

УДК 533.9.07

А. В. ЛОЯН

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ (БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ) ДВИГАТЕЛЯ ХОЛЛОВСКОГО ТИПА ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ БАТАРЕИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ

В статье проанализирована структура существующих источников электропитания электроракетных двигательных установок. Предложена схема источника питания, обеспечивающая прямую передачу электрической мощности от солнечной батареи к двигателю. Теоретически обоснована и практически доказана возможность прямого электропитания электроракетного двигателя холловского типа СПД-20 от высоковольтной фотоэлектрической батареи. Экспериментально проверено, что характеристики работы СПД-20, напрямую запитанного от ВВБФ, не отличаются от характеристик двигателя, работающего от стендовых и штатных систем электропитания. Показано, что разработанный комплекс (СПД-20+ВВБФ) без проблем запускается при штатных расходах через катодный и анодный тракты и не боится коротких замыканий в анодной цепи.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, стационарный плазменный двигатель, батарея фотоэлектрическая, система электропитания.

Введение

Хорошо известно, что в настоящее время для обеспечения коррекции в точке стояния геостационарных спутников связи (коррекция «север-юг», «запад-восток») очень хорошо себя зарекомендовали электроракетные двигатели. Это, прежде всего, технология Холловских двигателей (СПД, ДАС в странах бывшего СССР) и ионных двигателей (ПИД, РИД в странах Европы и США).

В силу исторических причин, в данной статье мы будем рассматривать только технологию холловских двигателей.

Имея существенно больший, чем у ЖРД удельный импульс эти типы двигателей позволяют существенно снизить запасы рабочего тела (РТ) на борту или получить значительное увеличение суммарного импульса тяги при неизменной массе КА. Эти преимущества обусловили широкое применение ЭРД в разработках как советских (затем по наследству - российских), так и зарубежных фирм производителей КА.

Однако коррекция положения точки стояния далеко не единственная задача, которую можно с успехом решать с помощью ЭРД. Приведем как пример некоторые другие: разгрузка двигателей-маховиков, управление ориентацией КА, довыведение КА в точку стояния и т.д. Однако применение ЭРД типа СПД для решения первых двух ограничено весьма длительным периодом предстартовой подготовки и неопределенностью времени запуска. Решение третьей задачи обусловлено необходимо-

стью разработки многорежимных двигателей. Рассмотрим более детально каждую из проблем.

Инерционность ЭРДУ обусловлена, прежде всего, динамическими свойствами катода-компенсатора (КК). Используемые в настоящее время КК со стартовым нагревателем и эмиттером, изготовленным из LaV₆ (известные КН-3, КЭ-5 и их модификации) имеют предстартовое время нагрева 120 сек, соответствующие системы электропитания и логику управления. Применение технологии безнагревного (или более часто применяемого термина - безнакального) старта позволяет избежать этого недостатка и с успехом решить задачи ориентации КА и разгрузки ДМ.

Для совмещения в одной ЭРДУ функций до-разгонного блока и системы коррекции необходима разработка многорежимных двигателей. Где на первом этапе требуются значительные тяги при умеренном удельном импульсе, а на втором рекомендуется иметь максимально возможный удельный импульс. Хорошо известно, что холловские двигатели (и анодный блок СПД в том числе) имеют достаточно широкий диапазон регулирования. Однако решение этой задачи обусловлено созданием много-режимного КК и системы электропитания. К примеру, из литературных данных, известны проекты где на первом этапе двигатель работает при токе 30 А, а на втором – всего 6. В данном случае созданная для работы на 30 А система электропитания (СЭП) будет слишком тяжелой.

Нами разработаны компактные многорежимные безнакальные катоды, а вот данных о многоре-

жимных СЭП с приемлемыми массово-габаритными и надежностными характеристиками отсутствуют. Одним из методов, а возможно и единственным, может быть метод прямой, т.е. без промежуточных преобразователей, запитки ЭРД от высоковольтных солнечных батарей при возможности коммутации выходного напряжения батареи фотоэлектрической (БФ) от штатных бортовых 27, 80, 160 В до необходимых для работы СПД 300...600 В.

Рассмотрим более детально принципиальную схему ЭРДУ и ее запитку от бортовой БФ.

