

УДК 629.7.036.7

ПРИМЕНЕНИЕ МАХОВИЧНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В.И. Ермолаев, Ю.А. Новиков

ФГУП «КБ «Арсенал» им. М.В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург

Важной особенностью современного этапа развития космических аппаратов (КА) является значительное повышение требований к энергодвигательным системам (ЭДС). В последние годы существенно расширилась элементная база ЭДС. Широкое распространение получили солнечные батареи (СБ) на базе трехкаскадных фотопреобразователей, а также электроракетные двигательные установки (ЭРДУ). Кроме того, существенное развитие получили ЭДС на базе ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

В работе [1] был проведен анализ областей рационального использования различных структур ЭДС. В последующих работах данная методика была расширена. В качестве основной энергоустановки рассматривались солнечные батареи с каскадными фотоэлементами и ЯЭУ с термоэмиссионным преобразователем энергии. В качестве накопителя энергии рассматривались литий-ионные и никель-водородные аккумуляторные батареи и маховичный накопитель (МН) энергии на основе супермаховика. Альтернативными вариантами маршевой двигательной установки являлись жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ), работающая на азотном тетроксиде и несимметричном диметилгидразине, и ЭРДУ, работающая на ксеноне.

На рис. 1 представлены области рационального использования различных структур ЭДС в зависимости от периодичности выполнения маневров и затрат характеристической скорости на выполнение единичного маневра при мощности целевой системы 5 кВт и 25 кВт.

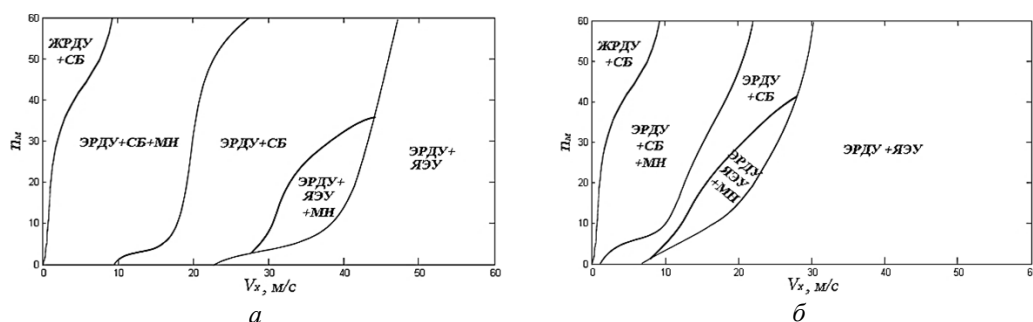


Рис. 1. Области рационального использования различных структур ЭДС при мощности целевой системы: а – 5 кВт; б – 25 кВт

Анализ областей рационального использования различных структур ЭДС показывает, что при наиболее характерных требованиях к маневренным возможностям и при невысокой мощности целевой системы КА целесообразно использовать ЭДС, включающую СБ, ЭРДУ и накопитель. Потребная мощность солнечных батарей в данном случае пик не покрывает, а недостаток мощности обеспечивается накопителем, заряд которого происходит на пассивных участках полета. При этом в качестве накопителя наиболее предпочтительным оказалось использование маховичного накопителя. Преимущество данной структуры ЭДС обусловлено высоким удельным импульсом ЭРДУ и высокой удельной мощностью маховичных накопителей.

В работе [2] была предложена структурно-функциональная схема ЭРДУ с МН, представленная на рис. 2. Она содержит солнечную батарею, электродвигатель-генератор (ЭДГ), МН, соленоид, униполярный генератор (УГ), торцевой сильноточный двигатель (ТСД) и систему хранения и подачи рабочего тела (СХП).

