

УДК 681.5.09

О.А. ЛУЧЕНКО<sup>1</sup>, А.Н. ТАРАН<sup>2</sup>, С.Н. ФИРСОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> «Хартрон-Плант», Харьков, Украина<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО БЛОКА ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ СИММЕТРИЧНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

*В статье отражена необходимость и актуальность применения избыточных схем электромагнитных исполнительных органов для решения задач ориентации и стабилизации малых космических аппаратов. Также показано, что отсутствует альтернатива применения в качестве исполнительных механизмов двигателей маховиков, которые по ресурсным и точностным показателям во много раз превосходят другие исполнительные органы. Получены аналитические соотношения, позволяющие определить необходимые параметры двигателей маховиков, а также параметры компоновочной схемы. Получен подход к оцениванию эффективности применения той или иной компоновки двигателей маховиков, основанный на оценке следа корреляционной матрицы ошибок моментов управления.*

**Ключевые слова:** избыточность, двигатели-маховики, электромагнитные исполнительные органы управления, матрица направляющих косинусов, отказ.

### Введение

Одной из важных тенденций развития космической техники для реализации конкретных целевых задач, связанных с наблюдением за определенными районами Земли в ограниченный период времени, астрономическими исследованиями, отработками новых технологий создания перспективных космических аппаратов (КА), является создание малых космических аппаратов (МКА) [1, 2]. Кроме этого, применение технологии создания МКА, позволяет создавать орбитальные системы на базе взаимодействующих МКА, которые превосходят по своим функциональным возможностям современные КА с большими платформами, что подчеркивает актуальность и необходимость создания МКА для решения разнообразных задач.

Обеспечение функций целевой аппаратуры, устанавливаемой на МКА, и сроки существования КА на орбите, ставят достаточно серьезные требования к точностным, энергетическим и ресурсным показателям систем ориентации и стабилизации, выполнение которых недостижимо применением классических избыточных схем в условиях дефицита массы и габаритов. Именно поэтому необходима разработка новых подходов к формированию ресурсных систем и подсистем МКА, обеспечивающих достижение выполнения сформированных требований.

При разработке систем ориентации и стабилизации (СОС) МКА в качестве элементов, создающих управляющие моменты, применяются электромеханические исполнительные органы (ЭМИО) – управ-

ляющие двигатели маховики (ДМ). ДМ на сегодняшний день невозможно противопоставить по требованиям точности ориентации аппарата и ресурса функционирования другим типам исполнительных органов СОС МКА длительного функционирования. При этом подобные ЭМИО являются наиболее массо-габаритными и энергопотребляющими устройствами СОС, постоянно задействованными в процессе функционирования МКА. В связи с этим выбор количества ДМ, их параметров и оптимизация вариантов расположения избыточного количества ЭМИО на борту МКА с целью формирования устойчивого управления при возникновении отказов ДМ представляет собой актуальную научную проблему.

### 1. Постановка задачи исследования

Динамические требования к ЭМИО во многом определяются множеством значений управляющих моментов  $|M_y(t)| \leq M_{yT}$ , которые необходимо формировать для перевода МКА из произвольного начального состояния  $x_0 \in R^n$  в требуемое  $x(t) \in G_1$  с определенными показателями качества и за ограниченный промежуток времени  $t$ . Таким образом, изменение вектора  $M_y(t)$  в указанной области в соответствии с реализуемыми в СОС законами управления должно обеспечивать требуемое управление параметрами движения МКА. Очевидно, что не зависимо от количества и способа расположения

ДМ на борту МКА, как минимум должно быть обеспечено выполнение условия  $M_y(t) \subset M_{yT}$ . Выполнения сформированного условия позволит утверждать в первом приближении, что величина суммарного управляющего момента  $M_y$  обеспечит изменение угловых параметров МКА с требуемым угловым ускорением, иными словами, сформированные управления обеспечат вращение МКА с требуемым угловым ускорением в желаемом направлении.

Для дальнейшего изложения, введем связанную с МКА правую декартовую систему координат  $Ox_{yz}$ , так, чтобы начало координат т. О совпадало с центром масс МКА, а оси совпадали с главными центральными осями инерции МКА. Поскольку для МКА важным параметром является как угловая скорость вращения, так и угловое ускорение, то в общем виде область возможных управляющих моментов ограничена эллипсоидальной поверхностью следующего вида:

$$\left(\frac{M_{yTx}}{J_x \dot{\omega}_x}\right)^2 + \left(\frac{M_{yTy}}{J_y \dot{\omega}_y}\right)^2 + \left(\frac{M_{yTz}}{J_z \dot{\omega}_z}\right)^2 = 1, \quad (1)$$

где  $M_{yTx}$ ,  $M_{yTy}$ ,  $M_{yTz}$  – проекции суммарного требуемого реактивного момента ЭМИО на оси связанной с МКА системы координат  $Ox_{yz}$ ;

$\dot{\omega}_x$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $\dot{\omega}_z$  – проекции максимально требуемого углового ускорения МКА на оси связанной системы координат  $Ox_{yz}$ .

Уравнение (1) представляет собой область требуемых значений реактивных моментов, необходимых для обеспечения вращения МКА с требуемым угловым ускорением при располагаемых моментах инерции.

