

УДК 681.5.09

А.С. КУЛИК, С.Н. ФИРСОВ, А.Н. ТАРАН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНИМАЛЬНО ИЗБЫТОЧНОГО БЛОКА ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ДЛЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

В статье представлены математические зависимости, описывающие угловое движение космического аппарата с минимально избыточным блоком двигателей-маховиков. Рассмотрена альтернативная схема расположения исполнительных органов, содержащая в себе четыре двигателя-маховика, оси вращения которых направлены вдоль боковых ребер правильной четырехугольной пирамиды. Получены зависимости, позволяющие формировать управляющие сигналы в системе угловой ориентации космического аппарата с избыточным блоком двигателей-маховиков при использовании четырех или трех работоспособных исполнительных органов. Произведено машинное моделирование углового разворота космического аппарата относительно подвижно-ориентированной системы координат.

Ключевые слова: *космический аппарат, двигатель-маховик, избыточность, кинетический момент, угловая скорость, управление, ориентация.*

Введение

Решение задач угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА) в течение продолжительного времени связано со значительными энергетическими затратами. Основным преимуществом использования для этих целей электромеханических исполнительных органов является возможность восполнения энергетических затрат с помощью солнечных батарей. Поэтому при разработке систем ориентации и стабилизации углового положения малых и средних КА, рассчитанных на длительное существование, в качестве электромеханических исполнительных органов применяются силовые гироскопические комплексы, трехступенные силовые гиросtabilизаторы и управляющие двигатели-маховики (ДМ) [1]. Каждый из исполнительных органов обладает как преимуществами, так и определенного рода недостатками. Между областями их применения невозможно провести четких границ. Эффективность использования того или иного исполнительного органа зависит от требований надежности, точности обеспечения ориентации и стабилизации КА, а также необходимости нормального функционирования в условиях отказов элементов системы управления (СУ) [2].

С точки зрения простоты устройства, функционирования, диагностирования, реконфигурации алгоритмов при отказах и организации управления режимами ориентации и стабилизации определенными преимуществами обладают исполнительные органы в виде ДМ [1, 2].

1. Выбор схемы расположения ДМ

В работах [3, 4] показано, что для создания управляющих моментов в системах угловой ориентации и стабилизации КА достаточно трех ДМ, расположенных таким образом, чтобы вектора создаваемых ими кинетических моментов были неколлинеарными друг другу. При этом для упрощения алгоритмов управления ДМ располагают вдоль основных осей инерции КА. Однако такая система утрачивает работоспособность при выходе из строя хотя бы одного из ДМ. В [2, 5] предлагается для обеспечения функционирования объекта управления при отказе вводить в систему структурную избыточность в виде минимального количества дополнительных функциональных элементов [5].

В [6, 7] произведен анализ различных избыточных конфигураций ДМ и предложен альтернативный вариант, содержащий в себе четыре исполнительных органа, расположенных таким образом, чтобы векторы создаваемых ими кинетических моментов были направлены вдоль ребер правильной четырехугольной пирамиды. При этом альтернативная схема характеризуется минимальной дисперсией формирования вектора управляющего кинетического момента в случае отказа одного из исполнительных органов.

ДМ обладают существенными массогабаритными характеристиками, следовательно, целесообразно использовать СУ с минимальным количеством избыточных ДМ. Примем к рассмотрению схему с четырьмя ДМ, векторы кинетических моментов

которых являются неколлинеарными друг другу, обеспечивается их линейная независимость, а также работоспособность системы при отказе одного из исполнительных органов. Этим условиям удовлетворяет альтернативная схема, предложенная в [6, 7].

2. Математическое описание углового движения КА с избыточным блоком ДМ

Для использования избыточного блока двигателей-маховиков (БДМ) в системах угловой стабилизации и ориентации КА необходимо получить математические зависимости, позволяющие рассчитывать управляющие сигналы для соответствующих ДМ.

Альтернативная схема расположения исполнительных органов в минимально избыточном БДМ представлена на рис. 1.