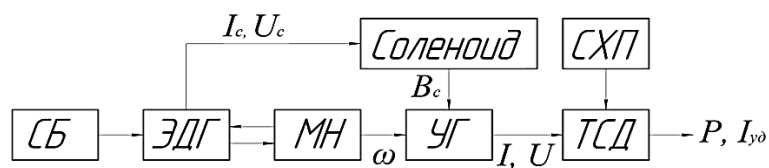


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ЭРДУ с МН

Благодаря высокой удельной мощности и высокой удельной энергоемкости маховичного накопителя энергии данная ЭДС позволяет обеспечить высокую тяговооруженность ввиду отсутствия тяжелой энергоустановки, а также высокую экономичность.

Одной из технических проблем, с которой пришлось столкнуться при реализации представленной схемы, является передача большой электрической мощности от УГ к ТСД. Кроме того, при высоких генерируемых мощностях сложно организовать токосъем с униполярного генератора.

Решить указанные технические проблемы удалось с помощью ЭРДУ, представленной на рис. 3.

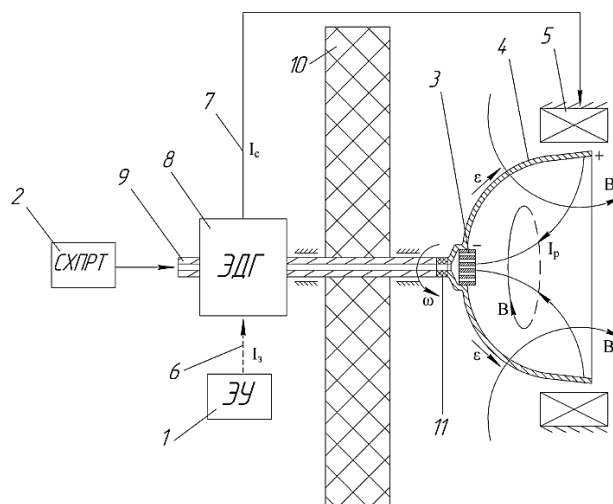


Рис. 3. Электроракетная двигательная установка с маховичным накопителем энергии:

- 1 – энергетическая установка, 2 – система хранения и подачи рабочего тела, 3 – катод, 4 – сопло-анод, 5 – соленоид, 6,7 – тоководы, 8 – электродвигатель-генератор, 9 – вал с каналом для подачи рабочего тела, 10 – маховик, 11 – изолирующая проставка.

ЭРДУ включает в себя энергетическую установку 1, систему хранения и подачи рабочего тела 2 и электроракетный двигатель, в состав которого входят соосно установленные катод 3, сопло-анод 4 и соленоид 5, размещенный снаружи сопла-анода 4. Энергетическая установка 1 и соленоид 5 соединены через тоководы 6 и 7 с электродвигателем-генератором 8. На валу 9 электродвигателя-генератора 8 закреплен маховик 10. На торцевой части вала 9 через изолирующую проставку 11 закреплен катод 3 и сопло-анод 4 электроракетного двигателя. Катод 3 имеет каналы для подачи рабочего тела и связан с системой хранения и подачи рабочего тела 2 через канал, выполненный внутри вала 9.

Устройство работает следующим образом. На пассивных участках полета КА вырабатываемый энергетической установкой 1 электрический ток через токовод 6 поступает на электродвигатель-генератор 8, который работает в режиме двигателя и раскручивает маховик 10. Благодаря этому запасается энергия, необходимая для работы электроракетного двигателя на активных участках полета.

На активных участках полета электродвигатель-генератор 8 переводится в режим генератора и через токовод 7 обеспечивает прохождение электрического тока I_c через соленоид 5. Вращение сопла-анода 4 с угловой скоростью ω в магнитном поле соленоида 5 с индукцией B_c приводит к появлению в токопроводящем материале сопла-анода 4 электродвижущей силы ϵ , направленной от катода 3 к выходному сечению сопла-анода 4. Это приводит к возникновению разности потенциалов между катодом 3 и выходной частью сопла-анода 4. При этом изолирующая проставка 11 предотвращает распространение электрического потенциала через вал 9.

