

УДК 629.78.036.7

ИТОГИ ДЕСЯТИЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ДВУХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ЯМАЛ-200» НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

© 2015 г. Ганзбург М.Ф.¹, Кропотин С.А.², Мурашко В.М.³, Попов А.Н.², Севастьянов Н.Н.⁴,
Смоленцев А.А.², Соколов А.В.², Соколов Б.А.², Сухов Ю.И.²

¹ АО «Авиационная электроника и коммутационные системы» (АО «АВЭКС») 1-я улица Ямского поля, 17/12, г. Москва, Российская Федерация, 125124, e-mail: avecs@avecs.ru

² Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

³ ФГУП Опытно-конструкторское бюро «Факел» (ОКБ «Факел») Московский проспект, 181, г. Калининград (обл.), Российская Федерация, 236001, e-mail: fakel@gazinter.net

⁴ ОАО «Газпром космические системы» Ул. Московская, 77Б, г. Щелково, Московская обл., Российская Федерация, 141112, e-mail: info@gazprom-spacesystems.ru

Представлены результаты работы электроракетных двигательных установок на борту двух телекоммуникационных космических аппаратов «Ямал-200» в течение десяти лет. Приводится описание двигательных установок и их основных составляющих: электроракетных тяговых модулей, обеспечивающих установку космических аппаратов в рабочие точки на геостационарной орбите и удержание в точке стояния; аппаратуры питания и управления, состоящей из блока электропитания и блока автоматики тяговых модулей. Анализируются режимы эксплуатации двигательных установок, особенности работы тяговых модулей и аппаратуры питания и управления при стационарной работе, переходных процессах — при запуске (выходе на режим номинальной мощности) и кратковременных бросках тока анода, характерных для электроракетных двигателей с керамической разрядной камерой. Показана стабильная работа двигательных установок в течение более десяти лет с наработкой на тяговых модулях более 1 100 ч при ~2 500 включениях. Приводятся результаты постоянного анализа тяги тяговых модулей по методологии, разработанной РКК «Энергия». Показана неизменность величины тяги за десять лет эксплуатации.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, тяговый модуль, огневая наработка, количество включений, броски тока анода, тяга тяговых модулей.

RESULTS OF TEN YEARS OF OPERATION OF ELECTRIC THRUSTERS WITHIN TWO TELECOMMUNICATION SPACECRAFTS YAMAL-200 IN GEOSTATIONARY ORBIT

Ganzburg M.F.¹, Kropotin S.A.², Murashko V.M.³, Popov A.N.², Sevast'yanov N.N.⁴,
Smolentsev A.A.², Sokolov A.V.², Sokolov B.A.², Sukhov Yu.I.²

¹ Stock company Avionics and Switching Systems (SC ASS) 1st Yamskoe pole str., 17/12, Moscow, 125124, Russian Federation, e-mail: avecs@avecs.ru

² *S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)*
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

³ *Federal State Unitary Enterprise Experimental Design Bureau FAKEL (EDB FAKEL)*
181 Moskovskiy pr-t, Kaliningrad (reg.), 236001, Russian Federation, e-mail: info@fakel.ru

⁴ *Joint Stock Company Gazprom Space Systems*
77B Moscow str., Shchelkovo, Moscow region, 141112, Russian Federation,
e-mail: info@gazprom-spacesystems.ru

The paper presents results of operation of electric thrusters' onboard two telecommunication spacecrafts Yamal-200 over a period of ten years. It provides a description of propulsion systems and their major components: electric thruster modules, which bring the spacecraft to their stations in the geostationary orbit, provide stationkeeping and attitude control; power supply and control equipment, consisting of the power supply unit and thruster modules automatic control unit. It analyses propulsion system operational modes, peculiarities of operation of thruster modules and power supply and control equipment during steady-state operation, during transient processes – during startup (reaching the nominal power mode) and during surge anode currents that are characteristic of electric thrusters with ceramic discharge chamber. It demonstrates stable operation of propulsion systems over a period of more than ten years with thruster modules accumulating more than 1 100 running hours during ~2 500 firings. It provides the results of continuous analysis of thruster modules thrust using methods developed by RSC Energia. It demonstrates that the thrust remained unchanged over the ten years of operation.

Key words: electric thruster, thrust module, running hours, number of firings, anode current surges, thruster modules thrust.

ГАНЗБУРГ Михаил Феликсович – кандидат технических наук, Первый заместитель генерального директора – главный конструктор АО «АВЭКС», e-mail: avecs@avecs.ru

GANZBURG Mikhail Feliksovich – Candidate of Science (Engineering), First Deputy General Director – General Designer of SC ASS, e-mail: avecs@avecs.ru

КРОПОТИН Сергей Александрович – начальник отделения РКК «Энергия», e-mail: post2@rsce.ru

KROPOTIN Sergey Alexandrovich – Head of Division at RSC Energia, e-mail: post2@rsce.ru

МУРАШКО Вячеслав Михайлович – кандидат технических наук, Генеральный конструктор ОКБ «Факел», e-mail: info@fakel.ru

MURASHKO Vyacheslav Mikhailovich – Candidate of Science (Engineering), General Designer of EDB FAKEL, e-mail: info@fakel.ru

ПОПОВ Александр Николаевич – начальник сектора РКК «Энергия», e-mail: post2@rsce.ru

POPOV Alexander Nikolaevich – Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: post2@rsce.ru

СЕВАСТЬЯНОВ Николай Николаевич – кандидат технических наук, Генеральный конструктор ОАО «Газпром космические системы», e-mail: gomenjuk@gazprom-spacesystems.ru

SEVAST'YANOV Nikolay Nikolaevich – Candidate of Science (Engineering), General Designer of Joint Stock Company Gazprom Space Systems, e-mail: gomenjuk@gazprom-spacesystems.ru

СМОЛЕНЦЕВ Александр Алексеевич – Главный конструктор двигателей, двигательных и энергетических установок РКК «Энергия», e-mail: post2@rsce.ru

SMOLENTSEV Alexander Alekseevich – General Designer for propulsion and power systems at RSC Energia, e-mail: post2@rsce.ru

СОКОЛОВ Андрей Васильевич – заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: post2@rsce.ru

SOKOLOV Andrey Vasil'evich – Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: post2@rsce.ru

СОКОЛОВ Борис Александрович – доктор технических наук, профессор, советник Президента РКК «Энергия», e-mail: boris.sokolov@rsce.ru

SOKOLOV Boris Alexandrovich — Doctor of Science (Engineering), Professor, Adviser to the President of RSC Energia, e-mail: boris.sokolov@rsce.ru

СУХОВ Юрий Иванович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: post2@rsce.ru

SUKHOV Yury Ivanovich — Candidate of Science (Engineering), Lead Research Scientist at RSC Energia, e-mail: post2@rsce.ru

Введение

На геостационарной орбите (ГСО) в течение более десяти лет (с декабря 2003 г.) успешно реализовали гарантийный срок службы два телекоммуникационных космических аппарата (КА) «Ямал-200», созданных РКК «Энергия» по заказу и при непосредственном участии ОАО «Газпром космические системы» [1]. Два КА массой около 1 300 кг каждый были выведены в ноябре 2003 г. одним пуском ракеты-носителя «Протон» с разгонным блоком ДМ на орбиту, близкую к геостационарной, с долготой точки выведения около 88° в. д. и с дрейфом на запад со скоростью примерно 1,4°/сут. Затем с использованием тяговых модулей (ТМ) двигательной установки (ДУ) КА устанавливались в рабочие точки 49 и 90° в. д. Начиная с января 2004 г., оба КА были введены в штатную эксплуатацию. Эксплуатация осуществляется Центром управления полетами (ЦУП «Ямал») ОАО «Газпром космические системы».

В настоящей статье приведено описание одной из основных систем, обеспечивающих целевое функционирование телекоммуникационного КА, — ДУ и ее составляющих. Приводятся также результаты анализа эксплуатации системы электроракетных двигателей (СЭРД) в составе ДУ, созданной на основе стационарного плазменного двигателя СПД-70, разработанного ОКБ «Факел» [2]. В статьях [3, 4] представлены результаты работы ТМ в течение пяти и восьми лет после запуска КА. Специалисты ЦУП «Ямал» ОАО «Газпром космические системы» и РКК «Энергия» проводят постоянный анализ (на каждом маневре) работы двигательных установок КА «Ямал-200» так же, как и других систем.

Объединенная двигательная установка

Объединенная двигательная установка (ОДУ) КА «Ямал-200» включает в себя:

- СЭРД, в состав которой входят восемь ТМ, при этом каждый из них состоит из СПД-70 и блока газораспределения (БГР);
- 12 газовых двигателей (ГД);
- средства хранения и подачи рабочего тела;

- блок формирования команд (БФК) ДУ.

ТМ и ГД работают на едином рабочем теле — ксеноне (Xe), что отражено в названии «объединенная двигательная установка». Имеющиеся в составе ОДУ ГД использовались только для гашения остаточных угловых скоростей КА после отделения его от ракеты-носителя и, в отдельных случаях, для управления угловым движением в процессе штатной эксплуатации КА.

Тяговые модули

В составе СЭРД ОДУ КА «Ямал-200» восемь электроракетных ТМ, расположенных попарно по ребрам КА [3, 4]. Все операции по установке КА в рабочие точки (49 и 90° в. д.), разгрузке силовых гироскопов от накопленного кинетического момента выполнялись ТМ.