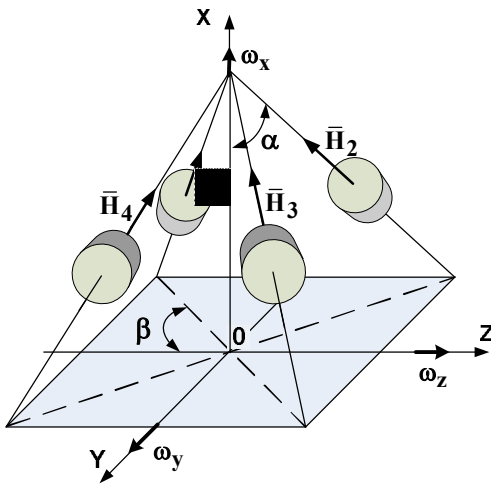


Рис. 1. Минимально избыточная альтернативная схема установки ДМ

БДМ содержит в себе четыре исполнительных органа, оси вращения которых расположены на ребрах правильной четырехугольной пирамиды. Ребра основания пирамиды направлены параллельно основным двум главным осям инерции КА (OY и OZ), а высота пирамиды совпадает с его третьей осью инерции (OX). Такое размещение позволяет каждому ДМ вносить свой вклад в управление по всем трем осям связанной системы координат (ССК). Ребра пирамиды образуют с осью OX ССК угол α , а диагонали основания образуют с осью OZ угол β .

Как показано в [6], при значениях углов $\alpha=60^\circ$ и $\beta=45^\circ$ обеспечивается минимальная дисперсия формирования вектора управляющего кинетического момента при отказе одного из ДМ.

Примем за положительное направление вращения ДМ такое, при котором векторы его угловой скорости и кинетического момента были направлены к вершине пирамиды. Тогда проекции управ-

ляющего кинетического момента, вырабатываемого БДМ, на оси ССК описываются следующим образом:

$$\begin{cases} H_x = \cos \alpha (H_1 + H_2 + H_3 + H_4); \\ H_y = \sin \alpha \sin \beta (H_1 + H_2 - H_3 - H_4); \\ H_z = \sin \alpha \cos \beta (H_1 - H_2 - H_3 + H_4), \end{cases} \quad (1)$$

где H_x, H_y, H_z – проекции управляющего кинетического момента БДМ на оси ССК;

H_1, H_2, H_3, H_4 – величины кинетических моментов соответствующих ДМ.

Для симметричного КА с абсолютно жестким корпусом, внутри которого отсутствуют перемещающиеся массы, угловое движение относительно центра масс с учетом создаваемого БДМ управляющего кинетического момента можно описать тремя динамическими уравнениями Эйлера [3, 4]:

$$\begin{cases} I_x \dot{\omega}_x - (I_y - I_z) \omega_y \omega_z = M_x - \dot{H}_x + H_y \omega_z - H_z \omega_y; \\ I_y \dot{\omega}_y - (I_z - I_x) \omega_x \omega_z = M_y - \dot{H}_y + H_z \omega_x - H_x \omega_z; \\ I_z \dot{\omega}_z - (I_x - I_y) \omega_y \omega_x = M_z - \dot{H}_z + H_x \omega_y - H_y \omega_x, \end{cases} \quad (2)$$

где I_x, I_y, I_z – моменты инерции КА относительно центра масс;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции абсолютной угловой скорости вращения КА на оси ССК;

M_x, M_y, M_z – проекции суммарного момента внешних сил на оси ССК.

Введем углы Эйлера-Крылова $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ и последовательность поворотов КА $\varphi_x \rightarrow \varphi_y \rightarrow \varphi_z$ [3] для определения положения ССК OXYZ относительно подвижной ориентированной системы координат (СК) $Ox_0y_0z_0$ (рис. 2).

