

Исследование теплового состояния блока имитации основного разряда микроэлектронного имитатора стационарного плазменного двигателя

Рассмотрено тепловое состояние и приведены результаты тепловых испытаний блока имитации основного разряда – наиболее термически нагруженного блока разрабатываемого в МАИ (Москва) микроэлектронного имитатора стационарного плазменного двигателя. Проанализированы процессы установления стационарных распределений температуры в различных режимах работы блока. Получены пространственные распределения температуры корпуса блока, которые в дальнейшем планируется использовать для проектирования компоновки микроэлектронного имитатора стационарного плазменного двигателя.

Р.В. АХМЕТЖАНОВ,

А.П. ВЛАСЕНКО,

С.В. ГОРДЕЕВ,

канд. техн. наук,

Е.В. СВЕТЛИЧНАЯ,

И.А. ПОПОВ

(МАИ, Москва)

svyatoslavgordeev@mail.ru

Стационарный плазменный двигатель, система питания и управления, микроэлектронный имитатор, тепловые испытания, двухрежимный блок коррекции

В настоящее время широко используется один из видов электрореактивных двигателей – стационарные плазменные двигатели, что связано с их достаточно высокими удельными характеристиками, а также относительной конструктивной простотой и высокой надежностью, подтвержденной длительной космической эксплуатацией таких двигателей [1].

Двигательные установки на основе стационарных плазменных двигателей применяются для поддержания орбит космических аппаратов [2], а также для довыведения космических аппаратов на геостационарную орбиту с увеличением их массы на данной орбите в 1,5–2 раза [3]. Такой маневр был реализован при запуске Eutelsat 172В (Франция) в 2017 г. С помощью двигателя СПД-140Д выполнено выведение космического аппарата с высокоэллиптической геопереходной орбиты на геостационарную за четыре месяца [4]. В России с помощью двигателей СПД-100В осуществлено довыведение тяжелых космических аппаратов «Экспресс-АМ5» (в 2013 г.) и «Экспресс-АМ6» (в 2014 г.), конечная масса которых на геостационарной орбите превышала располагаемые возможности средств выведения [3].

Двигательные установки на основе стационарных плазменных двигателей предназначаются для межпланетных миссий. Например, Европейским космическим агентством с помощью СПД-100 был осуществлен переход космического аппарата Smart-1 с околоземной орбиты на окололунную [5].

Стационарные плазменные двигатели исследуются, разрабатываются, производятся и эксплуатируются во многих странах мира, в частности в России [6], Франции [7], Великобритании [8], США [9], Китае [10].

В последнее время экспоненциально увеличивается количество выводимых на орбиту аппаратов, использующих двигатели данного типа [6], что связано в первую очередь с запуском многоспутниковых группировок OneWeb [11] и Starlink [12].

В частности, рост потребностей отрасли в области стационарных плазменных двигателей фиксируется по интенсивности выведения в космическое пространство космических аппаратов со стационарными плазменными двигателями производства АО «ОКБ «Факел»» (Россия) (рис. 1) [13].

В связи с потребностями отрасли актуально проведение работ по ускорению, удешевлению и упрощению процессов разработки, отработки данного типа двигателей, в том числе для обеспечения их массового серийного производства.

Использование серийных стационарных плазменных двигателей требует проведения предварительной наземной отработки для подтверждения их работоспособности.

Испытания космических двигателей в наземных условиях являются трудоемким, длительным и затратным процессом, поскольку необходима имитация условий космического пространства и расхода

дорогостоящего рабочего тела [14]. Таким образом, при наличии возможности целесообразно снижать объем таких испытаний.

