

УДК 629.7.036.7

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕСУРСА РАБОЧЕГО ТЕЛА ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.С. Ковтун

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва
Российская Федерация, 141070, Королёв, Московская обл., ул. Ленина, 4А
E-mail: Vladimir.S.Kovtun@rsce.ru

А.Н. Павлов

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
Россия, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39
E-mail: spiiras.nw.ru
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Россия, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13
E-mail: vka@mil.ru

В.Н. Воротягин

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Россия, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13
E-mail: vka@mil.ru

Ключевые слова: синергетический ресурс, рабочее тело, электроракетный двигатель, динамическое программирование, манёвр, геостационарный спутник связи, удельный импульс тяги.

Аннотация: В статье рассматривается метод получения синергетического ресурса рабочего тела (РТ) электроракетных двигателей (ЭРД) при выполнении манёвров космическими аппаратами (КА), построенный на основе принципа оптимальности Р. Беллмана. Для примера реализации метода выбран реальный КА - геостационарный спутник связи (ГСС) "Ямал". При этом полученный синергетический ресурс РТ, использованный для выполнения манёвров КА «Ямал», заменяет и, тем самым, сохраняет материальный ресурс, который был бы израсходован с той же целью без применения метода. Рассмотренный метод является универсальным для управления КА, содержащими в качестве исполнительных органов системы управления движением электродвигатели-маховики (ЭДМ) и ЭРД.

1. Введение

В состав системы электроракетных двигателей (СЭРД) ГСС «Ямал» входит восемь тяговых модулей (ТМ), разделённых на две группы (ТМ1,ТМ3,ТМ5,ТМ7 – 1-я группа; ТМ2, ТМ4,ТМ6, ТМ8 –2-я группа), два блока электропитания (БЭП), два блока автоматики ТМ (БАТМ) [1]. ТМ имеют идентичное исполнение и включают в себя блок газораспределения и анодно-катодный блок (АКБ), выполненный в виде электроракетного стационарного плазменного двигателя (СПД М-70), оснащённого

двумя катодами [2]. СПД является уникальным устройством, в состав которого входят разрядная камера, анод-газораспределитель, магнитная система, высоковольтный ввод, полый катод, поджигающий электрод. В результате нестационарных разрядных процессов в камере происходят постепенные изменения расходных характеристик каждого двигателя в сторону увеличения секундного массового расхода. При этом *макроскопические свойства синергетически сложного разрядного процесса в СПД определяются двумя электродинамическими параметрами порядка – разрядными напряжением и током*. За счёт автоматического регулирования, осуществляемого БАТМ, реализуется воспроизводимость функционирования СЭРД с каждым ТМ, обеспечивающая номинальную тягу модуля в пределах допустимого диапазона изменения электродинамических параметров СПД.

Тяга двигателя обеспечивается увеличением секундного массового расхода РТ при падении удельного импульса тяги [3]. В процессе огневой наработки ресурса двигателей происходит увеличение секундного массового расхода РТ до 33% [4]. При этом СЭРД рассматривается как синергетическая динамическая система, обладающая двумя фундаментальными свойствами: 1) осуществлением обмена как с внешней средой, так и между элементами энергией, веществом РТ и информацией; 2) взаимодействием, т.е. когерентностью [5]. Таким образом, от работы каждого элемента системы зависит значение величины удельного импульса тяги. В процессе выполнения программы полёта двигатели и другие элементы СЭРД неравномерно вырабатывают свой ресурс, что оказывает синергетическое влияние на их характеристики и величину удельного импульса тяги. Поэтому целесообразно выбирать для манёвра группы ТМ, а также комплекты БЭП и БАТМ, синергетическое взаимодействие которых с ТМ обеспечивает получение максимальных удельных импульсов тяги двигателей на момент начала текущего манёвра.

2. Постановка задачи

С учётом баллистических условий полёта ГСС «Ямал» в заданной точке стояния на геостационарной орбите сформированы возможные варианты проведения манёвров, представленные на рис. 1.

v									
v_1	$M_{1(1)}^1$	$\Delta G_{1(1)}^1$				$M_{3(1)}^2$	$\Delta G_{3(1)}^2$		v_1
v_2			$M_{2(2)}^1$	$\Delta G_{2(2)}^1$				$M_{4(2)}^2$	$\Delta G_{4(2)}^2$
v_3			$M_{2(3)}^1$	$\Delta G_{2(3)}^1$		$M_{3(3)}^2$	$\Delta G_{3(3)}^2$		v_3
v_4	$M_{1(4)}^1$	$\Delta G_{1(4)}^1$	$M_{2(4)}^2$	$\Delta G_{2(4)}^2$					v_4
v_5						$M_{3(5)}^1$	$\Delta G_{3(5)}^1$	$M_{4(5)}^2$	$\Delta G_{4(5)}^2$
m		1		2			3		4

