical work took place in a manufacturing and testing department of Yuzhnoye SDO.

The dissertation concerns the field of rocket and space technology and aims at the development and investigation of design principles for new-generation electric rocket engines that operate using metal plasma flows.

Research Relevance

Chemical rocket propulsion systems, which move rockets using chemical reactions of propellants, generate enough power and thrust to ensure rocket launch from Earth into space, but not to sustain long-term spaceflights. Since the energy capacity during spaceflights is limited, interest in electric engines is rising because power supply can be restored using solar energy, which means that as long as there is sunlight, the power source for electric engine will not run out.

Rocketry and space technology engineers pay great attention to plasma rocket engines, especially metal plasma engines. Such rocket engines can operate in spacecraft intended to remove space debris, and serve as orbit correction thrusters on nano- and microsatellites.

Electric discharges, especially vacuum arc discharges, are effective in transforming metal into plasma and accelerating it. Contemporary vacuum arc evaporators, where the cathode metal is converted into metal plasma flows, are frequently used for applying vacuum arc coatings and improving the physical and mechanical properties of the surfaces of parts operating in extreme environments.

However, plasma flows produced by vacuum arc discharges not only can provide vacuum arc coatings, but also generate jet thrust.

A vacuum arc thruster that uses metal plasma (Vacuum Arc Thruster, VAT) is a new class of electric propulsion systems, where metal ionization and ion acceleration occur within the cathode spot region of a vacuum arc discharge due to the processes within the discharge itself. Such engines can operate without special ionization and ion acceleration systems. A vacuum arc rocket engine does not require gas or liquid rocket propellant, neutralizers, heaters, high-voltage electronics, or strong electric or magnetic fields for operation.

Scientific and technical literature describes various designs of electric rocket engines that use metal plasma. However, development efforts concentrated chiefly on the creation of low-power pulsed engines intended for microsatellites. These thrusters use vacuum arc discharges that last a few microseconds to several milliseconds. These pulse durations result from the fact that the mentioned designs use inductive discharge power sources or discharge power sources with capacitors of relatively small capacitance.

Vacuum arc discharges of direct current or second-lasting discharges were almost out of consideration for operation in metal plasma engines, as they require powerful energy sources to be installed on spacecraft. Recent progress in the field of high-efficiency solar cells and other power supply systems, including miniature fusion systems suitable for use on space vehicles) has revived interest in powerful propulsion systems based on a vacuum arc discharge.

Pulsed vacuum arc rocket engines generate a very low thrust (from units of micronewtons to units of millinewtons), and their electrode mass (from units to tens of grams) is insufficient to generate plasma flow. Therefore, they are suitable only for attitude systems of nanosatellites weighing up to 10 kilograms and microsatellites with a mass of 10 to 100 kilograms.

Over the past few years, a number of publications have described metal-plasma electric rocket engines that produce thrust of about ten millinewtons. Such engines

feature a much wider range of application. Their design includes several (from two to eight) identical blocks that are integrated into a single system. Each block consists of a metal cathode and a power supply system. Cathodes can be cylindrical (30 to 60 mm in diameter) or rectangular (about 20×50 mm). Their weight may reach several hundred grams. In these engine designs, the cathode spots of a vacuum arc discharge move chaotically along the surface of the cathodes. Therefore, the erosion of their surface is extremely uneven, which significantly reduces the potential service life of a vacuum arc rocket engine. An increased cathode surface area results in even greater non-uniformity of erosion. The operating lives of vacuum arc engines is of great importance, especially for long spaceflights.

The subject of this paper is relevant because the operating lives of vacuum arc plasma engines are short, and their applications in space technologies are rapidly expanding. The dissertation investigates the principles of ensuring uniform evaporation of vacuum arc engine cathodes via the steered motion of cathode spots on the cathode surface, increasing their service lives, which is a topical problem.

The purpose of the dissertation is to develop scientific principles for designing vacuum arc metal plasma engines with a steered vacuum arc, as well as to investigate the relation between the reactive thrust and the parameters of a discharge in a quasi-stationary pulse duration range.

To achieve this goal, it is necessary to address a number of scientific and technical problems:

1. Analyze the technology maturity level of metal plasma jet engines.
2. Determine principal ways to enhance the performance parameters of vacuum arc plasma engines, especially their service life, as well as ways to use new types of power sources, use the magnetic field, control the arc discharge duration, and develop reliable discharge initiation systems.
3. Develop conceptual diagrams and design documentation for the prototypes of metal plasma jet engines with a steered vacuum arc.

4. Manufacture prototypes of vacuum arc plasma engines with a steered vacuum arc, along with prototypes of their power supply systems, provide software for the cathode spot movement control system, develop test equipment for research activities, and manufacture it.

5. Investigate the characteristics of metal-plasma vacuum arc engines with a steered vacuum arc at different magnetic field strengths and configurations, power supply system's parameters, designs of the cathode, anode, and magnetic field generation system.

6. Determine relations between vacuum arc discharge parameters, such as the discharge current magnitude and pulse duration, the magnetic field strength and configuration, and the thrust value.

7. Formulate recommendations for the design of metal-plasma vacuum arc engines with a steered vacuum arc.

Object of Research: The process of jet thrust generation using a vacuum arc discharge and the steered motion of cathode spots.

Subject of Research: The prototypes of metal-plasma vacuum arc jet engines with a steered vacuum arc.

Research Methods: Bibliographic analysis of scientific and technical literature, along with publications in databases and on the Internet; gravimetric methods of thrust measurement; magnetometric methods for magnetic field research; and electrical measurements of voltage and current.

Structure and Scope of the Dissertation

The dissertation includes an introduction, five sections, conclusions, and a list of references. It consists of 128 pages of typewritten text and contains 61 figures and 8 tables. The list of references is composed of 59 bibliography entries.

The introduction justifies the choice of the dissertation research topic, emphasizes its relevance, defines the paper's primary aim, sets out the tasks to be accomplished to achieve the goals, and indicates the scientific novelty of the results and the practical significance of the paper.

The first section reviews the literature on the dissertation's topic. The section provides an analysis of the existent types of rocket thrusters, specifically the metal-plasma vacuum arc jet engines, and determines the primary approaches to improving performance parameters of vacuum arc plasma engines based on this analysis. The physical principles and usage of a vacuum arc discharge for generating jet thrust are analyzed. The known designs of vacuum arc jet engines and their power supply systems are reviewed. Issues concerning vacuum arc engines are highlighted, along with possible solutions.

The second section describes the equipment and methodology of testing, including the characteristics of the vacuum test rig and additional equipment specifically developed for testing. The section also provides information about the developed electrical equipment for powering the vacuum arc engine, the selected method of control system programming for directing the motion of the cathode spots produced by the vacuum arc discharge on the cathode surface, and the system for measuring and recording the parameters of vacuum arc plasma engines.

The third section outlines the results of the development and testing of a prototype vacuum arc plasma engine with a steered vacuum arc and a disk cathode. The conceptual diagram of an engine with a disk cathode and the design of the developed prototype engine with a steered vacuum arc and a disk cathode are presented. The results of studying the magnetic control system for the cathode spots of the arc discharge are outlined, along with the test results for the parameters of the vacuum arc plasma engine with a steered vacuum arc and a disk cathode.

The fourth section presents the results of the development and investigation of a prototype vacuum arc engine with a steered vacuum arc and a spiral cathode. The section describes the concept of an engine with a steered vacuum arc and a spiral

cathode and suggests several variants of its conceptual design. Additionally, it outlines the configuration of the developed prototype engine with a spiral cathode and discusses the test results for the parameters of the vacuum arc engine with a steered vacuum arc and a spiral cathode.

The fifth section provides recommendations for the development of metal-plasma vacuum arc engines with a steered vacuum arc, along with recommendations concerning power supply systems to ensure the engines' proper functioning.

The scientific novelty of the research results lies in the following:

1. For the first time, the principle of organizing the functioning of a metal-plasma vacuum arc engine by programming the forced motion of cathode spots along complex spiral trajectories on the disk and spiral cathodes is proposed and scientifically justified. Unlike conventional designs, the principle suggested in this paper ensures controlled integral erosion over the cathode's surface and increases its operating life.

2. The physical and technical approaches to controlling the trajectory of cathode spots have been improved, specifically by introducing a combined magnetic field, generated by a solenoid and a permanent magnet, for disk cathodes, as well as by employing the topology of the discharge's natural magnetic field for spiral cathodes. It enabled closed self-regulating cycles of motion for the plasma generation region.

3. The relation between the electrophysical parameters of an arc discharge and the integral thrust characteristics of metal-plasma vacuum arc engines has become more deeply understood, which has enabled determining analytical dependencies of the thrust magnitude on the electrical current dynamics in a vacuum arc discharge.

The practical significance of the results is as follows:

1. The vacuum test rig has been designed. It includes power supply systems for vacuum arc engines, systems to control cathode spot motion, which are implemented on a Siemens LOGO! 0BA8 M 24CE programmable logic controller and a system for registering engine performance parameters.

2. Prototypes have been developed, manufactured, and tested for vacuum arc plasma thrusters with a steered vacuum arc, featuring disk and spiral cathodes.

3. Based on the conducted research, recommendations for developing the vacuum arc plasma engines with a steered vacuum arc and power supply systems were formulated.

4. The regularities for the motion trajectories of a vacuum arc discharge's cathode spots have been experimentally investigated using an arc-shaped controlled alternating magnetic field.

The results of the work were implemented at Yuzhnoye State Design Office, and an application for an invention was filed (application No. P27-1 dated April 20, 2026).

The primary scientific results of the dissertation **have been published** in six publications, specifically in three scientific papers in Ukrainian professional scholarly journals (Category B) and in collections of materials of three scientific conferences.

Keywords: rocketry and space technologies, jet thruster, spacecraft, space debris, electric rocket engine, vacuum arc discharge, plasma, magnetic field, vacuum chamber, evaporator, vacuum arc coatings, physical and mechanical properties, rocket propellant, programming, surface.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Публікації у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукових баз даних:

1. Спірін, Є., Надтока, В. (2024). Дослідження магнітного поля електро-дугового реактивного двигуна на металевій плазмі. Журнал ракетно-космічних технологій, 33 (4-28), 45-48. <https://doi.org/10.15421/452423>.
2. Спірін Є. В., Надтока В. М. Електричні реактивні двигуни на металевій плазмі. Космічна техніка. Ракетне озброєння 2025. Вип. 2 (123). 24-34. <https://doi.org/10.33136/stma2025.02.024>.
3. Спірін Є. В. Розробка та дослідження вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі. Технічна механіка, № 2, 2026, 69-78. <https://doi.org/10.15407/itm2026.02.069>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Спірін Є. В., Бондар М. А., Надтока В. М., Безуглий В. Ф., Кріпак І. Ю., Лейтер І. М. Стенди для випробувань виробів ракетно-космічної техніки в умовах високого вакууму. – Тези доповідей на 7-й Міжнародній конференції «Космічні технології: сьогодення та майбутнє», 21-24 травня 2019 р., м. Дніпро, с. 43.
2. Спірін Є. В. Електрореактивний двигун малої тяги з використанням електродугового розряду. – Тези XXV Міжнародної конференції «Людина і космос», 12-14 квітня 2023 р., м. Дніпро, с. 50-51.
3. Спірін Є. В., Надтока В. М. Дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі. – Тези XXV Міжнародної конференції «Людина і космос», 17-19 квітня 2024 р., м. Дніпро, с. 90-91. DOI.ORG/10.62717/2221-4550-2024-1-041

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОРЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ	27
1.1. Огляд фізичних принципів роботи електрореактивних двигунів....	27
1.2. Електричні реактивні двигуни на металевій плазмі.....	29
1.3. Вакуумно-дуговий розряд та його використання для створення реактивної тяги.....	30
1.3.1. Фізичні основи вакуумного дугового розряду	30
1.3.2. Катодні струмені вакуумно-дугового розряду	32
1.3.3. Реактивна сила потоків плазми з області катодних плям.....	33
1.3.4. Методи керування переміщенням катодних плям по поверхні катода	34
1.4. Конструкції вакуумно-дугових реактивних двигунів	37
1.5. Системи енергозабезпечення вакуумно-дугових двигунів	48
1.6. Взаємозв'язок матеріалу катода та параметрів електродугового двигуна	52
1.7. Проблеми вакуумно-дугових двигунів та напрями підвищення їх експлуатаційних характеристик	55
Висновки до розділу 1	59
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	61
2.1. Вакуумний експериментальний стенд.....	61
2.2. Електрообладнання для живлення вакуумно-дугового двигуна	64
2.2.1. Система енергозабезпечення вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі.....	64

2.2.2. Система управління роботою експериментальних вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі.....	66
2.3. Система вимірювання та реєстрації параметрів вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі.....	68
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДВИГУНА З ДИСКОВИМ КАТОДОМ....	
3.1. Концептуальна схема двигуна з дисковим катодом.....	72
3.2. Розробка експериментальної конструкції двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм.....	75
3.3. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом 95 мм	78
3.4. Розробка двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм	79
3.5 Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм	82
Висновки до розділу 3	88
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ДВИГУНА ЗІ СПІРАЛЬНИМ КАТОДОМ .	
4.1. Концептуальна схема двигуна зі спіральним катодом	89
4.2. Розробка конструкції двигуна зі спіральним катодом.....	98
4.3. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм.....	99
4.4. Розробка двигуна зі спіральним катодом діаметром 280 мм	101
4.5. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 280 мм.....	103
4.6. Варіант спірального катоду прямокутної форми	109
Висновки до розділу 4	111
РОЗДІЛ 5. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА СИСТЕМ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДВИГУНІВ З КЕРОВАНОЮ ВАКУУМНОЮ ДУГОЮ....	
	112

5.1. Порівняння переваг та недоліків вакуумно-дугових плазмових двигунів з дисковим та спіральним катодами.....	112
5.2. Загальні рекомендації щодо розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів.....	115
5.2.1. Системи електроживлення.....	115
5.2.2. Матеріал катода.	116
5.2.3. Матеріал анода.....	117
5.2.4. Пристрій ініціювання дугового розряду	117
5.3. Особливості розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом	117
5.3.1. Екрани для гасіння дугового розряду.....	117
5.3.2. Зазор між витками спірального катода	118
5.3.3. Розташування кабелю між струмовідводом спірального катода та джерелом живлення.	118
Висновки до розділу 5	119
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	120
Список використаної літератури	122

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕРДМП	– Електричний реактивний двигун на металевій плазмі
ВДРДМП	– Вакуумно-дуговий реактивний двигун на металевій плазмі
ВДРД	– Вакуумно-дуговий ракетний двигун
ВДД	– Вакуумно-дуговий двигун
ЕДРД	– Електродуговий ракетний двигун
ТМН	– Турбомолекулярний насос
ФВН	– Форвакуумний насос
VAT	– Vacuum Arc Thruster
ПЛК	– Програмований логічний контролер (англ. programmable logic controller (PLC))

ВСТУП

Актуальність роботи.

Для корегування положення супутників необхідні реактивні двигуни, які розвивають невелику тягу (величиною до десятка міліньютонів), але мають великий ресурс роботи та високу надійність. Для двигунів на рідкому або газоподібному паливі необхідні резервуари, електромагнітні клапани та трубопроводи. Це збільшує габарити і масу супутників, ускладнює їх систему керування та ставить жорсткі вимоги до герметичності резервуарів для забезпечення тривалої роботи.

Електричні реактивні двигуни на металевій плазмі в якості палива використовують метал, який має значно менший об'єм, ніж рідина та газ. Ефективним методом перетворення металу в потоки плазми та їх прискорення є використання електричних розрядів, зокрема вакуумно-дугового розряду. Вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі (Vacuum Arc Thruster, VAT) – це новий клас електричних рушійних установок, в яких іонізація металу та прискорення іонів здійснюється в області катодних плям вакуумного дугового розряду за рахунок процесів, які протікають в самому розряді. Такі двигуни можуть працювати без спеціальних систем іонізації та прискорення іонів. Для роботи вакуумно-дугового двигуна не потрібне газове або рідке ракетне паливо, нейтралізатори, нагрівачі, високовольтна електроніка, сильні електричні або магнітні поля.

В науково-технічній літературі описані різні конструкції електричних ракетних двигунів на металевій плазмі, але основна увага при їх розробці була спрямована на створення імпульсних двигунів малої потужності, які призначені для використання в мікросупутниках. У вказаних двигунах використовуються дугові розряди тривалістю від кількох мікросекунд до кількох мілісекунд. Вказані значення імпульсів зумовлені тим, що в цих конструкціях використовуються індуктивні джерела живлення розряду, або джерела живлення розряду з конденсаторами порівняно невеликої ємності.

Вакуумно-дугові розряди постійного струму або розряди секундної тривалості практично не розглядались для використання в двигунах на металічній плазмі, оскільки для цього необхідні потужні джерела енергії, які можна було б встановлювати на борту космічних апаратів. Нещодавній прогрес у галузі високоефективних сонячних елементів та інших систем енергопостачання (у тому числі мініатюрних ядерних систем, придатних для використання в ракетно-космічній техніці) відродив інтерес до потужних рушійних систем на основі вакуумно-дугового розряду.

Імпульсні вакуумно-дугові реактивні двигуни розвивають дуже низьку тягу (від одиниць мікроньютонів до одиниць міліньютонів), та мають невелику масу електроду, який використовується для одержання потоку плазми (від одиниць до десятків грамів), тому вони можуть бути використані лише в системах орієнтації наносупутників (маса 1-10 кг) та мікросупутників (маса 10-100 кг).

Протягом останніх кількох років з'явилися публікації, в яких проведені дослідження електричних ракетних двигунів на металевій плазмі з тягою близько десяти міліньютонів [36-38]. Такі двигуни мають значно ширший спектр використання. Відомі конструкції таких двигунів включають декілька однакових блоків (від двох до восьми), змонтованих в єдину систему. Кожен блок включає в себе металевий катод та систему електроживлення. Катоди можуть бути циліндричними (діаметр 30-60 мм) або прямокутними (близько 20 x 50 мм) і масою декілька сотень грамів. Ресурс роботи вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі МРТ4.3-001 [38], в якому встановлено шість катодів вагою по 120 г, становить 7,2 години. З загальної маси катодів (720 г) до закінчення ресурсу роботи використано 158,4 г, тобто коефіцієнт використання матеріалу катоду становить 0,22. Низький коефіцієнт використання матеріалу катоду пов'язаний з тим, що в цих конструкціях двигунів катодні плями вакуумно-дугового розряду переміщуються по поверхні катодів хаотично, ерозія їх поверхні вкрай нерівномірна, що значно знижує можливий ресурс роботи двигуна. Збільшення площі поверхні катодів приводить до ще більшої нерівномірності ерозії. Ресурс роботи вакуумно-

дугових двигунів має велике значення, особливо для тривалих космічних польотів.

В дисертації досліджені принципи забезпечення рівномірного випаровування катодів вакуумно-дугових двигунів керованим переміщенням катодних плям по поверхні катоду, яке забезпечує підвищення їх ресурсу роботи, що є актуальною проблемою.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка наукових принципів проектування вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою та встановлення залежності реактивної тяги від параметрів розряду при функціонуванні вакуумно-дугового розряду в квазістаціонарному діапазоні тривалості імпульсу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку наступних науково-технічних задач:

1. Провести аналіз рівня розробки реактивних двигунів на металевій плазмі.
2. Визначити принципові шляхи підвищення технічних характеристик вакуумно-дугових плазмових двигунів, у тому числі підвищення їх ресурсу роботи, використання нових типів джерел живлення, використання магнітного поля для керування переміщенням катодних плям дугового розряду, розробка надійних систем ініціювання розряду.
3. Розробити концептуальні схеми та конструкторську документацію на експериментальні реактивні двигуни на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою.
4. Виготовити експериментальні зразки вакуумно-дугових плазмових двигунів з керованою вакуумною дугою та системи їх електроживлення, забезпечити програмування системи керування переміщенням катодних плям, розробити та виготовити експериментальне обладнання для проведення досліджень.

5. Дослідити характеристики вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою при різній напруженості і конфігурації магнітного поля, різних параметрах системи енергоживлення, різних конструкціях катоду, аноду та системи створення магнітного поля.
6. Встановити закономірності впливу параметрів вакуумно-дугового розряду (величина розрядного струму, тривалість імпульсу), напруженості та конфігурації магнітного поля на величину реактивної тяги.
7. Сформулювати рекомендації по створенню вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою.

Методи дослідження

Бібліографічний аналіз науково-технічної літератури, а також інформаційних матеріалів в базах даних та в Інтернеті, гравіметричний метод вимірювання тяги, магнітометричні методи дослідження магнітного поля, електричні вимірювання вольт-амперних характеристик розряду.

Наукова новизна отриманих результатів

1. **Вперше запропоновано та науково обґрунтовано** принцип організації робочого процесу у вакуумно-дугових двигунах шляхом програмованого примусового переміщення катодних плям по складних спіральних траєкторіях на дискових та спіральних катодах, що, на відміну від традиційних схем, забезпечує керовану інтегральну ерозію всієї поверхні катода та підвищення його експлуатаційного ресурсу.
2. **Удосконалено фізико-технічні підходи** до керування траєкторією руху катодних плям, а саме: за рахунок комбінованого магнітного поля (соленоїда та постійного магніту) для дискових катодів та за рахунок використання топології власного магнітного поля розряду для спіральних катодів. Це дозволило реалізувати замкнені та саморегульовані цикли переміщення зони генерації плазми.

3. Дістали подальшого розвитку уявлення про взаємозв'язок між електрофізичними параметрами дугового розряду та інтегральними тяговими характеристиками вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі, що дозволило встановити аналітичні залежності величини тяги від динаміки струму у вакуумно-дуговому розряді.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Створено вакуумний стенд, який включає в себе системи електроживлення вакуумно-дугових двигунів, системи управління переміщенням катодних плям, які реалізовані на програмованому логічному контролері LOGO! 0BA8 M 24CE фірми Siemens та систему реєстрації параметрів роботи двигунів.

2. Розроблені, виготовлені та випробувані експериментальні зразки двигунів з керованою вакуумною дугою з дисковим та спіральним катодами.

3. На основі проведених досліджень сформульовані рекомендації для інженерної розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів з керованою вакуумною дугою та їх систем електроживлення. Результати роботи прийнято до використання у ДП «КБ «Південне», підготовлена заявка на винахід (заявка № П27-1 від 20.04.2026 р.).

4. Експериментально досліджено закономірності переміщення траєкторії катодних плям вакуумно-дугового розряду за допомогою керованого змінного магнітного поля арочної конфігурації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОРЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

1.1. Огляд фізичних принципів роботи електрореактивних двигунів

Зазвичай в ракетно-космічній техніці використовуються хімічні рушійні установки, які надають імпульс руху ракеті за допомогою хімічних реакцій в рідкому або твердому паливі. Вони досить потужні та ефективні для забезпечення доступу до космосу із Землі, але недостатньо ефективні для тривалих космічних польотів.

На даний час крім хімічних рушійних установок відомі електричні, ядерні та кілька видів екзотичних рушійних установок (фотонні, лазерні та інші). Оскільки під час космічних польотів запас енергоносіїв обмежений, електричні двигуни стають все більш затребуваними, тому що електроживлення можна відновлювати за рахунок сонячної енергії, а це означає, що поки є сонячне світло, джерело живлення електричних двигунів не вичерпається. До того ж, ракетне паливо електродвигунів, порівняно з хімічним рідинним або твердим паливом, має менший розмір. Вид використовуваного палива в електродвигунах залежить від типу двигуна, цим паливом може бути інертний газ, органічні та неорганічні тверді або рідкі матеріали, зокрема рідкий або твердий метал. Більше того, відпрацьоване паливо викидається з електричного двигуна в двадцять разів швидше, ніж з традиційного двигуна, що працює на хімічному паливі і, тому вся система в плані маси більш досконала. Електричний двигун у порівнянні з іншими рушійними установками споживає мізерно малу кількість енергії, але при цьому може забезпечувати невелику тягу тривалий час.

Електричними двигунами називають двигуни, в яких для розгону робочого тіла використовується електрична енергія [1,2]. На даний час розроблено низку електричних рушійних установок, що використовують різні фізичні процеси для

створення реактивної тяги [1-5]. Електричні рушійні установки мають дуже високі питомі імпульси, що досягають тисяч секунд і тягу від мікроньютонів до десятка ньютонів [6].

Електричні рушійні установки складаються з джерела живлення, ракетного палива, блоку управління і самого двигуна. Більшість електричних рухових установок генерує плазму для створення тяги. Як паливо в них використовується газ (наприклад, ксенон) або твердий матеріал (наприклад, тефлон). Плазма може генеруватися за допомогою електричної дуги (імпульсний плазмовий ракетний двигун малої тяги), високочастотних полів (електростатичний ракетний двигун з високочастотною іонізацією) або іонізацією газу потоком електронів в електричних і магнітних полях. Відомо багато різних типів іонно-плазмових, або іонних електрореактивних двигунів, що містять контейнер із запасом робочого тіла, камеру іонізації робочого тіла, прискорювач руху іонів та нейтралізатор заряду для створення магнітного поля [7,8].

Крім інертних газів, в електричних ракетних двигунах як ракетне паливо використовують метали - цезій, ртуть, вісмут, цинк, олово, магній, галій, йод та інші. Перспективним паливом може бути йод, який можна зберігати у твердому вигляді і при нагріванні він відразу ж перетворюється на газ.

Зазвичай в електричних ракетних двигунах використовують металевий пар, який одержують шляхом нагріву металу до високих температур, потім їх іонізують та прискорюють спеціальними пристроями.

Однак більш ефективним є метод, в якому метал переводиться в плазмовий стан та прискорюється за допомогою електричного розряду, наприклад за допомогою вакуумно-дугового розряду. Вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі (Vacuum Arc Thruster, VAT) – це новий клас електричних рушійних установок, в яких іонізація металу та прискорення іонів здійснюється в області катодних плям вакуумного дугового розряду за рахунок процесів, які протікають в самому розряді. Такі двигуни можуть працювати без спеціальних систем іонізації та прискорення іонів. Для роботи вакуумно-дугового двигуна не потрібне газове

або рідке паливо, нейтралізатори, нагрівачі, високовольтна електроніка, сильні електричні або магнітні поля. У двигунах на металевій плазмі для створення потоку плазми використовується метал, тому їх конструкція дуже компактна. Оскільки матеріал катоду знаходиться у твердій фазі, то не може бути втрат палива внаслідок його витоків. Такі двигуни не загрожують космічному апарату можливим вибухом резервуара, що знаходиться під тиском. Крім того, відсутні клапани та датчики витрат (компоненти які підвищують складність та вартість системи). Такі двигуни використовують для видалення космічного сміття та корекції орбіти супутників.

Необхідно відзначити, що назви «електродугові ракетні двигуни (ЕДРД)», яка зустрічається в літературі минулих років, та «вакуумно-дугові ракетні двигуни (ВДРД)» відрізняються різними фізичними процесами, що відбуваються під час передачі енергії робочій речовині. В ЕДРД проводиться нагрівання робочого газу дуговим розрядом, що горить у цьому газі. Це дозволяє збільшити температуру робочого газу і, отже, потужність та питомий імпульс ЕДРД. У ВДРД дуговий розряд розвивається в іонізованих парах металу, потік яких створюється в катодних плямах, що переміщуються на поверхні металу.

1.2. Електричні реактивні двигуни на металевій плазмі

Електричні рушійні установки, засновані на розрядах дуги постійного струму, є одними з найбільш перспективних кандидатів для потужних силових установок, здатних приводити в рух великі космічні кораблі, необхідні для великомасштабного дослідження віддалених планет. Оскільки ці установки вимагають потужних джерел енергії, їх розробка досі істотно обмежувалася відсутністю відповідних систем енергопостачання, які можна було б встановлювати на борту космічних апаратів. Нещодавній прогрес у галузі вискоефективних сонячних елементів та інших систем енергопостачання (у тому числі мініатюрних ядерних

систем, придатних для використання в космосі) відродив інтерес до потужних систем на основі вакуумної дуги.

Відносно малі розміри і низька середня споживана потужність вакуумно-дугових двигунів зробили їх найбільш перспективними для використання в кубсатах. Такі двигуни мають ряд переваг перед іншими двигунами для малих супутників. Через те, що такі двигуни працюють в імпульсному режимі, вони виробляють в певних межах керовану тягу і, в залежності від призначення космічного польоту, можуть використовуватися в основній системі двигунів, або в системі позиціонування або регулювання положення супутника на орбіті. Контролюючи частоту вмикання двигунів, можна легко керувати космічним літальним апаратом.

Ідея застосування цих двигунів на космічних станціях була висловлена ще в 1966 році [9] і обговорювалася багатьма дослідниками. Були також висловлені пропозиції щодо застосування цих двигунів для виконання більш складних космічних операцій, включаючи зближення з іншими космічними літальними апаратами і стикування з ними, виконання маневрів з метою зміни орбіти, а також при польоті на Місяць.

1.3. Вакуумно-дуговий розряд та його використання для створення реактивної тяги

1.3.1. Фізичні основи вакуумного дугового розряду

Існують два основні види вакуумно-дугового розряду - з холодним та гарячим (розжареним) катодами. У першому випадку емісія електронів для підтримки розряду забезпечується плазмою катодних плям, через яку проходить весь струм розряду, у другому відбувається термоемісія з нагрітого до високої температури катоду. У світовій літературі саме розряд з холодним катодом називають вакуумно-дуговим розрядом.

Вакуумна дуга – це розряд, що виникає в парах металу, утворених з матеріалу катоду в міжелектронному проміжку у вакуумному середовищі [11]. Вакуумно-дугові розряди детально описані в декількох публікаціях [11-15]. Катодна дугова плазма в довколишній зоні поверхні катода має назву катодно-дугових плям. У зоні розряду щільності струму складають від 10^8 до 10^{12} А/м² [11]. Катодні плями мають нестійкий характер при часі їх існування від наносекунд до мікросекунд. Нові катодні плями зазвичай виникають близько раніше існуючих катодних плям, де умови запалення найбільш сприятливі.