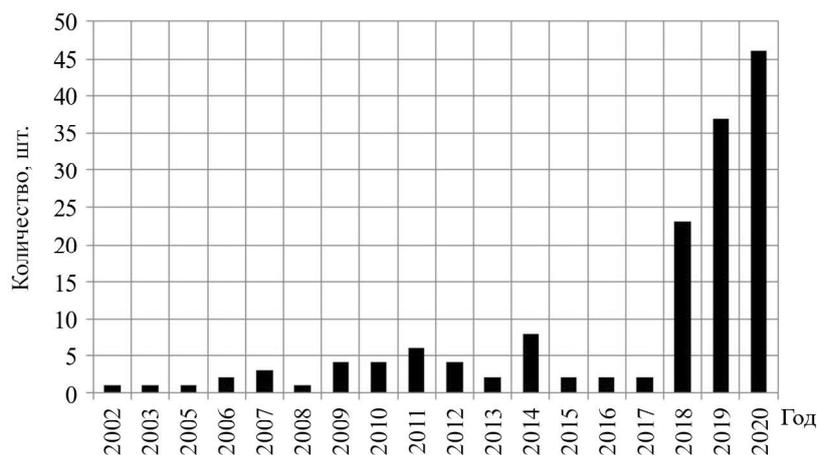


Рис. 1

В состав двигательной установки на базе стационарного плазменного двигателя входит двигатель, состоящий из катодного и анодного блоков, система хранения и подачи рабочего тела, блок газораспределения и система питания и управления, осуществляющая питание, управление и контроль остальных систем двигательной установки.

Поскольку двигательная установка является сложной системой, предварительные проверки работоспособности ее подсистем целесообразно проводить отдельно, в частности, испытания двигателя отдельно от системы питания и управления при использовании стендовых источников электропитания и испытания системы питания и управления отдельно от двигателя.

Система питания и управления – сложный, с точки зрения количества составных схемотехнических элементов и предъявляемых к элементам требований по их контролю, узел двигательной установки, требующий значительного объема испытаний и проверок.

Проблема автономных испытаний системы питания и управления стационарного плазменного двигателя связана с необходимостью имитации сложных физических процессов, происходящих в разрядной и других цепях двигателя. При включении двигателя возникают различные переходные процессы в линиях питания катодных цепей, цепи основного разряда и цепей клапанов. При упрощенной имитации соответствующих цепей омическими нагрузками возникает вопрос эквивалентности таких нагрузок реальным цепям стационарного плазменного двигателя.

Для обеспечения возможности автономных испытаний систем питания и управления необходимо создание электронного имитатора стационарного плазменного двигателя.

В МАИ (Москва) для автономных испытаний системы питания и управления был разработан микроэлектронный имитатор стационарного плазменного двигателя. В данном имитаторе с использованием программируемых нагрузок реализована имитация переходных процессов, регистрируемых в реальных цепях двигателя. Разработанный микроэлектронный имитатор предназначен для отработки систем питания и управления стационарного плазменного двигателя, разработанного АО «ГНЦ "Центр Келдыша"» (Россия) – высокоимпульсного двухрежимного блока коррекции.

Ключевой отличительный признак разработанного имитатора стационарного плазменного двигателя в сравнении известными аналогами [15, 16] – возможность программной настройки параметров имитации, в том числе и переходных процессов, без изменения электрической схемы устройства.

С помощью микроэлектронного имитатора возможно проводить проверки управления клапанами подачи рабочего тела, катодных цепей и цепи основного разряда. Таким образом, данное устройство содержит следующие узлы имитации различных электрических узлов стационарного плазменного двигателя.

ля: узел имитации основного разряда, имитации цепи поджига катода, имитации нагревателя эмиттера катода, имитации обмоток катушек намагничивания, имитации термодросселя регулятора расхода рабочего тела, имитации клапанов блока управления расходом рабочего тела.

Также микроэлектронный имитатор содержит модуль управления имитатором, в состав которого входят микропроцессорные блоки и исполнительные органы системы управления имитатором.

Особенностью разработанного устройства является возможность имитации работы высокоимпульсного двухрежимного блока коррекции на базе стационарного плазменного двигателя – с режимом повышенной тяги и режимом повышенного удельного импульса при сопоставимых значениях потребляемой мощности. Для этого в состав блока имитации основного разряда входят специальные регулируемые нагрузки, обеспечивающие протекание разрядного тока в этих двух режимах. Реализованы следующие параметры имитируемых режимов: режим повышенной тяги (напряжение разряда – 400 В, ток разряда – 6 А), режим повышенного удельного импульса (напряжение разряда – 800 В, ток разряда – 3,1 А).