Рис. 1. План проведения манёвров ГСС «Ямал» с использованием ТМ: $m = 1, \dots, 4$ – число витков; $I(v_1, \dots, v_5)$ – баллистические варианты возможной реализации манёвров по нормали (M^1) и по трансверсали (M^2) к плоскости орбиты с учётом изменений в выборе состава ТМ, катода СПД, комплекта БАТМ, БЭП; $\Delta G^{1,2}$ – расчётные значения

расхода массы РТ, вычисленные по электродинамическим параметрам СПД ТМ на предыдущих аналогичных манёврах.

Тяги СПД в процессе выработки ресурса поддерживаются практически на номинальном уровне регулированием электродинамических процессов в ТМ с использованием БАТМ. При этом удельные импульсы тяг СПД постепенно уменьшаются из-за увеличения секундного массового расхода РТ[4]. Большим значениям удельных импульсов тяги, при номинальной тяге, соответствует меньший секунднй массовый расход РТ. Следовательно, эквивалентным оптимальным выбором для манёвра является выбор ТМ с минимальным расходом РТ при номинальном значении тяги.

Для постановки задачи формируется множество вариантов проведения манёвров

$$(1) \quad M_{m(v)} = M^1_{m(v)} \cup M^2_{m(v)}, m = 1, \dots, 4, v = 1, \dots, 5.$$

С целью оценки синергетического ресурса РТ, получаемого в результате применения метода, осуществляется переход от функционального множества (1) к числовому

$$(2) \quad G_{m(v)} = G^1_{m(v)} \cup G^2_{m(v)}, m = 1, \dots, 4, v = 1, \dots, 5,$$

в котором каждому элементу функционального множества ставится в соответствие весовой коэффициент, определяющий прогнозируемый расход РТ на манёвр.

Оптимальный вариант расхода РТ G_{vmin} при проведении 2-х манёвров выбирается из условия

$$(3) \quad f_m(G_{vmin}) = \min_{m,v} \{ \sum_{m,v} (G_v^1 + G_v^2)_m \}, m = 1, 2, 3, v = \overline{1, 5}.$$

Вариант максимально возможных затрат расхода РТ G_{vmax} при проведении 2-х манёвров выбирается из условия

$$(4) \quad f_m(G_{vmax}) = \max_{m,v} \{ \sum_{m,v} (G_v^1 + G_v^2)_m \}, m = 1, 2, 3, v = \overline{1, 5}.$$

Синергетический ресурс $\Delta G_{m(v)}$ РТ определяется по выражению

$$(5) \quad \Delta G_{m(v)} = G_{vmax} - G_{vmin}.$$

Постановка задачи: выбрать из множества вариантов проведения 2-х манёвров ($M^1 + M^2$), при фиксированных значениях характеристической скорости, один оптимальный вариант по расходу РТ, соответствующий максимальному значению приобретённого синергетического ресурса.

3. Метод решения задачи

Решение задачи выполняется методом динамического программирования на основе принципа оптимальности Р. Беллмана: *оптимальная стратегия решения обладает таким свойством, что каковы бы ни были начальное состояние и начальное управление, последующее решение должно определять оптимальную стратегию относительно состояния, полученного в результате первоначального управления* [6].

Методы динамического программирования применяются при решении дискретных многошаговых задач, в которых на каждом шаге имеется ограниченный выбор управлений и отсутствует информация о производных [7].

Реализация метода производится путём систематического просмотра (перебора) всех допустимых решений задачи и выбора тех, которым соответствуют наименьшие (3) или наибольшие (4) значения функции.

Модель алгоритма полного перебора вариантов.