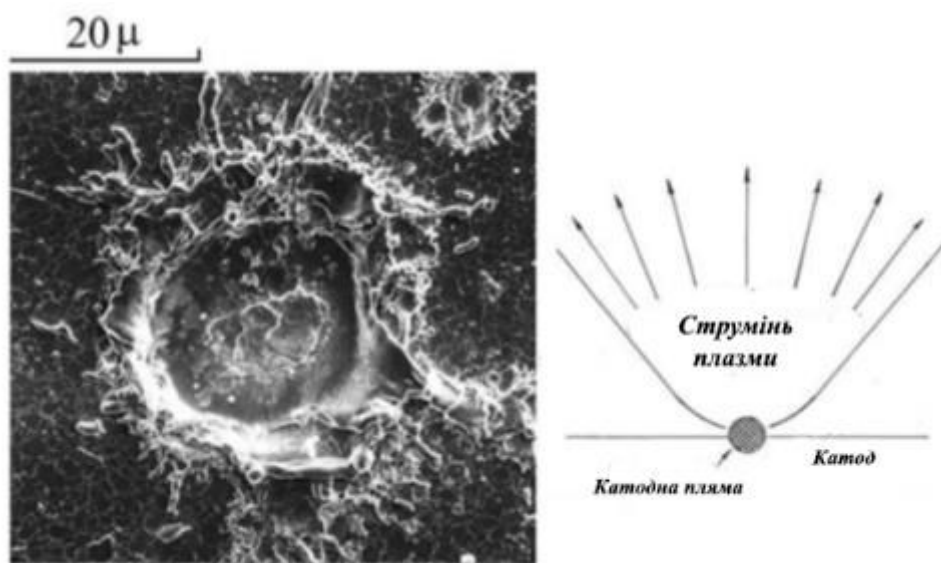


Рисунок 1.1 Катодна пляма вакуумно-дугового розряду та схема розльоту плазми з поверхні катоду

На рисунку 1.1 приведена фотографія катодної плями вакуумно-дугового розряду та схема розльоту плазми з поверхні катоду [55]. Дуговий розряд викликає ерозію поверхні катода, внаслідок чого утворюються іони, а також дрібні крапельки, що мають назву макрочасток. Іони, що створюються в області катодних плям, мають виключно високу енергію і ця енергія не залежить від величини струму розряду. Швидкість іонів також майже не залежить від величини заряду іона для цього металу. Величина швидкості іонів буде різною для різних матеріалів катоду і складає близько 10^4 м/с. Емітована з катодних плям плазма має дуже високу густину, що досягає до 10^{26} м⁻³ у безпосередній близькості від катодної

плями і близько 10^{20} м^{-3} на відстані в декілька міліметрів від нього [11]. Крім того, іони зазвичай багатозарядні, наприклад, 2^+ і 3^+ . Інтенсивність емісії макрочасток залежить від матеріалу катоду, а також від тривалості імпульсу. Матеріали з високою температурою плавлення, як наприклад, тугоплавкі матеріали, дають дуже мало макрочасток.

Технологія вакуумно-дугових розрядів сьогодні використовується для промислового застосування, наприклад, нанесення вакуумно-дугових покриттів за допомогою випарників, імплантації іонів у поверхню виробів для підвищення їх фізико-механічних властивостей, плазмо-хімічного осадження тонких плівок нітридів, карбідів та оксидів.

Менш відомий той факт, що технологія вакуумно-дугового розряду також може бути використана як засіб забезпечення тяги для невеликих супутників завдяки реактивній силі, яка виникає при викиді потоку плазми з області катодних плям дугового розряду.

1.3.2. Катодні струмені вакуумно-дугового розряду

Плазмові струмені, що викидаються катодною плямою, складаються з електронів, іонів, нейтральних атомів та крапель матеріалу катода. Кількість матеріалу в плазмових струменях залежить від заряду, що пройшов через катодну пляму, матеріалу катоду, його температури, тривалості розряду та ін. Матеріали характеризуються параметром, який називається коефіцієнт ерозії і має розмірність мкг/Кл .

Сьогодні визнано, що тиск плазми в катодній плямі перевищує атмосферний тиск на кілька порядків, що створює вибухоподібний викид металевого пару, який іонізується в катодній плямі потоком електронів.

Класична картина фізичних процесів, що відбуваються в катодній плямі вакуумної дуги металів і сплавів у стаціонарному режимі, включає випаровування атомів металу з поверхні катоду, температура якої близька до температури кипіння T_k металу, і термоавтоелектронну емісію електронів з тієї ж поверхні

[16]. Далі йдуть розліт металевої пари та прискорення електронів в електричному полі U_k

На деякій відстані від поверхні випаровування електрони, прискорені електричним полем U_k , починають ефективно іонізувати атоми, що випарувалися, в результаті чого над поверхнею випаровування утворюється плазмова хмара з позитивних іонів та електронів, яка і спостерігається як яскрава точка, що світиться на поверхні катоду. У плазмовій хмарі, що утворилася, велика частина позитивних іонів під дією електричного поля U_k повертається на поверхню катоду в катодній плямі, тим самим розігріваючи поверхню до температур, близьких до температури кипіння металу і підтримуючи розряд в цілому. Менша частина позитивних іонів під дією електронів, що витісняються полем U_k від поверхні катода, залишає плазмову хмару і поширюється в об'єм вакуумної камери, набуваючи за рахунок газодинамічного прискорення енергії близько 10-120 еВ.

Плазмові струмені, що випускаються катодною плямою, містять іони з різною кратністю заряду. Частка іонного компонента струму дугового розряду залежить від матеріалу катода і становить близько 10 % від загального струму розряду.

1.3.3. Реактивна сила потоків плазми з області катодних плям

У 1929 році Р. Танберг встановив, що вакуумний дуговий розряд створює силу, яка діє на катод, з якого виходить потік металевої плазми. Він зміг визначити приблизну швидкість іонів вакуумної дуги на міді, вимірявши силу, створену потоком плазми з катода [13]. Проведений Р. Танбергом експеримент показав, що дуговий розряд може бути використаний для створення реактивної тяги. Згідно з оцінкою Р. Танберга, швидкість іонів становить приблизно 16 км/с. В сучасних роботах було виявлено, що швидкості іонів для багатьох інших елементів знаходяться у відносно вузькому діапазоні 5–30 км/с, причому іони з низькою масою були швидшими за іони з високою масою [14].

Реактивна сила виникає в результаті розширення плазмового потоку в зоні катоду. Цей потік розширюється із надзвуковою швидкістю, і ця швидкість досягається вже на відстані 2-х – 3-х радіусів катодної плями. Сила, створена катодом, пропорційна струму і може бути виражена через відношення сили до струму. Тяга вакуумно-дугового реактивного двигуна залежить від маси іонів, іонного струму, швидкості плазми і коефіцієнта заряду іонів, тобто величин, що є фундаментальними характеристиками матеріалу катоду, а також від струму розряду. Реактивна сила плазмового потоку становить 0,4 мкН/А для мідних та 20 мкН/А для алюмінієвих катодів [6].

Будь-який електропровідний матеріал може бути використаний для створення реактивної тяги в ракетному двигуні. Метали добре підходять для цього завдяки своїй високій густині, добрій електро- та теплопровідності, високим температурам плавлення та кипіння, а також відносно низькій роботі виходу електронів.

1.3.4. Методи керування переміщенням катодних плям по поверхні катоду

Рух і динаміка катодної плями, особливо за наявності магнітного поля, відіграють важливу роль у явищах поблизу електроду та впливають на технічні характеристики катодної дуги [17]. Загальновизнано, що на поверхні катоду рух плям не є безперервним, а скоріше виникає внаслідок послідовного згасання старих плям і повторного виникнення нових плям поблизу старих [18]. Ретроградний рух вакуумної катодної плями в поперечному магнітному полі є одним із найцікавіших явищ дугового розряду. З моменту його відкриття в 1903 році Старком [57], воно було ретельно вивчено, і було запропоновано понад двадцять різних гіпотез для пояснення явища ретроградного руху. Однак було проведено дуже мало досліджень щодо того, як керувати рухом траєкторії катодної плями на поверхні, особливо на великій площі. У роботі [19] досліджено рух катодної

плями на поверхні катодів з чистого графіту та червоної міді в присутності поперечного магнітного поля. Досліджено стабільність дуги, швидкість переміщення плям та їх траєкторію.

На рисунку 1.2 представлено схему направленного переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під аркою силових ліній магнітного поля та хаотичного переміщення без зовнішнього магнітного поля [56].

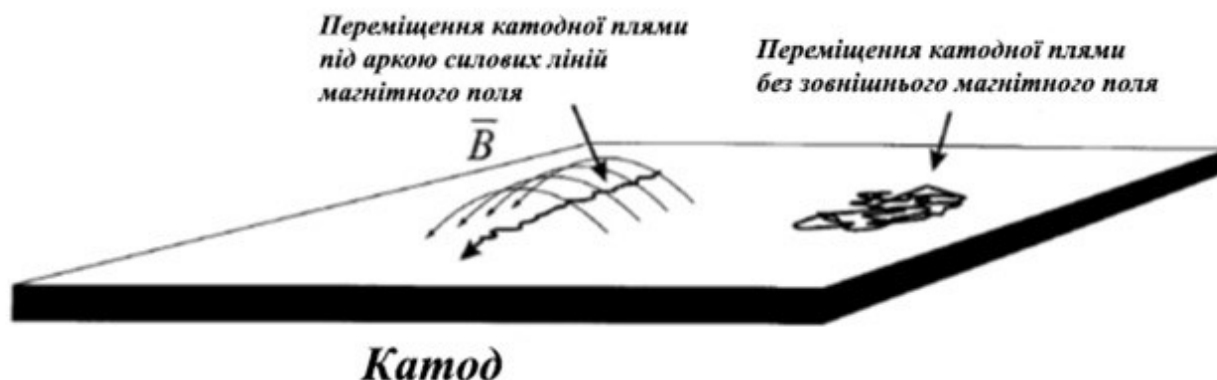


Рисунок 1.2 Направлене переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під аркою силових ліній магнітного поля та їх хаотичне переміщення без зовнішнього магнітного поля

На рисунку 1.3 представлено схему направленного переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під аркою силових ліній магнітного поля по кільцевій траєкторії [59].

На рисунку 1.4 представлено схему направленного переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під впливом власного магнітного поля дугового розряду [54]. На протяжному катоді при підключенні джерела струму до одного з його кінців струм розряду тече до місця підключення, його магнітне поле у цьому напрямі не слабшає, електрони утримуються в прикатодній області на великій відстані від області катодної плями, створюючи умови для виникнення нових осередків. З протилежного боку катодної плями через відсутність власного магнітного поля щільність плазми менша, і ймовірність виникнення нових катодних плям з цього боку суттєво нижча. Тому катодні плями у вакуумі завжди рухаються у бік підключення струму до катоду.

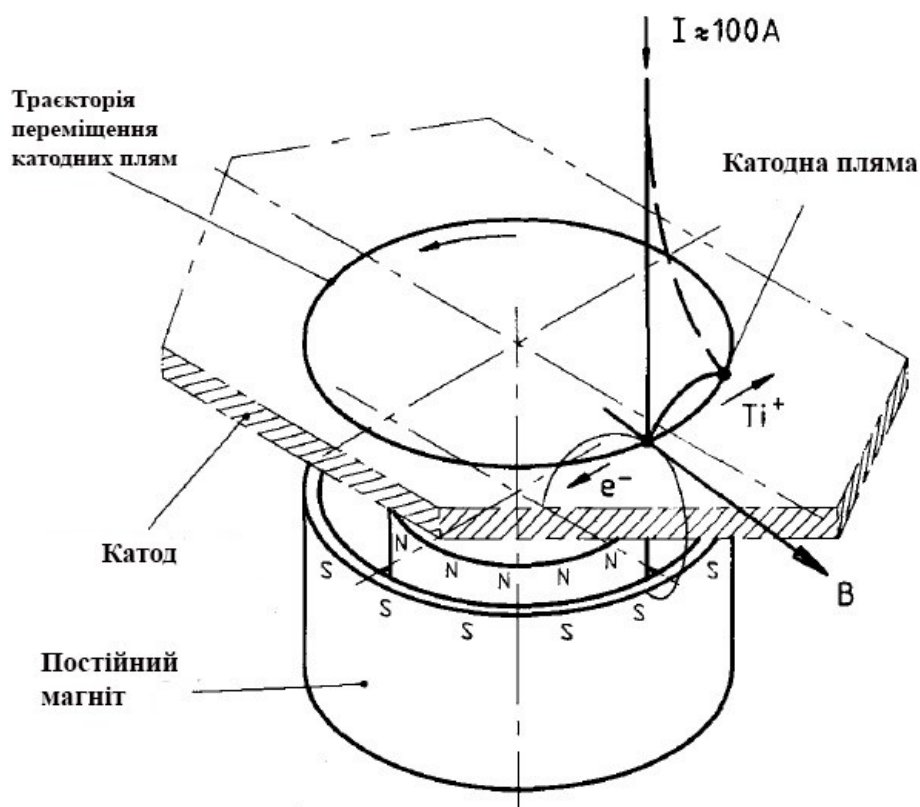


Рисунок 1.3 Направлене переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під аркою силових ліній магнітного поля кільцевій траєкторії

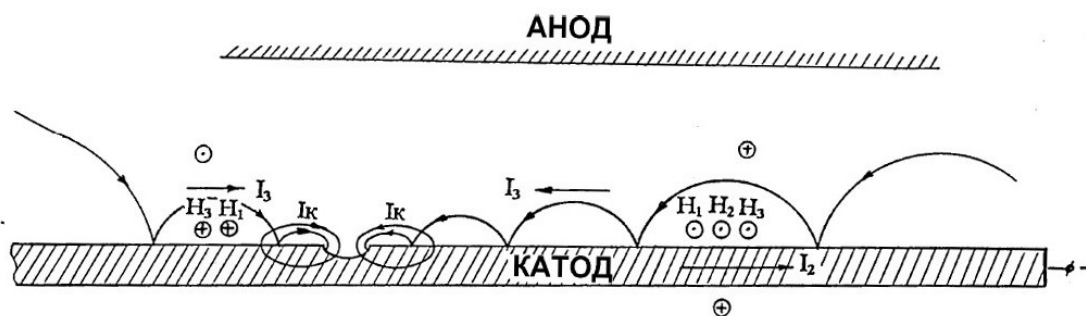


Рисунок 1.4 Схема направленного переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під впливом власного магнітного поля дугового розряду

Для управління переміщенням катодних плям по поверхні катоду необхідно враховувати такі закономірності їх існування та переміщення [20]:

1. За відсутності зовнішніх магнітних полів катодні плями рухаються у напрямку місця підключення струму до катоду під впливом власного магнітного

поля струму, що протікає по катоду. Швидкість їх переміщення зростає зі збільшенням щільності струму розряду.

2. За наявності зовнішнього магнітного поля катодні плями переміщуються:

- у бік, протилежний приписуваному правилом Ампера при тангенціальному (паралельному поверхні катода) магнітному полі;
- у бік гострого кута, утвореного силовими магнітними лініями та поверхнею катода (так зване правило гострого кута), одночасно із зворотним рухом.

3. При існуванні на поверхні катода або в безпосередній близькості від нього градієнта тиску газу катодні плями завжди переміщуються у напрямку підвищеного градієнту.

4. Якщо катод складається з декількох матеріалів з різними катодними падіннями напруги, катодні плями локалізуються переважно на матеріалі з меншим катодним падінням.

5. Катодні плями рухаються поверхнею катода до місць, розташованих найближче до аноду.

6. На поверхні катода катодні плями локалізуються на ділянках, що мають оксиди, тонкі діелектричні плівки та різні забруднення.

7. Кількість і розміри крапель у плазмовому струмені збільшуються зі зростанням струму, що протікає через катодну пляму.

8. Кількість і розміри крапель зменшуються зі збільшенням швидкості переміщення катодних плям.

9. Кількість і розміри крапель збільшуються з підвищенням температури поверхні, що випаровується.

1.4. Конструкції вакуумно-дугових реактивних двигунів

Розробка вакуумно-дугових двигунів почалася в 1960-1970 роках, коли були створені та випробувані перші прототипи таких двигунів [9]. Після перших

вдалих експериментів настав період застою аж до кінця 1990-х років. Тільки в кінці 1990-х роках були створені і випробувані льотні моделі вакуумно-дугових двигунів, зокрема, їх застосування на малих космічних літальних апаратах типу кубсатів. Знадобилося ще 15 років для того, щоб успішно випробувати вакуумно-дугові двигуни у космосі.

Перші опубліковані дослідження вакуумних дугових двигунів були виконані Детлефсеном [9] та Гілмором і Локвудом [10]. Вони випробували різноманітні катодні матеріали та стали піонерами у використанні осьового магнітного поля для фокусування плазмового струменя двигуна. Однак проблема забезпечення значних величин струму розряду призвела до того, що подальший розвиток вакуумних дугових рушійних установок призупинився.

Мініатюризація електронних компонентів та широке використання сонячних панелей дозволили вакуумному дуговому двигуну стати більш привабливою формою рушійних установок для малих супутників. Дослідження вакуумно-дугових двигунів відродилися в період 1998–2005 років завдяки співпраці між Корпорацією прикладних наук Alameda (AASC), Лабораторією реактивних двигунів NASA/Caltech (JPL) та Національною лабораторією імені Лоуренса в Берклі (LBNL) [21-23].

Вакуумно-дугові космічні двигуни привертають до себе підвищену увагу як частина системи космічних двигунів для наносупутників через простоту їхньої конструкції, легку масштабованість і стійку, надійну роботу. Зазвичай вакуумно-дуговий двигун складається з двох електродів, розділених ізолятором, покритим тонким провідним шаром. Цей тонкий провідний шар виконує роль спускового механізму до початку процесу ерозії катоду, що дозволяє використовувати керуючий пристрій дуже малої маси.

Принцип роботи вакуумно-дугового двигуна полягає в наступному [24]. При подачі імпульсу напруги між катодом і анодом відбувається вибухоподібне випаровування провідної плівки на поверхні ізолятора, що розділяє електроди. На катоді виникають катодні плями, що випаровують матеріал катоду. Металеві

пари, що випаровуються, іонізуються в прикатодному падінні напруги і з високою швидкістю викидаються з області катодної плями.

Заряджені частинки еродованого матеріалу катоду утворюють квазінейтральний потік плазми, що призводить до створення тяги (рисунок 1.5).

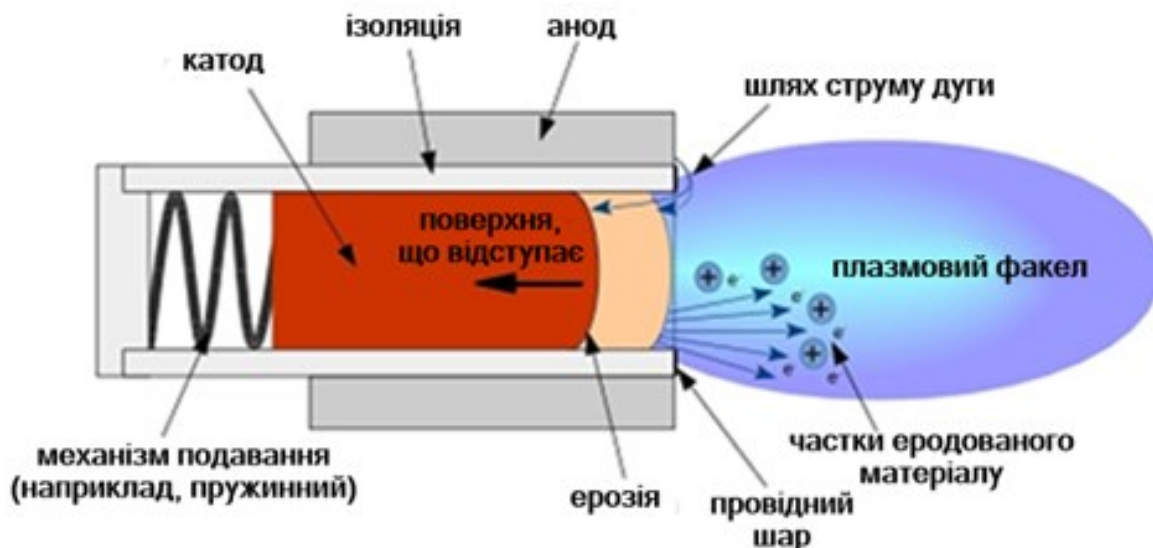


Рисунок 1.5 Принцип роботи вакуумно-дугового двигуна

Описані в літературі конструкції двигунів можна умовно розділити на три основні групи (рисунок 1.6):

1. Планарні [25,26].
2. Кільцеві (трубчаті) [27,28].
3. Коаксіальні [29,30].



Рисунок 1.6 Найпоширеніша геометрія вакуумно-дугового двигуна: планарна (ліворуч), кільцева (посередині) і коаксіальна схеми розташування електродів (праворуч).

Перевагою коаксіальної конструкції є визначене місце створення тяги в порівнянні з площинними двигунами, в яких вакуумна дуга може виникнути в будь-якій точці широкого контакту. У коаксіальних двигунах перевагою є також те, що існує точний напрям розширення плазмового потоку, тоді як в кільцевих двигунах напрям розширення плазмового потоку визначається зовнішнім магнітним полем.

Мікрокатодну систему двигуна (рисунок 1.7), розроблено в лабораторії мікродвигунів і нанотехнологій в Університеті ім. Дж. Вашингтона для використання з метою управління позиціонуванням супутника в просторі [27]. Мікрокатодний дуговий двигун (μ CAT) являє собою реактивний електричний двигун з процесорним пристроєм та індуктивним накопичувачем енергії, загальна маса якого становить не більше 100 г. Плазма формується в катодних плямах на внутрішній поверхні кільцевого електроду, потім розширюється у вакуумну зону під впливом градієнта магнітного поля.

Перша версія μ CAT, показана на рисунку 1.7, побудована між 2008 та 2009 роками, стала початком досліджень мікродвигунів, які проводять в Університеті ім. Джорджа Вашингтона [28].

Цей пристрій складається з трубчастого катоду і аноду, розділених ізолюючим кільцем. Внутрішня частина ізолюючого кільця покрита графітом для полегшення пробією розрядного проміжку. Анод прикріплений до основної конструкції двигуна. Потік плазми проходить через отвір аноду під впливом осевого магнітного поля.

Початкова конструкція працювала добре, але аналіз показав, що в процесі роботи двигуна частина плазми не бере участь у створенні тяги через геометрію двигуна. Плазма викидається під кутом із плями дуги, показаної червоним на рисунку 1.7. Місцеве магнітне поле досить сильне, щоб замагнічувати електрони розряду, які прямують уздовж силових ліній магнітного поля. Електричне поле «тягне» більшу частину іонів і направляє їх до вихідної площини. Частина іонів

не буде достатньо «вигнута» у бік вихідної площини і натомість конденсуватиметься на аноді, що приводить до зменшення максимально можливої тяги.



Рисунок 1.7 Вид спереду (ліворуч) та вид збоку (праворуч) на двигун μ CAT з кільцевим електродом. На зображенні зліва показано круговий рух

На рисунку 1.8 показана схема коаксіальної електродної системи μ CAT [29,30]. Нова концепція була розроблена для того, щоб вирішити проблему зниження ефективності, спричиненого втратою іонів на внутрішні стінки двигуна. Удосконалена конструкція μ CAT з коаксіальними електродами, складається з концентричних електродів з анодом у центрі. Анод оточений трубчастим керамічним ізоляційним матеріалом, а довкола нього - трубчастий катод. Ізоляційний матеріал покритий тонким шаром графіту. У системі також використовується магнітна котушка для збільшення швидкості іонів і, отже, ефективності.

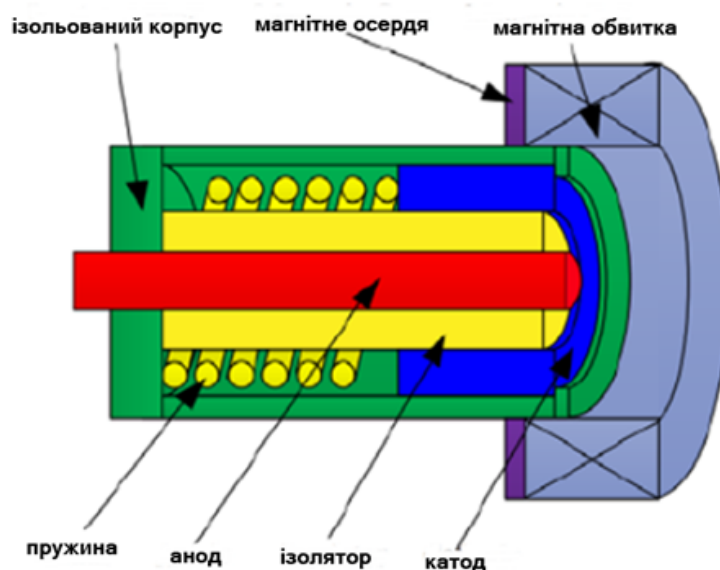


Рисунок 1.8 Схема коаксіальної електродної системи μ CAT

Коли йдеться про рушійні установки з твердим паливом, виробників супутників часто турбує зворотний потік іонів і нейтральних частинок, які конденсуються на поверхні супутника і забруднюють його. Це особливо шкідливо для оптики та чутливої електроніки, наприклад, для сонячних батарей. Дослідження, проведені вченими університету ім. Джорджа Вашингтона, показали, що завдяки високому ступеню іонізації плазми, зворотний потік іонів відсутній.

В процесі роботи матеріал катоду двигуна витрачається на створення плазми, тому через деякий час його торцева поверхня вже не буде контактувати з ізолюючим кільцем і розряд між електродами не зможе відбуватись. Для збільшення терміну служби двигуна необхідно постійно переміщувати катод в зону розряду. Для цього запропоновано використати пружину, яка притискує катод до ізолюючого кільця та забезпечує постійний контакт (рисунок 1.9) [31].

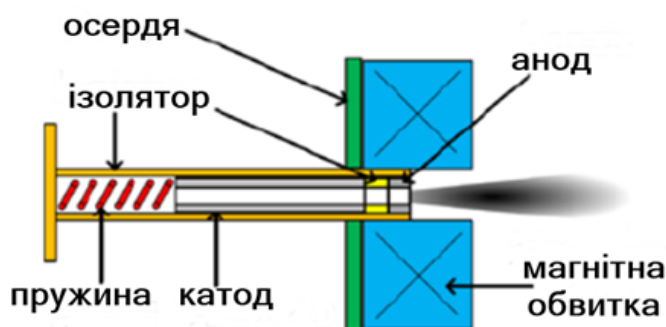


Рисунок 1.9 Мікро-катодний дуговий двигун із збільшеним терміном служби.

У статті [32] розглядається осесиметричний мікро-катодний дуговий двигун з боковою подачею (рисунок 1.10), що є вдосконаленою версією мікро-катодного дугового двигуна, розроблену для покращення його експлуатаційних показників. Осесиметричний мікро-катодний двигун містить кілька радіально встановлених катодів. Метою розробки було збільшення терміну служби двигуна. Потужність розряду двигуна регулюється зміною напруги та тривалості імпульсу джерела живлення. Характеристики двигуна були покращені за рахунок додавання кільцевого магніту довкола області генерації плазми. Досягнуто відсоток іонного струму дуги близько 10,5% при магнітному полі та швидкості іонів 30

км/с. Було досягнуто рекордного терміну служби – 13×10^6 імпульсів, що свідчить про ефективність механізму подачі катодів.

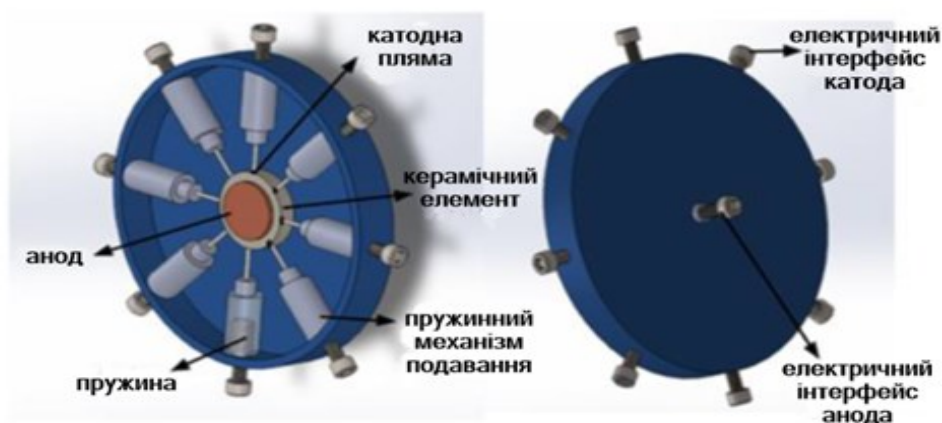
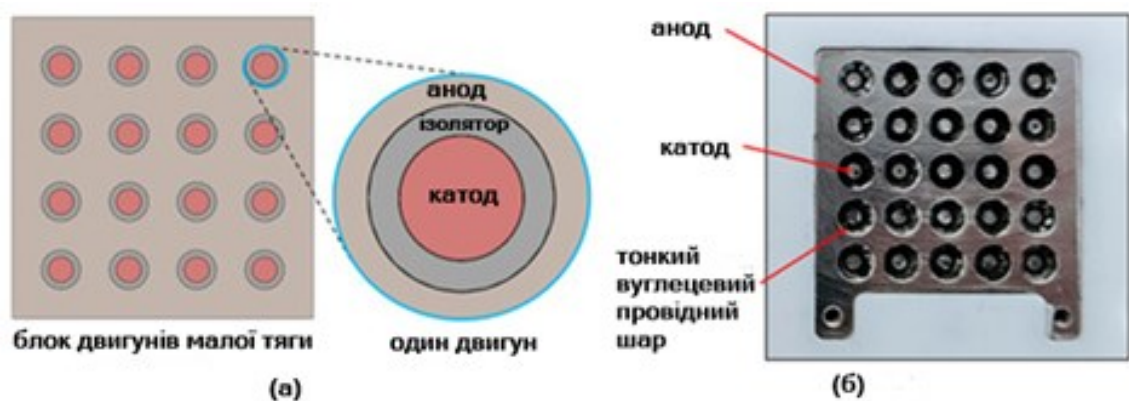


Рисунок 1.10 Осесиметрична конфігурація SF- μ CAT з вісьмома електродами для кращої продуктивності та ефективності.

Кластер тонкошарових вакуумно-дугових двигунів (ВДД), відомий як повністю друкована рухова система (ALPS) [33, 34], був розроблений як рішення ВДД без подачі катодів, яке усуває необхідність у складних механічних або електричних механізмах подачі, забезпечуючи при цьому точне вирівнювання електродів. Як показано на рисунку 1.11, кожен тонкошаровий ВДД має катодний шар, досить тонкий для роботи без спеціальної системи подачі. У той час як окремі ВДД мають обмежений запас катодного матеріалу, кластеризація кількох ВДД долає це обмеження. Кластерна конфігурація ВДД забезпечує значно менший форм-фактор та знижену складність системи, що робить її особливо придатною для CubeSats. Крім того, кілька двигунів підвищує надійність та знижує ризик повної відмови рушійної системи. [35]. У цьому дослідженні демонструється нова концепція силового блоку, здатна керувати безтригерними ВДД масивами на супутниках CubeSat, де традиційні архітектури силових блоків є надто громіздкими або мають значні обмеження в управлінні. Нова архітектура використовує кілька ізольованих джерел струму для забезпечення одночасної роботи двигунів із єдиним індуктивним підсилювачем енергії. Завдяки ізоляції ене-

ргії запалення від первинного джерела розряду різні варіанти силових блоків можуть забезпечувати як високу імпульсну первинну тягу, так і точне імпульсне управління в єдиній системі. Це дозволяє створювати рішення, що забезпечують високий сумарний імпульс, точне управління орієнтацією та резервування системи в єдиній масштабованій архітектурі, що значно розширює можливості мобільності та маневреності CubeSat у космосі.