Рабочее тело в электроракетный двигатель подается из системы хранения и подачи рабочего тела 2 через канал, выполненный внутри вала 9. При попадании рабочего тела в электроракетный двигатель под действием разности потенциалов между катодом 3 и выходной частью сопла-анода 4 в среде рабочего тела возникает ток разряда I_p , и образуется плазма. Осевая составляющая тока разряда создает азимутальное магнитное поле с индукцией B . Взаимодействием радиальной составляющей тока разряда I_p с азимутальным магнитным полем приводит к возникновению силы Ампера, которая ускоряет плазму и создает тягу ЭРДУ.

В предлагаемой ЭРДУ для создания тяги используется энергия, запасаемая в маховике 10. Поскольку удельная мощность маховичных накопителей на несколько порядков выше удельной мощности энергоустановок, предлагаемая ЭРДУ может создавать значительно большую тягу, чем известные ЭРДУ. Кроме того, в предлагаемой ЭРДУ энергетическая установка 1 используется на пассивных участках полета для раскрутки маховика 10. Длительность пассивных участков полета КА значительно превышает длительность активных участков полета. В связи с этим требуемая мощность энергетической установки 1 существенно ниже, чем в известных ЭРДУ. Благодаря этому обеспечивается значительное снижение массы энергетической установки.

Разработанная ЭРДУ позволяет также решить указанные технические проблемы использования накопителей для питания двигателей за счет объединения униполярного генератора и ТСД в единый агрегат. При этом сопло двигателя одновременно стало использоваться в качестве ротора униполярного генератора, токосъем производится непосредственно с электродов двигателя, а генерируемая электрическая энергия стала непосредственно создавать разрядный ток в камере двигателя.

В связи с существенной новизной предлагаемой ЭДС, важной частью исследования является ответ на вопрос о возможности реализации подобной энергодвигательной системы на данном этапе развития науки и техники. Для этого была разработана математическая модель основных агрегатов и проведено исследование параметров предлагаемой двигательной установки.

Параметры ТСД рассчитываются по соотношениям, приведенным в [2].

Для расчета генератора были сделаны следующие допущения:

1. Сопло представляет собой полусферу, помещенную в магнитное поле.

2. Уменьшение угловой скорости маховика в процессе работы двигателя компенсируется увеличением магнитной индукции соленоида для обеспечения постоянства тока разряда в двигателе.

Электродвижущая сила, которая индуцируется в роторе произвольной формы, помещенном в магнитном поле, определяется соотношением [3]:

$$\varepsilon = B_c v_{cp} l_{эф}, \quad (1)$$

где B_c – индукция магнитного поля соленоида; v_{cp} – средняя линейная скорость вращения ротора; $l_{эф}$ – эффективная длина ротора.

Для ротора в форме полусферы средняя линейная скорость вращения равна:

$$v_{cp} = \frac{r_2}{2} \omega, \quad (2)$$

а эффективная длина ротора выражается соотношением:

$$l_{эф} = \frac{2\pi r_2^2}{4}, \quad (3)$$

где r_2 – радиус ротора в виде полусферы, ω – угловая скорость вращения ротора.

Тогда выражение (1) примет вид:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} B_c r_2^2 \omega. \quad (4)$$

С другой стороны, потребная ЭДС определяется как сумма падений напряжений на источнике тока и во внешней цепи (в нашем случае между электродами ТСД):

$$\varepsilon = IR_{вн} + U, \quad (5)$$

где $R_{вн}$ – внутренне сопротивление источника.

Особенностью униполярного генератора является малое внутреннее сопротивление, которое составляет от $9 \cdot 10^{-7}$ Ом до $3 \cdot 10^{-4}$ Ом. В расчетах будем принимать худший случай с наибольшим сопротивлением. Внешнее сопротивление цепи определяется полным падением напряжения на электродах двигателя.