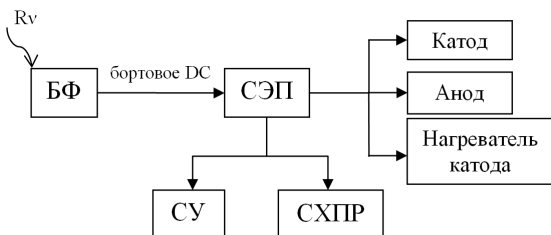


Рис. 1. Принципиальная схема традиционного типа (упрощенно)

В этой схеме предполагается двукратное преобразование солнечной энергии. Первый раз – в низковольтное напряжение постоянного тока, очевидно, что без этого преобразователя обойтись невозможно и, соответственно, вторичный преобразователь: СЭП ЭРДУ. СЭП преобразует низковольтное постоянное напряжение в напряжения, необходимые для нормальной работы ЭРДУ.

Заметим, что номиналов этих напряжений достаточного много: 300 В питания катод – анод, 27 В нагреватель катода, 5 и 27 В питания датчиков СХПРТ и электроники СУ. Следует обратить внимание, что основную долю потребления составляет потребление катод – анод (95...97 %). Наличие специального конвертера для преобразования бортового DC в Уразр (напряжение катод – анод) имеет много недостатков и сопряжено с решением ряда весьма сложных проблем. С одной стороны это снижение общей надежности ЭРДУ. С другой стороны – необходимость радиационной защиты и проблемы сброса низкотемпературного тепла при открытом исполнении блоков СЭП существенно усложняют конструкцию и перетяжеляют ее.

Целью данной работы была проверка идеи прямой запитки ЭРДУ Холловского типа (разрядного промежутка «катод-анод») от БФ, которая на выходе будет иметь напряжение близкое к разрядному.

Предварительные расчеты

Рассмотрим теоретическую возможность осуществления такой идеи. На рис. 2. (а, б) представлены типичные ВАХ БФ и двигателя.

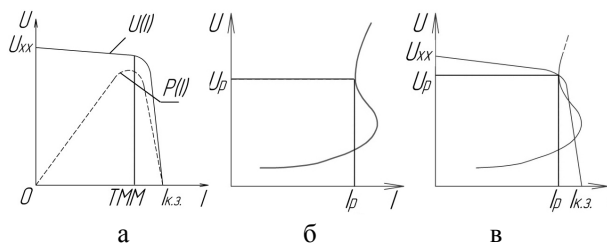


Рис. 2. ВАХ реальной БФ (а) и двигателя холловского типа (б), результирующий график (в)

Рассмотрим особенности взаимодействия этих систем. Выделим два характерных участка на ВАХ БФ: с положительным градиентом мощности (ПГМ) от тока (участок от $I=0$ до ТММ), отрицательным градиентом и точку максимальной мощности (ТММ). Второй режим рассматривать не будем в связи с очевидной неработоспособностью системы.

Выберем рабочую точку двигателя в интервале от $I=0$ до $I=TMM$. В этом интервале ВАХ БФ является полным аналогом конвертера со стабилизацией напряжения. В рамках этого случая можно выделить следующие режимы работы, которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Режимы работы двигателя

Значение тока рабочей точки	Описание режима	Особенности
$0 < I_p + \Delta I < I$	Колебания тока разряда не приводят к погасанию разряда	От БФ отбирается не максимально возможная мощность. БФ недогружена
$I_D + \Delta I < I_{к.з.}$	Устойчивая рабочая точка	Оптимальная работа БФ в режиме максимального отбора мощности
$I_D = I_{к.з.}$ $I_D + \Delta I > I_{к.з.}$	Устойчивая работа не возможна	

Очевидно, что возможные режимы системы ограничены условиями $U_{xx} > U_p$, $I_{кз} > I_p$. Учитывая, что работе любого двигателя холловского типа сопутствуют пульсации тока и напряжения в разрядной цепи. Введем величины ΔU и ΔI , определяющие диапазон пульсаций напряжения и тока соответственно. Важно, что в СЭП, построенных по принципу стабилизации напряжения имеются преимущественные колебания тока, а при стабилизации тока разряда существенны колебания напряжения. Таким образом, можно записать более жесткие условия на положение рабочей точки: $U_{xx} > U_p + \Delta U$, $I_{кз} > I_p + \Delta I$.

Таким образом, анализируя данные таблицы 1, можно прийти к выводу о необходимых требованиях по согласованию параметров БФ и ЭРД холловского типа работающих совместно: ток разряда двигателя должен соответствовать току в режиме максимальной мощности, а пульсации тока не должны превышать разницу между $I_{к.з.}$ и $I_{т.м.м.}$

Вышеуказанная логика, была положена в организацию эксперимента по подтверждению совместимости совместной работы высоковольтной БФ и ЭРД холловского типа.

Эксперимент

Вторым критерием в проведении эксперимента был критерий минимальной стоимости эксперимента. Соответственно некоторые из подсистем далеки от совершенства и не отвечают общепринятым нормам. Однако это не отражается на качестве полученных результатов и не снижает их ценность.