Описание ТМ на основе электроракетных двигателей (ЭРД) СПД-70 приводилось в предыдущих публикациях [3–5]. Основные номинальные характеристики ТМ:

рабочее тело	ксенон;
потребляемая электрическая мощность, Вт	675;
ток разряда, А	2,23;
напряжение разряда, В	300;
давление рабочего тела, Па	$1,72 \cdot 10^5$;
расход рабочего тела, г/с	$2,7 \cdot 10^{-3}$;
удельный импульс тяги, м/с	14 400.

Согласно технической документации на ТМ, ток разряда должен обеспечиваться в диапазоне $(2,23 \pm 0,02)$ А, высоковольтное напряжение электропитания (300 ± 15) В, давление рабочего тела на входе ТМ $(1,72 \pm 0,1) \cdot 10^5$ Па. При этих условиях удельный импульс тяги ТМ не менее 14 400 м/с.

Аппаратура питания и управления тяговых модулей

Аппаратура питания и управления (АПУ) осуществляет электропитание и управление ТМ, она состоит из блока электропитания (БЭП) и блока автоматики тяговых модулей (БАТМ), разработанных АО «АВЭКС». Важным решением является создание БЭП и БАТМ для работы в условиях космического вакуума (в негерметичном исполнении), которое было

реализовано еще на этапе разработки КА «Ямал-100» в 1990-е гг. [6]. Это было новым решением в отечественном космическом приборостроении, что с учетом условий эксплуатации на ГСО требовало специального подхода к конструированию и экспериментальной отработке АПУ, учитывая достаточно высокий уровень напряжения разряда в ЭРД — около 300 В. Аппаратура БЭП и БАТМ в составе ДУ выполняет следующие задачи:

- БЭП (рис. 1) предназначен для преобразования постоянного напряжения ($28 \pm 0,5$) В в напряжение постоянного тока (300 ± 15) В для питания цепей разряда ТМ и напряжение переменного тока ($28 \pm 0,5$) В с частотой 10 кГц для питания электрических цепей накала катодов (при подготовке работы ТМ) и термодросселей всех ТМ через БАТМ. Питание БЭП осуществляется от источника постоянного тока системы электропитания КА;

- БАТМ (рис. 2) предназначен для приема внешних команд и выработки в соответствии с ними управляющих воздействий в виде коммутации электрической мощности для всех функциональных электрических цепей каждого из восьми ТМ: накала катода, нагрева термодросселя, включения и выключения электропневмоклапанов, поджига, анодно-катодного разряда, выдачи в систему бортовых измерений параметров контроля

управляющих воздействий. БАТМ функционирует совместно с БЭП, ТМ № 1–8 и с БФК ДУ. Значения токов накала катода, термодросселя, разряда определяются конкретными настройками. Примеры величин напряжений питания БАТМ и разряда на протяжении маневра КА2 приведены на рис. 3.

БАТМ осуществляет передачу телеметрической информации о состоянии функциональных цепей ТМ с борта КА. Информация о работе ТМ передается с частотой опроса 0,2 с, что позволяет проводить детальные исследования работы ТМ.

Специфической особенностью БАТМ, разработанного АО «АВЭКС», в отличие от изделий других российских и зарубежных производителей АПУ, является то, что цепи питания накала катодов и термодросселей ТМ выполнены на переменном токе, что значительно сокращает габариты БАТМ и уменьшает мощность тепловыделения.

В состав ОДУ входит БФК ДУ, который выполняет следующие задачи:

- выдает команды в БАТМ для управления ТМ по сигналам, поступающим от бортового комплекса управления (БКУ);
- усиливает команды, поступающие от БКУ на управление ГД;
- управляет агрегатами ОДУ посредством сигналов, поступающих от БКУ КА, преобразуя их в силовые команды.

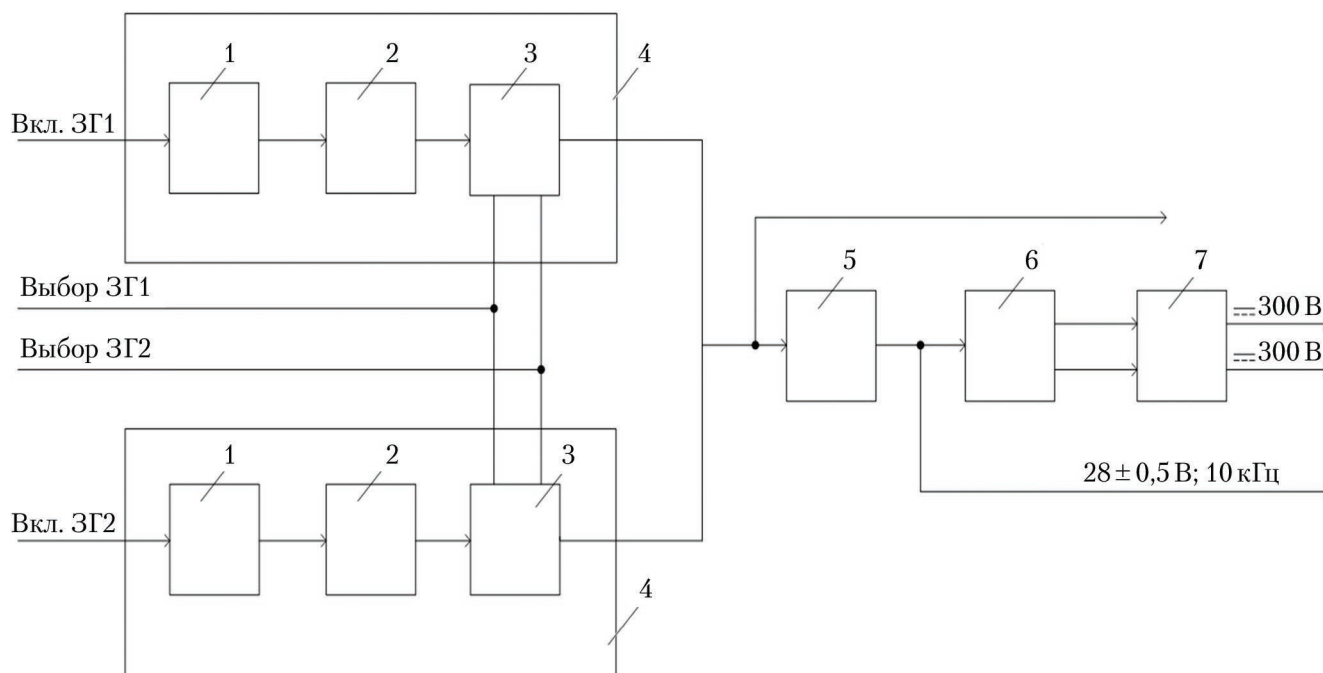


Рис.1. Структурная схема блока электропитания: 1 — задающий генератор; 2 — предварительный усилитель мощности; 3 — коммутатор; 4 — устройство управления; 5 — усилитель мощности; 6 — трансформатор; 7 — выпрямитель и фильтр

Примечание. «Вкл. ЗГ1 (2)» — команда блока формирования команд двигательной установки (БФК ДУ) на включение задающего генератора; «Выбор ЗГ1 (2)» — команда БФК ДУ на выбор задающего генератора в контур управления системой электроракетных двигателей.