Шаг 1.

$$f_{11}(G_{vmin}) = \min\{(\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{2(4)}^2), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_{11}(G_{vmax}) = \max\{(\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{2(4)}^2), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{1(1)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\},$$

$$f_{14}(G_{vmin}) = \min\{(\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{2(4)}^2), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_{14}(G_{vmax}) = \max\{(\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{2(4)}^2), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\},$$

$$f_1(G_{vmin}) = \min\{f_{11}(G_{vmin}), f_{14}(G_{vmin})\}, \quad f_1(G_{vmax}) = \max\{f_{11}(G_{vmax}), f_{14}(G_{vmax})\}.$$

Шаг 2.

$$f_{23}(G_{vmin}) = \min\{(\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_1(G_{vmin}), f_{23}(G_{vmax}) = \max\{(\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{2(2)}^2 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_1(G_{vmax}),$$

$$f_{23}(G_{vmin}) = \min\{(\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_1(G_{vmin}), f_{23}(G_{vmax}) = \max\{(\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{3(1)}^3), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{3(3)}^3), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{4(2)}^4), (\Delta G_{2(3)}^2 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_1(G_{vmax}),$$

$$f_2(G_{vmin}) = \min\{f_{23}(G_{vmin}), f_{23}(G_{vmin})\}, \quad f_2(G_{vmax}) = \max\{f_{23}(G_{vmax}), f_{23}(G_{vmax})\}.$$

Шаг 3.

$$f_3(G_{vmin}) = \min\{(\Delta G_{3(5)}^1 + \Delta G_{4(2)}^2), (\Delta G_{3(5)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_2(G_{vmin}),$$

$$f_3(G_{vmax}) = \max\{(\Delta G_{3(5)}^1 + \Delta G_{4(2)}^2), (\Delta G_{3(5)}^1 + \Delta G_{4(5)}^5)\}, f_2(G_{vmax}).$$

Шаг 4.

Выбор варианта проведения манёвра решением задачи в обратном направлении движения расчётного процесса

$$G_{vmin} = f_3(G_{vmin}) \Rightarrow f_2(G_{vmin}) \Rightarrow f_{23}(G_{vmin}) \Rightarrow f_1(G_{vmin}) \Rightarrow f_{14}(G_{vmin}) \Rightarrow (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(2)}^2),$$

$$(M_{1(4)}^1 + M_{4(2)}^2) \Leftarrow (\Delta G_{1(4)}^1 + \Delta G_{4(2)}^2).$$

Шаг 5.

Определение синергетического ресурса

$$G_{vmin} = f_3(G_{vmin}), G_{vmax} = f_3(G_{vmax}),$$

$$\Delta G_{m(v)} = G_{vmax} - G_{vmin}.$$

4. Заключение

Применение относительно простого метода получения синергетического ресурса РТ для электроракетных двигателей ГСС «Ямал», привело к довольно существенному эффекту [3]. При номинальном расходе РТ на проведение 5-ти импульсного манёвра ~27 г, **синергетический ресурс РТ** на начальном этапе полёта ГСС «Ямал-200» составлял в среднем ~5% (~1,35 г), а после 5-ти летнего срока эксплуатации ~7% (~1,89 г). Для выполнения программы полёта ГСС «Ямал-200» в год проводилось ~250 манёвров. За счёт применения метода **синергетический ресурс РТ за год** составлял ~340 г и ~ 470 г соответственно. Совместно с другими методами обеспечения синергетическим ресурсом РТ ЭРД [4], затраты РТ на выполнение программы полёта были уменьшены на величину, сопоставимую с проектными годовыми потребностями. Это дало возможность продлить срок эксплуатации ГСС «Ямал-200» №2 до 20 лет при плановом сроке 15 лет.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00706.

Список литературы

1. Ганзбург М.Ф., Кропотин С.А., Мурашко В.М., Попов А.Н., Севастьянов Н.Н., Смоленцев А.А., Соколов А.В., Соколов Б.А., Сухов Ю. И. Итоги 10-ти летней эксплуатации электроракетных двигательных установок в составе двух телекоммуникационных КА «Ямал 200» на ГСО // Космическая техника и технологии. 2015. № 4. С. 25-39.
2. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М. ФИЗМАТЛИТ, 2006. 576 с.
3. Ковтун В.С., Севастьянов Д.Н., Пищулин В.А., Фомин Л.В., Бедин Б.И. Определение расхода ксенона в электроракетных плазменных двигателях при эксплуатации космического аппарата «Ямал» // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 1. С. 59-66.
4. Ковтун В.С., Платонов В.А., Богачёв А.В. Методика обеспечения полёта автоматических космических аппаратов «Ямал» синергетическим ресурсом рабочего тела электроракетных двигателей // Космическая техника и технологии. 2023. № 4 (43). С. 88-103.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: (инварианты, оптимизация, синтез). Таганрог: гос. радиотехн.ун-т; М.: Энергоатомиздат, 2002. 343 с.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. 400 с.
7. Брайсон А., Хо-Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. Оптимизация, оценка и управление. М.: Мир. 1972. 544 с.