Схема испытательного стенда представлена на рис. 3.

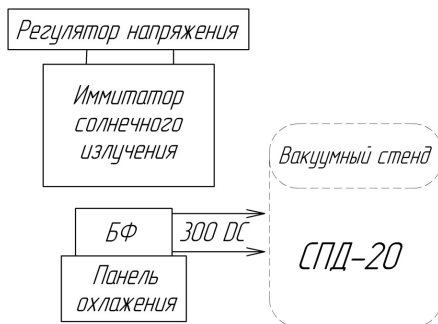


Рис. 3. Схема эксперимента

В качестве ЭРД холловского двигателя типа применялся стационарный плазменный двигатель малой мощности до 100 Вт, хорошо описанный в работах [1 – 5] (фото на рис. 4). В составе двигателя использовался безнакальный полый катод БНК М05 собственной разработки и изготовления. Катушка магнитной системы запитывалась от источника постоянного тока типа LabTuls 30В 10А. Поджиг катода осуществлялся специализированным блоком поджига собственной разработки.

Для изготовления ВВБФ было использовано 55 модулей типа УН60х150-15А/В 105-М сгруппированных в 11 стрингов по 5 модулей. Каждый модуль имел шунтирующий диод. Каждый стринг и вся батарея также имели защитные диоды. В таком исполнении батарея в условиях АМ0 имеет мощность ниже потребляемой двигателем. Поэтому было принято решение изготовить солнечный имитатор с регулируемым световым потоком и возможностью увеличения светового потока примерно до 6*АМ0. Это

повлекло за собой необходимость охлаждения БФ. Поэтому все модули располагались на водоохлаждаемой плите.

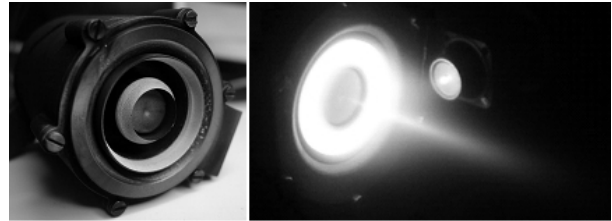


Рис. 4. Фотографии маломощного двигателя СПД-20

Результатирующие характеристики БФ представлены на рис. 5 и 6.

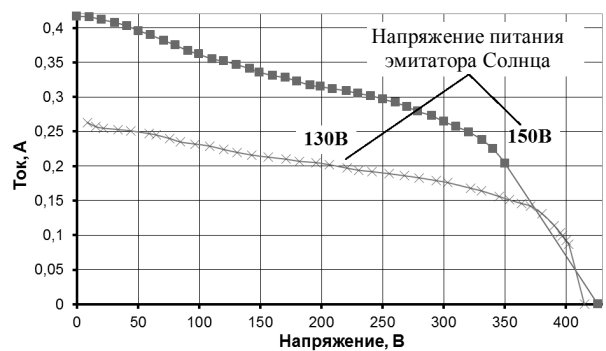


Рис. 5. ВАХ БФ при различных уровнях светового потока

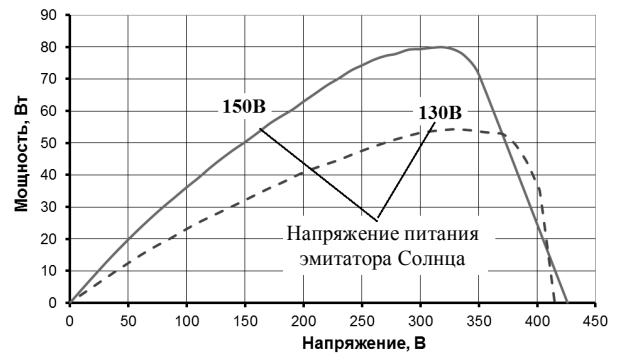


Рис. 6. Зависимость мощности батареи от напряжения при различных уровнях светового потока

Для изготовления имитатора солнечного излучения были использованы 30 ламп типа КГ-500-220. Для снижения неравномерности светового потока в пакете TracePro, была проведена оптимизация геометрических характеристик отражателей, выполненных из химически полированной алюминиевой фольги. С той же целью использовались торцевые отражатели. Исследование неравномерности светового потока проводилось с помощью термостабилизированного датчика светового потока ПСХ-9.0 разработки ГП НИТИП (Харьков, Украина).