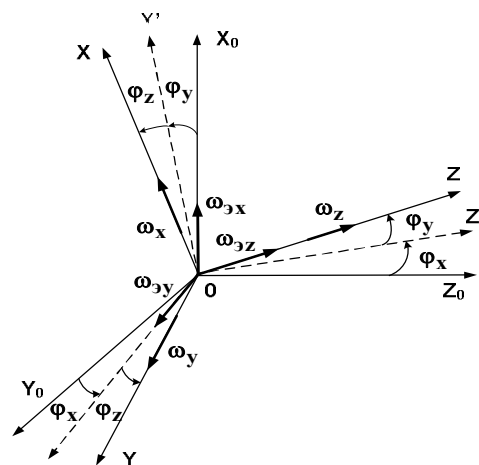


Рис. 2. Углы разворота между ССК и подвижной ориентированной СК

Проекции вектора мгновенной угловой скорости КА в ССК ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) связаны со скоростями

изменения углов Эйлера ($\omega_{\alpha x}, \omega_{\alpha y}, \omega_{\alpha z}$) системой уравнений:

$$\begin{cases} \omega_x = \omega_{\alpha x} \cos \varphi_y \cos \varphi_z + \omega_{\alpha y} \sin \varphi_z; \\ \omega_y = -\omega_{\alpha x} \cos \varphi_y \sin \varphi_z + \omega_{\alpha y} \cos \varphi_z; \\ \omega_z = \omega_{\alpha x} \sin \varphi_y + \omega_{\alpha z}. \end{cases} \quad (3)$$

Решая систему относительно $\omega_{\alpha x}, \omega_{\alpha y}$ и $\omega_{\alpha z}$, получим:

$$\begin{cases} \omega_{\alpha x} = \frac{1}{\cos \varphi_y} (\omega_x \cos \varphi_z - \omega_y \sin \varphi_z); \\ \omega_{\alpha y} = \omega_x \sin \varphi_z + \omega_y \cos \varphi_z; \\ \omega_{\alpha z} = \frac{1}{\cos \varphi_y} (-\omega_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z + \\ + \omega_y \sin \varphi_y \sin \varphi_z + \omega_z \cos \varphi_y). \end{cases} \quad (4)$$

Система динамических уравнений (2) совместна с (1) и (3) связывает угловое движение КА с вырабатываемыми ДМ управляющими кинетическими моментами.

Рассмотрим систему динамических уравнений Эйлера (2) без учета внешних возмущающих моментов, воздействующих на КА. Поскольку в СУ измерения производятся с временным интервалом T_0 , перейдем к дискретному представлению (2) с использованием метода Эйлера [8]. Представим угловые ускорения КА и производные кинетических моментов в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i(t) &\approx \frac{\omega_i(kT_0 + T_0) - \omega_i(kT_0)}{T_0}; \\ \dot{H}_i(t) &\approx \frac{H_i(kT_0 + T_0) - H_i(kT_0)}{T_0}; \\ t &= T_0 k, k = 0, 1, 2, \dots; \\ i &\in \{x, y, z\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуем систему (2) с учетом (5) и решим ее относительно проекций кинетического момента вырабатываемого БДМ в $(k+1)$ момент времени. Для простоты записи в выражениях вида $\omega_i(kT_0)$, $H_i(kT_0)$ опущено T_0 .

$$\begin{cases} H_x(k+1) = H_x(k) - I_x(\omega_x(k+1) - \omega_x(k)) + \\ + T_0(H_y(k)\omega_z(k) - H_z(k)\omega_y(k)) + \\ + (I_y - I_z)\omega_y(k)\omega_z(k)T_0; \\ H_y(k+1) = H_y(k) - I_y(\omega_y(k+1) - \omega_y(k)) + \\ + T_0(H_z(k)\omega_x(k) - H_x(k)\omega_z(k)) + \\ + (I_z - I_x)\omega_x(k)\omega_z(k)T_0; \\ H_z(k+1) = H_z(k) - I_z(\omega_z(k+1) - \omega_z(k)) + \\ + T_0(H_x(k)\omega_y(k) - H_y(k)\omega_x(k)) + \\ + (I_x - I_y)\omega_y(k)\omega_x(k)T_0. \end{cases} \quad (6)$$

Кинетический момент, вырабатываемый ДМ, равняется произведению его угловой скорости на собственный момент инерции, следовательно, систему уравнений (1) можно записать в виде:

$$\begin{cases} H_x = \cos \alpha (J_1 \Omega_1 + J_2 \Omega_2 + J_3 \Omega_3 + J_4 \Omega_4); \\ H_y = \sin \alpha \sin \beta (J_1 \Omega_1 + J_2 \Omega_2 - J_3 \Omega_3 - J_4 \Omega_4); \\ H_z = \sin \alpha \cos \beta (J_1 \Omega_1 - J_2 \Omega_2 - J_3 \Omega_3 + J_4 \Omega_4). \end{cases} \quad (7)$$

где $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ – угловые скорости вращения соответствующих ДМ;

J_1, J_2, J_3, J_4 – моменты инерции соответствующих ДМ.