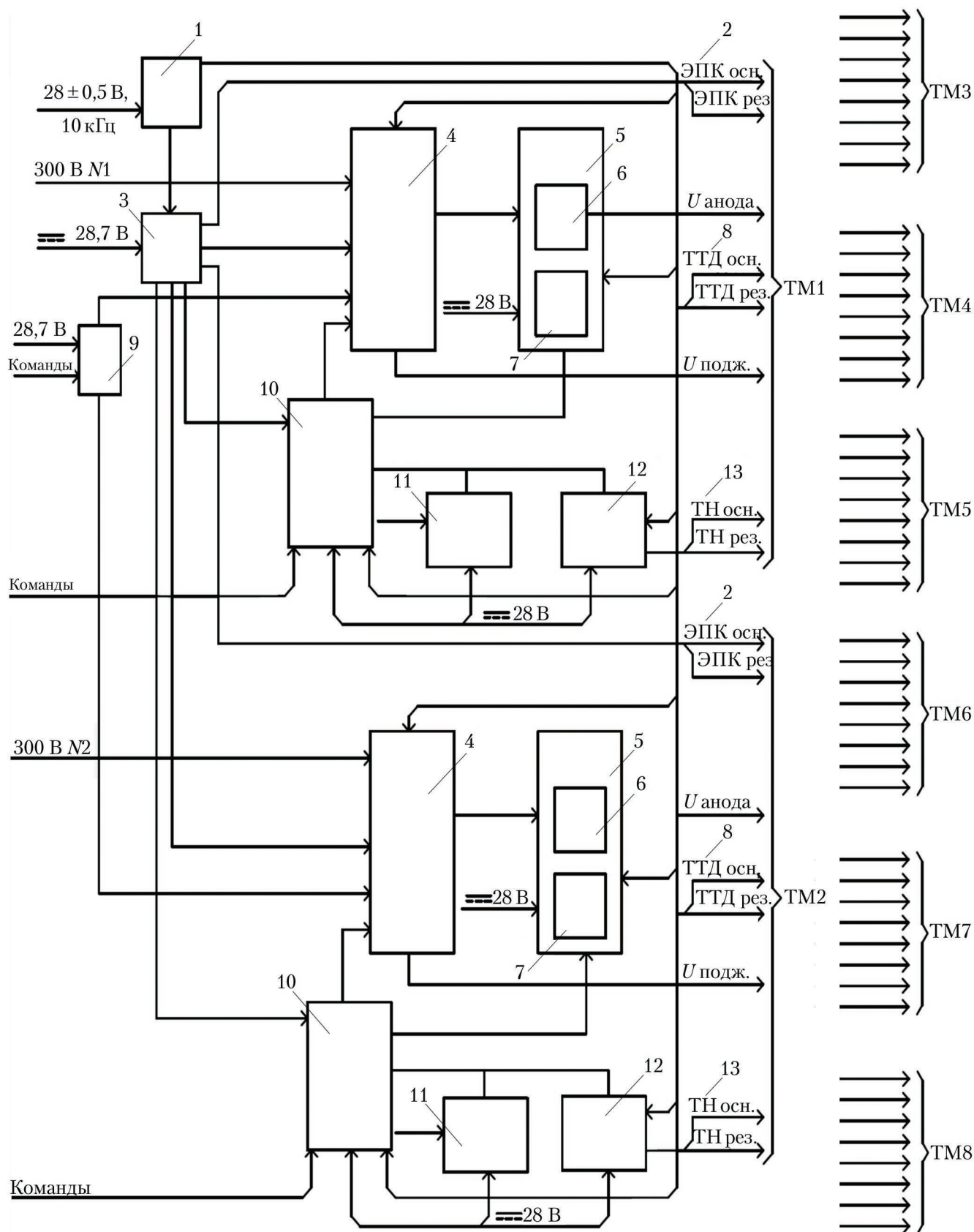


Рис. 2. Структурная схема блока автоматики тяговых модулей: 1 – трансформатор; 2 – питание электропневмоклапана основного (резервного); 3 – выпрямитель; 4 – устройство запуска и защиты; 5 – регулятор тока анода; 6 – измеритель тока анода; 7 – регулятор тока термодросселя; 8 – ток питания термодросселя основного (резервного); 9 – генератор импульсов; 10 – релейный блок; 11 – устройство коммутации; 12 – регулятор тока накала; 13 – ток питания накала катодов основного (резервного)

Примечание. $U_{\text{подж.}}$ – напряжение электропитания поджига разрядной дуги в стационарном плазменном двигателе (СПД); $U_{\text{анода}}$ – напряжение электропитания анода СПД (напряжение разряда); ЭПК – электропневмоклапан; ТТД – ток термодросселя; ТН – ток накала катода.

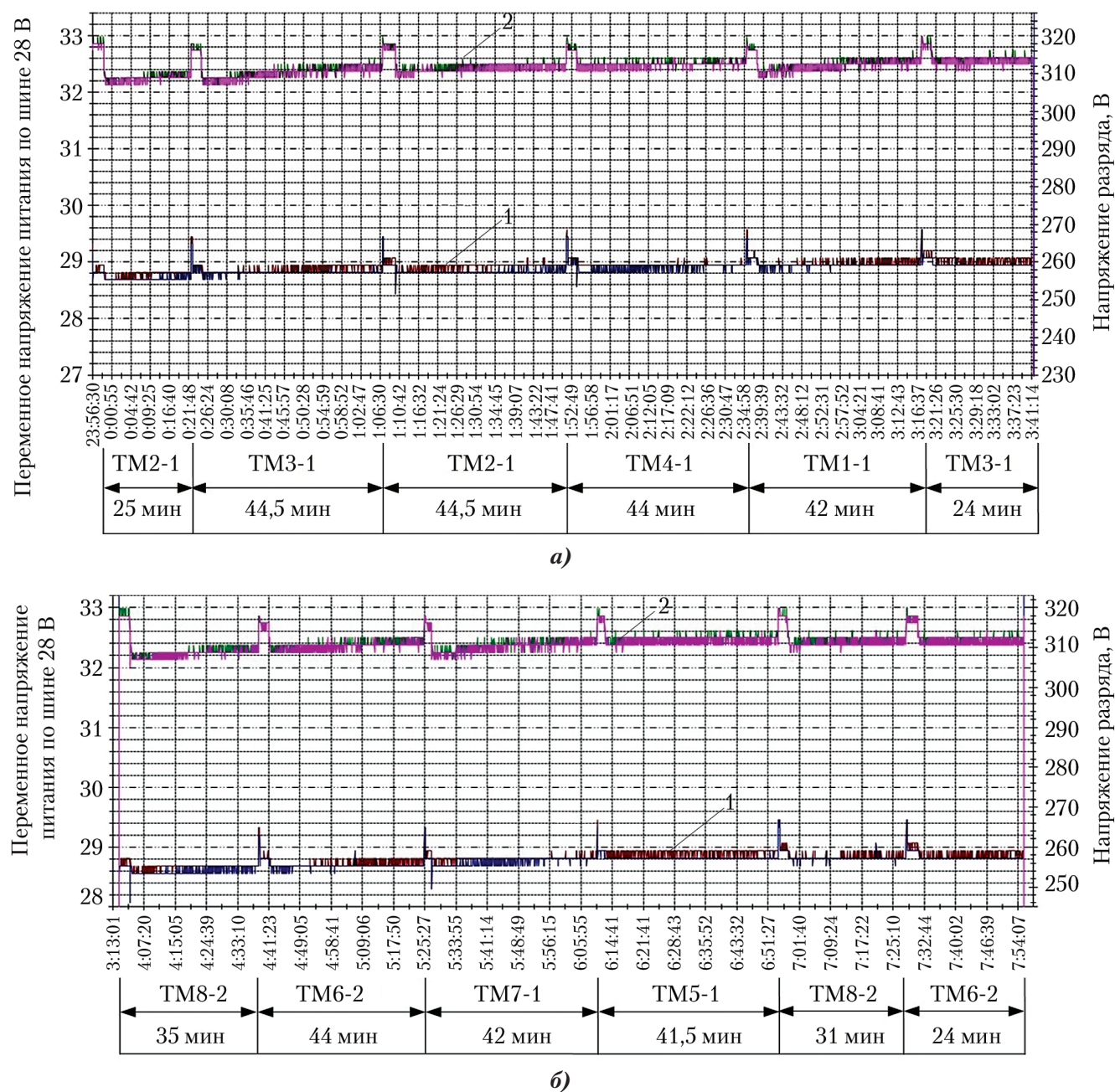


Рис. 3. Параметры электропитания блока автоматики тяговых модулей (БАТМ) и разряда в тяговых модулях (ТМ) в ходе маневров КА2: а – маневр № 1536 от 11.11.2009 г.; б – маневр № 2098 от 12.03.2012 г.; 1 – напряжение питания БАТМ; 2 – напряжение питания разряда в ТМ

Некоторые особенности пневматической и электрической схем СЭРД

При проведении в JPL (США) в 1993–1994 гг. ресурсных испытаний двигателя СПД-100 производства ОКБ «Факел» с электрической мощностью 1,35 кВт и током разряда 4,5 А (аналога применяемого на КА «Ямал» СПД-70) после работы на одном катоде в течение более 4 000 ч была обнаружена значительная эрозия корпуса «поджигного» электрода неработающего (резервного) катода, который находился под рабочим потенциалом, и через который происходил расход рабочего тела. Наличие эрозии со временем привело к короткому замыканию

и отказу этого катода [7]. Поэтому ОКБ «Факел» и РКК «Энергия» на этапе разработки КА «Ямал-200» рассмотрели необходимость исключения расхода ксенона через неработающий (резервный) катод и наличия на нем потенциала. Поскольку относительный вклад этих факторов в ТМ и АПУ СЭРД не был определен однозначно [7, 8], РКК «Энергия», ОКБ «Факел» и АО «АВЭКС» было реализовано разделение подачи ксенона в катоды путем введения дополнительных клапанов в блок газораспределения (БГР) ТМ. Схема БГР приведена в работе [4]. При эксплуатации ТМ реализуется попеременная (помесечно) работа стационарного плазменного двигателя на катодах 1 и 2.

Стойкость аппаратуры к внешним воздействиям

Технической документацией на ТМ, АПУ и ОДУ определена необходимость обеспечения их стойкости к электростатическим разрядам в космических условиях. Напряжение разряда определено в 20 кВ. Проверка на устойчивость осуществляется при наземных комплексных испытаниях КА.

В целях обеспечения стока электростатических зарядов, которые могут накапливаться на наружной поверхности элементов СЭРД в условиях плазмы космического пространства и воздействовать на агрегаты электрической системы ДУ, в БАТМ предусмотрено выведение минусовых цепей анодного питания ТМ на корпус КА через резисторы с суммарным электросопротивлением $(1,0 \pm 0,1)$ МОм после установки специальной внешней перемычки (заглушки).

Контрольно-технологические испытания объединенной двигательной установки

Перед установкой ОДУ на КА «Ямал-200» проведены ее контрольно-технологические испытания (КТИ). КТИ были проведены на стендовом комплексе РКК «Энергия» в вакуумной камере, обеспечивающей при работе ТМ давление не выше $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) [5, 6]. При КТИ составляющие СЭРД – ТМ, БЭП, БАТМ и БФК ДУ – находились в вакуумной камере. Проведены «огневые» включения всех восьми ТМ на каждом катоде (16 включений) по пять минут и четыре парных включения по 20 мин. Были подтверждены заданные электрические параметры ТМ и АПУ при одиночных и парных включениях и готовность ОДУ к летным испытаниям. Управление работой осуществлялось бортовым комплексом управления КА.