Кластерні тонкошарові ВДД також можуть забезпечити інтегроване керування орієнтацією, оскільки багатоосьові двигуни можуть створювати обертальний рух. Ця властивість особливо корисна для таких застосувань наносупутників, як спостереження за Землею та зв'язок, оскільки усуває необхідність в окремих системах управління орієнтацією, додатково оптимізуючи обмеження за масою та обсягом.



(а) схема масиву двигунів; (б) зображення зібраного двигуна ALPS.

Рисунок 1.11. Кластер тонкошарових ВДРД:

Як показано на рисунку 1.12, сегментована система ВДРД може забезпечувати як рух, так і управління орієнтацією [33]. Основна решітка двигунів, розташована в центрі поверхні двигуна, забезпечує більший імпульс для коригування орбіти, тоді як двигуни управління орієнтацією, розташовані по периметру поверхні двигуна, забезпечують точне наведення для спостереження за Землею та зв'язку, а також тонке коригування швидкості при польоті у складі групи супутників. Ця інтегрована система усуває необхідність додаткового обладнання для

управління орієнтацією, звільняючи критичний простір і масу для наносупутників з обмеженими можливостями. В якості альтернативи система може служити резервним механізмом управління орієнтацією, підвищуючи надійність і забезпечуючи можливість гасіння імпульсу для систем з маховиками.

Модульні або кластерні моделі вакуумно-дугових двигунів викликають значний інтерес як мікрорушійна система завдяки своїй масштабованості, низькій вартості, зручності зберігання та малому форм-фактору.

Кластерні тонкошарові ВДД мають катодний шар, досить тонкий для роботи без спеціальної системи подачі. Але тонкий катодний шар має обмежений запас катодного матеріалу, що не дозволяє досягти великих значень загального імпульсу двигуна. Для досягнення значного імпульсу двигуна необхідно використовувати катоди масою в сотні грамів.

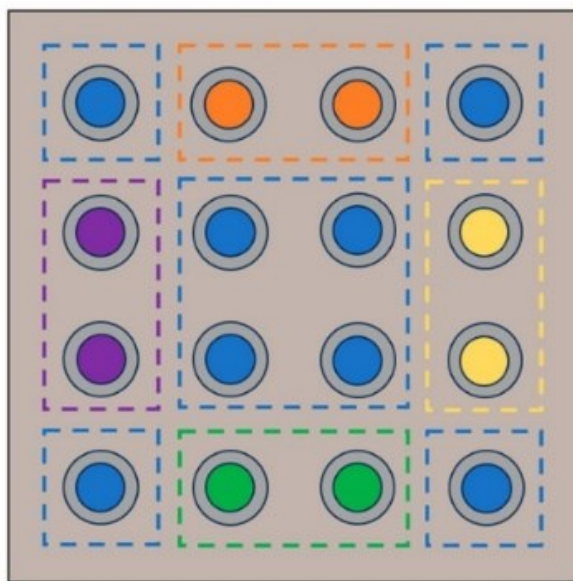


Рисунок 1.12. Схема сегментованих грат ВДРД, де сині ВДРД забезпечують основну тягу, а решта забезпечують управління орієнтацією.

В роботі [36] приведений опис двигуна на металевій плазмі з двома катодами діаметром 38 мм (молібден і вуглець) розробки американської фірми Alameda Applied Sciences Co. (рисунок 1.13). Дослідний зразок двигуна з катодом

з молібдену витримав 3.5 мільйонів імпульсів частотою 4 Гц (рисунок 1.13, праворуч). Середня еродована глибина дорівнює 8 мм, а еродована маса 89.5 g.

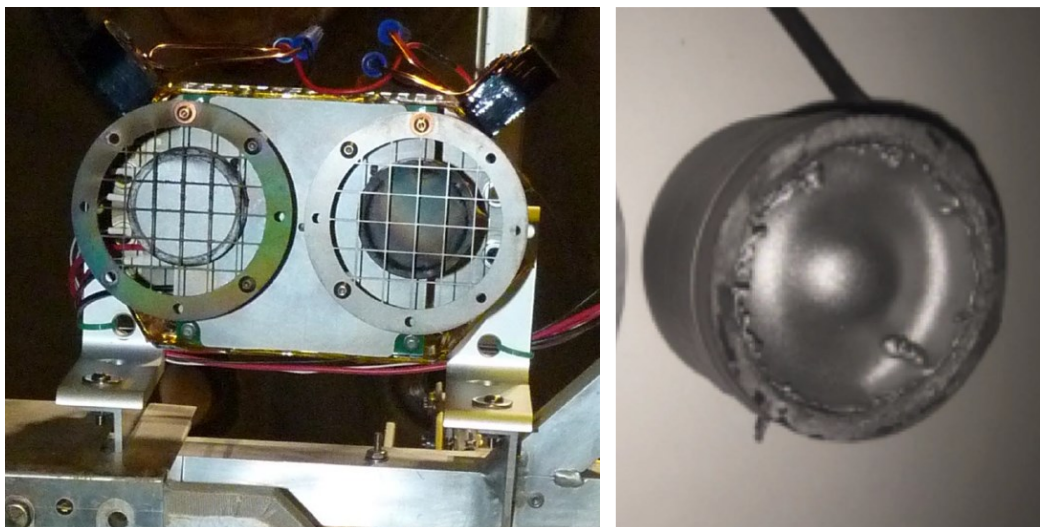


Рисунок 1.13. Двигун з катодами з Мо і С (ліворуч), катод Мо після 3,5 мільйона імпульсів (праворуч)

Концепція багатопозиційного двигуна на металевій плазмі була предметом досліджень більше ніж два десятиліття. В роботі [37] викладені результати цих досліджень. При випробуваннях у вакуумі виявились проблеми бортової електроніки, такими як збої контролера і відмови роботи електронних компонентів. Причина цих електричних проблем викликана електромагнітними перешкодами, що виникають в результаті дуже високої швидкості зміни величини струму (dI/dt) під час імпульсу розряду катодної дуги.

Проблеми електромагнітних перешкод вдалось подолати подальшим доопрацюванням схеми контролера для забезпечення її стійкості до шумів імпульсів та повним екрануванням його від електромагнітних перешкод. На рисунку 1.14 показаний зовнішній вигляд металевого плазмового двигуна МРТ4.2, в якому встановлено шість металевих катодів.

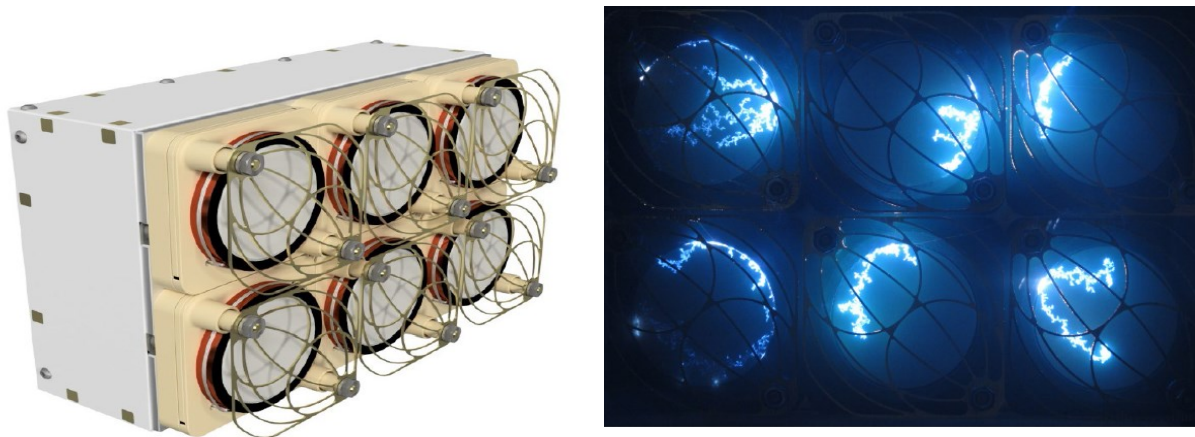


Рисунок 1.14. Металевий плазмовий двигун МРТ4.2

Наступним кроком удосконалення багатопозиційного двигуна на металевій плазмі була заміна катодів круглої форми на прямокутні катоди. Це дало змогу збільшити ресурс роботи двигуна при тій же загальній площі на 47 % за рахунок збільшення площі катодів. Глибина ерозії металевого катоду обмежує термін служби пристрою, а збільшення його загальної площі також збільшує загальний імпульс, доступний пристрою [37].

Наприкінці 2022 року компанія Benchmark Space Systems придбала права на двигун МРТ розробки фірми Alameda Applied Sciences Co. і запропонувала допомогу в маркетингу та продажах на більш широкому ринку, на якому вже представлені хімічні двигуни Benchmark. В результаті спільної роботи компанії Benchmark Space Systems та фірми Alameda Applied Sciences Co. був створений багатопозиційний двигун на металевій плазмі Xantus X4 (рисунок 1.15, праворуч) [38]. Перший запуск Xantus X4 у рамках місії Orion Space RROCI для Сил оборони США відбувся у січні 2023 року. Супутник вийшов на орбіту, але не відокремився від розгінного блоку через несправність системи розгортання. Супутник згорів під час входу в атмосферу. Другий запуск відбувся 4 березня 2024 року, успішно відокремившись і вийшовши на низьку навіколомісячну орбіту.

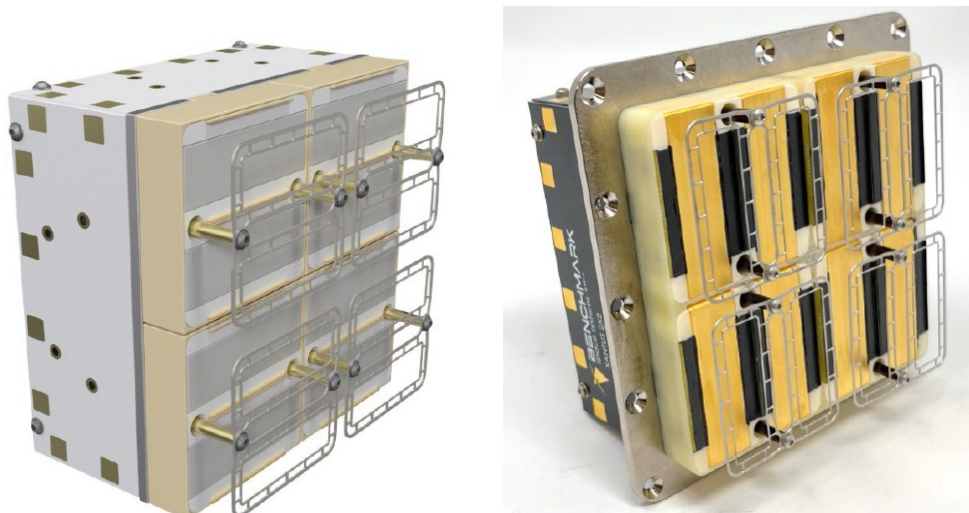


Рисунок 1.15. Металеві плазмові двигуни з прямокутними катодами
MPT5.0 та Xantus X4

На даний час Benchmark Space Systems продовжує вдосконалювати технологію ракетних двигунів на металевій плазмі з упором на надійність, включаючи прямі вимірювання імпульсу та тяги катодів з різних металів та збільшення ресурсу роботи більше 10 000 годин роботи у вакуумі. Необхідно підкреслити, що мається на увазі термін збереження працездатності двигуна, а не час безперервної його роботи.

В роботі [38] подано вимірювання імпульсних бітів та тяги металевого плазмового двигуна Xantus MPT. Випробування демонструють, що Xantus може працювати з будь-яким металом. Робота з молібденовими катодами показує співвідношення тяги/потужності приблизно від 11 мН/кВт до 12 мН/кВт. Отже, це двигун класу ~ 1 мН для малих супутників масою в діапазоні 50 кг. Базовий модульний двигун має розміри 98мм x 98мм x 60мм. Чотири катода в такому об'ємі загальною масою 1,2 кг дають максимальний імпульс 5 кНс.

1.5. Системи енергозабезпечення вакуумно-дугових двигунів

На даний час розробляються різні концепції двигунів на основі вакуумної дуги, переважно для роботи в імпульсному режимі, через обмеження потужності,

характерних для малих космічних апаратів. Тому для живлення вакуумно-дугових реактивних двигунів необхідно використовувати імпульсні джерела живлення. На практиці необхідно враховувати додаткові труднощі: перетворення низької напруги від джерела живлення в мінімальну робочу напругу для даного матеріалу катоду і отримання напруги запалення (від кількох сотень вольт до кіловольт), що знижує можливу енергію імпульсу. У роботі [39] запропоновано спосіб режиму «самозапуску» або «безтригерного» запуску дугового розряду. На рисунку 1.16 представлений принцип «самозапуску» розряду шляхом спеціальної схеми формування імпульсів. Ізолятор, який відокремлює катод від анода, покритий тонким шаром графіту. При відносно низькій напрузі ($\approx 100\text{--}200\text{ В}$) вакуумну дугу підключають за допомогою твердотільного перемикача, по шару графіту пройде струм, який буде концентруватися на контактних точках катода. Плазма з цих контактних точок розширюється у вакуумний зазор і підтримує провідність від катоду до аноду через вакуумний зазор. З огляду на те, що опір електропровідної плівки становить $\sim 1000\text{ Ом}$, струм швидко шунтується від початкової траєкторії (через поверхню) на нову траєкторію – через вакуумний зазор. Ерозія в процесі запалювання і горіння розряду призводить до нанесення плівки металу на ізолятор. Така схема дозволяє створити більше 10^6 імпульсів запуску.



Рисунок 1.16. Принципова схема безтригерного запалення дуги.
Ліворуч – звичайна система з пусковим електродом.
Праворуч – з «безпусковим» запалюванням дуги.

Автори [40] розробили інший метод генерування високовольтних піків напруги для запалення дуги та підтримки її роботи. Замість ємнісного накопичувача енергії, а також забезпечення запалення дуги, в обох випадках використовувалася котушка індуктивності. Базуючись на цій концепції процесорного пристрою, була розроблена вдосконалена система, спеціально для кубсатів 1U. Ідея полягала в тому, щоб мінімізувати кількість електричних елементів і підвищити ККД процесорного пристрою. Для цього була використана котушка індуктивності як накопичувач енергії. Була створена котушка як система з дуже невеликою кількістю деталей, яка має відносно невеликі розміри і дуже надійна в роботі. Для зарядки та розрядки котушки індуктивності як швидкодіючий перемикач був використаний IGBT - біполярний транзистор з ізольованим входом (рисунок 1.17).

Індуктивність заряджається в той момент, коли ланцюг закритий перемикачем. Коли перемикач відкривається, між анодом і катодом швидко зростає напруга U , яка пропорційна добутку індуктивності L на зміну електричного струму в ланцюгу dI/dt . Якщо пік напруги є достатнім для електричного пробоя, вакуумна дуга запалюється.

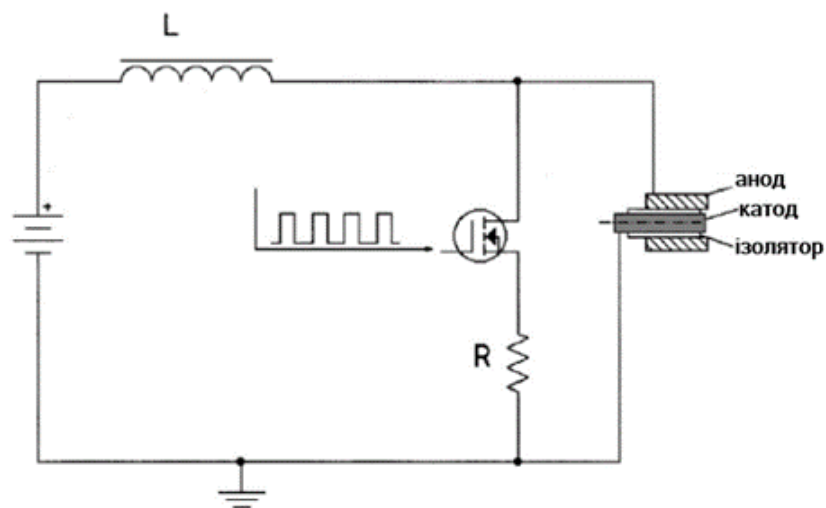


Рисунок 1.17 Схема процесорного пристрою з індуктивним накопичувачем енергії

У класичних експериментах з вакуумною дугою часто використовуються системи з чисто ємнісними накопичувачами енергії, які перетворюють напругу від лабораторного джерела живлення в напруги необхідних рівнів. Це досягається шляхом зарядки одного конденсатора з відносно невеликою ємністю (кілька μF) до напруги, достатньої для запалювання дуги (близько 1 кВ). Після запалювання, конденсатор з більшою ємністю (кілька μF) заряджається до нижчої напруги (100-200 В) для підтримки плазмової дуги. Накопичена енергія в даному конденсаторі пропорційна ємності і квадрату напруги. Схему процесорного пристрою з додатковим ємнісним накопичувачем енергії (рисунок 1.18) наведено в роботі [24].

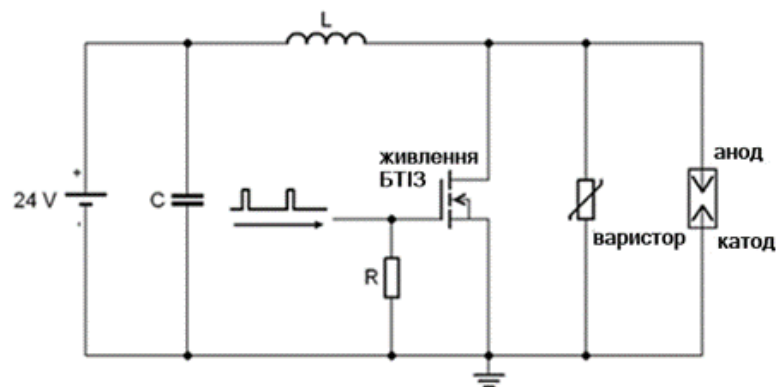


Рисунок 1.18 Схема процесорного пристрою з додатковим ємнісним накопичувачем енергії.

Для типових конструкцій вакуумно-дугових двигунів використовується напруга від 20 до 30 В, як буде показано нижче, звичайний конденсатор ємністю 4,7 μF і робочою напругою 63 В за розміром такий же як і котушка індуктивності 200 μH , але важить всього 10 г. При напрузі 20 В енергія конденсатора дорівнює 940 мДж у порівнянні з 10 мДж енергії згаданої вище котушки індуктивності. Отже, набагато більше енергії можна отримати для вакуумно-дугового двигуна, в якому як основний накопичувач енергії використовується конденсатор.

1.6. Взаємозв'язок матеріалу катоду та параметрів електродугового двигуна

Витрата маси або швидкість ерозії залежить від енергії імпульсу, що прикладається, а також від характеристик матеріалу. Отже, величина тяги може регулюватися лише в обмеженому діапазоні. Зазвичай, величина тяги знаходиться в межах від декількох наноеньютонів до декількох мікроньютонів на імпульс розряду, а величина питомого імпульсу від 64 с для кадмію до 1600 с для хрому. Існує тісний взаємозв'язок між атомною вагою матеріалу і теоретично досяжною продуктивністю двигуна. В роботі [23] приведені емпіричні значення характеристик вакуумної дуги для різних металевих катодних матеріалів.

Катодними матеріалами, що мають найбільший потенціал для експлуатаційних характеристик вакуумно-дугового двигуна, є магній, хром, ітрій, тантал, вольфрам, для яких ККД при їх використанні знаходиться в межах від 0,07 до 0,12, а питомий імпульс тяги становить від 860 до 1600 с [40].

Багатьма авторами, наприклад, [23, 24, 41] та іншими були проведені дослідження таких матеріалів, як Al, Cu, Ti та W для застосування їх як катоди реактивних двигунів. Крім того, що очевидним фактором була простота механічної обробки Al і Cu, хороші якості Ti при роботі вакуумної дуги (наприклад, стійкість запалювання, незначне утворення макрочасток, стійкість до розплавлення), враховувалися також робочі характеристики W ($I_{sp} = 1064$ s). Певний інтерес представляли також графіт, Cr та Mo з їхньою високою температурою плавлення, а також Sn та In з низькою температурою плавлення. Однак, крім правильного вибору відповідних матеріалів, потрібно було вирішити ще багато інших проблем.

Згідно з результатами вимірювань, проведених в останнє десятиліття, сила плазмового струменя для мідного катода становить близько 0,15 мН/А; для ртутного катода – (0,19–0,53) мН/А для струмів 30–37 А та тисків 65–130 Па; близько 0,4 мН/А для мідних та близько 20 мН/А для алюмінієвих катодів [41].

Грунтуючись на попередніх обговореннях, можна припустити, що вольфрам (W) є найбільш перспективним матеріалом з погляду ККД палива та очікуваного співвідношення «тяга/потужність». Однак, вольфрам важко піддається механічній обробці (наприклад, фрезерування) і руйнується вже на першій стадії обробки. Це відбувається через низьку пластичність вольфраму. Випробування показали, що з використанням вольфрамових катодів утворюються макрочастинки, що знижує ККД двигуна. Макрочастинки, ймовірно, утворюються через високе термічне навантаження від катодних плям. Це призводить до виникнення великої механічної напруги в катоді, а для такого матеріалу, як вольфрам - неминуче утворення тріщин в зоні перегріву. Застосування молібдену (Mo), який має практично такі ж характеристики, дає, природно, такий же результат.

Набагато кращим для такого застосування є хром. Однак, є дуже мало інформації про застосування цього елемента конструкції двигуна. Оскільки характеристики цього матеріалу дуже близькі до характеристик W і Mo, можна очікувати аналогічного результату від його застосування. Альтернативою з відносно непоганою перспективою по експлуатаційними характеристиками і з досить великою базою даних у літературі є титан. Була отримана величина співвідношення «тяга/потужність» для Ti – 13,49 $\mu\text{N}/\text{Вт}$ [24].

В роботі [23] встановлено, що для матеріалів з низькою температурою плавлення характерно більш високе співвідношення «тяга / потужність», ніж для зазвичай застосовуваних катодних матеріалів (наприклад, 22,95 $\mu\text{N} / \text{Вт}$ для олова в порівнянні з 12,77 $\mu\text{N} / \text{Вт}$ для титану) [24]. Отже, ще слід дослідити використання таких матеріалів. Зважаючи на обмежену базу даних для матеріалів з низькою температурою плавлення в частині їх використання для вакуумно-дугових двигунів, теоретично величину споживання палива можна розрахувати тільки для олова (Sn) і свинцю (Pb). Показано, що потрібно набагато більше палива для досягнення однакової величини Δv . Вони займають набагато більше простору і важать більше, ніж зазвичай використовувані катодні матеріали типу Al, Cu або

Ті. Більше того, у процесі випробувань спостерігається утворення більшої кількості крапель.

Отже, такі матеріали можуть використовуватися тільки в тих випадках, коли необхідно видати всього кілька імпульсів з високою тягою. Якщо враховувати при цьому зниження ККД, то це доцільно робити, якщо реальна величина співвідношення «тяга / потужність» порівнянна з теоретичним значенням. Для загальної оцінки ситуації потрібно ще визначити величину відношення «тяга/потужність» для індію (In). За фізичними характеристиками цей елемент подібний до Sn і Pb. В роботі [24] наведено співвідношення «тяга/потужність» для індію в межах $18,59 \mu\text{N/Вт}$. Однак, слід підкреслити, що макрочастинки все ж таки знижують очікувану ефективність двигуна.

Таким чином, можна зробити висновок, зважаючи на створення недостатньої величини тяги двигуна, утворення великої кількості макрочастинок і взагалі малої ефективності палива, матеріали з низькою температурою плавлення не придатні для використання в космічних двигунах.

Більшість літературних джерел як матеріал для катода називають Al, Cu, Ti, W, Bi, Fe і Y. В роботі [23] розглядається набагато більше матеріалів в якості катодного палива. Дуже перспективним у частині величини співвідношення «тяга / потужність» є елементи з великою атомною вагою - типу Pb, Pt і U, хоча питомий імпульс для цих матеріалів дуже низький. У лівій частині періодичної таблиці елементів Менделєєва Cr міг бути хорошим вибором щоб одержати високого значення питомого імпульсу. Сплави та присадочні матеріали також досліджені недостатньо. Перші експерименти з посиленням волокном вуглецевим пластиком показали дуже хороші результати. Більш того, точка зору на матеріали з низькою температурою плавлення - типу Sn, In або Pb - повинна бути переглянута. Як уже було показано, питомий імпульс і тяга можуть бути збільшені впливом осевого магнітного поля. Вплив цього методу на перелічені вище катодні матеріали може забезпечити більш інтенсивне їх використання в двигунах.

Це може стати дуже перспективним варіантом, зважаючи на те, що більш інтенсивне перенапилення оловом та індієм забезпечили більш тривалий час роботи двигуна навіть без допомоги механізму подачі палива [26].

1.7. Проблеми вакуумно-дугових двигунів та напрями підвищення їх експлуатаційних характеристик

Однією з проблем вакуумно-дугових реактивних двигунів є дуже низький коефіцієнт використання металу катоду. На даний час в конструкціях вакуумно-дугових двигунів здебільшого використовуються катоди невеликих розмірів (від одиниць до одного-двох десятків міліметрів). Пояснюється це тим, що такі двигуни використовуються для наносупутників, де вага та розміри двигуна повинні бути мінімально можливі. В процесі експлуатації таких двигунів матеріал катодів витрачається дуже нерівномірно, часто спостерігається оплавлення поверхні катоду.

На рисунку 1.19 наведено фотографію трубчатих титанових катодів діаметром 10 мм і товщиною стінки 1 мм після експлуатації [42].

На рисунку 1.20 наведено фотографію катодів діаметром 19 мм, виготовлених з магнію, алюмінію та цинку після експлуатації [43]. Спостерігається значна нерівномірність ерозії катодів, а також оплавлення робочої поверхні.



Рисунок 1.19 Трубчаті титанові катоди після експлуатації (ліворуч) та катод, який не був в експлуатації (праворуч)



Рисунок 1.20. Катоди з цинку, магнію та алюмінію після експлуатації

Розробка більш потужних вакуумно-дугових реактивних двигунів на металевій плазмі потребує використання катодів підвищеного розміру (50-100 мм в двигунах класу міліньютонів). В роботі [36] описані конструкція та результати дослідження вакуумно-дугового двигуна з катодом із молібдену діаметром 38 мм. На рисунку 1.21 наведено фотографію катоду з молібдену після 3,5 мільйона імпульсів.

Ерозія катоду дуже нерівномірна і коефіцієнт використання матеріалу катоду дуже низький. Це пояснюється тим, що в цій конструкції катодні плями дугового розряду переміщуються хаотично, без управління їх траєкторією.



Рисунок 1.21. Катод з молібдену діаметром 38 мм після 3,5 мільйона імпульсів

В роботі [36] приведено експлуатаційні характеристики вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі з молібденовим катодом діаметром 38 мм, висотою 30 мм та вагою 350 г, фото якого після експлуатації приведено рисунку

21. В роботі [36] вказана кількість імпульсів (3,5 млн) та тривалість одного імпульсу – 2 мс. Виходячи з цих даних, загальна тривалість процесу випаровування матеріалу катоду за вказані 3,5 млн. імпульсів дорівнює 7000 секунд, або близько 2 годин. Маса матеріалу катоду, яка була випарувана за цей час, дорівнює 91 г, що становить 0,26 від початкової маси катоду. Таким чином, коефіцієнт використання матеріалу в цьому двигуні дорівнює 0,26.

В роботі [38] приведені результат дослідження вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі МРТ4.3-001, в якому встановлено шість катодів у формі молибденових дисків діаметром 38 мм, висотою 10 мм та вагою 120 г. На рисунку 1.22 приведена фотографія повністю еродованого катоду після 2,2 млн. імпульсів. Маса еродованого металу за один імпульс, дорівнює 12 мкг, за 2,2 млн імпульсів – 26,4 г. З цих даних обчислюємо коефіцієнт використання матеріалу, який дорівнює 0.22. Загальна тривалість роботи одного катоду двигуна – 4400 секунд (1,2 години), шести катодів – 7,2 години.



Рисунок 1.22 Фото повністю еродованого катоду вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі МРТ4.3-001 після 2,2 млн. імпульсів

Металеві плазмові двигуни МРТ4.2, МРТ5.0 та Xantus X4 спільної розробки компанії Benchmark Space Systems та фірми Alameda Applied Sciences Co. [37, 38] мають дискові (діаметр 38 мм) або прямокутні катоди (15x45 мм). В кон-

струкціях цих двигунів також відсутні будь-які системи управління переміщенням катодних плям розряду, що приводить до значної нерівномірності випаровування катодів та зменшення ресурсу роботи двигунів.

Для досягнення високого ресурсу роботи вакуумно-дугових двигунів необхідно забезпечити збільшення робочої площі катоду та рівномірність його випаровування. В роботах по дослідженню катодних плям вакуумно-дугового розряду описані методи управління переміщенням катодних плям з допомогою магнітного поля, в тому числі і власного магнітного поля дугового розряду. Тому доцільно використати магнітні поля для керування переміщенням катодних плям дугового розряду, які приведені в розділі 1.3.4 «Методи керування переміщенням катодних плям по поверхні катоду».

Інша проблема пов'язана з ініціюванням дугового розряду. Зазвичай дуговий розряд ініціюється при високовольтному електричному пробіі плівки металу, нанесеного на поверхню ізолятора між катодом та анодом. Для стабільної роботи системи ініціювання необхідно, щоб плівка металу відновлювалась після кожного пробію. Враховуючи хаотичне переміщення катодних плям по поверхні катоду, не завжди забезпечується нанесення на ізолятор плівки металу необхідної товщини.

Ще однією проблемою є забезпечення вакуумно-дугового двигуна підвищеної потужності необхідним джерелом живлення. В двигунах малої потужності використовують розряд конденсатора або короткий імпульс індуктивності. Для двигунів високої потужності необхідно або використовувати конденсатори великої ємності, або велику індуктивність, що приводить до збільшення габаритів і маси двигуна.

В роботі [23] показано що робочі характеристики вакуумно-дугових двигунів змінюються в залежності від матеріалу катоду, геометрії двигуна та величини розрядного струму. Переваги вакуумно-дугових двигунів полягають у тому, що їх конструкція дуже проста, не вимагає ніякої системи подачі газу і

ними можна керувати за допомогою дуже простого пристрою регулювання потужності.

Однак необхідно подолати низку технічних проблем для реалізації потенціалу вакуумно-дугових плазмових двигунів. По-перше, необхідно досягти рівномірної ерозії катоду, який є джерелом металевої плазми. По-друге, необхідно розробити надійні системи ініціювання дугового розряду. По-третє, необхідно розробити надійні, потужні та малогабаритні джерела струму для живлення вакуумно-дугових двигунів. Прогнозовані робочі характеристики та масштабованість двигунів на базі вакуумно-дугових розрядів вказують на те, що вони мають унікальні переваги перед іншими конструкціями перспективних рушійних установок.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз науково-технічного рівня розробок вакуумно-дугових плазмових двигунів. Виявлена тенденція до переходу від створення вакуумно-дугових двигунів з реактивною тягою в десятки мікроньютонів до розробки двигунів з величиною тяги до десятків міліньютонів.