При работе двигателя в данных двух режимах обеспечиваются близкие значения потребляемой мощности. В режиме повышенной тяги сокращается время работы двигателя при выполнении маршевых задач, а в режиме повышенного удельного импульса повышается суммарный импульс при решении задач стабилизации орбитального положения или поддержания орбиты космического аппарата.

При работе имитатора разрядный ток коммутируется на специально подобранную с учетом соответствующих значений напряжения, тока и рассеиваемой мощности резистивную нагрузку. В силу данной особенности блока имитации основного разряда вся мощность, выдаваемая системой питания и управления, выделяется в виде тепла на резистивных элементах. В связи с этим требуется высокая интенсивность их охлаждения для обеспечения приемлемой температуры имитатора и исключения теплового повреждения его составных конструктивных элементов. Охлаждение блока нагрузок осуществляется мощными вентиляторами, позволяющими отводить выделяемую энергию с потоком воздуха. Переключение режимов обеспечивается коммутацией различных групп резисторов, осуществляющейся с помощью высокоточных транзисторных ключей, которые также должны работать в приемлемом температурном режиме.

Отладку и испытания элементов разработанного микроэлектронного имитатора стационарного плазменного двигателя также целесообразно проводить отдельно для разных блоков. В настоящей работе описаны результаты тепловых испытаний блока имитации основного разряда микроэлектронного имитатора. Данный блок имеет габаритные размеры 260×260×470 мм.

Для обеспечения режима работы блока имитации основного разряда, соответствующего его работе при подключении штатной системы питания и управления, использовался стендовый источник питания постоянного тока с выходным напряжением до 1200 В и допусковым выходным током до 40 А.

В процессе испытаний сначала исследовался режим с напряжением питания 400 В и током разряда 6 А. Для этого на вход блока было подано соответствующее напряжение и регистрировалась зависимость максимальной температуры внутри блока от времени. Для регистрации максимальной температуры внутри корпуса блока использовался инфракрасный пирометр AZ 8868, погрешность которого составляет ± 2 °С. Этого вполне достаточно для качественного определения картины разогрева блока и выявления критических конструктивных элементов с точки зрения обеспечения теплового режима.

На рис. 2 представлено тепловое состояние верхней панели внешнего корпуса после достижения установившегося режима (400 В; 6 А) по температуре. Максимальная температура корпуса (примерно 55 °С) возникает при работе блока имитации основного разряда вблизи соответствующих групп резисторов, через которые протекает ток.

В процессе испытаний наиболее высокая температура корпуса блока устанавливалась на его задней стенке, в области выхода нагретого воздуха. В установившемся режиме температура задней стенки составила около 80 °С.

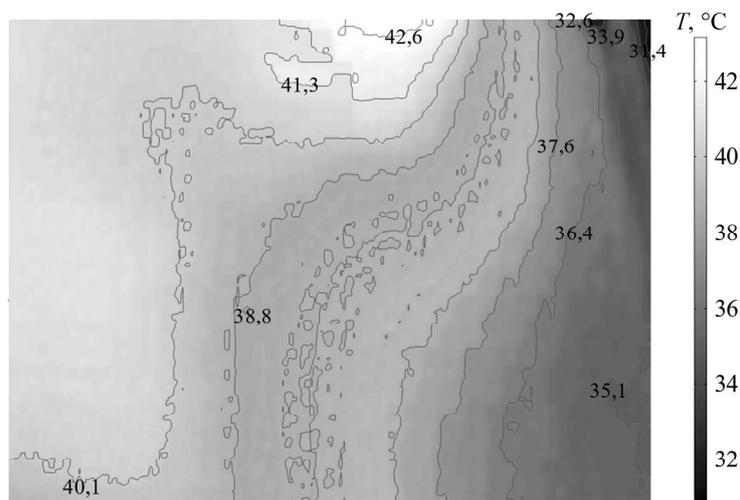


Рис. 2

После проведения испытаний блока в режиме 400 В, 60 А его питание было отключено, и после выравнивания его температуры с температурой окружающей среды проводились испытания во втором режиме работы блока (800 В; 3,1 А). Для этого напряжение, подаваемое на вход, плавно повышалось от 0 до 800 В с регистрацией возрастающего тока потребления блока. Номинальный режим был достигнут в течение 2 мин. После выхода на номинальный режим проводились измерения максимальной температуры внутри корпуса блока в зависимости от времени работы блока.