Основные результаты работы ТМ на борту КА № 1, 2 «Ямал-200»

Основные показатели работоспособности ТМ при длительной эксплуатации, обеспечивающие выполнение целевой задачи КА, – это количество часов работы («огневая» наработка) и включений, которые, по технической документации ОКБ «Факел» на ТМ, составляют для каждого ТМ 1 650 ч и 2 500 включений, соответственно. Нарботка ТМ КА «Ямал-200» за десять лет эксплуатации приведена в табл. 1. Различия в значениях наработки связаны как с компоновочными

решениями по установке ТМ на КА, так и со значениями тяги, заложенными в алгоритм управления, и самим алгоритмом управления.

Таблица 1

Нарботка тяговых модулей КА № 1, 2 за 10,5 лет эксплуатации

КА № 1			КА № 2		
№ ТМ	Огневая наработка, ч	Количество включений	№ ТМ	Огневая наработка, ч	Количество включений
1	692	1 735	1	971	2 120
2	1 122	2 454	2	1 061	2 292
3	798	2 020	3	1 048	2 267
4	1 167	2 326	4	936	1 732
5	906	2 077	5	776	1 607
6	1 010	2 120	6	750	1 480
7	731	1 855	7	765	1 847
8	1 058	2 253	8	827	1 734

При эксплуатации КА «Ямал-200» в течение десяти лет, в основном каждые 1,5 сут, проводились боковые маневры (удержание КА в точке стояния по направлению «север–юг») с последовательными включениями четырех ТМ (например, ТМ с № 1 по № 4), последующий маневр – через 1,5 сут с включениями других четырех ТМ. Продолжительность маневра – около трех часов, работа одного ТМ – от нескольких минут до одного часа. Иногда, в соответствии с тактической необходимостью, регулярность, последовательность и продолжительность маневров могли отличаться. К примеру, при довыведении КА в рабочие точки в декабре 2003 – январе 2004 гг. проводились по два восьмичасовых маневра в сутки при продолжительности непрерывной работы ТМ до двух часов, в т. ч. и при одновременной работе двух ТМ. В среднем два раза в месяц проводились трансверсальные маневры (коррекция положения КА в направлении «восток–запад») продолжительностью 1,0–1,5 ч с последовательными единичными включениями двух-трех ТМ.

Оценки тяги ТМ

Интегральным результирующим показателем работы ТМ является величина тяги, создаваемой ТМ и определяющей выполнение маневра. Поскольку непосредственное измерение тяги на борту КА не проводится, то оценка тяги осуществляется по результатам комплексного анализа и обработки телеметрической и измерительной информации [4].

РКК «Энергия» регулярно проводятся расчеты по оценке параметров каждого реализованного маневра этапа удержания КА в рабочей точке. Для этого этапа характерно проведение коррекций поддержания в основном по наклонению с частотой ~1,5 сут, что обеспечивает достаточную мерную базу для оценки каждого из маневров.

Оценки величин тяг работающих ТМ находятся в результате решения задачи определения орбиты с использованием измерительной информации Земной станции служебного канала управления по определению относительной дальности до КА и угломерных измерений телескопа Специальной астрофизической обсерватории РАН, расположенной на пике Терскол, а также телеметрической информации о маневрах.

При проведении расчетов по оценке параметров маневров использовалась точная модель движения, учитывающая все наиболее весомые возмущения. Для этих расчетов специально формировались мерные базы таким образом, чтобы на них попадал только один оцениваемый маневр. Началом мерной базы являлся конец предыдущего маневра, а концом —

начало следующего. Для боковых маневров эта база составляла в основном около трех суток.

В качестве примера в табл. 2 приведены данные по тягам ТМ, полученные в результате обработки данных определения орбиты для КА методом радиоконтроля в 2013 г. Каждое определение орбиты сопровождалось расчетом качества измерительной информации. Во всех вариантах математическое ожидание ошибки измерения относительной дальности получалось около нуля, а среднее отклонение не превышало 1,2 м, что подтверждает достоверность полученных результатов. Указанная точность в определении местоположения КА на орбите до и после маневра, при неизменной массе КА, обеспечивала достоверность полученных результатов.

В табл. 3 приведены оценки тяги в 2006, 2010 и 2013 гг. (оценки тяги проводятся каждый год). В качестве априорных значений величин тяги ТМ при решении задачи определения орбиты использовались оценки этих величин, полученные по маневрам 2006 г. Приведены также значения тяги по формулярам изготовителя ТМ — ОКБ «Факел». Из табл. 3 видно, что за прошедшие восемь лет регулярных оценок существенных изменений тяги ТМ не произошло.

Таблица 2

Результаты определения тяги тяговых модулей по данным радиоконтроля (за 2013 г.)

№ ТМ	№ катода	Количество оцениваемых маневров	Формулярное значение тяги, гс	Оценки тяги, гс		Начальное значение тяги, гс (2006 г.)	Изменение оценки тяги относительно нач. знач., %
				Математическое ожидание величины тяги	Средне-квадратичное отклонение		
1	1	29	3,87	3,9865	0,04356	3,9561	0,76
	2	25	3,86	3,9465	0,04051	3,9112	0,90
2	1	30	3,86	4,0754	0,04035	4,0981	-0,42
	2	25	3,93	4,1179	0,02677	4,1295	-0,28
3	1	29	3,86	3,9910	0,03100	3,9279	1,60
	2	26	3,84	3,9846	0,04618	3,9603	0,61
4	1	29	3,92	3,9611	0,03338	3,9464	0,37
	2	26	3,95	3,9552	0,03039	3,9438	0,28
5	1	16	3,83	3,8682	0,03384	3,8934	-0,64
	2	26	3,83	3,8949	0,04397	3,9086	-0,35
6	1	15	3,87	3,8137	0,04809	3,7934	0,53
	2	14	3,89	3,7914	0,03854	3,8182	-0,70
7	1	16	3,93	3,8530	0,05936	3,8566	0,01
	2	27	3,91	3,8557	0,04417	3,8663	-0,27
8	1	16	3,90	3,8900	0,04635	3,9043	-0,37
	2	27	3,91	3,8987	0,03790	3,8737	0,64

Оценки тяги тяговых модулей КА № 1 и 2 «Ямал-200»

№ ТМ	КА № 1 – ТМ – катод 1				КА № 2 – ТМ – катод 2			
	$F_{\text{форм}}$, гс	F_{2006} , гс	F_{2010} , гс	F_{2013} , гс	$F_{\text{форм}}$, гс	F_{2006} , гс	F_{2010} , гс	F_{2013} , гс
1	3,87	3,9561	3,9662	3,9865	3,93	4,0672	4,0655	4,0689
2	3,86	4,0981	4,0907	4,0754	3,96	4,2443	4,2428	4,3063
3	3,86	3,9279	3,9910	3,9803	3,90	4,0632	4,1218	4,0862
4	3,92	3,9464	3,9808	3,9611	3,98	4,0274	4,0781	4,0539
5	3,83	3,8934	3,8969	3,8682	3,91	3,9028	3,9142	3,9260
6	3,87	3,7934	3,8059	3,8137	3,96	3,9489	3,9295	3,9637
7	3,93	3,8566	3,8202	3,8530	3,90	3,9261	3,9371	3,9315
8	3,90	3,9043	3,9278	3,8900	3,93	3,9794	3,9766	3,9897

Примечание. $F_{\text{форм}}$ – формулярное значение тяги; F_{2006} , F_{2010} , F_{2013} – значения тяги в 2006, 2010 и 2013 гг., соответственно.

Некоторые особенности ЭРД при длительной работе в составе КА

Эксплуатация электроракетных ТМ на борту КА «Ямал-200» дает уникальную возможность провести исследования работы ЭРД СПД-70, учитывая ее длительность (десять лет) и количество – 16 ТМ на двух КА со штатной АПУ, что невозможно в наземных условиях.

А также важное значение имеет получение детальной информации, передаваемой ЦУП «Ямал» с борта КА. В начале каждого маневра включается информационный режим «микроскоп», обеспечивающий получение данных о работе ТМ три раза в секунду. Пример реального протокола бокового маневра (коррекция орбиты в направлении «север-юг») приведен на рис. 4 (маневр № 2270 от 20.01.2013 г.).