Решение системы уравнений (7) позволяет по заданным проекциям управляющего кинетического момента определить соответствующие угловые скорости вращения ДМ. Система из трех уравнений содержит четыре переменные, следовательно, решение может быть бесчисленное множество. Исходя из того, что искомыми переменными являются управляющие сигналы, можно сузить область возможных решений введением следующих ограничений и условий:

– ограничение значения угловой скорости вращения ДМ:

$$|\Omega_j| < \Omega_{\max}; \quad j \in \{1, 2, 3, 4\}; \quad (8)$$

– отключение одного из ДМ либо «замораживание» его угловой скорости вращения:

$$\Omega_j = 0 \quad \text{или} \quad \Omega_j = \text{const}; \quad j \in \{1, 2, 3, 4\}; \quad (9)$$

– введение линейной зависимости между угловыми скоростями вращения маховиков:

$$\Omega_v = A_{\text{св } vj} \Omega_j + B_{\text{св } vj} \Big|_{v \neq j}; \quad v, j \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (10)$$

На линейном участке работы ДМ можно приближенно описать аperiodическим звеном. Тогда дифференциальное уравнение, связывающее угловую скорость вращения ДМ и управляющий входной сигнал, имеет вид:

$$T_j \Delta \dot{\Omega}_j = -\Delta \Omega_j + K_{\text{дм } j} \Delta u_j; \quad j \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (11)$$

где T_j – постоянные времени j -го ДМ;

$K_{\text{дм } j}$ – коэффициент передачи по управляющему сигналу j -го ДМ.

По аналогии с (5), (6) перейдем к дискретному представлению уравнения и вычислим значения управляющих сигналов для БДМ:

$$\Delta u_j(k+1) = \frac{\Delta \Omega_j(k+1) - \Delta \Omega_j(k) \left(1 + \frac{T_j}{T_0}\right)}{K_{\text{дм } j}}. \quad (12)$$

Использование зависимостей (6), (7) и (12) позволяет на основании заданных параметров углового движения КА, а также информации с датчиков ско-

ростей вращения КА и ДМ формировать управляющие сигналы для БДМ.

3. Машинное моделирование разворота КА с избыточным БДМ

Для оценки работоспособности СУ с избыточным блоком ДМ было произведено машинное моделирование разворота КА относительно подвижно ориентированной СК. Функциональная схема машинной модели системы представлена на рис. 3.

Использованы следующие параметры КА и БДМ: осевые моменты инерции КА $I_x = 113 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_y = 85 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $I_z = 86 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент инерции ДМ $J_j = 0,04 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, максимальная скорость вращения ДМ $\Omega_{\max j} = 4000 \text{ рад/с}$, коэффициент передачи ДМ $K_{\text{ДМ} j} = 166 \text{ рад/В} \cdot \text{с}$, постоянная времени ДМ $T_{\text{ДМ} j} = 10 \text{ с}$, $j = \overline{1,4}$.

Входными сигналами для системы являются углы Эйлера-Крылова ($\varphi_{x \text{ зад}}$, $\varphi_{y \text{ зад}}$, $\varphi_{z \text{ зад}}$). Составляющие скорости выхода КА в заданное угловое положение ($\omega_{\text{э}x}$, $\omega_{\text{э}y}$, $\omega_{\text{э}z}$) в общем случае рассчитываются на основании величины ошибки

рассогласования, требуемых показателей по точности, быстродействию, динамических возможностей КА и траектории перемещения и преобразуются по (3) в соответствующие проекции вектора мгновенной угловой скорости объекта в ССК (ω_x , ω_y , ω_z).