2. Розглянуті основні типи конструкцій вакуумно-дугових двигунів та систем їх електроживлення. Проведено аналіз переваг та недоліків різних типів конструкцій двигунів. Виявлені проблемні питання відомих конструкцій та запропоновані шляхи їх вирішення.

3. Розглянуті методи примусового керування переміщенням катодних плям вакуумно-дугового розряду по робочій поверхні катоду.

4. Роботи в галузі розробки та дослідження реактивних вакуумно-дугових двигунів ведуться в багатьох промислово розвинених країнах. Най-більш активно проводяться роботи в Сполучених Штатах Америки, Німеччині, Франції, Китаї, Австрії, Японії, Великобританії, Південно-Африканській Республіці, Ізраїлі.

5. На даний час основними проблемами вакуумно-плазмових двигунів є низький ресурс роботи, низький коефіцієнт використання матеріалу катоду та відсутність компактних джерел живлення, здатних забезпечити тривалість дугового розряду протягом секунд.

РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Вакуумний експериментальний стенд

Для дослідження процесу переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду та вимірювання величини тяги реактивного двигуна на металевій плазмі було розроблено та виготовлено додаткове оснащення вакуумного експериментального стенду. Створено дві системи електроживлення вакуумно-дугових двигунів (на постійному струмі та для роботи в імпульсному режимі). Також була розроблена та виготовлена система управління роботою вакуумно-дугових двигунів на основі програмованих логічних контролерів (ПЛК) LOGO! фірми Siemens, розроблено алгоритм функціонування системи керування роботою ЕРДМП та здійснено відповідне програмування контролерів для забезпечення електроживлення двигуна та керування переміщенням катодних плям вакуумно-дугового розряду по робочій поверхні катода. Створена система вимірювання та реєстрації параметрів вакуумно-дугових двигунів, яка дозволила вивчати характер переміщення катодних плям по великій поверхні катода в залежності від напруженості магнітного поля та його конфігурації, а також характер ерозії катода.

Для відпрацювання конструкцій експериментальних ракетних двигунів на металевій плазмі та проведення досліджень їх характеристик використаний стенд вакуумних випробувань малогабаритних виробів [44], виготовлений на базі вакуумної камери магнетронної установки МИР-2. Загальний вигляд стенду представлено на рисунку 2.1.

Вакуумна камера цієї установки виконана з нержавіючої сталі з системою охолодження корпусу, верхнього та нижнього фланців, а також бокових люків. Продумана та зручна конструкція вакуумної камери установки «МИР-2» з успіхом використовується в багатьох модернізованих вакуумних установках.

Для вакуумного стенду було змінено вакуумну систему установки «МИР-2», яка включала в себе паромасляний вакуумний насос та масляний форвакуумний насос. Замість цих насосів було встановлено сучасні безмасляні насоси. Також був розроблений та виготовлений пульт управління вакуумною системою.



Рисунок 2.1. Загальний вигляд стенду вакуумних випробувань малогабаритних виробів

До складу стенду входять (рисунок 2.2):

- охолоджувана вакуумна камера діаметром 800 мм та висотою 800 мм з нержавіючої сталі (позиція 1);
- об'єкт дослідження – електрореактивний двигун на металевій плазмі (позиція 2);
- пристрій вимірювання тяги (електронні ваги з захистом від потоків плазми (позиція 3);
- форвакуумний насос Leybold SCROLLVAC SC60D (позиція 4);
- система відеореєстрації (камера, кріплення, фільтри – позиція 6)

- турбомолекулярний насос PFEIFFER ATH3204M DN320(позиція 7);
- вакуумний затвор VAT pendulum valve DN320 (позиція 8);
- датчики контролю вакууму PTR-90 та дисплейний блок DISPLAY THREE фірми Leybold (входять до складу позиції 9);
- електрообладнання та система управління роботою вакуумних насосів та вакуумного затвору (входять до складу позиції 9).



Рисунок 2.2. Загальний вигляд стану вакуумних випробувань
(схематичне зображення)

Вакуумний стенд забезпечує досягнення остаточного тиску в вакуумній камері до $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Завдяки використанню «сухих» вакуумних насосів в остаточній атмосфері відсутні масляні пари, які зазвичай присутні при використанні паромасляних вакуумних насосів.

Оснащення для встановлення експериментальних двигунів в вакуумній камері стану включає в себе підставки, струмовідводи, захисні екрани від потоку металевої плазми, захисний екран вагів від електромагнітних перешкод. Також були виготовлені інтерфейси для вводу в вакуумну камеру напруги живлення дугового розряду, напруги живлення соленоїдів для створення магнітного поля та для виводу сигналів вимірювання ваги.

2.2. Електрообладнання для живлення вакуумно-дугового двигуна

2.2.1. Система енергозабезпечення вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі

Система енергозабезпечення для живлення ВДРД повинна забезпечувати можливість подачі на двигун електричної напруги з наступними параметрами:

- постійну напругу величиною від 20 В до 80 В для живлення дугового розряду постійного струму з можливістю плавного регулювання струму від 0 А до 200 А;
- імпульсну напругу величиною 3-4 кВ з енергією імпульсу близько одного джоуля для ініціювання дугового розряду;
- імпульсну напругу величиною від 20 В до 80 В для живлення імпульсного дугового розряду тривалістю до 1 с;
- напругу постійного струму величиною від 0 В до 60 В для живлення соленоїдів магнітної системи з можливістю плавного регулювання струму від 0 А до 15 А.

Для живлення дугового розряду вакуумно-дугових двигунів використовували дві різні системи. Живлення постійним струмом забезпечувалось серійним джерелом живлення ИВЭ-045, характеристики якого вказані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Характеристики джерела живлення ИВЭ-045

Вихідна регульована потужність, Вт	від 500 до 5500
Вихідна регульована напруга, В	від 10 до 85
Вихідний регульований струм, А	від 22 до 220
Імпульсна напруга ініціювання розряду, кВ	4
Енергія імпульсу ініціювання розряду, Дж	1

Для роботи системи ініціювання дугового розряду двигунів використовували імпульсне джерело живлення з напругою 4 кВ і енергією імпульсу ініціювання розряду 1 Дж, яке входить до складу джерела ИВЭ-045. Управління траєкторією переміщення катодної плями по поверхні дискового катода вакуумно-дугового двигуна здійснюється шляхом змінення магнітного поля, утвореного системою постійних магнітів та двох соленоїдів - внутрішнього та зовнішнього. Змінюючи напрям та силу струму, що проходить по соленоїдах, можна створити потрібну конфігурацію магнітного поля. Живлення соленоїдів включає в себе два джерела живлення BVP Electronics LAB tools Power Supply 60V 15A. Схема функціональна електрообладнання вакуумного стенду для роботи ЕРДМП на постійному струмі приведена на рисунку 2.3.

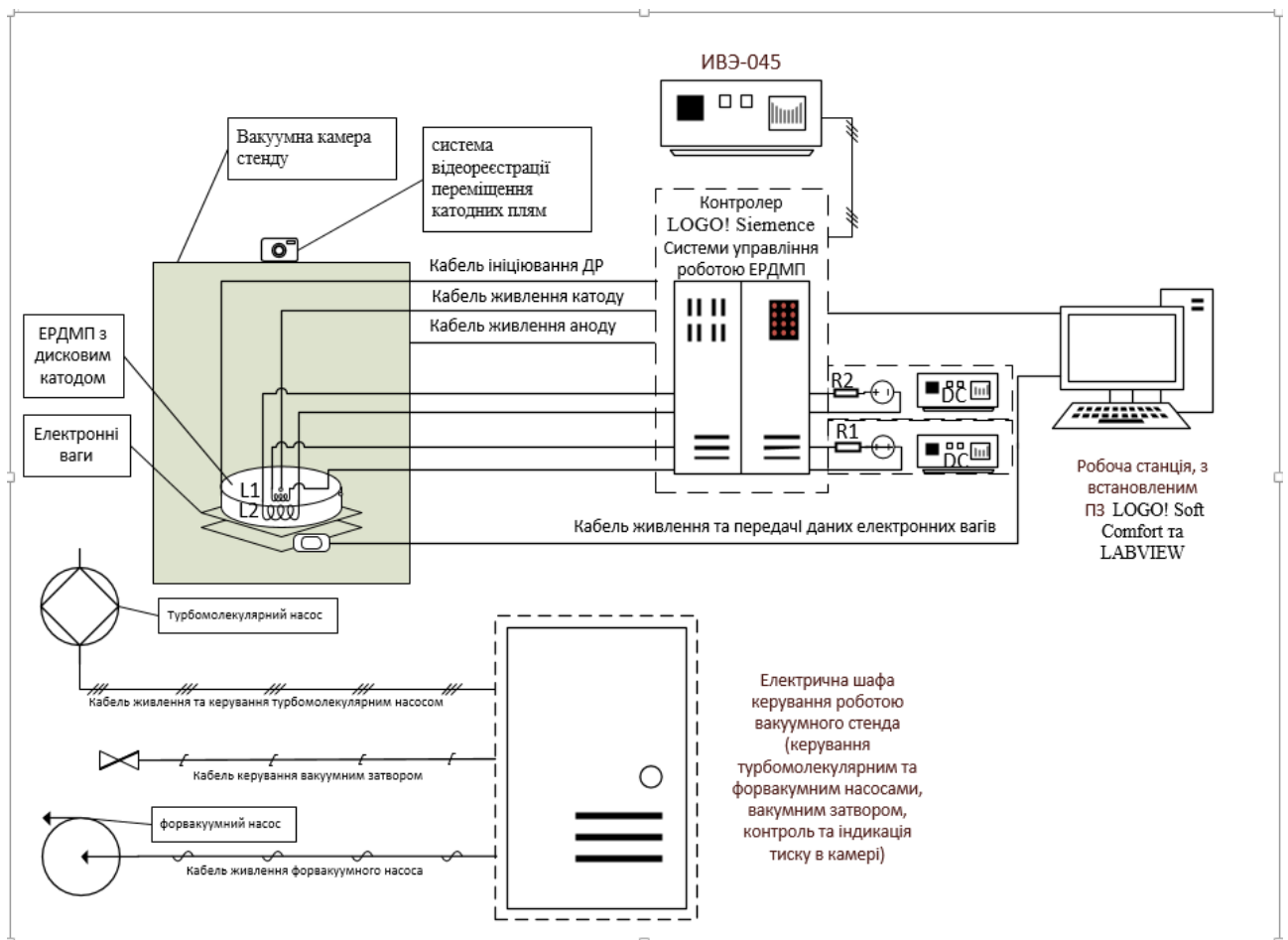


Рисунок 2.3 Схема функціональна електрообладнання вакуумного стенду для роботи ЕРДМП в режимі постійного струму

При роботі ЕРДМП в імпульсному режимі використовували батарею електrolітичних конденсаторів загальною ємністю 20 000 мкф з напругою 100 В. Зарядження батареї конденсаторів здійснювали від джерела постійного струму ИВЭ-045. Підключення батареї конденсаторів до електродів вакуумно-дугового двигуна здійснювали високовольтним тиристорним модулем з гальванічною розв'язкою МТ1-250-12. На рисунку 2.4 представлена функціональна схема електрообладнання вакуумного стенду для роботи ЕРДМП зі спіральним катодом.

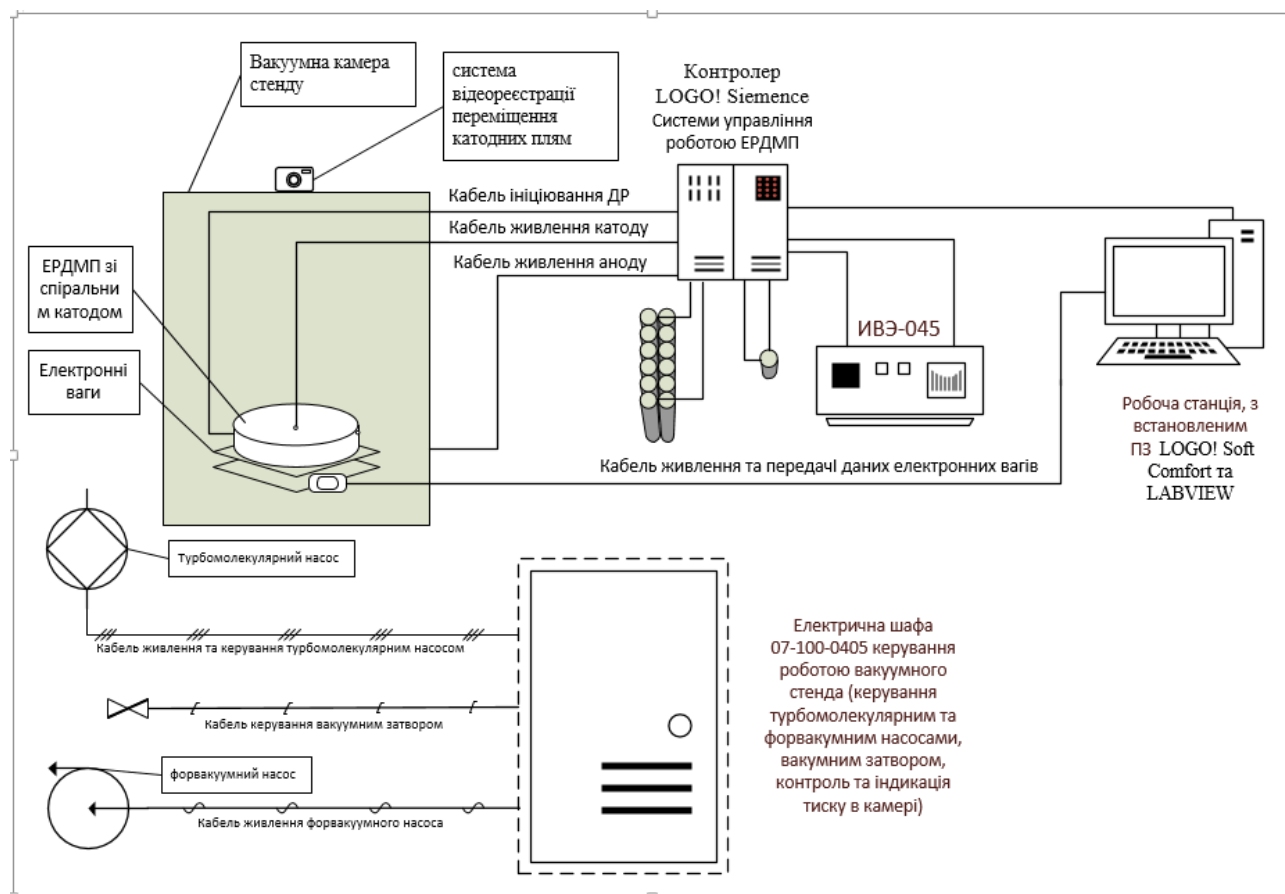


Рисунок 2.4 Схема функціональна електрообладнання вакуумного стенду для роботи ЕРДМП в режимі імпульсного струму

2.2.2. Система управління роботою експериментальних вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі.

Система управління роботою експериментальних вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі реалізована на програмованому логічному контролері

LOGO! 0BA8 M 24CE фірми Siemens. Комутація входів, виходів, електрична схема для реалізації алгоритму роботи системи управління програмується в програмному комплексі LOGO! Soft Comfort. v. 8.3.0.

Контролер забезпечує подачу імпульсу ініціювання дугового розряду, контроль наявності розряду, регулювання тривалості розряду при живленні двигуна від джерела постійного струму та тривалість заряду батареї конденсаторів при імпульсному режимі роботи двигуна. На рисунку 2.5 представлена функціональна схема частини системи управління роботою ЕРДМП, а саме система ініціювання дугового розряду.

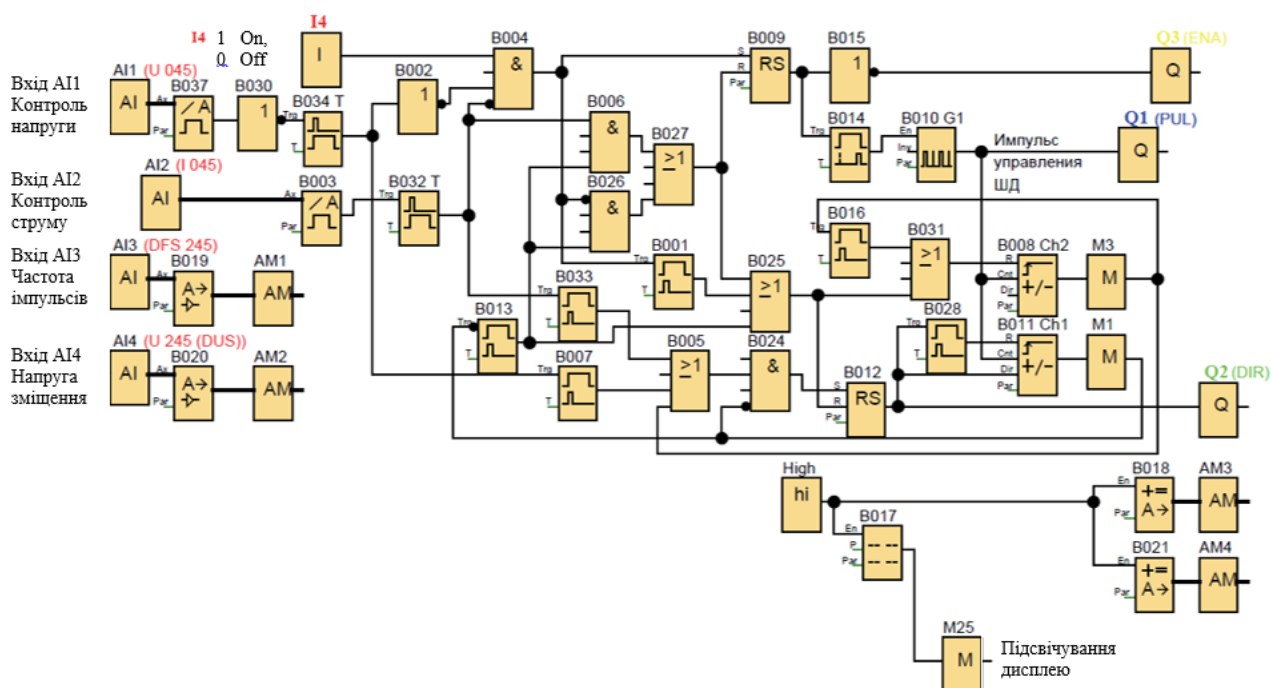


Рисунок 2.5 Функціональна схема логічного контролера LOGO! 0BA8 M 24CE системи ініціювання дугового розряду

При роботі вакуумно-дугових двигунів з дисковим катодом контролер синхронізує подачу напруги на соленоїди двигуна та керує їх тривалістю (рисунок 2.6). При роботі вакуумно-дугових двигунів зі спіральним катодом контролер обмежує тривалість розряду при живленні двигуна від джерела постійного струму.

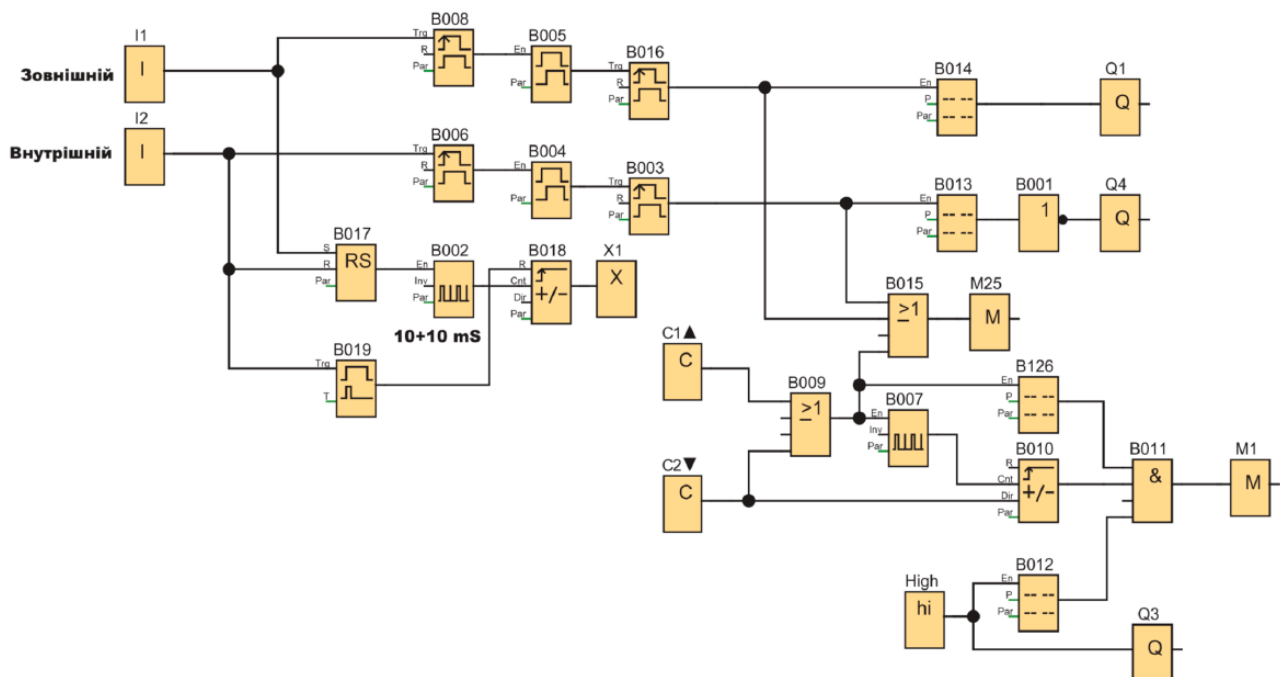


Рисунок 2.6 Функціональна схема логічного контролера LOGO! 0BA8 M 24CE, системи керування роботою ЕРДМП з дисковим катодом, схема комутації та управління соленоїдами магнітної системи

2.3. Система вимірювання та реєстрації параметрів вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі.

Вимірювання реактивної тяги вакуумно-дугових плазмових двигунів, які працюють на імпульсах тривалістю від сотень мікросекунд до десятків мілісекунд, є досить складною задачею. В роботах [38, 41, 42, 45-46] приведені різні конструкції реєстрації реактивної тяги для імпульсних вакуумно-дугових двигунів. Ці конструкції доволі складні і процес вимірювання реактивної тяги потребує точного калібрування.

Розроблені в цій роботі ЕРДМП працюють з імпульсами тривалістю від кількох десятих часток секунди до кількох секунд. В цьому випадку для вимірювання реактивної тяги було використано електронні ваги PS 6000.R2 RADWAG,

що забезпечують фіксацію зміни ваги з потрібною чутливістю та точністю, а також дозволяють здійснювати запис журналу вимірювань у реальному часі для подальшої обробки та аналізу результатів. За час роботи двигуна система вимірювання електронних вагів приходить в рівновагу і реєструються стабільні значення реакції датчиків вагів на додаткове навантаження, яке створює реактивна тяга. Електрична схема підключення соленоїдів ЕРДМП та інтерфейс системи вимірювання реактивної тяги представлено на рисунку 2.7.

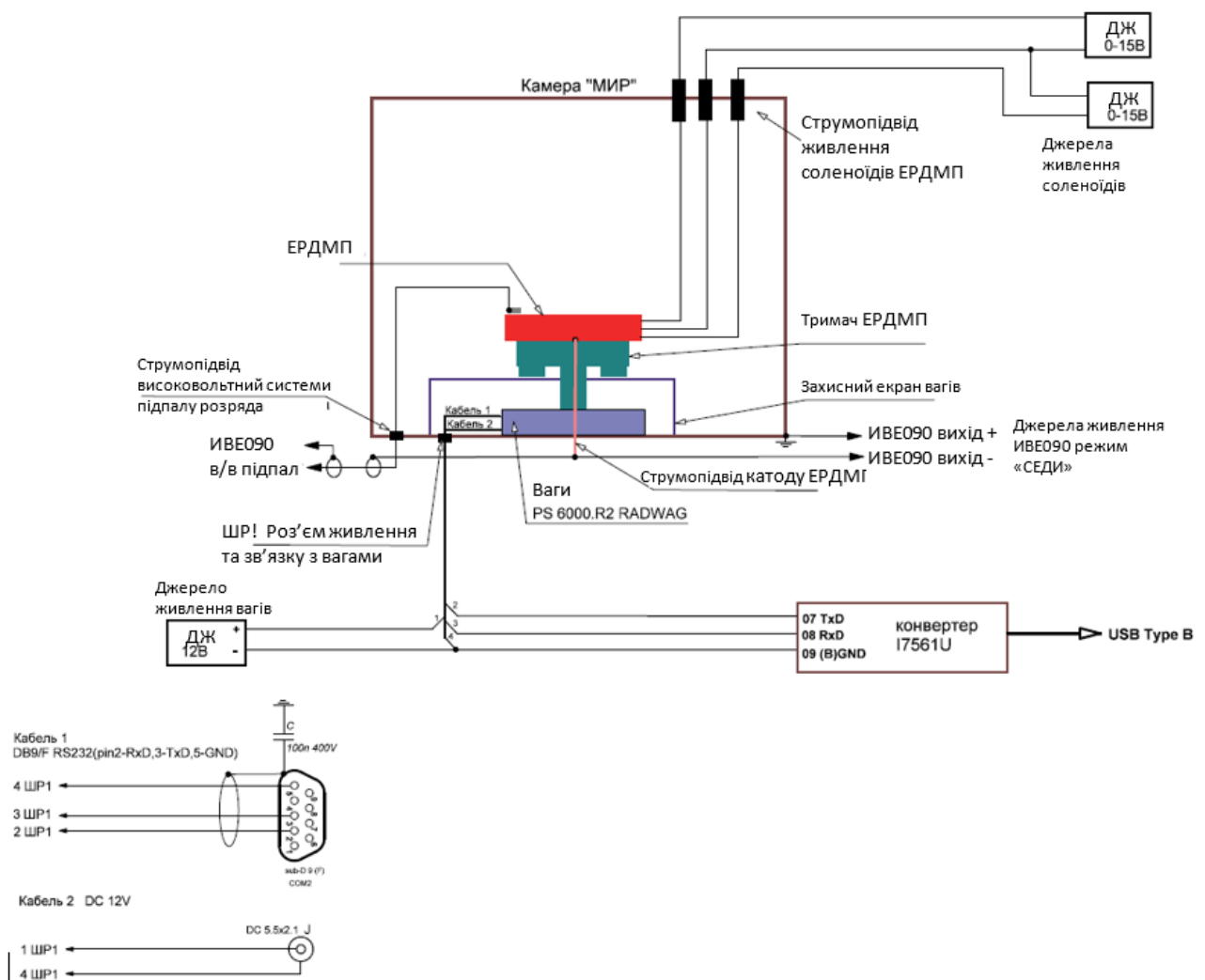


Рисунок 2.7 Електрична схема підключення соленоїдів ЕРДМП та інтерфейс системи вимірювання реактивної тяги

До складу системи вимірювання та реєстрації параметрів входять:

- електронні ваги PS 6000.R2 RADWAG;

- електричні інтерфейси, кабель живлення вагів, Data-кабель DB9F RS232, конвертер I7651U RS232/RS485 to USB;
- робоча станція (персональний комп'ютер з встановленим програмним забезпеченням LOGO! Soft Comfort. v. 8.3.0, LABVIEW, MS Office, Exel).

Електронні ваги розміщені у вакуумній камері, для захисту від плазми, на платформу вагів було встановлено захисний екран у вигляді диску з нержавіючої сталі, який в свою чергу був захищений ізолятором (пластина фторопласту товщиною 5 мм), на який встановлювався ЕРДМП.

Сигнал з виходу вагів через інтерфейс RS232 передавався на конвертер I7651U RS232/RS485 to USB і потім на робочу станцію. Журнал вимірів синхронізувався з інформацією від ПЛК LOGO!, таким чином одночасно реєструється кілька параметрів: струм дугового розряду, напруга між анодом та катодом вакуумно-дугового двигуна, тривалість дугового розряду, значення тяги ЕРДМП та остаточний тиск в вакуумній камері.

Реактивна тяга двигуна розраховувалась, як різниця між значеннями ваги при вимкненому ЕРДМП та при подачі живлення і виходу ЕРДМП на робочій режим.

Всі синхронізовані дані автоматично, записувались до файлу у форматі CSV, для подальшого аналізу та обробки у MS Office Exel.

Система відеозапису включала в себе камеру OLYMPUS OMD EM-5 з частотою 30 кадрів за секунду та камери GO PRO з частотою 200 кадрів за секунду.

Відеокамери встановлювались на ілюмінаторі, розташованому на верхньому фланці вакуумної камери, над робочою поверхнею вакуумно-дугового двигуна.

Висновки до розділу 2

1. Створено вакуумний стенд, який включає в себе системи електроживлення вакуумно-дугових двигунів, системи управління переміщенням катодних плям, які реалізовані на програмованому логічному контролері LOGO! 0BA8 M 24CE фірми Siemens та систему реєстрації параметрів роботи двигунів.
2. Розроблено та виготовлено додаткове оснащення вакуумного експериментального стенду (струмовідводи, захисні екрани від потоку металевої плазми, захисний екран вагів від електромагнітних перешкод, інтерфейси для вводу в вакуумну камеру напруги живлення дугового розряду, напруги живлення соленоїдів для створення магнітного поля та для виводу сигналів системи вимірювання реактивної тяги).
3. Розроблено систему керування та здійснено програмування контролера LOGO! фірми Siemens для синхронізації роботи пристрою ініціювання дугового розряду та комутації напруги дугового розряду для переміщення катодних плям по поверхні спірального катода.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДВИГУНА З ДИСКОВИМ КАТОДОМ

Конструкція вакуумно-дугового реактивного двигуна на металевій плазмі повинна відповідати таким вимогам:

- надійний запуск та підтримка дугового розряду в широкому діапазоні струмів;
- локалізація катодних плям на робочій поверхні катоду;
- оптимальна діаграма спрямованості плазмових потоків;
- максимальний коефіцієнт використання матеріалу катода (відношення ваги відпрацьованого катода до ваги вихідного);
- достатній запас матеріалу, що випаровується, що визначається початковими розмірами катода.

3.1. Концептуальна схема двигуна з дисковим катодом

Для забезпечення високого ресурсу роботи реактивного двигуна на металевій плазмі необхідно мати достатню масу матеріалу катоду, який є джерелом плазми. Також доцільно вибрати велику площу робочої поверхні катоду для запобігання перегріву катоду при великих значеннях розрядного струму.