КА "Ямал-200" №2. Анализ работы ТМ. Маневр боковой №2270

Архив E:\PROT_TMI\Jmal202_028127.tcl

СХП 1

Подготовка СХП 23.01.2013 18:39:28 18:39:27 Контроль СХП 23.01.2013 18:41:41 18:41:40

Приведение ОДУ в исходное 23.01.2013 22:36:37 22:36:36

Суммарное время работы ТМ 2:58:34

Суммарный расход РТ при работе ТМ 28.9278 грамм

Характеристическая скорость

	Заданная	Отработанная
Wb (м/с)	0.244110	0.243599
Wn (м/с)	0.000000	-0.001552

Кинетический момент КА

	В начале маневра	После маневра	%
Gx (Нмс)	8.023	11.799	73.054
Gy (Нмс)	-7.097	5.805	
Gz (Нмс)	-3.308	5.347	29.706

Работа ТМ

№ ТМ	№ катода	Вкл. ЭПК	Номин. тяга	Откл. ТМ	Длит. работы	Поджиг
ТМ2	1	23.01.2013 19:23:03	19:23:25	19:55:18	0:32:16	
ТМ4	1	23.01.2013 19:58:11	19:58:28	20:39:18	0:41:8	
ТМ1	1	23.01.2013 20:42:11	20:42:22	21:24:23	0:42:13	
ТМ4	1	23.01.2013 21:27:16	21:27:33	22:08:33	0:41:18	
ТМ2	1	23.01.2013 22:11:26	22:11:49	22:24:53	0:13:28	
ТМ3	1	23.01.2013 22:27:46	22:27:59	22:35:56	0:8:11	

Сообщения о номинальной тяге во время работы ТМ

ТМ1	ТМ2	ТМ3	ТМ4	ТМ5	ТМ6	ТМ7	ТМ8
			21:58:23				

Рис. 4. Фрагмент протокола маневра (время – дата, ч:мин:с). Продолжительность выхода на режим «номинальной тяги» (2,23–0,3) А: ТМ2 – (22–23) с; ТМ4 – 17 с; ТМ1 – 11 с; ТМ3 – 13 с

В протоколе, в разделе «Работа ТМ» приведена графа «Номинальная тяга», а также есть раздел «Сообщения о номинальной тяге во время работы ТМ». «Номинальная тяга» — это алгоритмическое понятие, соответствующее значению тока анода ($2,23 \pm 0,3$) А из-за возможной погрешности тарировок телеметрических параметров, погрешностей датчиков, погрешности системы измерений и обработки параметров (по технической документации на ТМ ток анода ($2,23 \pm 0,02$) А). Включение ТМ «номинальной тяги» — это признак появления тока анода и прохождения его через значение примерно ($2,23 - 0,3 = 1,93$) А. Время достижения этой величины индивидуально

для каждого ТМ, как видно из протокола на рис. 4 (от 11 с для ТМ1 до 23 с для ТМ2), и стабильно (с точностью до 1–2 с) на протяжении всего времени эксплуатации. «Сообщения о номинальной тяге во время работы ТМ» — это признак выхода тока анода из броска тока анода (БТА), оно соответствует значению тока ($2,23 + 0,3 = 2,53$) А, что и означает проявление БТА.

На рис. 5 приведены графики основных параметров ТМ, полученные при проведении маневра № 2270 на КА2 от 23.01.2013 г. В типичном боковом маневре реализуются шесть включений четырех ТМ (длительность работы приведена в протоколе на рис. 4).

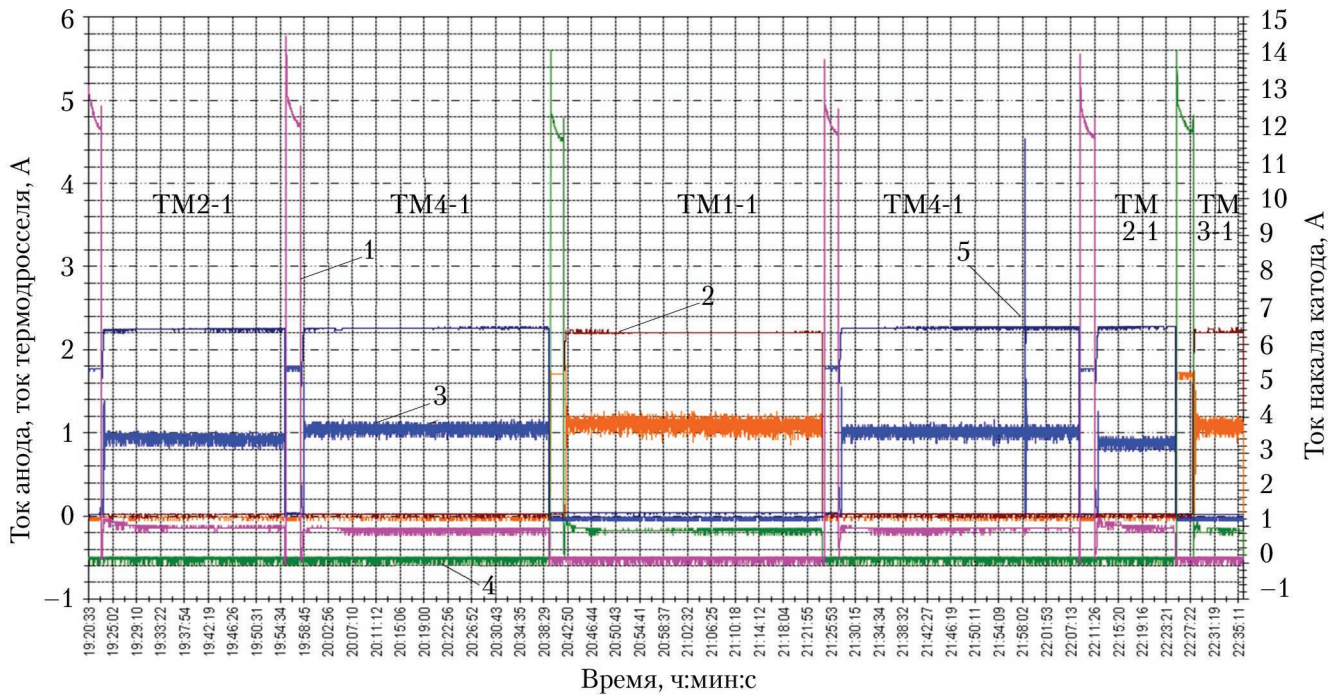


Рис. 5. Маневр № 2270 от 23.01.2013 г.: 1 — ток накала катода в дежурном режиме; 2 — ток анода (разряда); 3 — ток термодросселя; 4 — ток в цепи датчика накала катода (индикатор переменной составляющей тока разряда); 5 — бросок тока анода

Броски тока анода. Специфической особенностью стационарных плазменных двигателей, имеющих керамическую ($BN + SiO_2$) разрядную камеру, являются броски тока анода (тока разряда). При работе ЭРД в составе КА «Ямал-200» продолжительность БТА составляла от нескольких секунд в начале работы двигателя (для различных двигателей от 30 до 150 ч наработки) [3] до долей секунды в дальнейшем. Длительные БТА продолжительностью до 5 с для различных ТМ начались с 30...70 ч наработки и заканчивались при 100...170 ч [3]. Одновременно имели место и кратковременные БТА (менее 1 с), которые стали преобладающими после прекращения длительных БТА. Число их сначала достигало до 20 за маневр на один ТМ, со временем оно уменьшилось до одного–трех за маневр [5] (рис. 6).

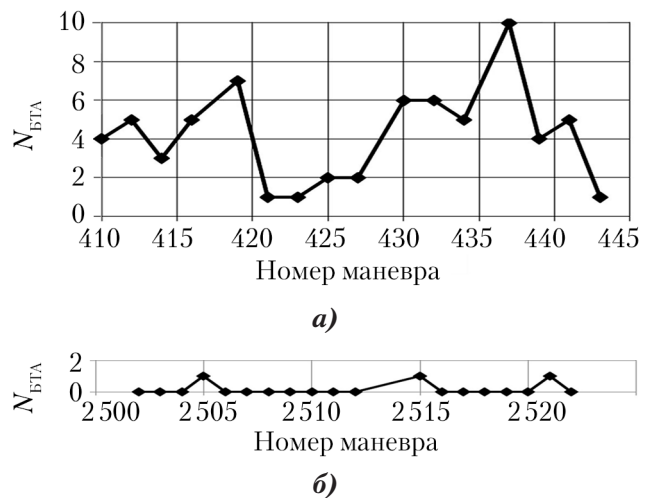


Рис. 6. Количество бросков тока анода (БТА) при маневрах КА2 с ТМ1: а — в мае–июне 2005 г.; б — в ноябре 2013 г.

Примечание. $N_{БТА}$ — количество БТА за маневр.

При БТА происходит одномоментное повышение тока термодросселя в соответствии с существующим механизмом обратной связи между ними, а затем в течение нескольких

секунд ток анода возвращается к номинальной величине (рис. 7). Из-за их кратковременности броски тока анода не оказывают заметного влияния на величину тяги.