Проекции вектора управляющего кинетического момента (H_x , H_y , H_z) в текущий момент времени вычисляются по (7) исходя из требуемой скорости вращения КА, а также угловых скоростей вращения КА и ДМ в предыдущие моменты времени. С учетом принятых ограничений и условий (8–10), а также состояния блока ДМ решается система уравнений (7) и определяются требуемые скорости вращения ДМ. На основании (12) и функциональных параметров исполнительных органов рассчитываются управляющие сигналы для блока ДМ (u_1 , u_2 , u_3 , u_4). Блок преобразования $\vec{\omega} \rightarrow \vec{\omega}_3$ и интегратор используются для определения текущего углового положения КА относительно подвижно ориентированной СК на основании информации о векторе мгновенной угловой скорости вращения аппарата в ССК.

В процессе моделирования для решения системы (7) введено условие (10), связывающее угловые скорости 2-го и 4-го маховиков:

$$\Omega_4 = -\Omega_2. \tag{13}$$

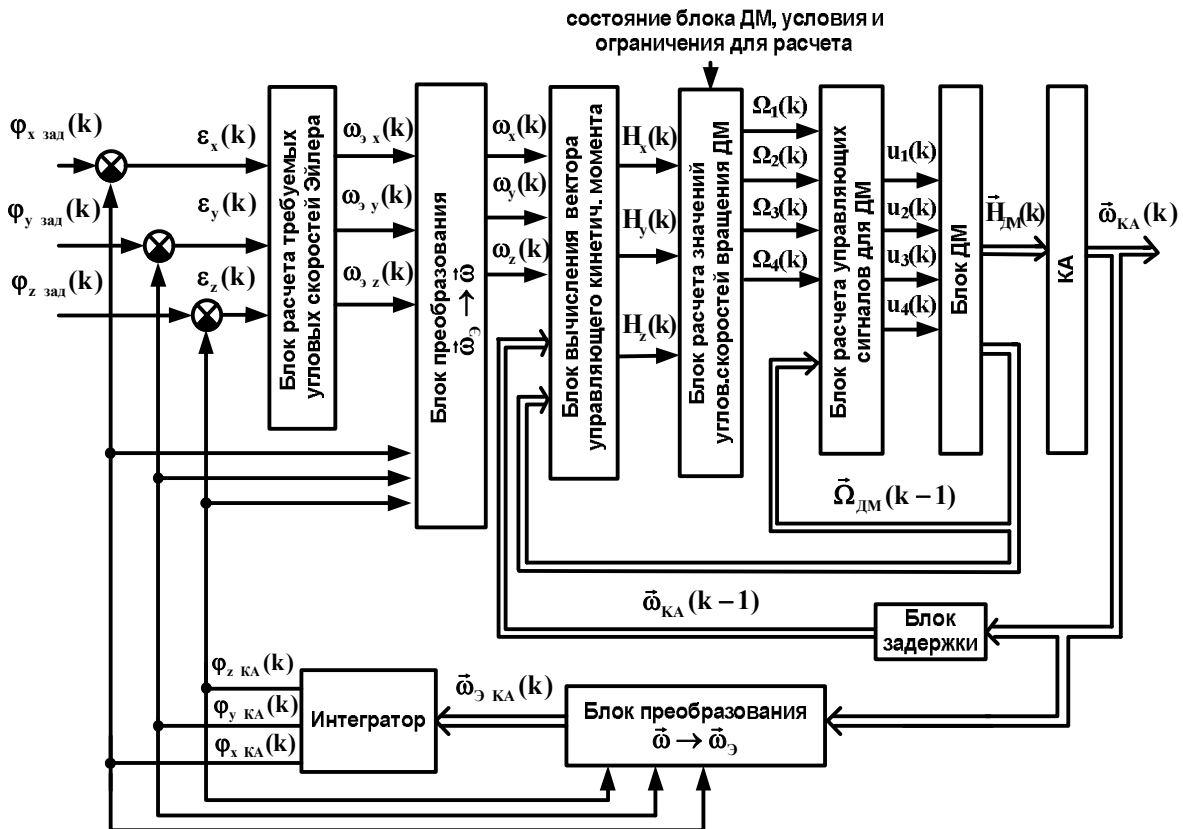


Рис. 3. Функциональная схема машинной модели системы угловой ориентации КА

Скорость выхода в заданное положение по каждой из осей ССК прямо пропорциональна соответствующему угловому рассогласованию:

$$\omega_{\varphi_i} = P_i \cdot \varepsilon_i, \quad i \in \{x, y, z\}. \quad (14)$$

Коэффициенты P_i определяют быстродействие системы. Их величина ограничена в основном динамическими возможностями КА по выбранной оси.