Оптимальним варіантом є вибір дискової форми катоду. Для досягнення рівномірної ерозії катоду необхідно забезпечити кероване переміщення катодних плям дугового розряду по його робочій поверхні. Кероване переміщення катодних плям можливо здійснити за допомогою магнітного поля. В сучасних вакуумно-дугових випарниках металів, які використовують для нанесення вакуумно-дугових покриттів, широко застосовується метод керування переміщенням катодних плям дугового розряду за допомогою магнітного поля, силові лінії якого мають арочну конфігурацію [47, 48]. Силові лінії такого поля розташовані над катодом і мають вигляд дуг (арок). Катодна пляма рухається всередині такої арки, де перпендикулярна складова магнітного поля дорівнює нулю (вершина

арки). Катодні плями переміщуються під аркою силових ліній магнітного поля. При незмінному магнітному полі катодні плями будуть переміщатись по одній і тій же траєкторії, і через деякий час внаслідок випаровування металу на поверхні катоду з'являється кільцева канавка. Для того, щоб максимально використати матеріал катоду, необхідно переміщати катодні плями дугового розряду по всій його поверхні, для чого необхідно або переміщувати магнітну систему, яка створює магнітне поле арочної конфігурації, або періодично змінювати конфігурацію магнітного поля.

В роботі [58] показано, що при незмінному арочному магнітному профілі еродованої поверхні катоду може бути описаний кривою Гауса (рисунок 3.1), яка визначається максимальною глибиною виробітки H_0 і середнім квадратичним відхиленням σ , яке відповідає глибині виробітки $H_0/e^{0.5}$:

$$H(r) = H_0 \exp\left[-\frac{(r-R)^2}{2\sigma^2}\right]$$

де R – радіус максимальної виробітки.

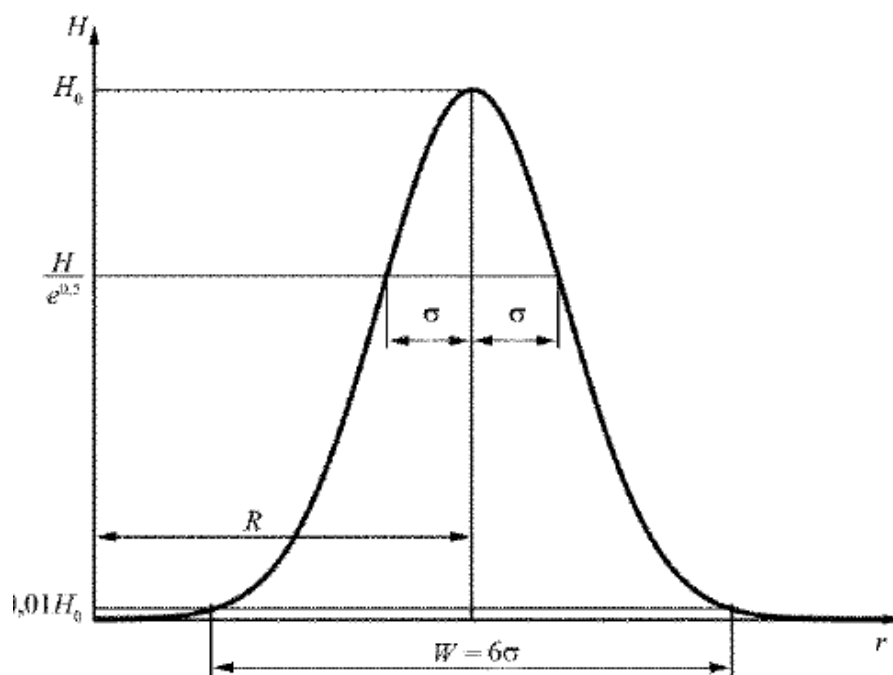


Рисунок 3.1 Крива Гауса, яка описує профіль ерозії катоду при переміщенні катодних плям під аркою силових ліній магнітного поля [58].

H_0 – максимальна глибина канавки (виробітки), R - радіус максимальної виробітки, σ - середнє квадратичне відхилення, W - ширина зони виробітки

При багаторазовій зміні радіусу кругового переміщення катодних плям профіль виробітки буде дорівнювати сумі профілей виробітки прифіксованій траєкторії переміщення катодних плям [58]:

$$H_{\Sigma}(r) = H_0 \sum_i \exp \left[-\frac{(r-R_i)^2}{2\sigma^2} \right]$$

Для одержання нерівномірності виробітки менш, ніж 3 % необхідно, щоб зміна радіусу переміщення катодних плям була не більше 1/3 ширини доріжки виробітки [58]. Виходячи з цього висновку при проектуванні системи керування катодними плямами дугового розряду доцільно використати не ступінчасту зміну індукції магнітного поля, а безперервну. Для цього необхідно величину струму соленоїду задавати за допомогою керуючої програми, яка буде враховувати швидкість переміщення катодних плям, мінімальний та максимальний радіуси траєкторії переміщення катодних плям.

В роботі [49] для зміни положення арки магнітного поля використали електромагнітну систему, що складається з двох соленоїдів, яка створює на поверхні катода аорчне магнітне поле. Змінюючи співвідношення струмів у соленоїдах магнітної системи, можна було змінювати кривизну ліній аркового магнітного поля та радіус кругового руху катодної плями. Беручи до уваги необхідність досягнення мінімальної ваги реактивного двигуна на металевій плазмі доцільно замінити один з соленоїдів постійним магнітом.

Таким чином, необхідно розробити реактивний двигун на металевій плазмі, який буде включати в себе дисковий катод з випаруваного матеріалу, та магнітну систему з постійного магніту, розташованого під робочою поверхнею катода, та соленоїду, розташованого на периферійній області дискового катода. Крім того, необхідно створити систему ініціювання дугового розряду, захистити неробочу поверхню катода екранами та забезпечити розташування аноду дугового розряду в зоні потоку плазми.

3.2. Розробка експериментальної конструкції двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм

Для проведення попередніх досліджень розроблено та виготовлено вакуумно-дуговий двигун з дисковим катодом діаметром 95 мм, осьовий переріз якого приведено на рисунку 3.2 [50]. Матеріал катоду – алюмінієвий сплав АМГ6.

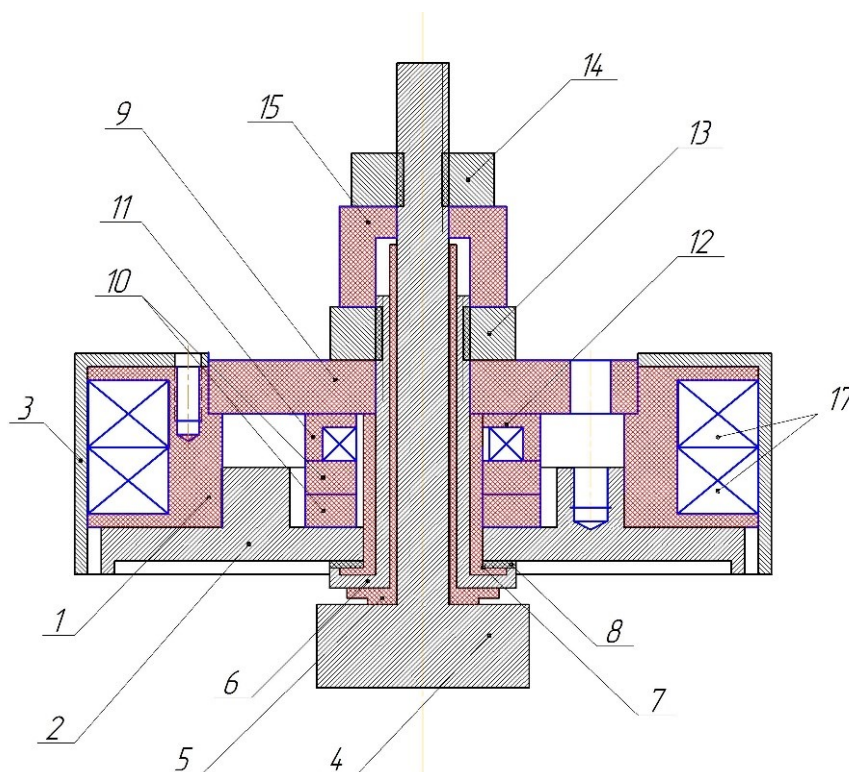


Рисунок 3.2 Осьовий переріз експериментального вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм

В корпусі 1 з ізолюючого матеріалу встановлений катод 2, нижня робоча поверхня якого є робочою, по якій переміщуються катодні плями дугового розряду. Екран 3 закриває бічну поверхню катоду 2 і не дозволяє катодним плямам переміщуватись з робочої поверхні катоду. Анод 4 встановлений в центрі двигуна. Електрод ініціювання дугового розряду 6 ізолюваний від аноду ізолятором 5, а від катоду - ізолятором 7. Кільцевий керамічний ізолятор 8 розташований між робочою поверхнею катоду та електродом ініціювання розряду 6. При подачі на електрод 6 високовольтного імпульсу виникає розряд по боковій по-

верхні ізолятора 8, який ініціює дуговий розряд між катодом 1 та анодом 4. Катодні плями дугового розряду переміщуються по робочій поверхні катоду по кільцевій траєкторії, утворюючи потоки металічної плазми, направлені від робочої поверхні катоду. Ці потоки плазми і створюють реактивну тягу.

Рівномірне випаровування катоду забезпечує магнітна система, яка складається з центрального дискового магніту 12 та периферійного соленоїда 17.

В роботах [51, 52] приведені результати дослідження параметрів комбінованої магнітної системи електродугового ракетного двигуна на металевій плазмі.

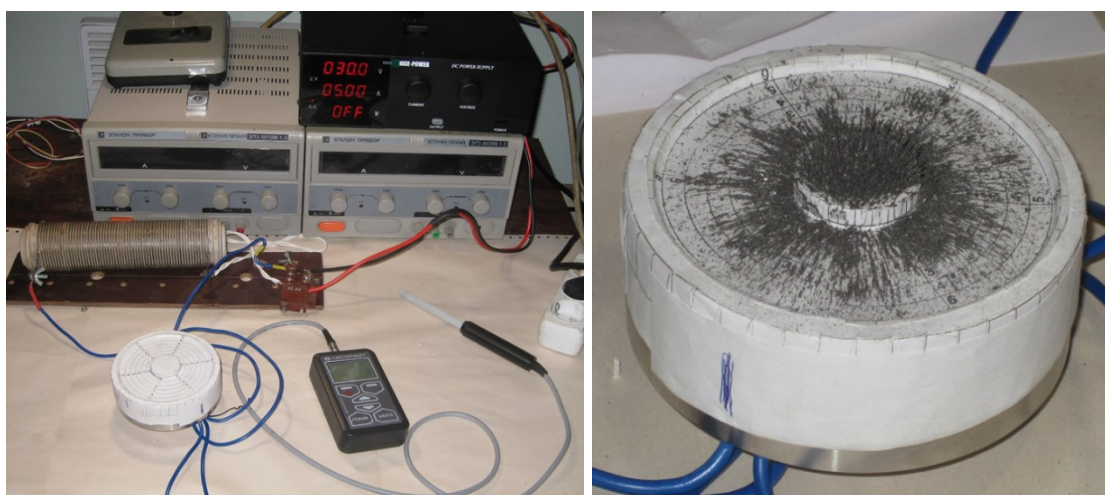


Рисунок 3.3 Дослідження параметрів магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом

На рисунку 3.3 показано експериментальне обладнання для дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом .

На рисунку 3.4 зображені силові лінії магнітного поля 3, яке створене постійним магнітом 2, розташованим в центрі дискового катоду 5 при відсутності струму в соленоїді 1, розташованому на периферії катоду 5. Траєкторія 4 руху катодних плям розташована в центральній частині катоду 5 під вершиною арки силових ліній магнітного поля 3.

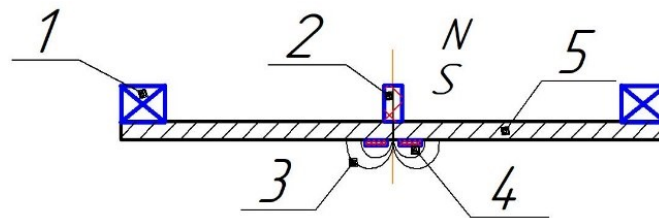


Рисунок 3.4. Арка силових ліній магнітного поля
при відсутності струму в соленоїді

На рисунку 3.5 зображені силові лінії магнітного поля 3, яке створене постійним магнітом 2, розташованим в центрі дискового катода 5 та соленоїдом 1 при середньому значенні струму. Траєкторія 4 руху катодних плям розташована в центральній частині катода 5 під вершиною арки силових ліній магнітного поля 3.

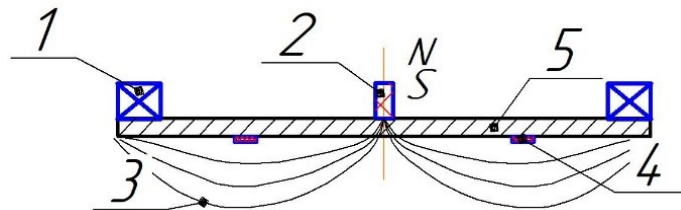


Рисунок 3.5 Арка силових ліній магнітного поля
при середньому значенні струму в соленоїді

На рисунку 3.6 зображені силові лінії магнітного поля 3, яке створене постійним магнітом 2, розташованим в центрі дискового катода 5 та соленоїдом 1 при максимальному значенні струму. Траєкторія 4 руху катодних плям розташована в периферійній частині катода 5 під вершиною арки силових ліній магнітного поля 3.

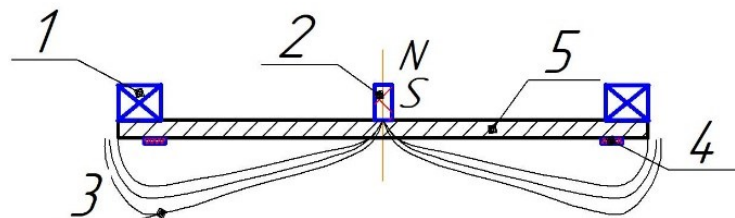


Рисунок 3.6. Арка силових ліній магнітного поля
при максимальному струмі в соленоїді

Проведені дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з різними постійними магнітами та з різними варіантами роботи керуючих соленоїдів показали, що використання комбінації постійного магніту та соленоїду забезпечує можливість переміщення катодних плям дугового розряду по всій поверхні катоду, забезпечуючи його рівномірне випаровування.

3.3. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом 95 мм

Проведення випробувань ЕРДМП з дисковим катодом з алюмінієвого сплаву АМГ6 проводили в вакуумній камері стенду при тиску остаточних газів $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Струм дугового розряду становив 100 А, напруга при роботі розряду – від 28 В до 40 В. Мета проведення попередніх досліджень – визначення характеру переміщення катодних плям при зміні конфігурації магнітного поля.

На рисунку 3.7 показні фотографії роботи електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом в вакуумній камері стенду. Зліва зафіксований момент ініціювання дугового розряду, справа – траєкторія переміщення катодних плям дугового розряду.



Рисунок 3.7. Робота в вакуумній камері стенду експериментального електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом

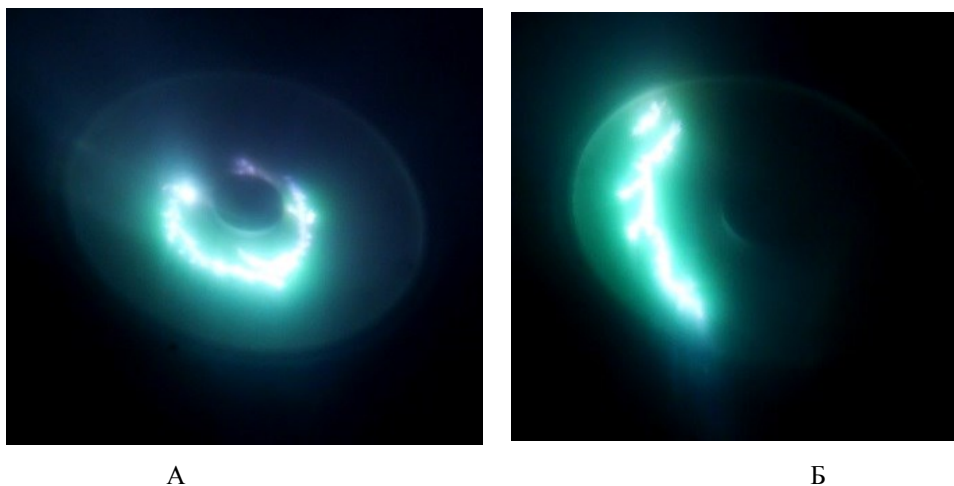


Рисунок 3.8. Траєкторія переміщення катодних плям,
а – індукція магнітного поля 3 мТ,
б – індукція магнітного поля 12 мТ

На рисунку 3.8 показні фотографії траєкторії переміщення катодних плям на робочій поверхні дискового катоду електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі в вакуумній камері. На рисунку 3.8 а – траєкторія переміщення катодних плям дугового розряду при індукції магнітного поля 3 мТ, яку створює тільки постійний магніт (струм в периферійному соленоїді відсутній), на рисунку 3.8 б – при величині струму 10 А в периферійному соленоїді.

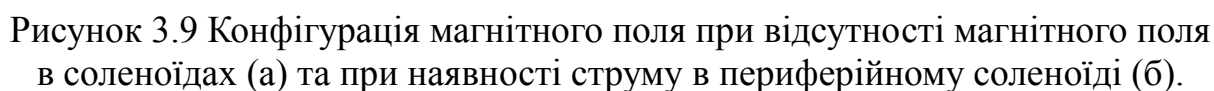
Проведені експерименти показали, що при зміні струму периферійного соленоїду змінюється радіус траєкторії руху катодних плям, що підтверджує концепцію можливості управління траєкторією руху за допомогою комбінованої магнітної системи, яка складається з постійного магніту та соленоїдів.

При випробуваннях експериментального електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі з дисковим катодом відбувся значний нагрів катоду і руйнування ізолятора двигуна.

3.4. Розробка двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм

На основі аналізу результатів дослідження роботи експериментальної конструкції двигуна з дисковим катодом діаметром 95 мм розроблено новий експериментальний зразок двигуна. Діаметр катоду збільшено до 195 мм, використані

Розроблена розрахункова модель магнітної системи з постійним центральним магнітом та центральним та периферійним соленоїдами. На рисунку 3.9а приведено конфігурацію магнітного поля при відсутності магнітного поля в соленоїдах, на рисунку 3.9б – при наявності струму в периферійному соленоїді (1-струм соленоїду 15 А, струм соленоїду 10 А).



На рисунку 3.10 приведено осьовий переріз вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом збільшеного діаметра (195 мм) та керамічними ізоляторами. Він включає в себе наступні елементи: 1 – катод з алюмінієвого сплаву 5056 (аналог АМГ6), 2 – анод, 3 – пристрій ініціювання розряду, 4 – постійні магніти, 5 – внутрішній соленоїд, 6 – зовнішній соленоїд, 7 – магнітопровід. Дисковий катод 1 встановлений на магнітопроводі 7 через опорні ізолятори. На магнітопроводі 7 встановлені три магнітні системи.

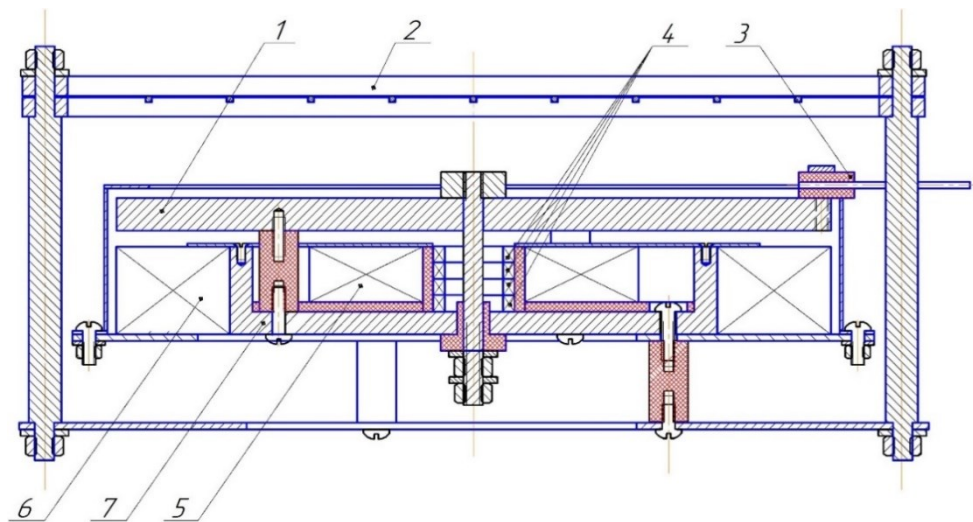


Рисунок 3.10. Осьовий переріз експериментального ЕРДМП
з дисковим катодом діаметром 195 мм

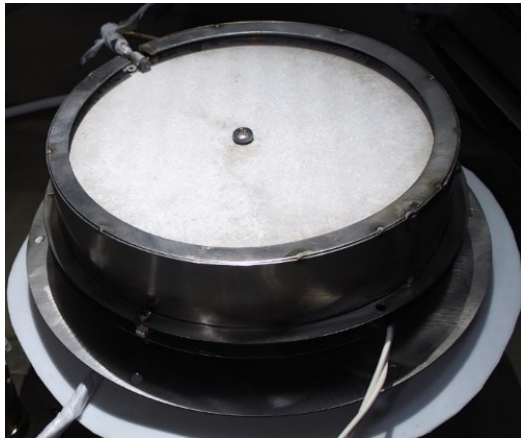
1 – катод, 2 – анод, 3 – пристрій ініціювання розряду, 4 – постійні магніти, 5 – внутрішній соленоїд, 6 – зовнішній соленоїд, 7 – магнітопровід

Перша магнітна система включає чотири магнітних кільця 4, виготовлених з самарій-кобальтового сплаву та магнітопровід 7. Силкові лінії магнітного поля на поверхні катоду 1 мають конфігурації арки, що забезпечує переміщення катодних плям дугового розряду по кільцевій траєкторії.

Друга магнітна система включає в себе внутрішній соленоїд 5, який має 100 витків мідного дроту діаметром 2 мм та магнітопровід 7. Зміною величини струму через обмотку соленоїду 5 можна змінювати величину індукції та конфігурацію силових ліній магнітного поля, змінюючи цим траєкторію та швидкість переміщення катодних плям по поверхні катоду.

Третя магнітна система включає в себе зовнішній соленоїд 6, який має 100 витків мідного дроту діаметром 2 мм та магнітопровід 7. Зміною величини струму через обмотку соленоїду 6 можна змінювати величину індукції та конфігурацію силових ліній магнітного поля, змінюючи цим траєкторію та швидкість переміщення катодних плям по поверхні катоду.

Комбінацією цих трьох магнітних систем можна забезпечити зміну в широких межах індукції магнітного поля та конфігурації його силових ліній, що дозволяє провести дослідження тяги реактивного двигуна на металевій плазмі.



А



Б

Рисунок 3.11. Зовнішній вигляд двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм
а - без допоміжного аноду, б - з встановленим допоміжним анодом

Для ініціювання дугового розряду на периферійній частині катоду 1 встановлений блок ініціювання дугового розряду, який включає в себе електрод ініціювання розряду, ізолятор та фіксатор електроду. Блок ініціювання дугового розряду аналогічний відомим системам ініціювання дугового розряду в електродугових випарниках металу (наприклад, в установках типу БУЛАТ).

Зовнішній вигляд двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм показано на рисунку 3.11.

3.5 Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм

Дослідження вакуумно-дугового двигуна з дисковим катодом діаметром 195 мм проводили в вакуумній камері при остаточному тиску $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для вимірювання тяги використовували електронні ваги PS-6000R.2 з виведенням даних через інтерфейс RS-232C.

Електронні ваги встановлювали в вакуумній камері, на їх робочий стіл встановлювали металічний диск, далі – фторопластовий ізолятор, а на нього ста-

вили вакуумно-дуговий двигун. Через ілюмінатор проводили відеозапис катодних плям дугового розряду з допомогою камер OLYMPUS OM-D EM-5 або GO PRO. Реєстрація величини струму та напруги дугового розряду проводилась з допомогою програми LABVIEW.

На рисунку 3.12 показано траєкторії переміщення катодних плям дугового розряду з величиною струму 120 А при різних величинах струму зовнішнього соленоїда. При відсутності струму в соленоїдах на робочій поверхні катоду є тільки магнітне поле, створене постійним магнітом, розташованим в центрі дискового катоду. В цьому випадку траєкторія переміщення катодних плям, які переміщуються під аркою силових ліній магнітного поля постійного магніту, має мінімальний діаметр, (рисунок 3.12а). При максимальному значенні струму в периферійному соленоїді траєкторія переміщення катодних плям дугового розряду має максимальний діаметр (рисунок 3.12в). Пояснюється це тим, що магнітне поле периферійного соленоїду деформує арку силових ліній магнітного поля постійного магніту і вершина арки розташовується на більшій відстані від центру катоду. При меншому значенні магнітного поля периферійного соленоїду діаметр траєкторії переміщення катодних плям зменшується (рисунок 3.12б).

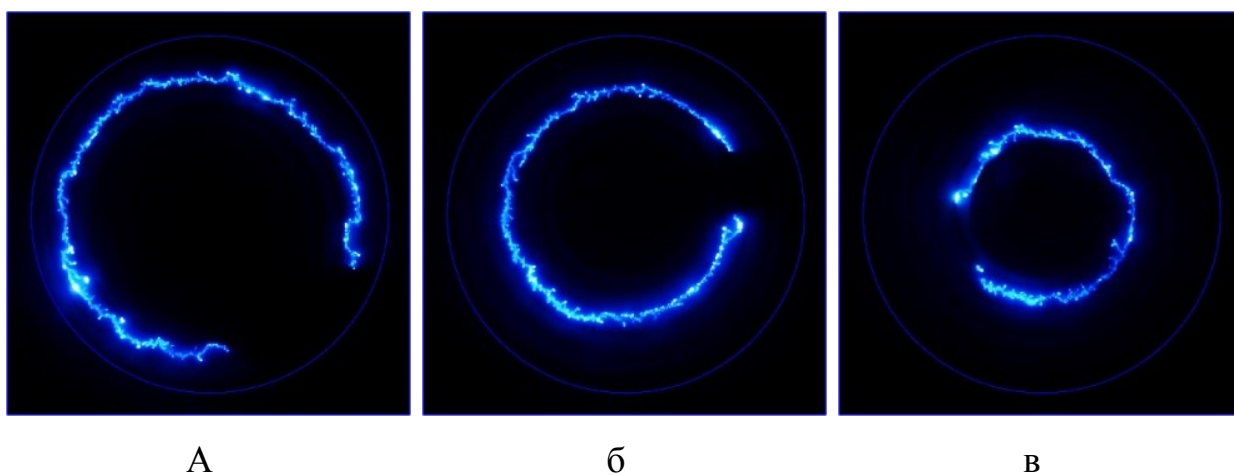


Рисунок 3.12. Траєкторії переміщення катодних плям при різних величинах струму зовнішнього соленоїда (а – 12 А, б – 8 А, в- 0 А)

Керування переміщенням катодних плям можна також здійснити за допомогою магнітного поля периферійного та центрального соленоїдів без постійного магніту. Проведені експерименти показали, що практично немає різниці між вказаними методами керування. Враховуючи, що постійний магніт має значно меншу масу та не потребує окремого джерела живлення, для вакуумно-дугового реактивного двигуна доцільно використовувати систему керування переміщенням катодних плям на основі комбінації соленоїда та постійного магніту.

Проведені випробування двигуна з дисковим катодом при різних конфігураціях магнітного поля та різних значеннях струму дугового розряду. Величини розрядного струму, напруги між анодом та катодом в залежності від струму соленоїда (індукції магнітного поля) вказані в таблиці 3.1.

Величину тяги визначали, як різницю значень ваги ЕРДМП при наявності розряду та ваги двигуна без розряду. Цей метод дозволяє провести оцінку величини тяги з невеликою точністю, але завдяки його простоті може бути проведений великий обсяг досліджень для вибору оптимальної конструкції двигуна. Величину тяги відносно величини розрядного струму визначали шляхом ділення одержаного значення реактивної тяги на величину розрядного струму.

На рисунку 3.13 приведено зведений графік зміни напруги, струму та ваги вакуумно-дугового двигуна в процесі роботи дугового розряду. На початковий момент напруга на електродах вакуумно-дугового двигуна дорівнює вихідній напрузі джерела живлення (74 В), вага двигуна з опорним диском – 5856,86 г.

В момент ініціювання дугового розряду напруга між анодом та катодом двигуна зменшується до величини 38-38,5 В, величина струму становить 190 А, а величина показань на вагах збільшується до 5861,43 г за рахунок реактивної сили, створюваної вакуумно-дуговим двигуном. Показання ваги запізнюються відносно моменту ініціювання що пояснюється інертністю системи вимірювання. В момент відключення джерела живлення напруга на електродах і струм розряду зменшуються до нуля, а вага з тим же запізненням зменшується до вихід-

дного значення. Різниця в показаннях ваги становить 4,57 г, що відповідає величині тяги близько 44,79 мН. Питома реактивна тяга T обчислювалась, як результат ділення виміряного значення реактивної тяги на величину потужності розряду P .

$$\frac{T}{P} = \frac{44,79}{7,3} = 6,14 \text{ мН/кВт}$$

Одержані величини питомої реактивної тяги нижчі порівняно з величинами, які приведені в роботі [38], які становлять величину 6,14 мН/кВт. Це пояснюється тим, що при переміщенні катодних плям під аркою силових ліній магнітного поля напруга на розряді, а отже і енерговитрати значно більші, ніж при відсутності магнітного поля. Тому відношення тяги до енерговитрат в магнітному полі буде нижче, ніж при відсутності магнітного поля.