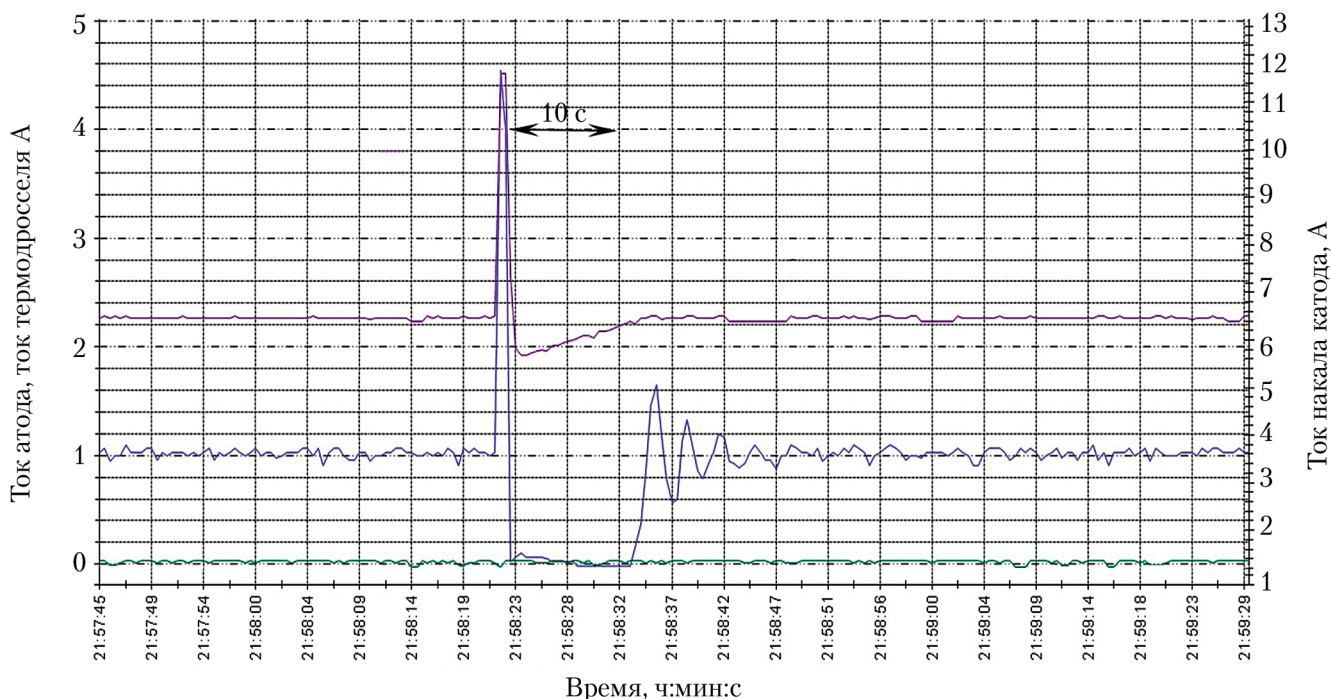


Рис. 7. Броски тока анода КА2 при выполнении маневра № 2270 от 23.01.2013 г.: ■ — ток анода; ■ — ток термодросселя; ■ — отрицательные колебания токов (по данным телеметрии)

Наблюдаемые БТА наиболее вероятно связаны с процессом приработки керамической разрядной камеры: эрозия и переконденсация материала внутри разрядной камеры приводит к кратковременным нарушениям электронно-ионных процессов. Начало процесса состоит в сглаживании угловой выходной кромки керамики. Изменение скорости эрозии выходной кромки ($\text{BN} + \text{SiO}_2$) по данным ОКБ «Факел» приведено на рис. 8. Некоторые вопросы влияния состояния поверхности керамики разрядной камеры в процессе эрозии на характер колебаний в двигателе типа СПД рассмотрены в работах [9, 10].

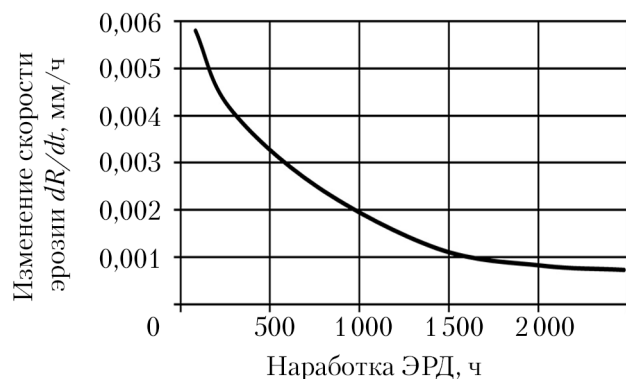


Рис. 8. Изменение скорости эрозии (изменение радиуса) на срезе керамической разрядной камеры электроракетного двигателя М70

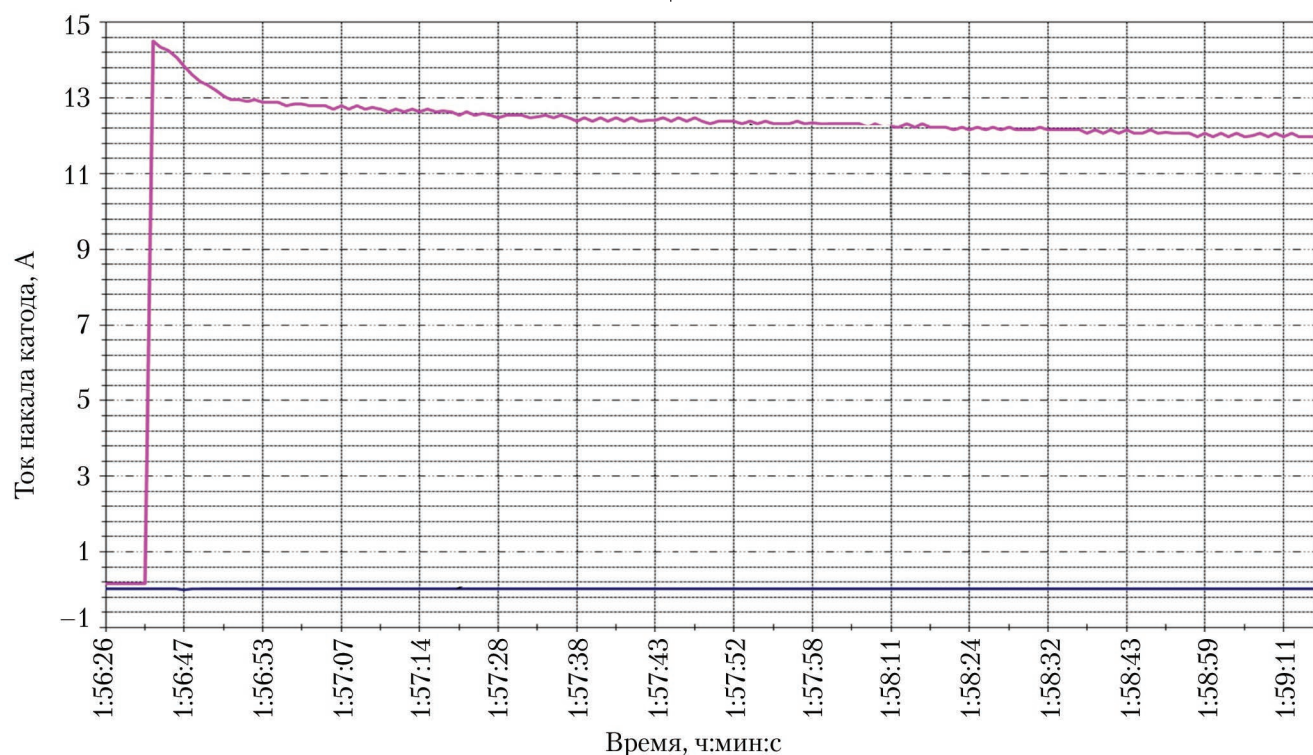
Если БТА происходят, то, как правило, через более чем 15 мин после включения ТМ (это примерно время прогрева керамики разрядной камеры до $\sim 600^\circ\text{C}$ (расчеты ОКБ «Факел»)). Это можно трактовать как термостимулированный процесс переноса микроколичеств осаждающихся в процессе эрозии фрагментов керамики и его влияния на процессы в разрядной камере.

Работа катода. Одним из компонентов, определяющих длительную работу ТМ, является катод, при этом в целях резервирования в ТМ предусмотрены два катода. В катоде, являющемся источником электронов (материал эмиттера — гексаборид лантана LaB_6), на этапе подготовки к включению ТМ («дежурный режим») в течение 150...160 с эмиттер радиационно нагревается током накала спирали из сплава W-Re27 (расчетная температура спирали — до $\sim 1700^\circ\text{C}$). После включения ТМ командой «Поджиг» на 160-ой секунде эмиттер нагревается потоком ионов ксенона. Выключение поджигного электрода двигателя осуществляется по достижении разрядным током значения большего или равного 0,8 А.