Выражение для потребной магнитной индукции при заданном значении силы тока на электродах генератора имеет вид:

$$B_c = \frac{4(IR_{вн} + U)}{\pi r_2^2 \omega}. \quad (6)$$

Индукция магнитного поля, создаваемая соленоидом, определяется зависимостью:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I_c, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; n – число витков на единицу длины; I_c – ток в обмотке соленоида.

Подставив потребную магнитную индукцию соленоида, получим выражение для силы тока, который необходимо пропускать через соленоид:

$$I_c = \frac{4(IR_{вн} + U)}{\pi \mu_0 r_2^2 \omega n}. \quad (8)$$

Для расчета параметров ЭРДУ с маховичным накопителем энергии была разработана программа в среде MatLab. В качестве исходных варьируемых параметров использовались тяга P и удельный импульс $I_{yд}$.

На рис. 4 представлены зависимости тягового КПД от удельного импульса и массового расхода при тяге $P = 10$ Н.

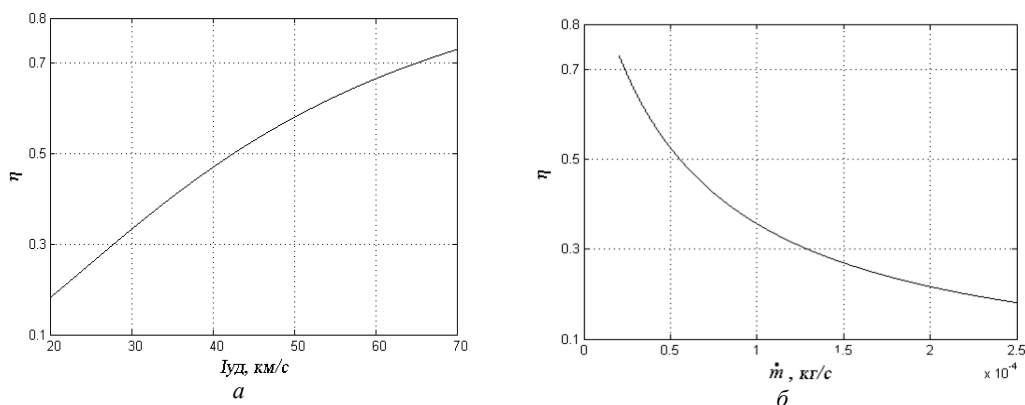


Рис. 4. Зависимости КПД ТСД от: *a* – удельного импульса, *b* – массового расхода

Увеличение удельного импульса приводит к значительному увеличению тягового КПД, а увеличение массового расхода приводит к его снижению. Кроме того, можно отметить, что КПД ТСД в пределе не превышает 80%, а в области наиболее характерных требований к двигательной установке составляет порядка 35-60%.

На рис. 5 представлены зависимости потребной магнитной индукции соленоида от тяги ТСД при угловой скорости вращения 8000 об/мин и удельном импульсе: *a* – 30 км/с, *b* – 50 км/с.

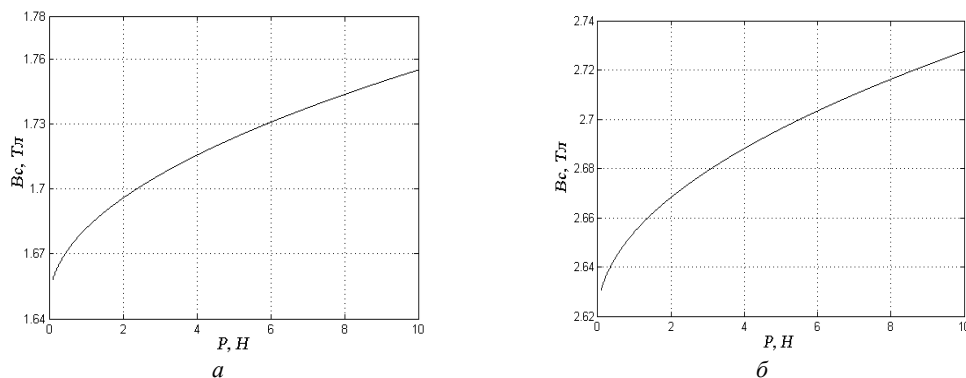


Рис. 5. Зависимости потребной магнитной индукции соленоида от тяги двигателя при удельном импульсе: *a* – 30 км/с, *b* – 50 км/с