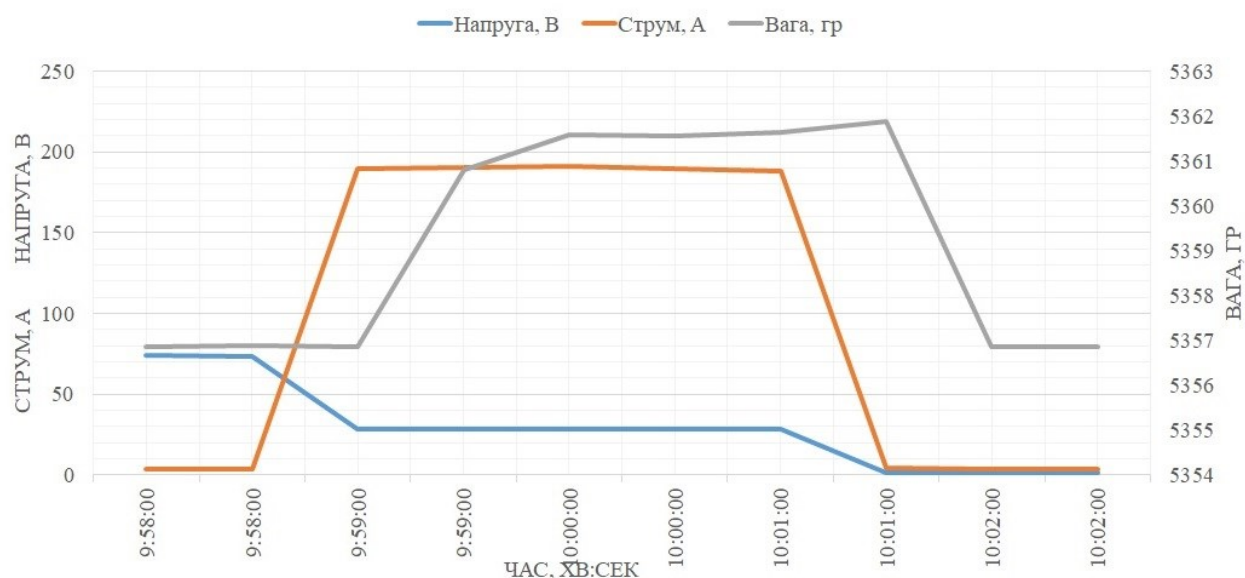


Рисунок 3.13. Зведений графік зміни параметрів двигуна з дисковим катодом при струмі розряду 189,8 А

Таблиця 3.1

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна з дисковим катодом при струмі розряду 189,8 А

Час	Напруга розряду, В	Струм розряду, А	Показання вагів, г
9:58:00	73,8757	3,6039	5856,86
9:58:00	73,6697	3,6039	5856,89
9:59:00	38,2964	189,9046	5856,85
9:59:00	38,0904	190,6562	5860,81
10:00:00	38,2964	190,9784	5861,58
10:00:00	38,3788	189,5825	5861,55
10:01:00	38,5025	187,9718	5861,64
10:01:00	73,5505	4,1408	5861,59
10:02:00	73,6329	3,2817	5856,87
10:02:00	73,5093	3,8186	5856,85

На рисунку 3.14 приведено зведений графік зміни параметрів вакуумно-дугового двигуна при струмі розряду 111,9 А. Зміна ваги за рахунок реактивної тяги становить 1,78 г, що відповідає величині тяги близько 17,44 мН. Питома реактивна тяга – 4,35 мН/кВт.

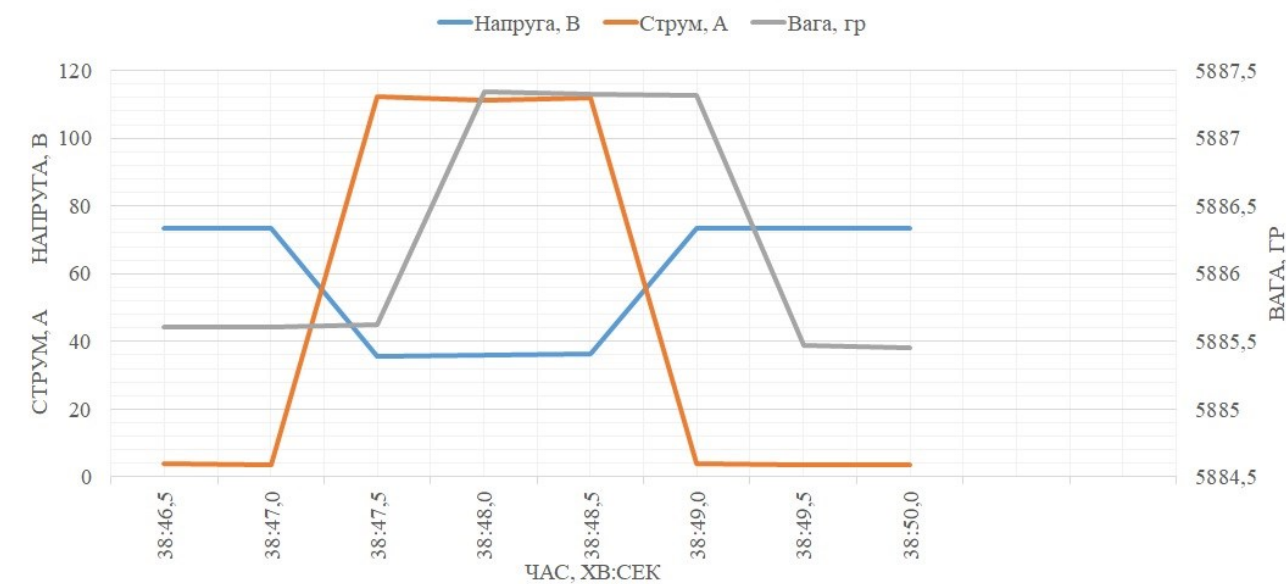


Рисунок 3.14. Зведений графік зміни параметрів двигуна з дисковим катодом при струмі розряду 111,9 А

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна з дисковим катодом при струмі розряду 111,9 А

Час	Напруга розряду, В	Струм розряду, А	Показання вагів, г
38:46,5	73,5093	3,8186	5885,61
38:47,0	73,5093	3,6039	5885,61
38:47,5	35,4671	112,3777	5885,62
38:48,0	35,7968	111,3039	5887,34
38:48,5	36,187	112,0556	5887,33
38:49,0	73,5505	3,8186	5887,32
38:49,5	73,4269	3,7113	5885,47
38:50,0	73,5093	3,7113	5885,45

Ресурс роботи вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі залежить від маси катоду, швидкості ерозії матеріалу та рівномірності його виробітки. Дисковий катод товщиною 10 мм може бути вироблений на глибину 8 мм, центральна його частина діаметром близько 50 мм та периферійна частина від діаметру 180 мм до діаметру 195 мм не буде випаровуватись. Тому робоча частина катоду діаметром 195 мм становить кільцеву область від діаметру 50 мм до діаметру 180 мм. Площа цієї області дорівнює 254 см^2 . При глибині рівномірної виробітки катоду 8 мм об'єм випареного алюмінію дорівнює 203 см^3 , маса – 548 г. Загальний об'єм матеріалу катоду дорівнює 298 см^3 , маса – 805 г. Коефіцієнт використання матеріалу – 0,68. Коефіцієнт ерозії алюмінію дорівнює 28 мкг/К, при струмі дугового розряду 100 А за 1 секунду буде випарено 2,8 мг. Маса алюмінію 548 г повністю буде вирапена за 54 години, при величині струму 200 А – за 27 годин. Таким чином ресурс роботи двигуна з дисковим алюмінієвим катодом діаметром 195 мм становить не менше 27 годин.

Висновки до розділу 3

1. Розроблена концептуальна схема вакуумно-дугового плазмового двигуна з примусовим програмним переміщенням катодних плям розряду за допомогою магнітного поля арочної конфігурації.
2. Розроблені та виготовлені дві експериментальні конструкції вакуумно-дугових плазмових двигунів з дисковими катодами різного діаметру та магнітними системами з програмованим керуванням переміщенням катодних плям вакуумно-дугового розряду.
3. Проведено дослідження параметрів експериментальних реактивних вакуумно-дугових двигунів з дисковими катодами.
4. Встановлено закономірності переміщення траєкторії катодних плям дугового розряду під аркою силових ліній магнітного поля при зміні їх конфігурації.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ДВИГУНА ЗІ СПІРАЛЬНИМ КАТОДОМ

4.1. Концептуальна схема двигуна зі спіральним катодом

У розділі 1.3.4 описані закономірності переміщення катодних плям по поверхні катоду. Однією з них є те, що за відсутності зовнішніх магнітних полів катодні плями рухаються у напрямку місця підключення струму до катоду під впливом власного магнітного поля струму, що протікає по катоду. На рисунку 1.3 представлено схему направлено переміщення катодних плям вакуумно-дугового розряду під впливом власного магнітного поля дугового розряду [54]. Переміщення катодних плям у бік підключення струму до катоду часто використовується для виготовлення простих по конструкції вакуумно-дугових випарників металу для нанесення покриттів на великі площі.

Відомо кілька конструкцій вакуумно-дугових випарників металів для нанесення покриттів, в якій використана ця закономірність [20]. Найпростіша конструкція – це катод у вигляді довгомірного стрижня або труби з випаруваного матеріалу. На одному його кінці розташований струмовідвід, на іншому – пристрій ініціювання дугового розряду. Після ініціювання розряду катодні плями під дією власного магнітного поля переміщуються по поверхні катоду до струмовідводу і попадають під екран. При цьому розряд погасає і процес його ініціювання повторюється. Також катод може бути виготовлений у вигляді прямокутника з щілинними прорізами.

Цей принцип керування переміщенням катодних плям досить простий, не потребує додаткових магнітних систем для переміщення катодних плям, а також має нижчу потужність споживання енергії порівняно з переміщенням катодних плям в зовнішньому магнітному полі завдяки меншій величині наруги на електродах.

Створення вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі з використанням власного магнітного поля для керування переміщенням катодних плям приваблює можливістю не тільки зменшити вагу та габарити реактивного двигуна, але й зменшити його енергоспоживання за рахунок відсутності зовнішніх магнітних систем та меншої величини напруги розряду.

Доцільно виготовити експериментальний вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі з катодом у формі спіралі Архімеда. Це дає змогу при невеликій площі одержати велику протяжність катоду, яка забезпечить значний запас випаруваного матеріалу та можливість використання розряду тривалістю від сотень мілісекунд до одиниць секунд.

Розглянемо декілька концептуальних варіантів вакуумно-дугового плазмового двигуна.

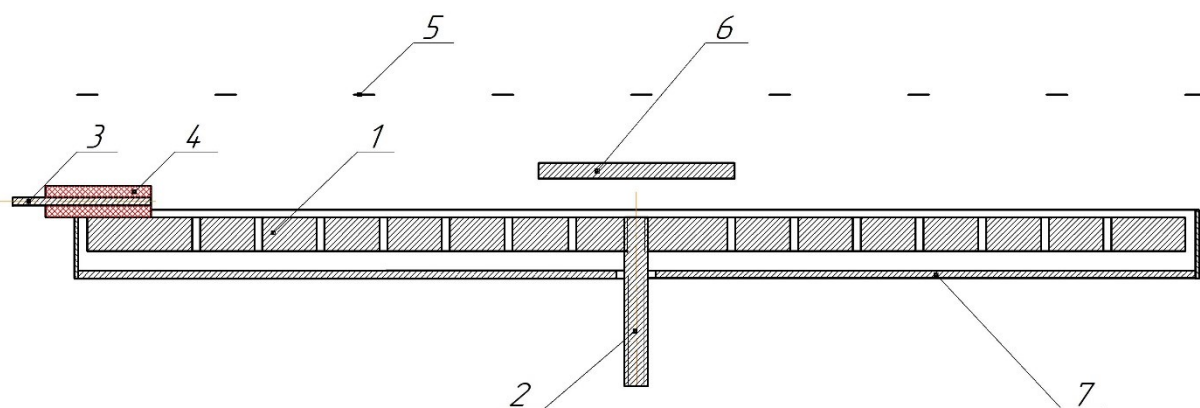


Рисунок 4.1 Осьовий переріз вакуумно-дугового плазмового двигуна з центральним струмовідводом.

На рисунку 4.1 зображено осьовий переріз, а на рисунку 4.2 - вигляд зверху вакуумно-дугового плазмового двигуна з центральним струмовідводом. Катод 1 виготовлений у вигляді спіралі Архімеда. На одному кінці катоду 1, розташованому в центрі спіралі, встановлений струмовідвід 2, а на другому кінці, розташованому на периферії спіралі, встановлений електрод 3 ініціювання дугового розряду, який через ізолятор 4 доторкається до робочої поверхні катоду 1. Над робочою поверхнею катоду 1 розташований анод 5, виготовлений у вигляді

набору паралельних пластин, електрично з'єднаних одна з одною. В центрі спірального катоду 1 встановлений дисковий екран 6, ізолюваний від катоду 1. Неробоча частина спірального катоду 1 закрита захисним екраном 7, електрично ізолюваним від катоду 1.

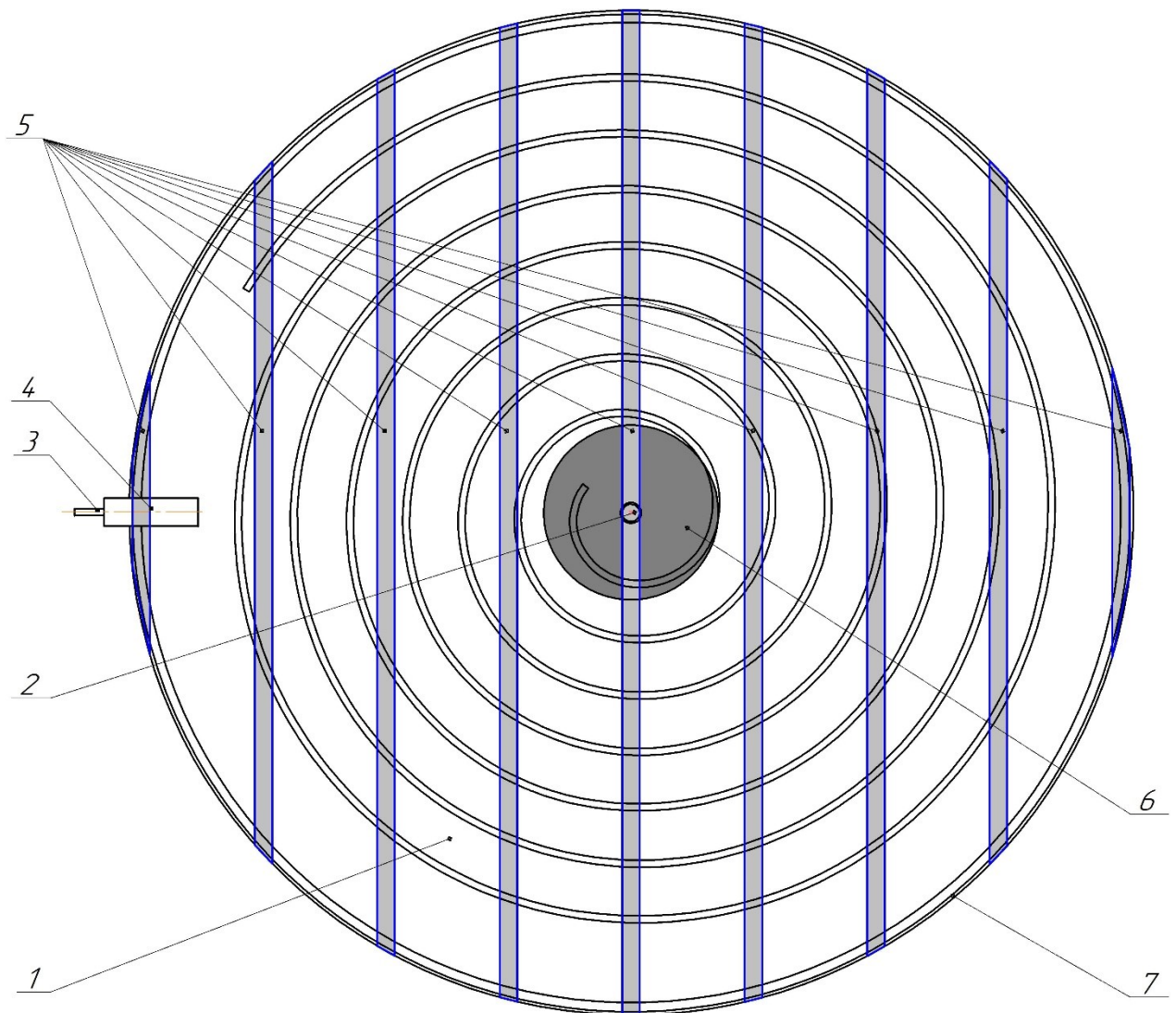


Рисунок 4.2 Вигляд зверху вакуумно-дугового плазмового двигуна з центральним струмовідводом.

Вакуумно-дуговий плазмовий двигун працює наступним чином. Катод 1 та анод 5 вакуумно-дугового плазмового двигуна, зображеного на рисунку 4.1 та рисунку 4. 2, підключають до джерела живлення постійну струму з напругою 60-

70 В. Між електродом 3 ініціювання дугового розряду та катодом 1 подають імпульс напруги 3 кВ з енергією близько 1 Дж. На торцевій поверхні ізолятора 4 виникає поверхневий розряд, який створює потік допоміжної плазми, направлений на робочу поверхню катоду 1. На поверхні катоду 1 виникають катодні плями вакуумно-дугового розряду, які під впливом власного магнітного поля дугового розряду переміщуються в напрямку до струмовідводу 2 [20]. В процесі переміщення катодні плями випаровують матеріал катоду, в області катодних плям створюються потоки металевої плазми, яка з швидкістю близько 10^4 м/с викидається з поверхні катоду, створюючи реактивну тягу. Коли катодні плями дугового розряду досягають кінця катоду, розташованого в центрі спіралі, вони попадають під дисковий екран 6, ізолюваний від катоду 1. Потік металевої плазми екранується екраном 6 і не досягає аноду 5. В результаті дуговий розряд погасає. Далі знову між електродом 3 ініціювання дугового розряду та катодом 1 подають імпульс напруги 3 кВ з енергією близько 1 Дж і процес горіння дугового розряду повторюється. Регулюючи інтервал між циклами горіння дугового розряду, регулюють загальну величину тяги вакуумно-дугового плазмового двигуна. При відсутності екрану 6 катодні плями, досягнувши кінця катоду 1, розташованого в центрі спірального катоду 1, продовжували б випаровувати катод в одному місці, приводячи до руйнування катоду при тривалому випаровуванні. Робота вакуумно-дугового двигуна можлива і без екрану 6, але тоді необхідно відключати джерело живлення розряду при досягненні катодними плямами центральної частини спірального катоду. Це можна зробити або за допомогою таймера, або за допомогою датчика положення катодних плям, який буде давати сигнал на відключення джерела живлення. Захисний екран 7 закриває неробочу частину катоду 1. При його відсутності можливий перехід катодних плям на нижню частину катоду 1 та струмовідвід 2, що може привести до виходу з ладу вакуумно-дугового плазмового двигуна. Для забезпечення рівномірного зазору між витками спірального катоду 1 та досягнення стабільної роботи вакуумно-дуго-

вого плазмового двигуна між витками спіралі можна встановити керамічний ізолятор, верхня частина якого розташована на рівні робочої поверхні катоду 1. При гарантованому рівномірному зазорі між витками спірального катоду 1 стабільна робота вакуумно-дугового плазмового двигуна забезпечується і без ізолятора, але при нерівномірному зазорі можливе переміщення катодних плям на бокову поверхню спіралі, що приводить до погасання дугового розряду.

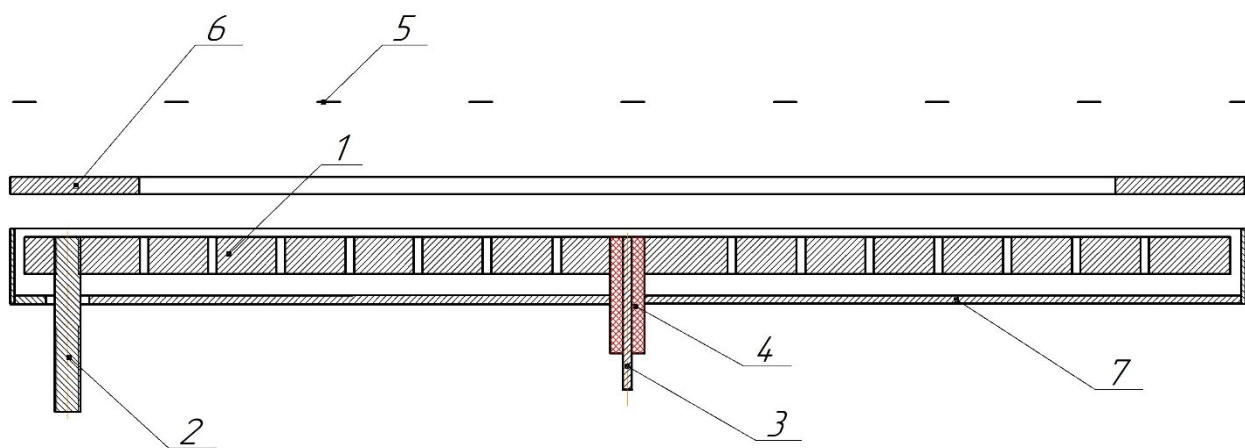


Рисунок 4.3 Осьовий переріз вакуумно-дугового плазмового двигуна з периферійним струмовідводом.

На рисунку 4.3 зображено осьовий переріз варіанту вакуумно-дугового плазмового двигуна з периферійним струмовідводом. Катод 1 виготовлений у вигляді спіралі Архімеда. На одному кінці катоду 1, розташованому на периферії спіралі, встановлений струмовідвід 2, а на другому кінці, розташованому в центрі спіралі, встановлений електрод 3 ініціювання дугового розряду, який через ізолятор 4 вставлений в отвір в катоді 1 так, що торцева поверхня електроду 3 та ізолятора 4 знаходиться на рівні робочої поверхні катоду 1. Над робочою поверхнею катоду 1 розташований анод 5, виготовлений у вигляді набору паралельних пластин. На периферії спірального катоду 1 встановлений кільцевий екран 6, ізолюваний від катоду 1. Неробоча частина спірального катоду 1 закрита захисним екраном 7, електрично ізолюваним від катоду 1.

Варіант вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом та периферійним струмовідводом працює наступним чином.

Катод 1 та анод 5 вакуумно-дугового плазмового двигуна підключають до джерела живлення постійну струму з напругою 60-70 В. Між електродом 3 ініціювання дугового розряду та катодом 1 подають імпульс напруги 3 кВ з енергією близько 1 Дж. На торцевій поверхні ізолятора 4 виникає розряд, який створює потік допоміжної плазми, направлений на робочу поверхню катоду 1. На поверхні катоду 1 виникають катодні плями вакуумно-дугового розряду, які під впливом власного магнітного поля дугового розряду переміщуються в напрямку до струмовідводу 2. Коли катодні плями дугового розряду досягають кінця катоду, розташованого в периферійній частині спірального катоду 1, вони попадають під кільцевий екран 6, ізолюваний від катоду 1. Потік металеві плазми екранується екраном 6 і не досягає аноду 5. В результаті дуговий розряд погасає. Далі знову між електродом 3 ініціювання дугового розряду та катодом 1 подають імпульс напруги 3 кВ з енергією близько 1 Дж і процес горіння дугового розряду повторюється.

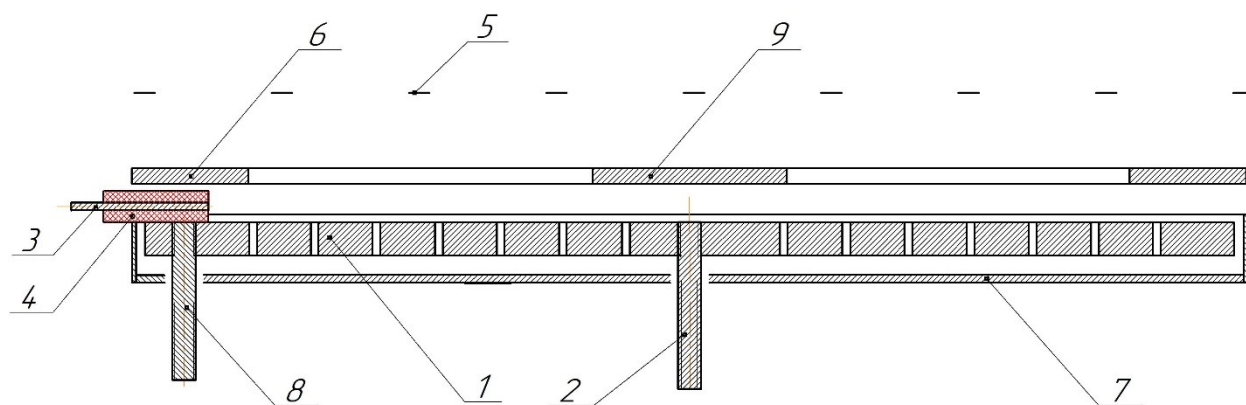


Рисунок 4.4 Осьовий переріз вакуумно-дугового двигуна з двома струмовідводами

Варіант вакуумно-дугового плазмового двигуна з двома струмовідводами зображено на рисунку 4.4 (осьовий переріз). Катод 1 виготовлений у вигляді спіралі Архімеда. На одному кінці катоду 1, розташованому в центрі спіралі, встановлений струмовідвід 2, а на другому кінці, розташованому на периферії спіралі, встановлений електрод 3 ініціювання дугового розряду, який через ізолятор 4 доторкається до робочої поверхні катоду 1. Над робочою поверхнею катоду 1

розташований анод 5, виготовлений у вигляді набору паралельних пластин, електрично з'єднаних одна з одною. В центрі спірального катоду 1 встановлений дисковий екран 6, ізолюваний від катоду 1. Неробоча частина спірального катоду 1 закрита захисним екраном 7, електрично ізолюваним від катоду 1. На кінці катоду 1, розташованому в периферійній частині катоду, встановлений додатковий струмовідвід 8. Над периферійною частиною робочої поверхні катоду 1 встановлений кільцевий екран 9.

Вакуумно-дуговий двигун з двома струмовідводами, один з яких встановлений в центральній частині, а інший – в периферійній частині спірального катоду, працює наступним чином. Електрод ініціювання 3 дугового розряду встановлений в периферійній частині катоду 1. Катод 1 та анод 5 вакуумно-дугового плазмового двигуна підключають до джерела живлення постійну струму з напругою 60-70 В. Між електродом 3 ініціювання дугового розряду та катодом 1 подають імпульс напруги 3 кВ з енергією близько 1 Дж. На торцевій поверхні ізолятора 4 виникає поверхневий розряд, який створює потік допоміжної плазми, направлений на робочу поверхню катоду 1. На поверхні катоду 1 виникають катодні плями вакуумно-дугового розряду, які під впливом власного магнітного поля дугового розряду переміщуються в напрямку до струмовідводу 2. Коли катодні плями дугового розряду досягають кінця катоду, розташованого в центральній частині спірального катоду 1, але ще не попадають під дисковий екран 9, з допомогою електронного комутатора (на рисунку не показаний) перемикають подачу негативного потенціалу від джерела живлення з струмовідводу 2 до струмовідводу 8. При цьому катодні плями змінюють напрям і переміщуються до струмовідводу 8. Коли катодні плями дугового розряду досягають кінця катоду, розташованого в периферійній частині спірального катоду 1, але ще не попадають під кільцевий екран 6, з допомогою електронного комутатора перемикають подачу негативного потенціалу від джерела живлення з струмовідводу 8 до струмовідводу 2. Катодні плями знову змінюють напрямок переміщення і знову переміщу-

ються в напрямку струмовідводу 2. Цикли повторюються і катодні плями безперервно випаровують поверхню катоду, створюючи потоки плазми, які, в свою чергу, створюють реактивну тягу. Екрани 6 і 9 необхідні для запобігання виходу двигуна з ладу при випадковому порушенні синхронізації переміщення катодних плям та перемиканні струмовідводів.

Спіральний катод може бути виготовлений не тільки у формі спіралі Архімеда, але і в будь-якій іншій спіральній формі (овал, трикутник, квадрат, прямокутник). На рисунку 4.5 та рисунку 4.6 показано вакуумно-дуговий плазмовий двигун з прямокутним спільним катодом. На рисунку 4.5 зображено осьовий переріз вакуумно-дугового плазмового двигуна прямокутної форми. На рисунку 4.6 – вигляд зверху вакуумно-дугового плазмового двигуна прямокутної форми. Катод 1 виготовлений у вигляді прямокутної спіралі. На одному кінці катоду 1, розташованому в центрі спіралі, встановлений струмовідвід 2, а на другому кінці, розташованому на периферії спіралі, встановлений електрод 3 ініціювання дугового розряду, який через ізолятор 4 доторкається до робочої поверхні катоду 1. Над робочою поверхнею катоду 1 розташований анод 5, виготовлений у вигляді набору паралельних пластин, електрично з'єднаних одна з одною. В центрі спірального катоду 1 над його робочою поверхнею встановлений прямокутний екран 6, ізольований від катоду 1. Неробоча частина спірального катоду 1 закрита захисним екраном 7, електрично ізольованим від катоду 1. На кінці катоду 1, який знаходиться на периферії, встановлено струмовідвід 8. Над робочою поверхнею катоду 1 над струмовідводом 8 встановлений прямокутний екран 9.

Робота варіанту вакуумно-дугового плазмового двигуна з прямокутним спіральним катодом з двома струмовідводами аналогічна роботі двигуна з катодом у формі спіралі Архімеда. Прямокутна форма катоду забезпечує більшу площу катоду, ніж кругла форма, при розміщенні на поверхні супутників прямокутної форми.

Результати аналізу концептуальних варіантів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом показують, що для дослідження параметрів

двигуна і вивчення закономірностей переміщення катодних плям по поверхні спірального катода доцільно розробити та виготовити вакуумно-дуговий плазмовий двигун з катодом у формі спіралі Архімеда.

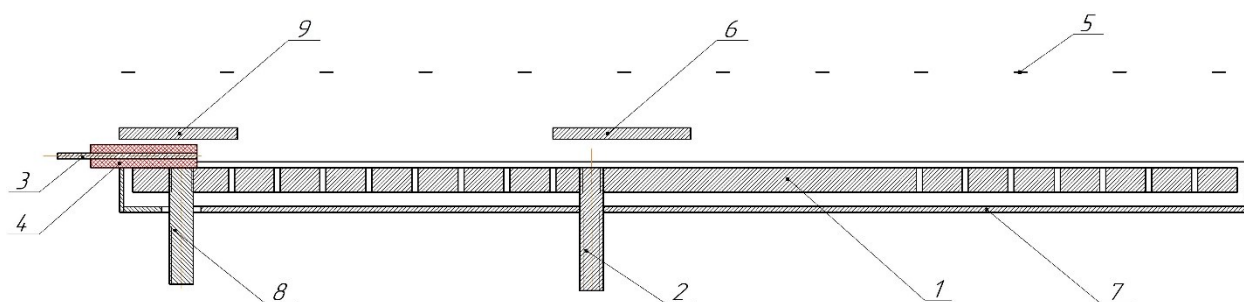


Рисунок 4.5 Осьовий переріз вакуумно-дугового двигуна з прямокутним спіральним катодом

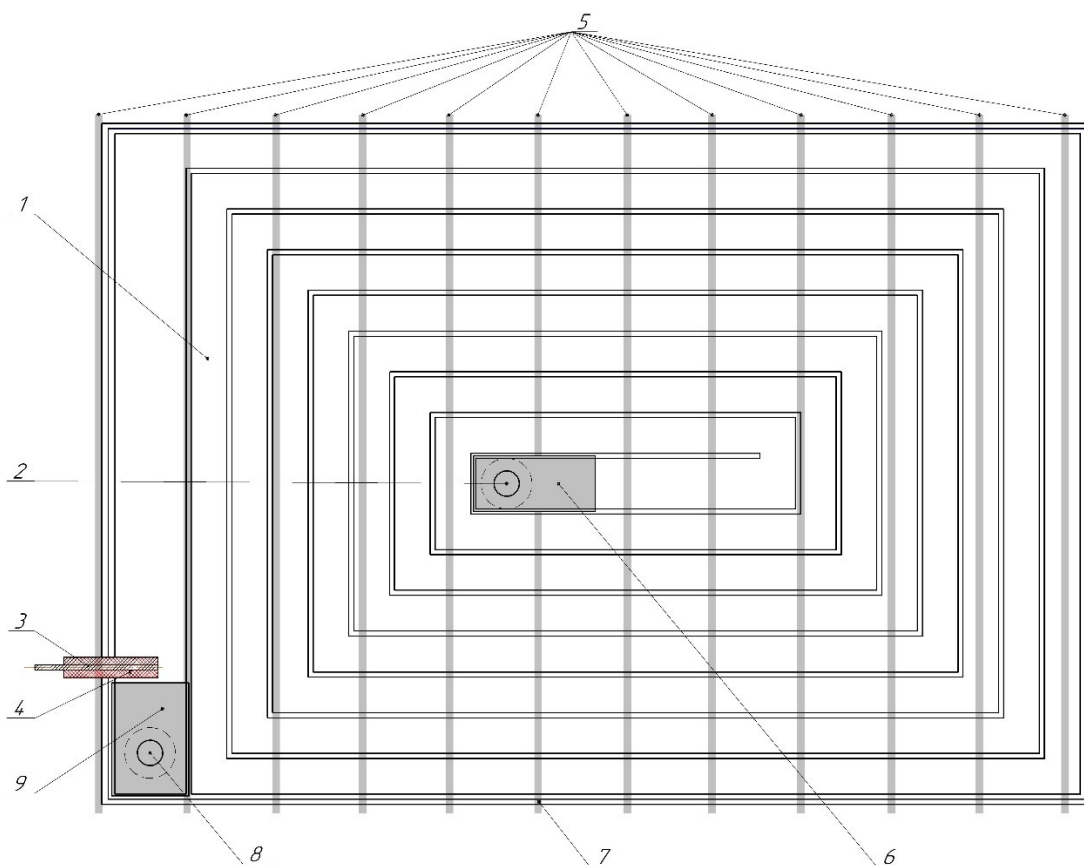


Рисунок 4.6 Вигляд зверху вакуумно-дугового двигуна з прямокутним спіральним катодом

4.2. Розробка конструкції двигуна зі спіральним катодом

Для проведення попередніх досліджень було розроблено експериментальний вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі зі спіральним катодом діаметром 125 мм.