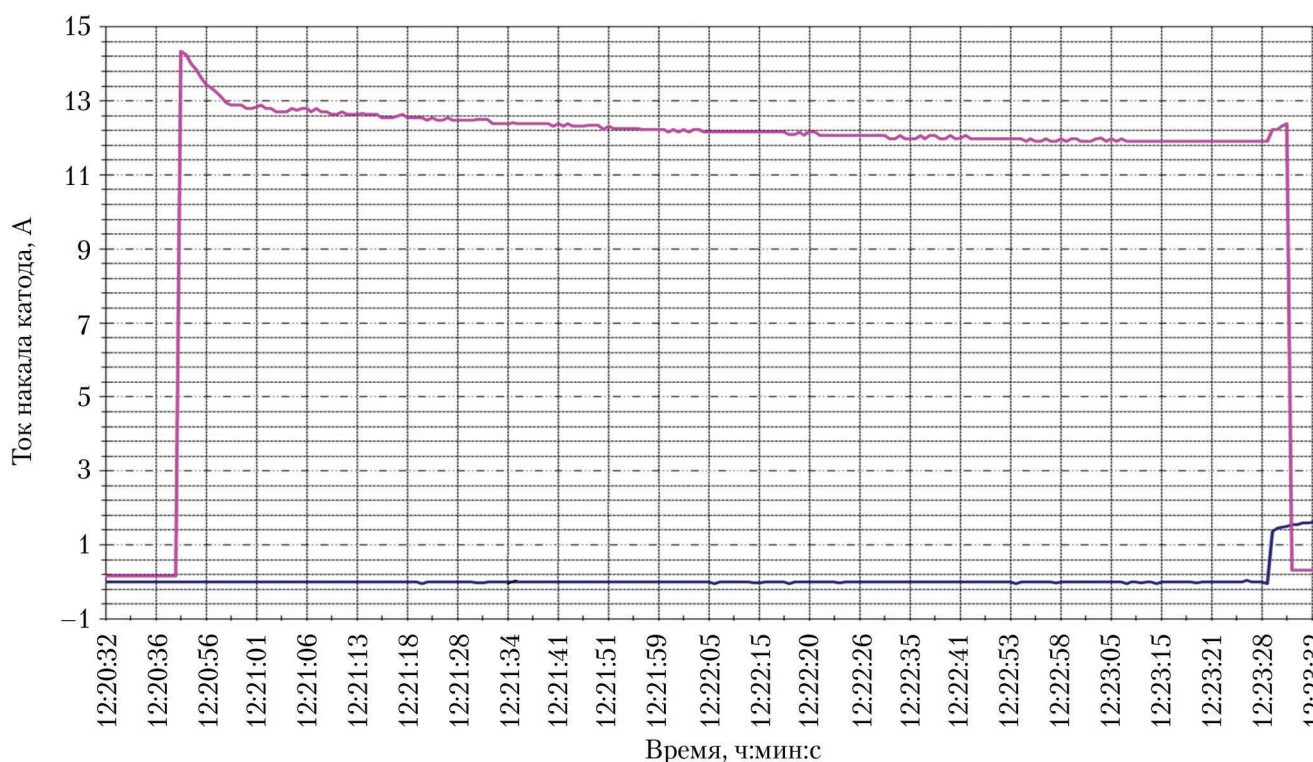
По документации ОКБ «Факел» на ТМ, величина тока накала катода в дежурном режиме $(12 \pm 0,5)$ А. Процесс включения тока накала катода осуществляется БАТМ.

В момент включения происходит бросок тока от 14 до 15 А (фиксируемое телеметрией значение), в течение 2–3 с ток спадает до ~13 А, со временем, по мере прогрева спирали (повышения ее электросопротивления), ток приходит в регламентируемый диапазон ($12,0 \pm 0,5$) А. Время выхода на значение 12,5 А для различных

катодов ТМ имеет разброс от единиц до десятков секунд. За прошедшие годы характер поведения тока накала не претерпел изменений. На рис. 9 в качестве примера приведены графики токов накала ТМ 6–1 КА1 в 2005 и 2013 гг. Характер изменения тока накала виден также на графиках рис. 5.



а)



б)

Рис. 9. Сравнение токов накала катода (дежурный режим) тяговых модулей (ТМ)6–1 КА1: а – маневр № 405 от 20.03.2005 г.; б – маневр № 2320 от 18.10.2013 г.; ■ – ток накала катода; ■ – нулевой ток анода (разряда) при подготовке к включению ТМ

Динамика выхода ТМ на рабочий режим.

Может представлять интерес реальная динамика выхода ТМ на рабочий режим. В соответствии с протоколами ЦУП «Ямал», это время от открытия электропневмоклапана подачи рабочего тела (с одновременной подачей анодного напряжения) до режима «номинальной тяги». Алгоритмическое понятие «номинальная тяга» описано выше. Время выхода на «номинальную

тяги» индивидуально для различных ТМ. Как видно из протокола маневра (рис. 4), это время от 11 с для ТМ1 до 23 с для ТМ2. Это типичная картина для обоих КА на различных ТМ и катодах. За прошедшие десять лет эти величины для каждого ТМ практически не изменились (с точностью 1–2 с). Пример картины запуска ТМ (по телеметрическим данным с борта КА) приведен на рис. 10.

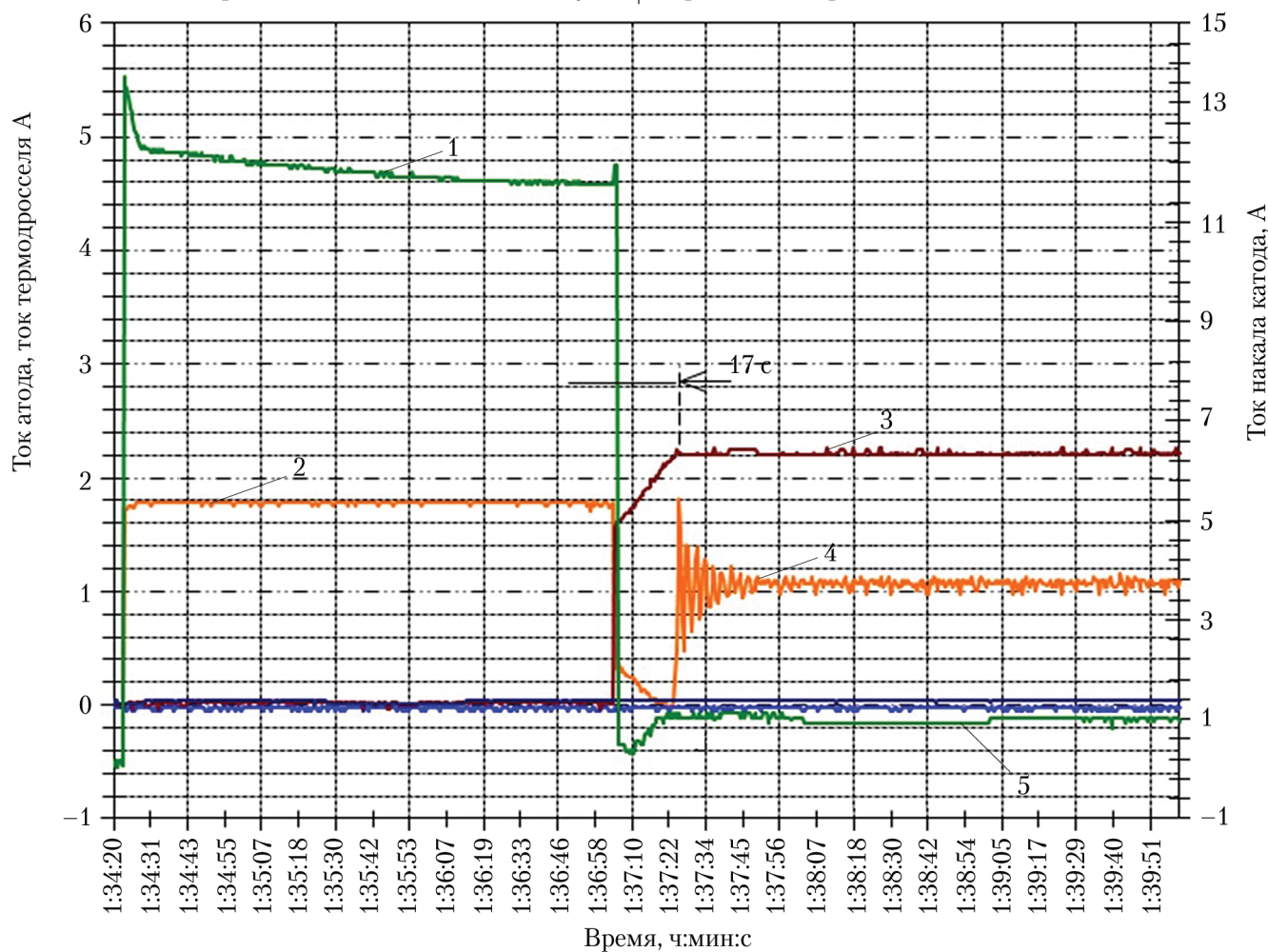


Рис. 10. Режим запуска тяговых модулей (ТМ) КА2 при выполнении маневра № 2251 от 16.12.2013 г. ТМ4–1: 1; 2 — ток накала катода, ток термодросселя в режиме подготовки к запуску; 3 — ток анода в рабочем режиме; 4 — ток термодросселя в рабочем режиме; 5 — ток в цепи накала катода в рабочем режиме

Стабильность работы ДУ. За последние годы проведен ряд наблюдений, подтверждающих длительную стабильность работы ТМ КА «Ямал-200»:

- обычно ТМ включаются попеременно на катодах 1 и 2 (переходы — ежемесячно). В качестве проверки стабильности в течение двух лет (2011–2012 гг.) четные ТМ КА2 (ТМ № 2, 4, 6, 8) работали только на катодах 2. После включений этих ТМ на катоде 1 они подтвердили использованные ранее режимы работы;

- как указывалось выше, в основном при эксплуатации попеременно выполняются маневры на ТМ № 1, 2, 3, 4 и ТМ № 5, 6, 7, 8

с переменной через 1,5 сут. С целью исследования возможностей эксплуатации проведены циклы маневров, когда в течение полугодия КА работали только на ТМ № 1–4, следующее полугодие — на ТМ № 5–8. Изменений характера работы ТМ и параметров не отмечено;

- в табл. 4 приведена статистика по токам анода и токам термодросселя — регулятора расхода ряда тяговых модулей КА2 за все время работы ТМ. Приведенные значения — это данные, усредненные с распечаток в пределах каждого из приведенных в таблице маневров (например, маневр № 2270 — см. рис. 5). Видна достаточная стабильность параметров. Аналогичная картина и на КА1.