На рис. 3 представлено распределение температуры верхней панели корпуса блока имитации основного разряда в режиме с питанием 800 В; 3,1 А. Ток протекал через другую группу резисторов, что приводило к изменению значений получаемого распределения температур.

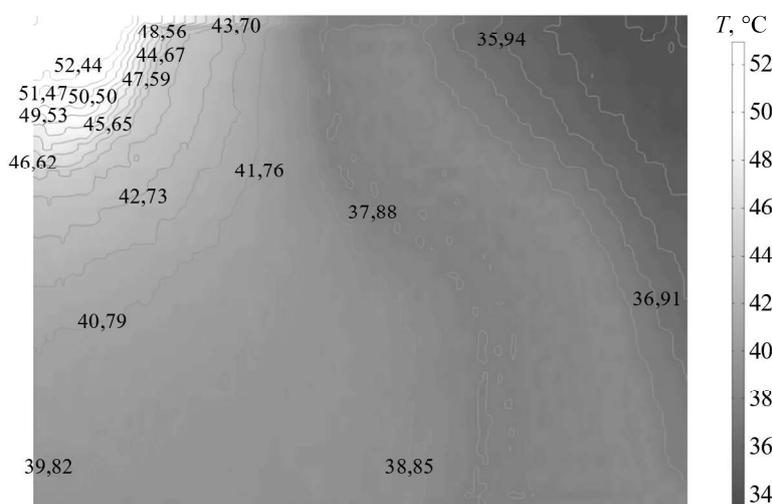


Рис. 3

Проводилось также исследование времени установления температурного поля при работе блока имитации основного разряда в каждом режиме работы.

Максимальная температура внутри блока определялась с помощью инфракрасного пирометра измерением через отверстия в задней стенке блока. На рис. 4 представлены временные зависимости зарегистрированной максимальной температуры внутри блока имитации основного разряда.

Как видим (см. рис. 4), при работе блока имитации основного разряда в каждом из двух режимов время установления температурного поля составляет около 600 с, в дальнейшем существенных изменений температурного поля не происходит.