Фотография ВВБФ представлена на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид стеновой ВВБФ

В результате измерений было установлено, что неравномерность светового потока не превышает 10% по горизонтали и 15% по вертикали, что является приемлемым для поставленной в работе цели. Для электропитания ламп имитатора использовался регулируемый источник постоянного тока с уровнем пульсации не более 0,5% (см. рис. 8, 9).

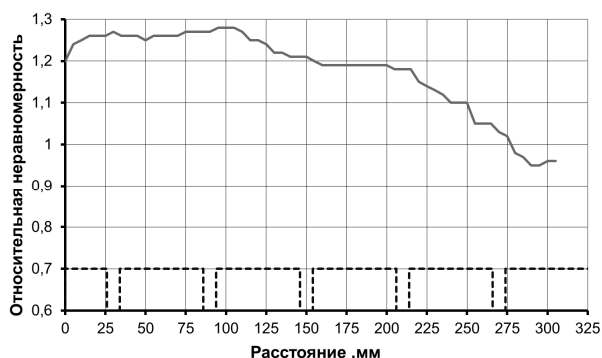


Рис. 8. Неравномерность светового потока по вертикали. Пунктиром выделено расположение фотоэлектрических модулей

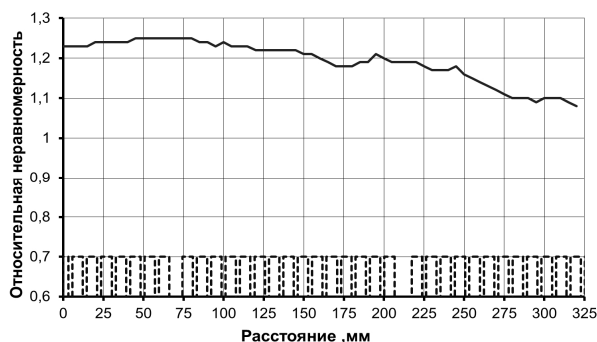


Рис. 9. Неравномерность светового потока по горизонтали. Пунктиром выделено расположение фотоэлектрических модулей

На рис. 10, 11, 12 представлены результирующие характеристики полученного комплекса и его фотография во время эксплуатации. Пределы регулирования светового потока от 0 до 3600 Вт/м². Очевидно, что спектральные характеристики имитатора существенно отличаются от солнечного спектра. Но основная цель проекта была достигнута.

Была создана ВВБФ с мощностью достаточной для устойчивой работы стационарного плазменного двигателя.

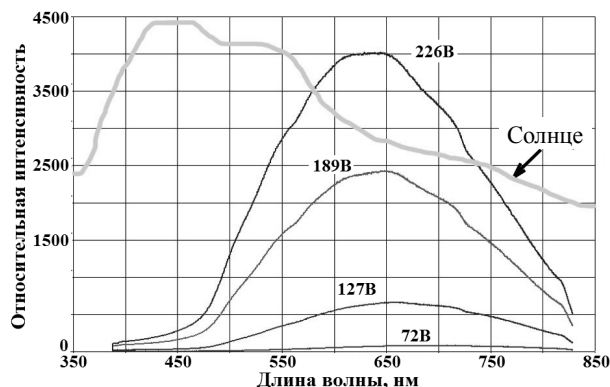


Рис. 10. Спектральная характеристика ВВБФ

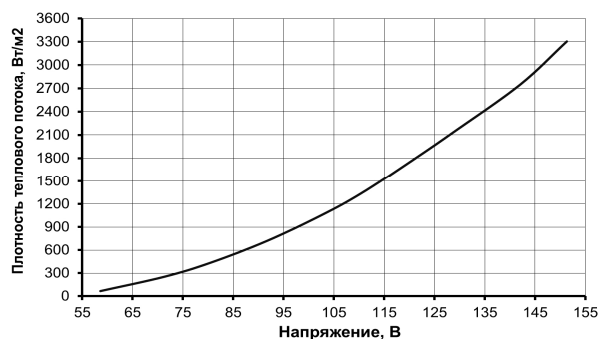


Рис. 11. Регулировочная характеристика ВВБФ

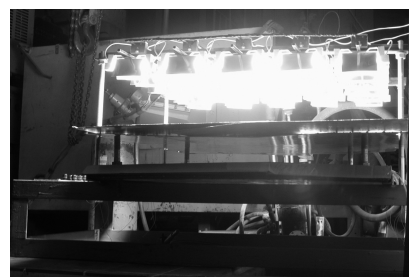


Рис. 12. Фотографии работающей стеновой ВВБФ

В результате проведения экспериментальных работ были получены следующие результаты:

1. Характеристики работы СПД-20 (ВАХ, ВРХ, тяговые характеристики), напрямую запитанного от ВВБФ не отличаются от характеристик двигателя, работающего от стеновых и штатных систем электропитания.