Осьовий переріз вказаного варіанту експериментального зразка вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом показаний на рисунку 4.7.

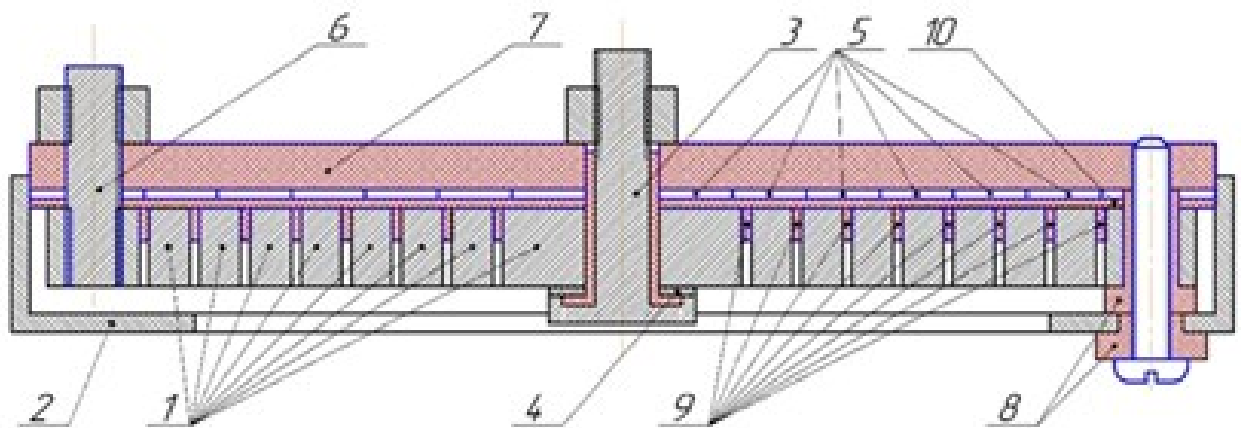


Рисунок 4.7. Осьовий переріз першого варіанту експериментального зразка вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм

Неробоча поверхня спірального катоду 1 захищена екраном 2. В центрі двигуна встановлений електрод ініціювання розряду 3, який ізолюваний від катоду ізолятором 4. Магнітна система 5 двигуна виготовлена з дискових магнітів, розташованих з протилежної сторони катоду від його робочої поверхні. Струмівідвід 6 катоду проходить через дисковий ізолятор 7. Екран 2 ізолюваний від катоду прохідними ізоляторами 8. Між витками катоду 1 встановлений стрічковий ізолятор 9. Між катодом 1 та магнітною системою 5 встановлений ізолятор 10.



Рисунок 4.8. Експериментальний зразок вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм

На рисунку 4.8 показана фотографія експериментального зразка вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм після проведення випробувань.

4.3. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм

Проведені випробування експериментального зразка вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм. Випробування проведені в двох варіантах – без встановлення магнітної системи та з встановленими дисковими магнітами. Без магнітного поля спостерігались неодноразові спонтанні погасання дугового розряду, що можливо пов'язано з нерівномірністю зазору між витками спіралі (спіральний катод виготовлений з алюмінієвої шини

розміром 6x8 мм, при виготовленні практично неможливо було витримати рівномірний зазор). З встановленими магнітами стабільність розряду була значно вищою. Спонтанні погасання практично не спостерігались.

Випробування показали працездатність концепції керування переміщенням катодних плям дугового розряду по спіральній траєкторії катоду за допомогою власного магнітного поля. Цей результат показав можливість виготовлення вакуумно-дугового двигуна на металевій плазмі без спеціальних систем управління переміщенням катодних плям по робочій поверхні катоду. Зазвичай такі системи не тільки збільшують масу двигуна, але й підвищують витрати енергії на живлення магнітних систем, які керують переміщенням катодних плям дугового розряду.

На рисунку 4.9 показана траєкторія руху катодних плям розряду в експериментальному зразку вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм.

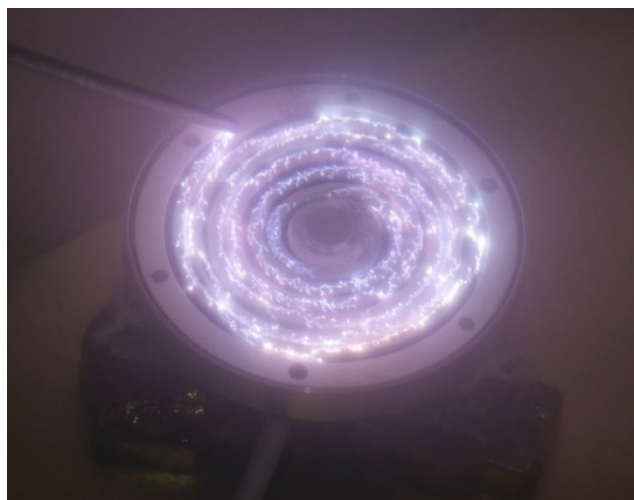


Рисунок 4.9. Траєкторія руху катодних плям розряду на спіральному катоді діаметром 125 мм.

Система ініціювання дугового розряду в розробленому варіанті експериментального вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм працювала нестабільно, можливо, що по причині відносно великої площі керамічного кільця не був забезпечений надійний контакт між електродом

ініціювання та поверхнею катоду. Тому при проведенні випробувань використовували контактний метод ініціювання розряду. Струмівідвід катоду був встановлений замість електроду ініціювання дугового розряду, а розряд ініціювали допоміжним рухомим електродом, який короткочасно дотикався до поверхні катоду в периферійній його частині.

4.4. Розробка двигуна зі спіральним катодом діаметром 280 мм

Аналіз результатів випробування вакуумно-дугового реактивного двигуна зі спіральним катодом діаметром 125 мм показав, що необхідно забезпечити рівномірний зазор між витками спірального катоду, збільшити діаметр катоду та змінити конструкцію системи ініціювання. Була розроблена конструкторська документація для виготовлення удосконаленого експериментального вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 280 мм.

На рисунку 4.10 приведено креслення варіанту експериментального вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом. Експериментальний ЕРДМП зі спіральним катодом включає в себе наступні елементи:

- 1 - катод, алюмінієвий сплав 5056 (аналог АМГ6);
- 2 – електростатичний екран, ст.12Х18Н10Т
- 3 – периферійний струмівідвід катоду ст. 12Х18Н10Т
- 4 – центральний струмівідвід катоду ст. 12Х18Н10Т
- 5 – прохідний ізолятор, кераміка
- 6 – ізолятор, кераміка
- 7 - опорний ізолятор, кераміка
- 8 - електрод ініціювання розряду, ст. 12Х18Н10Т
- 9 - ізолятор електроду ініціювання розряду
- 10 - фіксатор електроду ініціювання розряду

Катод 1 вказаного вакуумно-дугового двигуна виготовлений у вигляді спіралі Архімеда з алюмінієвого сплаву 5056 (аналог АМГ6). Ширина полоси становить 14 мм, ширина зазору між витками – 2 мм, товщина катоду – 10 мм.

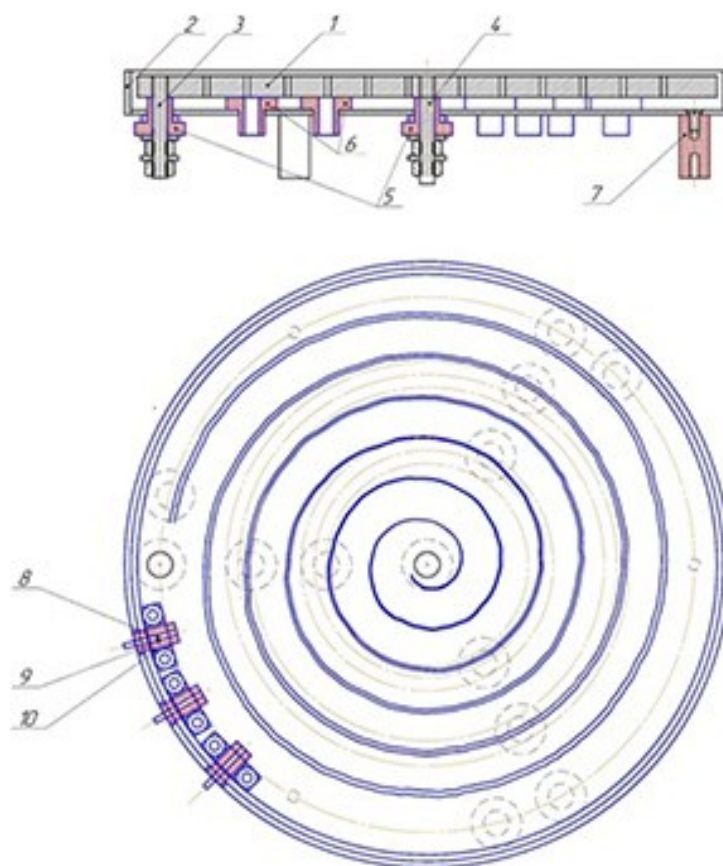


Рисунок 4.10. Варіант експериментального ЕРДМП зі спіральним катодом

Катод встановлений в електростатичному екрані 2 на керамічних ізоляторах 6. На кінцях спірального катоду 1 встановлені струмовідводи 3 та 4, які ізолювані від електростатичного екрану прохідними ізоляторами 5.

Для ініціювання дугового розряду на периферійній частині катоду 1 встановлені три блоки ініціювання розряду, які включають в себе електрод ініціювання розряду 8 ізолятор 9 та фіксатор електроду 10. Вказана конструкція блоку ініціювання розряду застосовується в вакуумно-дугових випарниках обладнання для нанесення покриттів (установки типу БУЛАТ) і показала досить високу працездатність. Для забезпечення високої надійності в системі ініціювання застосовано дублювання (встановлено три ідентичні системи ініціювання).

4.5. Дослідження технологічних параметрів вакуумно-дугового двигуна зі спіральним катодом діаметром 280 мм

На рисунку 4.11 приведено графік зміни величини напруги між катодом та анодом двигуна при ініціюванні розряду, величини струму розряду та реактивної сили двигуна на протязі розряду тривалістю 3,5 секунди. Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 188,14 А наведені у таблиці 4.1.

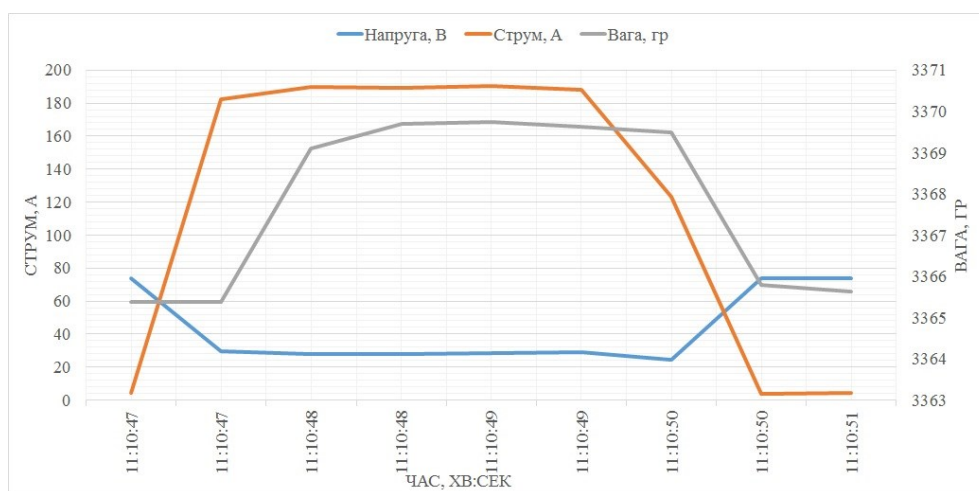


Рисунок 4.11. Зведений графік зміни параметрів двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 188,14 А

Таблиця 4.1

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 188,14 А

Час	Напруга розряду, В	Струм розряду, А	Показання вагів, г
11:10:47	73,8345	4,3555	3420,79
11:10:47	73,3679	2,1734	3420,77
11:10:48	28,1728	189,7972	3420,91
11:10:48	28,0492	189,2603	3425,82
11:10:49	28,4201	190,3341	3425,85
11:10:49	28,9146	188,0792	3425,73
11:10:50	28,4226	183,2229	3425,72
11:10:50	73,7521	4,0334	3425,85
11:10:51	73,7523	4,0323	3420,77

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 138,9 А наведені у таблиці 4.2., відповідно графік для цього режиму рисунок 4.12.

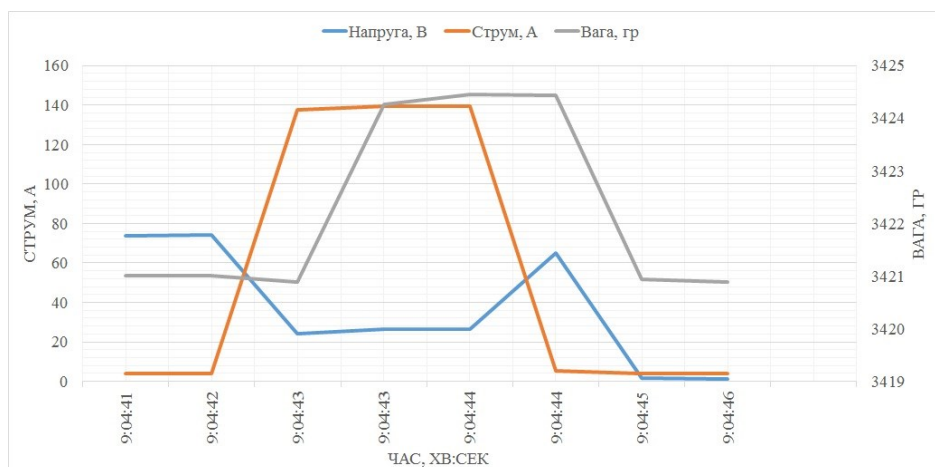


Рисунок 4.12. Зведений графік зміни параметрів двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 138,9 А

Таблиця 4.2

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 138,9 А

Час	Напруга розряду, В	Струм розряду, А	Показання вагів, г
9:04:41	73,9581	4,1408	3421,01
9:04:42	74,0406	3,926	3421
9:04:43	24,2577	137,3968	3420,88
9:04:43	26,5243	139,6517	3424,26
9:04:44	26,4007	139,5443	3424,46
9:04:44	73,139	5,3219	3424,44
9:04:45	73,7154	3,8186	3420,94
9:04:46	73,262	3,8186	3420,89

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 116,8 А наведені у таблиці 4.3, відповідно графік для цього режиму приведений на рисунку 4.13.

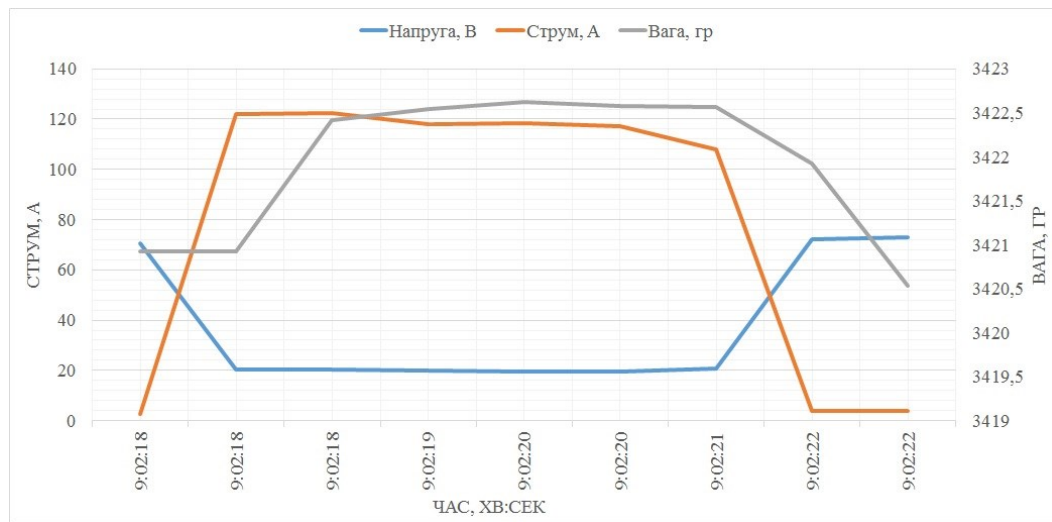


Рисунок 4.13. Зведений графік зміни параметрів двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 116,8 А

Таблиця 4.3

Результати вимірювання параметрів вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом при струмі розряду 116,8 А

Час	Напруга розряду, В	Струм розряду, А	Показання вагів, г
9:02:18	73,4251	1,827	3420,93
9:02:18	20,3427	122,3639	3420,92
9:02:19	19,8894	118,0688	3422,84
9:02:20	19,3536	118,2974	3422,92
9:02:20	20,5185	117,331	3422,88
9:02:21	20,5488	108,0826	3422,87
9:02:22	73,2486	3,926	3422,82
9:02:22	73,4269	3,926	3420,53

В таблиці 4.4 представлені зведені результати дослідження параметрів вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом. Результати досліджень показують, що величина питомої реактивної тяги вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом значно вища, ніж питома реактивна тяга двигунів з дисковим катодом, в яких використовується арочне магнітне поле для

керування переміщенням катодних плям по поверхні катоду. Значення питомої тяги близькі до значень тяги (8,7 – 13,9 мН/кВт), вказаних в роботах по дослідженню вакуумно-дугових плазмових двигунів Xantus MPT спільної розробки Alameda Applied Sciences Corporation і Benchmark Space Systems [38].

На рисунку 4.14 представлений графік залежності тяги та питомої тяги від струму дугового розряду вакуумно-дугових двигунів з дисковим та спіральним катодами. Як видно з графіку, величина тяги практично однакова для обох типів вакуумно-дугових двигунів. Питома тяга вакуумного двигуна зі спіральним катодом на 25-30 % вища, ніж питома тяга двигуна з дисковим катодом. Це пояснюється тим, що енерговитрати на підтримку вакуумно-дугового розряду в магнітному полі (на дисковому катоді) значно вищі, ніж при відсутності зовнішнього магнітного поля (на спіральному катоді).

На рисунку 4.15 показані скріншоти з відеозапису процесу переміщення катодних плям по поверхні спірального катоду при величині струму розряду 140 А. Відеозйомка проводилась з частотою кадрів 1/30 секунди, тривалість експозиції одного кадру – 1/60 секунди. Виходячи з цих даних, була розрахована швидкість переміщення катодних плям, яка для вказаних параметрів розряду становила близько 35 м/с.

Таблиця 4.4

Зведені результати дослідження параметрів вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом

№	Струм дугового розряду, А	Напруга дугового розряду, В	Величина реактивної тяги, мН	Питома реактивна тяга, мН/кВт
1	188,14	28,4	48,84	9,19
2	138,9	25,7	33,74	9,45
3	116,8	20,1	20,32	8,65

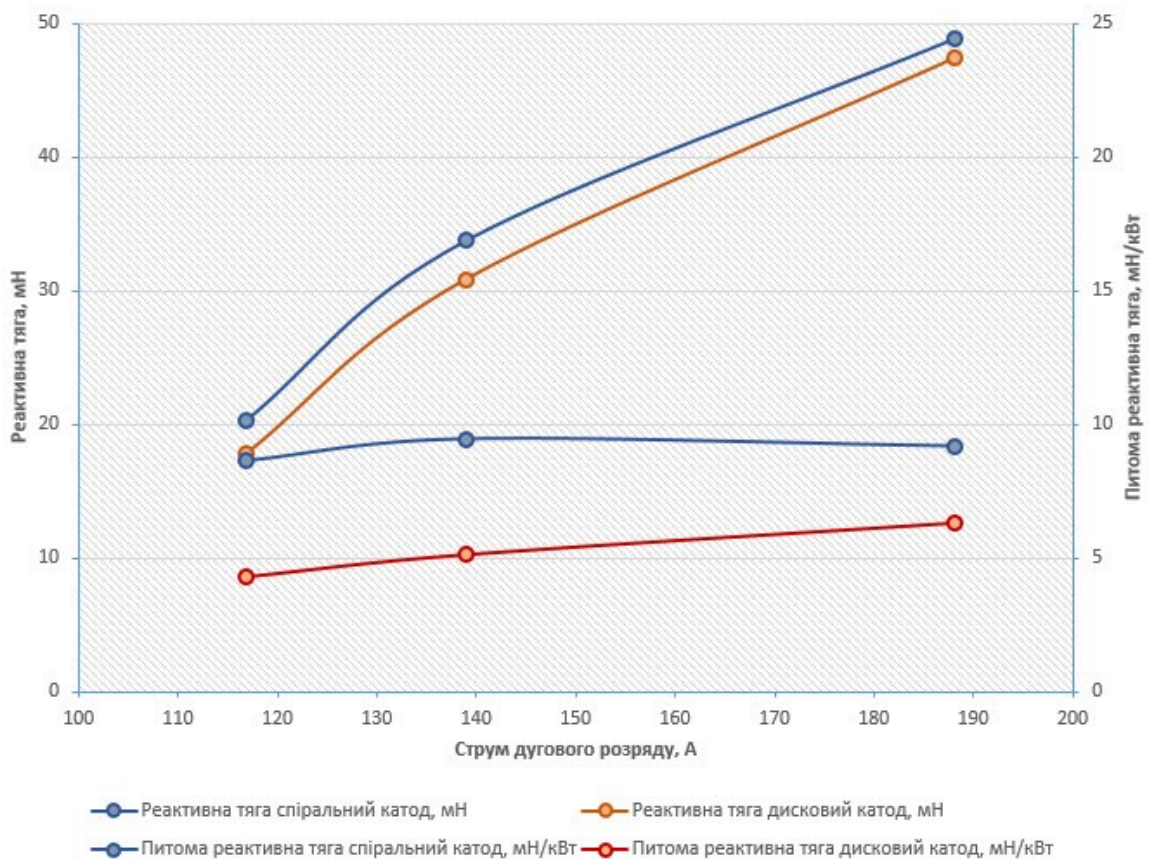


Рисунок 4.14 Графік залежності тяги та питомої тяги від струму дугового розряду вакуумно-дугових двигунів з дисковим та спіральним катодами

Ресурс роботи вакуумно-дугового плазмового двигуна зі спіральним катодом можна оцінити наступним чином. Катод з алюмінієвого сплаву 5056 діаметром 280 мм, товщиною 10 мм має масу близько 1600 г. Робоча частина катоду має розміри: зовнішній діаметр 260 мм, внутрішній діаметр 30 мм, ширина полоси становить 14 мм, ширина зазору між витками – 2 мм. Довжина спіралі робочої частини катоду становить 3000 мм. При глибині виробітки 8 мм випарений об'єм катоду становить 336 см³, а маса – 907 г. Загальний об'єм матеріалу катоду дорівнює 590 см³, маса – 1600 г. Коефіцієнт використання матеріалу – 0,57. При струмі дугового розряду 100 А маса алюмінію 907 г повністю буде випарена за 90 години, при величині струму 200 А – за 45 годин. Таким чином ресурс роботи двигуна зі спіральним алюмінієвим катодом діаметром 280 мм становить не менше 45 годин.

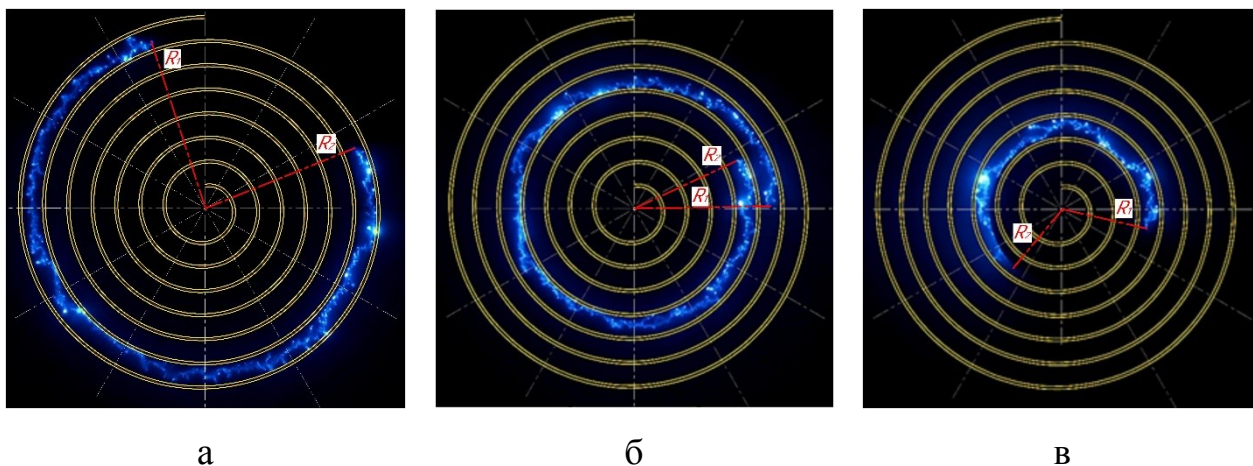


Рисунок 4.15 Фотографії переміщення катодних плям по поверхні спірального катоду

На рисунку 4.16 показано фото траєкторії катодних плям вакуумно-дугового розряду на робочій поверхні спірального катоду. Катодні плями вакуумно-дугового розряду переміщуються від електроду 3 ініціювання дугового розряду до центру спірального катоду. Експозиція тривала протягом 1 секунди, тому на фото зображена вся траєкторія переміщення катодних плям протягом одного циклу розряду.

На рисунку 4.17 показано фото спірального катоду вакуумно-дугового плазмозового двигуна з алюмінієвого сплаву 5056 (аналог АМГ6) діаметром 280 мм після роботи двигуна протягом 30 хвилин. Двигун працював без встановленого екрану 6, джерело живлення вимикалось через заданий проміжок часу після ініціювання дугового розряду. В центральній частині спірального катоду спостерігається більш еродована поверхня катоду, що пов'язано з тим, що проміжок часу відключення джерела живлення перевищував час, за який катодні плями досягали центральної частини катоду, і катодні плями деякий час продовжували випаровувати центральну частину катоду.

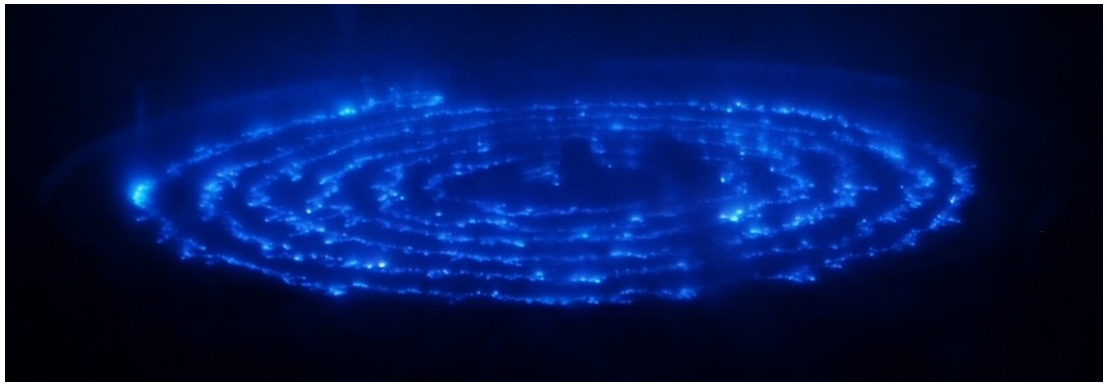


Рисунок 4.16 Фото траєкторії катодних плям вакуумно-дугового розряду на робочій поверхні спірального катоду.



Рисунок 4.17 Фото спірального катоду вакуумно-дугового плазмового двигуна після роботи протягом 30 хвилин.

4.6. Варіант спірального катоду прямокутної форми

Вакуумно-дуговий двигун на металевій плазмі з прямокутним катодом є варіантом двигуна зі спіральним катодом, але замість спіралі Архімеда катод має форму прямокутної спіралі. Прямокутний катод дозволяє розмістити декілька двигунів більш компактно, ніж дисковий. Принцип управління переміщенням катодних плям такий же, як і в спіральному катоді, який має форму спіралі Архімеда.