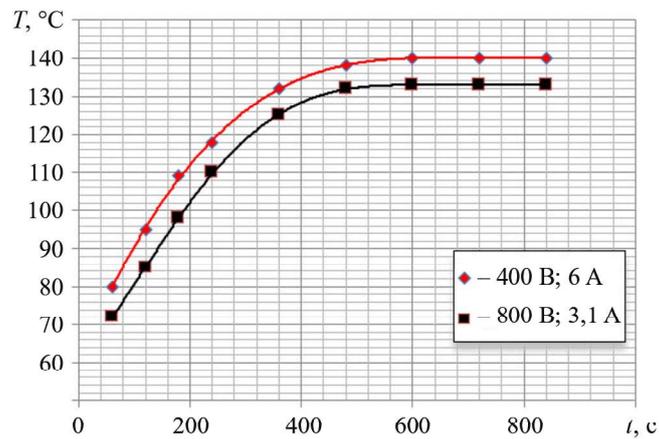


Рис. 4

Таким образом, разработанный микроэлектронный имитатор стационарного плазменного двигателя позволяет испытывать системы питания и управления стационарных плазменных двигателей без необходимости запуска самого двигателя, что упростит и удешевит цикл испытаний, необходимых при создании серийных двигательных установок. С помощью устройства возможно имитировать переходные процессы в различных цепях двигателя. Проведены тепловые испытания блока имитации основного разряда двигателя, получены распределения температур и исследовано время установления температурного поля. Максимальная температура при исследовании блока составила 140 °С, а время установления стационарного поля температур – около 600 с.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта «Создание высокотехнологического производства микроэлектронных средств обработки и контроля качества многофункциональной системы коррекции космических аппаратов» (соглашение № 075-11-2023-019 от 13.02.2023, идентификатор соглашения – 000000S407523Q9D0002, Постановление Правительства РФ № 218 от 9.04.2010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ким В.П.* Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журнал технической физики. 2015. № 3. С. 45–59.
2. *Гусев Ю.Г., Пильников А.В.* Роль и место электроракетных двигателей в российской космической программе // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 60. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35385> (дата обращения: 19.06.2024).
3. *Ермошкин Ю.М. и др.* Применение двигательной подсистемы на базе плазменного двигателя СПД-100В для довыведения и коррекции орбиты космических аппаратов «Экспресс-80» и «Экспресс-103» // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. № 3. С. 480–493.
4. Airbus-Built Full Electric EUTELSAT 172B Satellite Reaches Geostationary Orbit in Record Time [Electronical Resource]. URL: <https://gog.su/HvSr> (дата обращения: 19.06.2024).
5. *Koppel Ch.R., Estublier D.* The SMART-1 Hall Effect Thruster around the Moon: In Flight Experience // Proc. of the 29th International Electric Propulsion Conference, Oct. 31 – Nov. 4, 2005, Princeton, USA. Paper IEPC № 2005-119.
6. *Ким В.П.* Стационарные плазменные двигатели в России: проблемы и перспективы // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 60. <https://trudymai.ru/published.php?ID=35374> (дата обращения: 19.06.2024).
7. *Vaudolon J. et al.* PPS R X00 Thruster Development Status at Safran [Electronical Resource]. URL: <https://electricrocket.org/2019/241.pdf> (дата обращения: 19.06.2024).
8. *Tejeda J.M., Knoll A.* A Water Vapour Fuelled Hall Effect Thruster: Characterization and Comparison with Oxygen // Acta Astronautica. 2023. Vol. 211. P. 702–715.
9. *Hruby P. et al.* Overview of Busek Electric Propulsion [Electronical Resource]. URL: <https://electricrocket.org/2019/926.pdf> (дата обращения: 19.06.2024).
10. *Ding Yongjie et al.* Overview of Hall Electric Propulsion in China // Proc. of the IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. Vol. 46. Iss. 2. P. 263–282.
11. Handbook of Small Satellites. Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation / Ed. J.N. Pelton, S. Madry. Springer, 2020. 1702 p.

12. *McDowell J.C.* The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation // *The Astrophysical Journal Letters*. 2020. Vol. 892. № 2. Article № L36.
13. Летная история [Электронный ресурс]. URL: <https://fakel-russia.com/letnaya-istoriya> (дата обращения: 19.06.2024).
14. *Гусев Ю.Г., Пильников А.В., Суворов С.Е.* Сравнительный анализ выбора ЭРДУ большой мощности на основе отечественных ЭРД и перспективы их применения в системах межорбитальной транспортировки и для исследования дальнего космоса // *Космическая техника и технологии*. 2019. № 4 (27). С. 45–55.
15. Имитатор электроракетной плазменной двигательной установки: пат. 2395716 Рос. Федерация, № 2009102564/06; заявл. 26.01.2009; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 21.
16. Динамический имитатор стационарных плазменных двигателей: пат. 2610623 Рос. Федерация, № 2015133144; заявл. 7.08.2015; опубл. 14.02.2017, Бюл. № 5.

Поступила в редакцию 19.07.24

После доработки 22.08.24

Принята к публикации 8.09.24

Study of Thermal State of the Main Discharge Simulation Unit of Stationary Plasma Thruster Microelectronic Simulator

R.V. AKHMETZHANOV, A.P. VLASENKO, S.V. GORDEEV,
E.V. SVETLICHNAYA, AND I.A. POPOV

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

The paper presents the results of thermal tests of the main discharge simulation unit as the most thermally loaded unit of the stationary plasma thruster microelectronic simulator being developed at Moscow Aviation Institute. The processes of establishing the stationary temperature distributions in various modes of operation of the unit are analyzed. Spatial temperature distributions of the unit body have been obtained, which are planned to be used in designing the layout of a microelectronic simulator of a stationary plasma thruster.

Stationary plasma thruster, power processing unit, microelectronic simulator, thermal tests, dual-mode propulsion system