2. Разработанный комплекс (СПД-20+ВВБФ) без проблем запускается при штатных расходах через катод и анодный тракт.

3. Комплекс не боится коротких замыканий в анодной цепи и не требует специальной защиты как при первичном обезгаживании, так и при наличии закрытых пор в керамических изоляторах СПД и пусковых бросках тока.

Выводы и дальнейшие перспективы

Теоретически обоснована и практически доказана возможность прямого электропитания ЭРД холловского типа от высоковольтной БФ.

Изменение традиционной схемы электропитания ЭРДУ на комплекс ЭРД+ВВБФ будет выгодно как с точки зрения повышения надежности всей системы, так и снижения ее массы. По мнению авторов, такое изменение будет особенно выгодно при создании многоразовых транспортных модулей для реализации перелетных задач.

Автор глубоко благодарен всем сотрудникам МНТЦ КЭД ХАИ, принявшим непосредственное участие в реализации проекта, а также тем, кто помогал добрым и мудрым советом.

Работа выполнена научным коллективом отделения ЭРД МНТЦ КЭД ХАИ в инициативном порядке.

Литература

1. Максименко, Т. А. Исследование влияния повышения тягового КПД СПД малой мощности на ресурсные характеристики [Текст] / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, В. А. Федотенко // *Авиационно-*

космическая техника и технология. – 2007. – № 9 (48). – С. 144-146.

2. Loyan, A. V. Performance Investigation of SPT-20M Low Power Hall Effect Thruster [Electronic resource] / A. V. Loyan, T. A. Maksymenko // *30th Int. Electric Propulsion Conference, Florence, Italy. September 17-20, 2007.* – IEPС-2007-100. – Access: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-100.pdf. – 12.04.2015.

3. Экспериментальное исследование влияния положения катода-компенсатора на интегральные характеристики МСПД [Текст] / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, Н. Н. Кошелев, В. А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2008. – № 10(57). – С. 96-99.

4. Лоян, А. В. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик МСПД [Текст] / А. В. Лоян, Т. А. Максименко, В. А. Подгорный // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2008. – № 9(56). – С. 44-47.

5. Дослідження ерозії розрядної камери МСПД протягом тривалих ресурсних випробувань [Текст] / А. В. Лоян, Т. О. Максименко, О. П. Рибалов, В. О. Подгорний, // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2009. – № 8(65). – С. 121-124.

Поступила в редакцію 6.06.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А. Н. Петренко, Днепрпетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепрпетровск.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ (БЕЗ ПРОМІЖНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ) ДВИГУНА ХОЛЛІВСЬКОГО ТИПУ ВІД ВИСОКОВОЛЬТНОЇ БАТАРЕЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ

А. В. Лоян

В статті проаналізовано структуру існуючих джерел електроживлення електроракетних рушійних установок. Запропоновано схему джерела живлення, що забезпечує пряму передачу електричної потужності від сонячної батареї до двигуна. Теоретично обґрунтовано і практично доказано можливість прямого електроживлення електроракетного двигуна типу СПД-20 від високовольтної фотоелектричної батареї. Експериментально перевірено, що характеристики роботи СПД-20, що живиться напряму від ВВБФ, не відрізняються від характеристик двигуна, працюючого від стендових й штатних систем електроживлення. Показано, що розроблений комплекс (СПД-20 + ВВБФ) без проблем запускається при штатних витратах через катодний та анодний тракти і не боїться коротких замикань в анодному ланцюгу.

Ключові слова: електроракетний двигун, стаціонарний плазмовий двигун, батарея фотоелектрична, система електроживлення.

POSSIBILITY INVESTIGATION OF HALL EFFECT THRUSTER DIRECT ELECTRIC POWER SUPPLYING (WITHOUT INTERMEDIATE CONVERTERS) FROM SOLAR BATTERY

A. V. Loyan

Structure of exist electric power supply units for electric propulsion is analyzed in the paper. The power unit scheme, which provides direct electric power supplying from solar battery to the thruster, is proposed. The possibility of Hall Effect type thruster SPT-20 direct power supplying from high voltage solar battery (HVSB) is theoretically validated and experimentally demonstrated. It is experimentally verified that characteristic of SPT-20, which is directly supplying form HVSB, are not differ from thruster's characteristics, which is supplying from standard power unit. It is demonstrated that developed complex (SPT-20 + HVSB) has possibility to start up with standard cathode and anode mass flow rates without any problems and doesn't afraid short circuit in anode line.

Key words: electric propulsion thruster, stationary plasma thruster, solar battery, electric power supply unit.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.