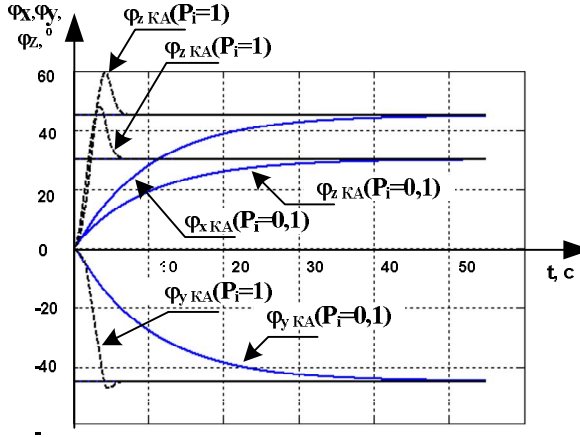


Рис. 4. Угловой разворот КА с избыточным БДМ

На рис. 4 представлены переходные процессы при угловом развороте КА в положение со следующими значениями углов Эйлера: $\varphi_{x \text{ зад}} = 45^\circ$, $\varphi_{y \text{ зад}} = 30^\circ$, $\varphi_{z \text{ зад}} = -45^\circ$. Графики получены при значениях коэффициента $P_i = 0,1$ и $P_i = 1$. Очевидно, что увеличение значения коэффициентов P_i позволяет ускорить переходные процессы, однако приводит к появлению перерегулирования. При уменьшении значения коэффициентов КА плавно достигает заданного углового положения.

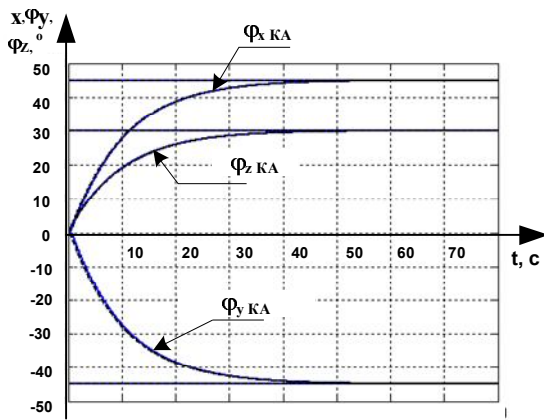


Рис. 5. Угловой разворот КА при отключении одного ДМ

В случае отключения или выходе из строя одного из ДМ необходимо решать систему уравнений (8) с учетом условия (10). Например, при отказе четвертого маховика ($\Omega_4 = 0$) система примет вид:

$$\begin{cases} H_x = \cos \alpha (J_1 \Omega_1 + J_2 \Omega_2 + J_3 \Omega_3); \\ H_y = \sin \alpha \sin \beta (J_1 \Omega_1 + J_2 \Omega_2 - J_3 \Omega_3); \\ H_z = \sin \alpha \cos \beta (J_1 \Omega_1 - J_2 \Omega_2 - J_3 \Omega_3). \end{cases} \quad (15)$$

Результаты моделирования углового разворота КА с учетом отключенного четвертого ДМ представлены на рис. 5. Графики свидетельствуют, что переходные процессы в системе практически не изменяются. Этот факт показывает возможность использования в процессе функционирования трех маховиков из четырех.

Заключение

В работе были получены выражения (3), (4), (6), (7), (12), позволяющие формировать необходимые управляющие воздействия в системах угловой ориентации и стабилизации КА с минимально избыточным блоком ДМ исходя из известных функциональных параметров объекта управления и исполнительных органов, а также показаний датчиков угловых скоростей вращения ДМ и датчиков угловых скоростей вращения КА в ССК.