Увеличение тяги двигателя с 1 Н до 10 Н увеличивает потребную магнитную индукцию только на 0,06-0,07 Тл. В то время как значение удельного импульса вносит значительный вклад в ее величину. Для объяснения этого явления необходимо обратиться к зависимости (6). Тяга ТСД определяется главным образом разрядным током, в то время как удельный импульс – напряжением. Так как внутренне сопротивление униполярного генератора достаточно мало, увеличение значения тока разряда не оказывает существенное влияние на потребное значение мощности УГ. Увеличение удельного импульса приводит к значительному росту напряжения на электродах двигателя, что приводит к значительному увеличению потребной мощности униполярного генератора, и, соответственно, потребной индукции магнитного поля, создаваемого соленоидом. График зависимости потребной индукции магнитного поля от удельного импульса при тяге $P = 10$ Н и угловой скорости вращения ротора УГ 8000 об/мин представлен на рис. 6.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что предложенная ЭРДУ с маховичным накопителем энергии реализуема на современном этапе развития науки и техники.

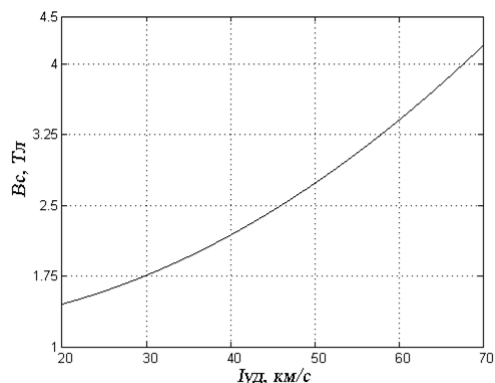


Рис. 6. Зависимости потребляемой магнитной индукции соленоида от удельного импульса

Как показал анализ областей рационального использования различных структур ЭДС, при наиболее характерных требованиях к маневренным возможностям КА целесообразно использовать ЭДС на базе солнечных батарей и предложенной ЭРДУ. Это позволяет существенно снизить массу ЭДС и КА в целом.

Кроме того, предложенная ЭРДУ позволяет значительно повысить тяговооруженность КА по сравнению с другими типами ЭРДУ за счет уменьшения массы энергоустановки. В результате достигается существенное повышение оперативности маневрирования КА.

Библиографический список

1. Ермолаев В.И., Новиков Ю.А. Исследование оптимальных структур энергодвигательных систем на основе солнечных батарей для перспективных космических аппаратов // Труды пятой НТК «Инновационный арсенал молодежи». СПб: ФГУП «КБ «Арсенал», БГТУ «Военмех», 2014. С. 106 – 109.
2. Ермолаев В.И., Новиков Ю.А. Исследование параметров электроракетной двигательной установки с маховичным накопителем энергии // Труды шестой НТК «Инновационный арсенал молодежи». СПб: ФГУП «КБ «Арсенал», БГТУ «Военмех», 2014. С. 105 – 108.
3. Суханов Л.А., Сафиуллина Р.Х., Бобков Ю.А. Электрические униполярные машины. М.: ВНИИЭМ, 1964.

УДК 629.7.001

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАСС КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ДВУХРЕЖИМНОГО СПОСОБА НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.И. Ермолаев, Д.Г. Цируль

ФГУП «КБ «Арсенал» им. М.В. Фрунзе», г. Санкт-Петербург

В настоящее время космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) нашли широкое практическое применение для решения оборонных и социально-экономических задач. Известен способ наблюдения земной поверхности из космоса, вклю-