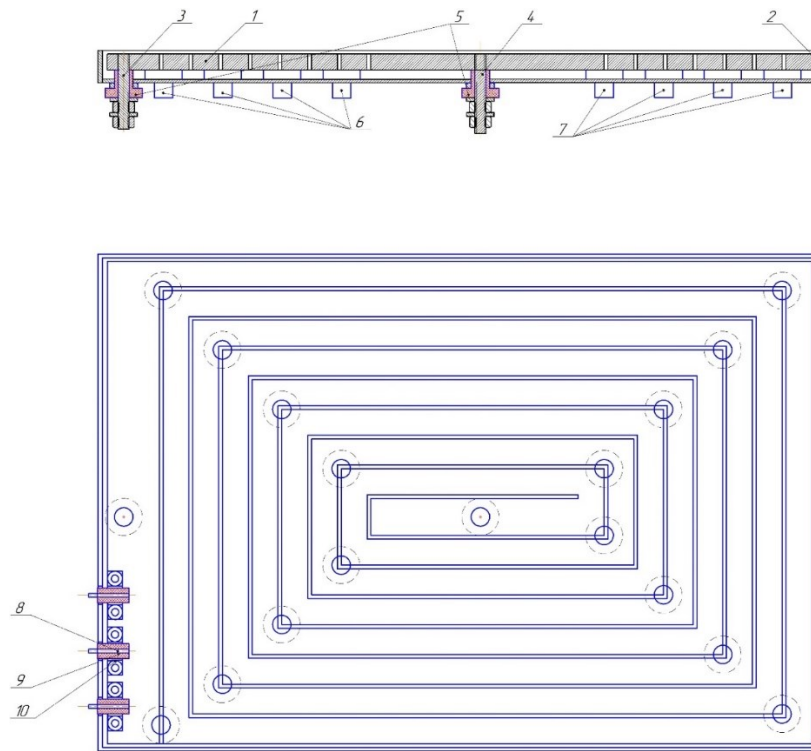


Рисунок 4.18 Варіант експериментального ЕРДМП
з прямокутним спіральним катодом

На рисунку 4.18 приведено креслення варіанту експериментального вакуумно-дугового двигуна з прямокутним катодом. Експериментальний ЕРДМП зі прямокутним катодом включає в себе наступні елементи:

- 1 - катод, алюмінієвий сплав 5056 (аналог АМГ6);
- 2 – електростатичний екран, ст.12Х18Н10Т
- 3 – периферійний струмовідвід катоду ст. 12Х18Н10Т
- 4 – центральний струмовідвід катоду ст. 12Х18Н10Т
- 5 – прохідний ізолятор, кераміка
- 6 – ізолятор, кераміка
- 7 - опорний ізолятор, кераміка
- 8 - електрод ініціювання розряду, ст. 12Х18Н10Т
- 9 - ізолятор електроду ініціювання розряду
- 10 - фіксатор електроду ініціювання розряду

Катод 1 вказаного вакуумно-дугового двигуна виготовлений у вигляді прямокутної спіралі з алюмінієвого сплаву АмГ-6. Ширина полоси становить 14 мм, ширина зазору між витками – 2 мм, товщина катоду – 10 мм.

Катод встановлений в електростатичному екрані 2 на керамічних ізоляторах 6 та 7. На кінцях спірального катоду 1 встановлені струмовідводи 3 та 4, які ізолювані від електростатичного екрану прохідними ізоляторами 5.

Для ініціювання дугового розряду на периферійній частині катоду 1 встановлені три блоки ініціювання розряду, які включають в себе електрод ініціювання розряду 8 ізолятор 9 та фіксатор електроду 10.

Висновки до розділу 4

1. Розроблені концептуальні схеми вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральними катодами з переміщенням катодних плям розряду за допомогою власного магнітного поля дугового розряду.

2. Розроблені та виготовлені дві експериментальні конструкції вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральними катодами різного діаметру.

3. Проведено дослідження параметрів експериментальних реактивних вакуумно-дугових двигунів зі спіральними катодами.

4. Встановлено закономірності переміщення катодних плям дугового розряду під впливом власного магнітного поля при різних величинах струму дугового розряду.

5. Проведено дослідження реактивної тяги двигунів зі спіральним катодом та розрахована питома тяга при різних струмах дугового розряду.

РОЗДІЛ 5. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА СИСТЕМ ВАКУУМНО-ДУГОВИХ ДВИГУНІВ З КЕРОВАНОЮ ВАКУУМНОЮ ДУГОЮ

5.1. Порівняння переваг та недоліків вакуумно-дугових плазмових двигунів з дисковим та спіральним катодами

Проведені дослідження показали перспективність розроблених вакуумно-дугових плазмових двигунів для використання їх у системах видалення космічного сміття, для корекції орбіт нано- та мікросупутників, а також для довготривалих космічних польотів.

Для вибору типу вакуумно-дугового плазмового двигуна необхідно знати переваги та недоліки різних їх конструкцій.

Порівнюючи вакуумно-дуговий плазмовий двигун з дисковим катодом з вакуумно-дуговим плазмовим двигуном зі спіральним катодом, можна зробити наступні висновки про їх переваги та недоліки.

1. Коефіцієнт використання матеріалу дискового катода вищий, ніж спірального катода за рахунок більш рівномірного випарювання. Це пояснюється тим, що граничні області катода випаровуються менше, ніж центральна частина області переміщення катодних плям. Для дискового катода граничні області знаходяться в центральній частині катода і на його периферії. Для спірального катода граничні області знаходяться по межі спіралі поблизу зазорів, які, у загальному випадку, перевищують площу граничних областей дискового катода.

2. Загальна маса вакуумно-дугового плазмового двигуна з дисковим катодом значно перевищує масу двигуна зі спіральним катодом за однакової маси катодів. Це пояснюється тим, що у двигуні з дисковим катодом для керування переміщенням катодних плям використовується магнітна система, що створює

магнітне поле арочної конфігурації на поверхні дискового катода. Магнітна система складається з постійного магніту та соленоїда, які збільшують вагу вакуумно-дугового плазмового двигуна.

3. Для живлення магнітної системи необхідне додаткове джерело живлення, яке не тільки збільшує загальну вагу космічного апарату, а й витрачає додаткову енергію для живлення соленоїда, який створює магнітне поле.

4. На дисковому катоді переміщення катодних плям відбувається під аркою магнітного поля, що приводить до підвищення необхідної напруги живлення вакуумно-дугового розряду за рахунок замагнічування електронів розряду. Наприклад, для катодів з алюмінієвого сплаву 5056 (аналог АМГ6), який використаний в розроблених двигунах, напруга дугового розряду на дисковому катоді лежить в межах 28-30 В, а напруга дугового розряду на спіральному катоді - в межах 24-25 В. Отже, енерговитрати при одному і тому ж струмі розряду будуть вище в вакуумно-дуговому двигуні з дисковим катодом, ніж у вакуумно-дуговому двигуні зі спіральним катодом.

5. Вакуумно-дуговий плазмовий двигун з дисковим катодом має більш складну конструкцію за рахунок магнітної системи, система живлення потребує більше компонентів та більш складного алгоритму керування переміщенням катодних плям дугового розряду.

6. Вартість виготовлення вакуумно-дугового плазмового двигуна з дисковим катодом вища, ніж зі спіральним катодом за рахунок більш складної конструкції системи керування переміщенням катодних плям та більш складної системи живлення.

Переваги та недоліки вакуумно-дугових плазмових двигунів двох типів зведені до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Порівняння переваг та недоліків вакуумно-дугових плазмових двигунів з дисковим та спіральним катодом

Тип вакуумно-дугового плазмового двигуна	Переваги	Недоліки
Вакуумно-дуговий плазмовий двигун з дисковим катодом	1. Вища корисна площа катоду. 2. Вищий коефіцієнт використання матеріалу катоду.	1. Більші енерговитрати на одиницю тяги. 2. Більш складна конструкція. 3. Складний алгоритм керування переміщенням катодних плям. 4. Значно більша маса двигуна при однаковій масі катоду. 5. Висока вартість виготовлення.
Вакуумно-дуговий плазмовий двигун зі спіральним катодом	1. Менші енерговитрати на одиницю тяги. 2. Проста конструкція. 3. Простий алгоритм керування переміщенням катодних плям. 4. Значно менша маса двигуна при однаковій масі катоду. 5. Низька вартість виготовлення.	1. Менша корисна площа катоду. 2. Нижчий коефіцієнт використання матеріалу катоду.

5.2. Загальні рекомендації щодо розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів

5.2.1. Системи електроживлення

Електричні рушійні установки, робота яких заснована на вакуумно-дуговому розряді, потребують потужних джерел енергії. На даний час бортові системи живлення мікросупутників мають обмежену потужність, яка не дозволяє використовувати вакуумно-дугові плазмові двигуни в режимі постійного струму. Тому проектуються імпульсні системи живлення, в яких використовується конденсатор або індуктивний накопичувач енергії.

При імпульсній роботі вакуумно-дугового плазмового двигуна тривалість розряду залежить від кількості електроенергії, запасеної в конденсаторі. Енергія, яку може зберігати конденсатор, прямо пропорційна його ємності та квадрату напруги. На даний час в системах електроживлення вакуумно-дугових реактивних двигунів використовуються конденсатори різних типів, зокрема танталових. Ємність таких конденсаторів становить величину сотні мікрофарад при допустимій нарузі до 100 В. Для підвищення енергії необхідно збільшувати ємність конденсаторів шляхом паралельного з'єднання. При цьому зростають габарити та вага батареї конденсаторів.

На даний час розроблені накопичувачі енергії, які по своїм параметрам значно перевищують параметри конденсаторів та акумуляторів – іоністори (суперконденсатори). Ці молекулярні накопичувачі енергії з подвійним електричним шаром є оптимальним варіантом для імпульсних систем живлення вакуумно-дугових плазмових двигунів.

Головна перевага іоністорів це – на кілька порядків більша ємність, ніж у будь-яких інших класів конденсаторів. Іоністори з питомої енергії та питомої потужності займають проміжне положення між хімічними джерелами струму (акумуляторами) та електролітичними конденсаторами, але на відміну від акумуляторів зберігають працездатність у широкому температурному діапазоні від –50

до +85 °C при числі циклів заряд – розряд до 10^6 . Їх ємність становить до кількох тисяч фарад при напрузі від 2,3 до 5 В. На відміну від акумуляторів іоністори не потребують обслуговування протягом усього терміну експлуатації (до 20 років).

Велика ємність іоністрів при невеликих розмірах забезпечить імпульсну роботу вакуумно-дугових плазмових двигунів на розрядах тривалістю від сотень мілісекунд до одиниць секунд. Тому для живлення розроблених вакуумно-дугових плазмових двигунів в імпульсному режимі доцільно використовувати джерела живлення з накопичувачами енергії з іоністорами.

В роботі [53] іоністери (суперконденсатори) успішно використані в системі живлення вакуумно-дугового двигуна, в якому в якості ракетного палива використаний парафін.

Враховуючи викладене, доцільно в імпульсних системах живлення вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі використовувати іоністори.

5.2.2. Матеріал катоду.

В роботах [23] проведений аналіз металів, які можуть бути використані, як матеріал катоду для вакуумно-дугових плазмових двигунів. Для розроблених конструкцій вакуумно-дугових плазмових двигунів доцільно використовувати алюміній, титан, магній, цирконій. Ці метали мають високе теоретичне відношення величини тяги на одиницю потужності (від 12,77 мкН/Вт до 17,73 мкН/Вт по даним роботи [23]). Дуговий розряд на цих металах стабільно працює в межах від 50 до 200 А. Крім того, ці метали досить широко використовуються в техніці, мають невелику вартість і не мають проблем з механічною обробкою.

5.2.3. Матеріал аноду.

В процесі роботи вакуумно-дугових плазмових двигунів на аноді розсіюється близько третини енергії дугового розряду. Враховуючи, що в умовах космічного апарату важко забезпечити примусове охолодження аноду, доцільно виготовляти аноди з високотемпературного металу, наприклад з вольфраму.

5.2.4. Пристрій ініціювання дугового розряду

Для ініціювання дугового розряду доцільно використати систему, яка включає в себе електрод ініціювання розряду, встановлений в трубчатому ізоляторі так, що торцева поверхня електроду знаходиться на рівні торця трубчатого ізолятора, який щільно притиснений до робочої поверхні катоду. Ця конструкція блоку ініціювання дугового розряду аналогічна відомим системам ініціювання дугового розряду в електродугових випарниках металу, які використовуються для нанесення вакуумно-дугових покриттів (наприклад, в установках типу БУЛАТ). Процес ініціювання дугового розряду здійснюється наступним чином. Між анодом та катодом вакуумно-дугового плазмового двигуна подається напруга від джерела живлення. Між електродом ініціювання дугового розряду та катодом подається імпульс напруги величиною 3-4 кВ. По поверхні ізолятора на його торці виникає іскровий розряд, який ініціює дуговий розряд між катодом та анодом вакуумно-дугового плазмового двигуна.

5.3. Особливості розробки вакуумно-дугових плазмових двигунів зі спіральним катодом

5.3.1. Екрани для гасіння дугового розряду

Катодні плями вакуумно-дугового розряду переміщуються по поверхні спірального катоду під впливом власного магнітного поля, яке створюється струмом розряду, який проходить через спіраль катоду. При досягненні катодними плямами струмовідводу переміщення катодних плям припиняється і вони продовжують випаровувати поверхню катоду в області струмовідводу. Для запобігання

руйнування катоду необхідно погасити розряд в момент досягнення катодними плямами струмовідводу. Найпростіше це зробити шляхом встановлення ізольованого від катоду екрану над робочою поверхнею катоду. При переміщенні катодних плям до струмовідводу вони попадають в зазор між екраном та робочою поверхнею катоду. При цьому потік плазми до аноду перекривається екраном і розряд погасає. Зазор між робочою поверхнею катоду та екраном повинен бути не менше 5 мм. При меншому зазорі наведений потенціал екрану буде відштовхувати катодні плями і вони будуть переміщуватись по робочій поверхні катоду поблизу екрану.

5.3.2. Зазор між витками спірального катоду

Величина зазору між витками спірального катоду повинен бути в межах від 1 до 3 мм. При менших величинах зазору можливе закорочування між витками катоду за рахунок того, що катодні плями, переміщуючись на краю спіралі, можуть розплавити частину матеріалу катоду та створити «місток» між витками катоду. При більших величинах зазору катодні плями можуть переходити на бокову поверхню спіралі, що приводить до погасання розряду.

5.3.3. Розташування кабелю між струмовідводом спірального катода та джерелом живлення.

Катодні плями вакуумно-дугового розряду переміщуються по поверхні спірального катоду під впливом магнітного поля, яке створюється струмом розряду, який проходить через спіраль катоду. До струмовідводу катоду підключений кабель, або інший провідник, який з'єднує струмовідвід з виходом джерела живлення. Цей провідник також створює магнітне поле, і при розташуванні його на невеликій відстані від робочої поверхні катоду магнітне поле провідника буде впливати на переміщенні катодних плям. Тому провідник необхідно розташувати від струмовідводу катоду в напрямі, перпендикулярному до робочої поверхні катоду. В цьому випадку магнітне поле провідника не буде впливати на ха-

рактар переміщення катодних плям. Як показали проведені експерименти, на відстані більше 100 мм від робочої поверхні катоду при струмі розряду 200 А магнітне поле провідника не впливає на переміщення катодних плям при будь-якій орієнтації.

Висновки до розділу 5

1. Проведений аналіз переваг та недоліків вакуумно-дугових плазмових двигунів з дисковим та спіральним катодами.
2. На основі проведених досліджень розроблені рекомендації по проектуванню вакуумно-дугових плазмових двигунів, зокрема по імпульсним системам живлення, по конструктивним особливостям, по системі ініціювання дугового розряду.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове питання, що полягає у розробці наукових принципів проектування вакуумно-дугових двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою, що забезпечує створення вакуумно-дугових двигунів з підвищеним ресурсом роботи порівняно з відомими конструкціями.

Розроблені принципи програмного керування переміщенням катодних плям вакуумно-дугового розряду дозволяють проектувати конструкції вакуумно-дугових плазмових двигунів, які можуть бути використані в системах видалення космічного сміття, в системах корекції орбіт мікро- та наносупутників, а також для тривалих польотів космічних апаратів.

Дослідження спрямовані на вдосконалення конструктивних елементів двигунів і оптимізацію процесів створення реактивної тяги за рахунок потоків металевої плазми, яка утворюється в області катодних плям вакуумно-дугового розряду. Це, у свою чергу, сприяє розширенню експлуатаційних можливостей і підвищенню технологічної конкурентоспроможності вакуумно-дугових плазмових ракетних двигунів.

Основні наукові та практичні результати роботи:

1. Вперше в конструкціях вакуумно-дугових плазмових реактивних двигунів використано примусове програмоване переміщення катодних плям по поверхні катоду для забезпечення рівномірної ерозії матеріалу катоду та підвищення ресурсу роботи двигуна.

2. Удосконалено фізико-технічні підходи до керування траєкторією руху катодних плям, а саме: за рахунок комбінованого магнітного поля (соленоїда та постійного магніту) для дискових катодів та за рахунок використання топології власного магнітного поля розряду для спіральних катодів.

3. Встановлений взаємозв'язок між електрофізичними параметрами дугового розряду та інтегральними тяговими характеристиками вакуумно-дугових

двигунів на металевій плазмі, що дозволило встановити аналітичні залежності величини тяги від динаміки струму у вакуумно-дуговому розряді.

4. Розроблена та досліджена конструкція вакуумно-дугового плазмового ре-активного двигуна з дисковим катодом з примусовим керуванням переміщенням катодних плям дугового розряду за рахунок магнітного поля соленоїду та постійного магніту.

5. Розроблена та досліджена конструкція вакуумно-дугового плазмового реактивного двигуна зі спіральним катодом та керуванням переміщенням катодних плям за рахунок власного магнітного поля дугового розряду. Підготовлена заявка на винахід «Вакуумно-дуговий плазмовий двигун» (реєстраційний номер ДП «КБ «Південне» № П27-1 від 20.04.2026 р.).

6. Досліджені залежності величини тяги двигуна від параметрів дугового розряду.

7. Розроблено практичні рекомендації щодо інженерної розробки вакуумно-дугових плазмових реактивних двигунів з підвищеним ресурсом роботи та їх систем електроживлення.

Список використаної літератури

1. Гришин С. Д. Електричні ракетні двигуни космічних апаратів / С. Д. Гришин, Л. В. Лєсков. – М.: Машинобудування, 1989. – 216 с.
2. Кравченко В. П. Електрореактивні двигуни космічних апаратів: навч. посіб. / В. П. Кравченко. – Дніпро: НГУ, 2018. – 320 с.
3. Dale Ethan. Future Directions for Electric Propulsion Research. / E. Dale, B. Jorns, A. Gallimore. Aerospace. 2020, 7, 120. <https://doi.org/10.3390/aerospace7090120>
4. Lev D., The technological and commercial expansion of electric propulsion. / D. Lev, R.M. Myers, K.M. Lemmer, J. Kolbeck, H. Koizumi, K. Polzin. Acta Astronautica (2019), <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.058>.
5. O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D.F. Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review. Aerospace 2021. 8. 22. <https://doi.org/10.3390>.
6. Kolbeck J., Anders A., Beilis II, Keidar M. (2019) Micro-propulsion based on vacuum arcs. J Appl Phys 125. <https://doi.org/10.1063/1.5081096>.
7. Franklin R. Chang-Diaz, "Plasma Propulsion for Interplanetary Flight," Thin Solid Films, Vol. 506-507 (May26, 2006): 449-453 с.
8. Goebel D.M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. Wiley, 2008, 508 p.
9. Dethlefsen R. Performance measurements on a pulsed vacuum arc thruster. AIAA Journal 6(6). 1968. 1197–1199.
10. Gilmour A. & Lockwood D. Pulsed metallic-plasma generators, Proceedings of the IEEE. 1972. 60(8), 977–991.
11. Anders A., Cathodic Arcs. Springer Science Business Media. New York. 2008. 540 p.
12. Любимов Г.А., Раховський В.І. Катодна пляма вакуумної дуги. УФН. 1978. Т. 125, № 4. С. 665-706.
13. Tanberg R. On the Cathode of an Arc Drawn in Vacuum. Physical Review Vol. 35, No. 9, 1929, P. 1080-1089.
14. Anders A. and Yushkov G. Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of magnetic fields. J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. No. 8. P. 4824.

15. Sanders D. M., Anders A.. Review of Cathodic Arc Deposition Technology at the Start of the New Millennium. The 27th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, April 10 - 14, 2000.
16. Krinberg, I.A. Acceleration of a multicomponent plasma in the cathode region of a vacuum arc. *Tech. Phys.* 46, 1371–1378 (2001).
<https://doi.org/10.1134/1.1418498>
17. Beilis I.I. Vacuum arc cathode spot grouping and motion in magnetic fields. *IEEE Transactions on Plasma Science* (Volume: 30, Issue: 6, December 2002) Page(s): 2124 – 2132: DOI: 10.1109/TPS.2002.807330.
18. Hartmann W, Lins G. Retrograde motion of cathode spots. *Proceedings of the XXIVth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Braunschweig, Germany, 2010, pp. 371–374.
19. Li, L., Zhu, Y., He, F., Dun, D., Li, F., Chu, P. K., & Li, J. (2013). Control of cathodic arc spot motion under external magnetic field. *Vacuum*, 91, 20-23.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.10.008>.
20. A. A. Andreev, L. P. Sablev, and S. N. Grigoriev, *Vacuumno-dugovie pokritiya [Vacuum Arc Coatings]* (Kharkiv: 2010).
21. Qi N., Gensler S., Prasad R., Krishnan M., Vizir A. & Brown I. A vacuum arc ion thruster for space propulsion, Technical report, AASC. SBIR Phase-I Final Report F49620-97-C-0024, 31 MARCH 1998.
22. Tang B., Idzkowski L. & Au M. (2005), Thrust improvement of the magnetically enhanced vacuum arc thruster (MVAT), in ‘29th International Electric Propulsion Conference’, Vol. IEPC-2005-304, Princeton University.
23. Polk J. E., Sekerak M. J., Ziemer J. K., Schein J., and Anders A. A Theoretical analysis of vacuum arc thruster and vacuum arc ion thruster performance. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36, no. 5, P. 2167–2179.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2004374>
24. Pietzka M. Development and Characterization of a Propulsion System for CubeSats Based on Vacuum Arc Thrusters. Ph.D. Thesis, University of the Bundeswehr Munich, Munich, Germany, 2016. P. 177.
25. Rysanek F., Hartmann J. W., Schein J. and Binder R. MicroVacuum Arc Thruster Design for a CubeSat Class Satellite. In 16th Annual/USU Conference on Small Satellites. 2002.

26. Lun J. Development of a vacuum arc thruster for nanosatellite propulsion. Master's thesis, Stellenbosch University. 2008.
27. Keidar M., Schein J., Wilson K., Gerhan A., Au M., Tang B., Idzkowski L., Krishnan M. and Beilis I. I. Magnetically enhanced vacuum arc thruster. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. 14(4), 661–669.
28. Schein J., Gerhan A., Woo R., Au M. and Krishnan M. Vacuum arc plasma thrusters with inductive energy storage driver. US Patent App. 11/417,366. (2007).
29. Gilmour A. S. Concerning the Feasibility of a Vacuum-Arc Thruster. In AIAA 5th Electric Propulsion Conference, San Diego, CA (1966).
30. Schein J., Qi N., Binder R., Krishnan M., Polk J., Ziemer J. and Shotwell R. Vacuum Arc Thruster for Small Satellite Applications. Final Contractor Report, NASA. NASA CR-2001-211323. (2001).
31. Zhuang T., Shashurin A., Brieda L., and Keidar M. Development of micro-vacuum arc thruster with extended lifetime. 31st International Electric Propulsion Conference, IEPC-2009-192. Ann Arbor, Michigan. 2009.
32. Taploo A., Jake Spinelli J., Michael Keidar J. Toward achieving longevity of micro cathode thrusters. *Guru Sankar Duppada; Appl. Phys.* 138, July 09 2025. <https://doi.org/10.1063/5.0273158>.
33. Saletes J., Kim M., Saddul K., Wittig A., Honda K., Katila P. Development of a Novel Cubesat De-Orbiting All Printed Propulsion System. *Space Propulsion: Estoril, Portugal*, 2022.
34. Saletes James (2025) Development of vacuum arc thruster technology through printed architecture and improved arc stability. University of Southampton, Doctoral Thesis, 235pp.
35. Benjamin Kanda and Minkwan Kim. Operation of Vacuum Arc Thruster Arrays with Multiple Isolated Current Sources. *Aerospace*. 2025, 12(6), 549. <https://doi.org/10.3390/aerospace12060549>
36. Krishnan M., Velas K., and Leemans S. Metal Plasma Thruster for Small Satellites. *AIAA Journal*. 2020. Vol. 36, No. 4, P. 535-539. <https://doi.org/10.2514/1.B37603>.
37. Kent Frankovich, Mahadevan Krishnan, "Metal plasma thruster (MPT): from garage to orbit in 4 years", presented at the 2024 3AF Space Propulsion Conference in Glasgow, Scotland, 20 – 23 MAY 2024.

38. Frankovich K., Krishnan M., Mackey J.A., Kamhawi H. Flight Metal Plasma Thruster (MPT) Development, Qualification, and Thrust Measurement Campaign. Nasa Technical Reports Server: Cleveland, OH, USA, 2024.
39. Anders A., Schein J. and Qi N. Pulsed vacuum-arc ion source operated with a “triggerless” arc initiation method. *Review of Scientific Instruments*. 2000. 71(2), 827.
40. Schein J., Qi N., Binder R., Krishnan M., Ziemer J. K., Polk J. E., & Anders A. Inductive Energy Storage Driven Vacuum Arc Thruster, *Review of Scientific Instruments*. 2022 . 73. 925-927. <https://doi.org/10.1063/1.428784>.
41. Lun J. Performance improvement of vacuum arc thrusters. A thesis submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment at the University of the Witwatersrand, Johannesburg, in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2015.
42. Kühn, Marvin et al. Thrust Measurements on the High Efficient and Reliable Vacuum Arc Thruster (HERVAT). *Appl. Sci.* 2021, 11, 2274. <https://doi.org/10.3390/app11052274>.
43. J Kolbeck, D Lines and AK Knoll, Experimental Investigation of an Aluminium Fuelled Vacuum Arc Thruster, 34th International Electric Propulsion Conference Proceedings.
44. Спірін Є. В., Бондар М. А., Надтока В. М., Безуглий В. Ф., Кріпак І. Ю., Лейтер І. М. Стенди для випробувань виробів ракетно-космічної техніки в умовах високого вакууму. – Тези доповідей на 7-й Міжнародній конференції «Космічні технології: сьогодення та майбутнє», 21-24 травня 2019 р., м. Дніпро, с. 43.
45. Jochen Schein; Niansheng Qi; Robert Binder; Mahadevan Krishnan; André Anders. Low mass vacuum arc thruster system for station keeping missions. Presented as Paper IEPC-01-228 at the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15-19 October, 2001.
46. Etienne Michaux, Stéphane Mazouffre. Influence of cathode spots behavior on vacuum arc thruster performance. *International Electric Propulsion Conference 2025*, Sep 2025, Londres, UK. pp.157. <https://hal.science/hal-05273352v1>.
47. Sethuraman S.K., Barrault M.R. Study of the Motion of Vacuum Arcs in High Magnetic Field. *Journal of Nuclear Materials*, 1980, vol. 93–94, pp. 791–798.

48. Mahrle, A.; Zimmer, O.; Schenk, S.; Borkmann, M.; Leyens, C. A Semi-Empirical Model of Cathodic Arc Spot Motion under the Influence of External Magnetic Fields. *Plasma* 2024, 7, 1–15. <https://doi.org/10.3390/plasma7010001>.
49. Духопельніков Д. В., Кириллов Д. В., Рязанов В.А., Наїнг Чжо Він. Оптимізація траєкторії переміщення катодної плями для підвищення рівномірності виробітки катода вакуумного дугового випарника. *Інженерний журнал: наука і інновації*, 2013, вип. 10. <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1042.html>
50. Спірін Є. В. Електрореактивний двигун малої тяги з використанням електродугового розряду. – Тези XXV Міжнародної конференції «Людина і космос», 12-14 квітня 2023 р., м. Дніпро, с. 50-51.
51. Спірін Є. В., Надтока В. М. Дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі. – Тези XXV Міжнародної конференції «Людина і космос», 17-19 квітня 2024 р., м. Дніпро, с. 90-91. DOI.ORG/10.62717/2221-4550-2024-1-041.
52. Спірін, Є., Надтока, В. (2024). Дослідження магнітного поля електродугового реактивного двигуна на металевій плазмі. *Журнал ракетно-космічних технологій*, 33 (4-28), 45-48. <https://doi.org/10.15421/452423>.
53. Nishioka, K., Shinnyo, T. & Toyoda, K. Investigation of the use of electric double-layer capacitors and rectangular propeller shape to improve the performance of surface arc thrusters and to reduce the voltage of the igniter discharge circuit. *J Electr Propuls* 5, 5 (2026). <https://doi.org/10.1007/s44205-026-00181-1>.
54. Андрєєв А. А. Про рух катодної плями вакуумної дуги. *Питання атомної науки та техніки*. 2000. № 1, сірий. Плазмова електроніка та нові методи прискорення. С. 63-66.
55. Yu-Xi Liu, Jin-Yue Geng, Hai-Xing Wang¹, Hao Yan, Xu-Hui Liu, Su-Rong Sun, Ao-wei Liu, and Tao Wu Experimental study of the rotation characteristics of

- magnetically driven vacuum-arc cathode spots. Phys. Rev. E 112, 015213 – Published 30 July, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1103/cnft-5pyh>.
56. Siemroth, P. (2001). Calculation and measurement of the time dependent erosion rate of electromagnetic steered rectangular arc cathodes. Surface & Coatings Technology. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01388-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01388-3).
57. Stark, J. (1903). Zur Kenntnis des Lichtbogens. Annalen der Physik, 317(12), 673–713. DOI: 10.1002/andp.19033171202.
58. Духопельніков Д. В., Кириллов Д. В., Рязанов В. А. Дослідження профілю виробітки катода дугового випарника з арочним магнітним полем. Інженерна освіта, 2012, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/482485.html> doi:10.7463/1112.0482485 (18.06.2013).
59. E. Ertürk, H.-J. Heuvel, H.-G. Dederichs. Comparison of the steered arc and random arc techniques. Surface and Coatings Technology. Volumes 39–40, Part 2, 15 December 1989, Pages 455-464.
60. J.G. Brown, H. Shiraishi. Cathode erosion rates in vacuum-arc discharges //IEEE Trans. Plasma Sci. 1990, v. 18, № 1, p. 170 – 171.

Додаток А Акт впровадження результатів дисертаційної роботи Спіріна Єгора Володимировича на здобуття наукового ступеня доктора філософії «Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою».

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник
Генерального директора
ДП "КБ "Південне" ім. М. К. Янгеля
Максим ДЕГТЯРЬОВ



24.06. 2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Спіріна Єгора Володимировича
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
**«Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі
з керованою вакуумною дугою»**

Результати досліджень Спіріна Єгора Володимировича, що представлені в дисертаційній роботі «Розроблення та дослідження реактивних двигунів на металевій плазмі з керованою вакуумною дугою», у вигляді методичних та практичних результатів застосовуються у ДП "КБ "Південне" ім. М. К. Янгеля під час проєктування, конструювання, виготовлення дослідних зразків та їх експериментальному відпрацюванню для окремих вузлів і агрегатів перспективних виробів ракетно-космічної техніки, таких як піко-, нано- та мікросупутників.

Начальник
бюро конструкторського (КБ-3)

Костянтин БІЛОУСОВ

MS 24.06.26