Из (7) следует, что при выбранной схеме расположения исполнительных органов, управление возможно в случае работоспособности трех ДМ из четырех. Соответственно один из ДМ можно сделать резервным и задействовать лишь в случае выхода из строя одного из основных ДМ, либо при необходимости увеличения управляющего момента для ускорения процесса ориентации КА или компенсации большого по амплитуде возмущения. Подобный режим работы системы позволит продлить ее ресурс, так как один из ДМ большую часть времени работы может находиться в «холодном» резерве.

Полученные в настоящей статье результаты могут быть полезны разработчикам систем ориентации и стабилизации КА. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку моделей и методов диагностирования функционального состояния блока ДМ, а также оптимизации алгоритмов формирования управляющих воздействий.

Литература

1. *Игнатов А.И. Анализ динамических возможностей системы управления малым космическим аппаратом, построенным на базе двигателей-маховиков: препринт / А.И. Игнатов, А.А. Давыдов,*

В.В. Сазонов. – М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, РАН, 2005. – 30 с.

2. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления: монография / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

3. Раушенбах Б.В. Управление ориентацией космических аппаратов / Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь. – М.: Наука, 1974. – 600 с.

4. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов / А.П. Разыграев. – М.: Машиностроение, 1990. – 480 с.

5. Елифанов А.Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами / А.Д. Елифанов. – М.: Машиностроение, 1978. – 144 с.

6. Кулик А.С. Эффективность избыточных систем стабилизации и ориентации космических аппаратов с двигателями-маховиками / А.С. Кулик, А.М. Суббота, О.В. Резникова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 3. – С. 18-24.

7. Пат. 35598 Україна, МПК⁶ В64G1/24 Надлишковий блок двигунів-маховиків / Кулік А.С., Суббота А.М., Резнікова О.В.; Заявник та власник Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – № u200805651; заявл. 30.04.08; опубл. 25.09.08, Бюл. № 18. – 5 с.

8. Кулик А.С. Основы моделирования систем: учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х.: Харьк. авиац. ун-т, 1998. – 90 с.

Поступила в редакцию 1.12.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информатики А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ВИКОРИСТАННЯ МІНІМАЛЬНО НАДЛИШКОВОГО БЛОКУ ДВИГУНІВ МАХОВИКІВ ДЛЯ КУТОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТУ

А.С. Кулік, С.М. Фірсов, О.М. Таран

У статті представлено математичні вирази, що описують кутовий рух космічного апарату з мінімально надлишковим блоком двигунів-маховиків. Розглянуто альтернативну схему розташування виконавчих органів, що складається з чотирьох двигунів-маховиків, осі обертання яких спрямовані вздовж бокових ребер правильної чотирикутної піраміди. Отримано залежності, що дозволяють формувати керуючі сигнали в системі кутової орієнтації космічного апарату з надлишковим блоком двигунів-маховиків при використанні чотирьох і трьох працездатних виконавчих органів. Проведено машинне моделювання кутового розвороту космічного апарату відносно рухомо-орієнтованої системи координат.

Ключові слова: космічний апарат, двигун маховик, надлишковість, кінетичний момент, кутова швидкість, керування, орієнтація.

USAGE OF MINIMALLY REDUNDANT REACTION WHEEL BLOCK FOR SPACECRAFT ANGULAR ORIENTATION

A.S. Kulik, S.N. Firsov, A.N. Taran

Mathematical relationships for describing angular motion of spacecraft with minimally redundant reaction wheel block are presented in the article. An alternative layout chart of reaction wheels, containing four actuators, rotation axis of which are directed along the lateral ribs of correct quadrangular pyramid, is considered. The mathematical relationships for control signals generation in space craft angular orientation system with the use of four or three efficient actuators is synthesized. Computational modeling of space craft angular rotation in relation to mobile oriented coordinate system is made.

Key words: spacecraft, reaction wheel, redundancy, kinetic moment, angular velocity, control, orientation.

Кулик Анатолій Степанович – д-р техн. наук, проф., заведуючий кафедри систем управління летательных аппаратов, декан факультета систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kulik@d3.khai.edu.

Фирсов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Системы управления летательными аппаратами» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: firsov@d3.khai.edu.

Таран Александр Николаевич – ассистент кафедры систем управления летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Taran_A_N@mail.ru.