Сравнение токов анода и токов термодросселя тяговых модулей объединенной двигательной установки КА2 в 2004–2013 гг.

Годы	№ ТМ	ТМ1-1	ТМ2-1	ТМ3-1	ТМ4-1	ТМ5-2	ТМ6-2	ТМ7-1	ТМ8-1
2004	№ маневра	307	275	275	275	282	327	307	308
	ТА, А	2,22	2,23	2,10	2,22	2,20	2,20	2,20	2,23
	ТТ, А	1,20	1,20	1,20	1,08	1,05	1,20	1,20	1,17
2005	№ маневра	395	395	506	395	457	445	438	396
	ТА, А	2,20	2,22	2,19	2,23	2,20	2,21	2,20	2,20
	ТТ, А	1,15	0,95	1,20	1,02	1,00	1,00	1,20	1,12
2007	№ маневра	847	844	844	852	876	914	914	904
	ТА, А	2,22	2,22	2,22	2,23	2,21	2,20	2,21	2,20
	ТТ, А	1,21	1,00	1,20	1,01	1,00	1,00	1,08	1,07
2012	№ маневра	2 087	2 143	2 188	2 143	2 087	2 096	2 139	2 242
	ТА, А	2,20	2,20	2,20	2,22	2,20	2,20	2,20	2,20
	ТТ, А	1,10	0,95	1,00	1,00	0,90	1,00	1,10	1,10
2013	№ маневра	2 277	2 265	2 275	2 277	2 316	2 252	2 275	2 280
	ТА, А	2,20	2,20	2,20	2,22	2,20	2,23	2,20	2,20
	ТТ, А	1,20	0,90	1,10	1,00	0,90	1,00	1,00	1,10

Примечание. ТА — ток анода; ТТ — ток термодросселя.

Выводы

В составе двух телекоммуникационных космических аппаратов «Ямал-200», созданных РКК «Энергия» по заказу и при непосредственном участии ОАО «Газпром космические системы», в течение более десяти лет (с декабря 2003 г.) работали двигательные установки с электроракетными тяговыми модулями, разработанными ОКБ «Факел», и аппаратурой электропитания и управления тяговыми модулями разработки АО «АВЭКС».

Постоянный контроль и анализ работы электроракетных тяговых модулей, осуществляемые специалистами ОАО «Газпром космические системы» и РКК «Энергия», показывают, что эти ТМ обеспечивают в течение более десяти лет работу телекоммуникационных КА на геостационарной орбите. Максимальная огневая наработка ТМ за 10,5 лет составила 1 170 ч, количество включений — 2 450 (по документации ОКБ «Факел», гарантированные значения, соответственно, 1 650 ч и 2 500 включений), суммарная огневая наработка СЭРД составила на КА1 7 480 ч, на КА2 — 7 090 ч, количество включений — 16 820 и 14 970, соответственно.

За время эксплуатации продемонстрирована стабильная работа как ТМ и системы электроракетных двигателей, так и объединенной двигательной установки в целом. Важно, что проведены детальные исследования работы

партии ЭРД (16 ЭРД СПД-70) и АПУ при выполнении штатной работы КА в течение более десяти лет, включая динамику при запуске ТМ; кратковременные превышения тока анода различной длительности и частоты их проявления, характеризующие динамику приработки керамической разрядной камеры; регулярные расчеты тяги всех ТМ на базе большого числа маневров, показывающие практически неизменную величину тяги за время эксплуатации.

Список литературы

1. Журавин Ю. Новые «Ямалы» // Новости космонавтики. 2004. Т. 14. № 1(252). С. 19–21.
2. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Издательство МАИ, 2012. 291 с.
3. Таюрский Г.И., Мурашко В.М., Борисенко А.А., Кропотин С.А., Островский В.Г., Попов А.Н., Сухов Ю.И., Уланова Е.Н. Анализ работы электроракетных двигателей в составе телекоммуникационного космического аппарата «Ямал-200» // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 3. С. 124–130.
4. Борисенко А.А., Канищева М.А., Мурашко В.М., Обухов Е.В., Попов А.Н., Севастьянов Н.Н., Соколов А.В., Сухов Ю.И. Работа электроракетных двигателей в составе двух телекоммуникационных космических аппаратов

«Ямал-200» за 8 лет эксплуатации // *Космонавтика и ракетостроение*. 2013. № 1(70). С. 51–57.

5. *Островский В.Г., Сухов Ю.И.* Разработка, создание и эксплуатация электроракетных двигателей и электроракетных двигательных установок в ОКБ-1–ЦКБЭМ–НПО «Энергия»–РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (1958–2011 г.) // *Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. Королёв: РКК «Энергия»*, 2011. Вып. 3–4. С. 122–127.

6. *Агеев В.П., Милевский С.Я., Мурашко В.М., Севастьянов Н.Н., Семенов Ю.П., Соколов Б.А., Сухов Ю.И., Чинаев М.Г.* Длительная эксплуатация электроракетных двигателей в составе геостационарного информационного космического аппарата «Ямал 100» // *Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. Королёв: РКК «Энергия»*, 2003. Вып. 1–2. С. 7–10.

7. *Garner Ch., Brophy J., Day M., et al.* A 5730-Hr Cyclic Endurance test of the SPT-100 // *24th International Electric Propulsion Conference*. 19–23 September 1995, Moscow, Russia.

8. *Day M., Kim V., Kozlov V., et al.* Investigation of the nonoperating cathode erosion reasons // *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 1–3 July 1996, Lake Buena Vista, FL, USA, AIAA 96–2704.

9. *Морозов А.И.* Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. 576 с.

10. *Kim V., Brophy J., Day M., et al.* Simulation of Discharge Channel Wall Contamination Influence of SPT-100 parameters and level of Oscillation in Discharge Circuit // *31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 10–12 July 1995, San Diego, CA, USA.

Статья поступила в редакцию 27.10.2015 г.

Reference

1. *Zhuravin Yu.* Novye «Yamaly» [New Yamals]. *Novosti kosmonavтики*, 2004, vol. 14, no. 1(252), pp. 19–21.

2. *Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K.* Stacionarnye plazmennye dvigateli Morozova [Morozov stationary plasma thrusters]. Moscow, MAI publ., 2012. 291 p.

3. *Tayurskii G.I., Murashko V.M., Borisenko A.A., Kropotin S.A., Ostrovskii V.G., Popov A.N., Sukhov Yu.I., Ulanova E.N.* Analiz raboty elektroraketnykh dvigatelei v sostave telekommunikatsionnogo kosmicheskogo apparata «Yamal-200» [Analysis of electric thrusters performance within telecommunication spacecraft Yamal-200]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2009, no. 3, pp. 124–130.

4. *Borisenko A.A., Kanishcheva M.A., Murashko V.M., Obukhov E.V., Popov A.N., Sevast'yanov N.N., Sokolov A.V., Sukhov Yu.I.* Rabota elektroraketnykh dvigatelei v sostave dvukh telekommunikatsionnykh kosmicheskikh apparatov «Yamal-200» za 8 let ekspluatatsii [Performance of electric thrusters within two telecommunication spacecrafts Yamal-200 over 8 years of operation]. *Kosmonavтика i ракетостроение*, 2013, no. 1(70), pp. 51–57.

5. *Ostrovskii V.G., Sukhov Yu.I.* Razrabotka, sozdanie i ekspluatatsiya elektroraketnykh dvigatelei i elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok v ОКБ-1–TsKBEM–NPO «Energiya»–RKK «Energiya» im. S.P. Koroleva (1958–2011) [Development and operation of electric propulsion thrusters and electric propulsion systems at ОКБ-1–TsKBEM–NPO Energia–S.P.Korolev RSC Energia (1958-2011)]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII. Korolev: RKK «Energiya» publ.*, 2011, issue 3–4, pp. 122–127.

6. *Ageev V.P., Milevskii S.Ya., Murashko V.M., Sevast'yanov N.N., Semenov Yu.P., Sokolov B.A., Sukhov Yu.I., Chinaev M.G.* Dlitel'naya ekspluatatsiya elektroraketnykh dvigatelei v sostave geostatsionarnogo informatsionnogo kosmicheskogo apparata «Yamal-100» [Long-term operation of electrical thrusters within a geostationary communication spacecraft Yamal-100]. *Raketno-kosmicheskaya tekhnika. Trudy. Ser. XII. Korolev: RKK «Energiya» publ.*, 2003, issue 1–2, pp. 7–10.

7. *Garner Ch., Brophy J., Day M., et al.* A 5730-Hr Cyclic Endurance test of the SPT-100. *24th International Electric Propulsion Conference*, 19–23 September 1995, Moscow, Russia.

8. *Day M., Kim V., Kozlov V., et al.* Investigation of the nonoperating cathode erosion reasons. *32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 1–3 July 1996, Lake Buena Vista, FL, USA, AIAA 96–2704.

9. *Morozov A.I.* Vvedenie v plazmodinamiku [Introduction to plasma dynamics]. Moscow, Fizmatlit publ., 2006. 576 p.

10. *Kim V., Brophy J., Day M., et al.* Simulation of Discharge Channel Wall Contamination Influence of SPT-100 parameters and level of Oscillation in Discharge Circuit. *31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 10–12 July 1995, San Diego, CA, USA.