Таким образом, при разработке СОС МКА необходимо выбирать параметры и располагать ЭМИО таким образом, чтобы для области действительных значений результирующего реактивного момента, создаваемых ДМ МКА выполнялось условие:

$$M_y \subset M_{yT}. \quad (2)$$

Построение области множества значений управляющих моментов, создаваемых ЭМИО, задача более сложная. В зависимости от количества и расположения ЭМИО относительно главных осей МКА, возможно получить форму области управления наиболее соответствующую заданным моментам инерции МКА как при номинальном режиме работы ЭМИО, так и при возникновении частичных и полных отказов элементов ЭМИО, а также позволяет сформировать требования к ЭМИО по количе-

ству элементов в блоке и способах расположения ЭМИО на МКА. Вопросы выбора количества и вариантов расположения ЭМИО на МКА с целью обеспечения требуемых параметров углового движения МКА при отсутствии отказов в ЭМИО и при возникновении отказов в блоке управляющих ДМ.

## 2. Определение количества избыточных ДМ СОС симметричного МКА

Для обеспечения отказоустойчивостью элементов СОС МКА необходимо наличие разного рода избыточностей. Так как ЭМИО относятся к числу элементов диагностирования с известными входами, то при решении задач диагностирования технического состояния и восстановления работоспособности ЭМИО в режиме реального времени, для обеспечения их отказоустойчивостью наличие структурной избыточности необязательно, при условии, что выполнимы критерии полной диагностируемости [3]. Однако такие виды избыточностей, как параметрическая, сигнальная, и алгоритмическая обеспечивают парирование только тех отказов, которые приводят к частичной потере работоспособности, а парирование полностью отказавшего ЭМИО возможно только применением структурной избыточности. Здесь под структурной избыточностью понимается совокупность дополнительных средств, предназначенных для выполнения функций основных средств в случае полного отказа последних. Характерной особенностью применения структурной избыточности является также то, что она позволяет помимо компенсации отказов, которые не парируются другими видами избыточностей улучшить ряд показателей качества систем управления (точность, надежность, готовность и др.). Несмотря на указанные достоинства, применение структурной избыточности влечет за собой увеличение массы, габаритов, энергопотребления, усложнение алгоритмов обработки информации, что является не маловажным для такого элемента СОС МКА, как ДМ. Эти обстоятельства определяют необходимость решения задачи обеспечения отказоустойчивостью ЭМИО КЛА с минимальной структурной избыточностью.

Как уже отмечалось, ЭМИО необходимы для создания управляющих моментов относительно соответствующих осей связанной системы координат МКА. Таким образом минимально необходимое число ДМ, обеспечивающее полную управляемость МКА, равно трем. Кроме того, очевиден тот факт, что при полном отказе одного из ДМ, никакая компоновка трех ЭМИО не позволит на двух ДМ обеспечить полную пространственную управляемость МКА. Иными словами, для обеспечения

полной управляемости МКА при полном отказе одного из ДМ, необходимо вводить дополнительный ЭМИО, при этом остается открытым вопрос о вариантах расположения избыточного количества ДМ на борту МКА.

Для ответа на этот вопрос рассмотрим уже применяемые варианты расположения ЭМИО и сформируем критерии расположения ДМ.

### 3. Конфигурация схемы избыточных ДМ «четырёхгранная пирамида»

Рассмотрим систему ДМ, оси которых расположены параллельно боковым ребрам четырёхгранной пирамиды (рис. 1).

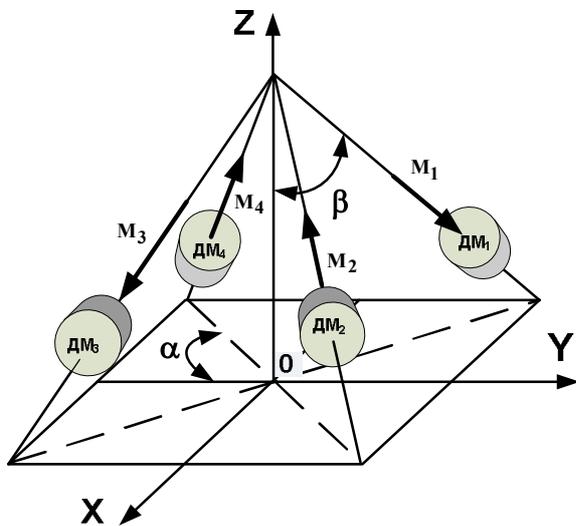


Рис. 1. Расположение ДМ по ребрам четырёхгранной пирамиды

Для пирамидального расположения ДМ искомыми параметрами, являются углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Для определения значений углов воспользуемся критерием оценки эффективности применения маховичной системы, основанном на анализе следа корреляционной матрицы ошибок результирующего вектора управляющих моментов:

$$SpD = \sum_{i=1}^3 d_{ij}, \quad (3)$$

где  $D = [M^T M]^{-1}$  – ковариационная матрица;

$M$  – матрица направляющих косинусов, определяющая взаимное расположение осей приложения управляющих моментов ДМ и связанной системы координат.

Для компоновки, представленной на рис. 1, матрица направляющих косинусов будет равна:

$$M = \begin{bmatrix} -\sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha & -\cos \beta \\ \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \cos \alpha & -\cos \beta \\ \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & -\cos \beta \\ -\sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & -\cos \beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

На основании тождества (3), с учетом того, что транспонированная матрица направляющих косинусов равна:

$$M^T = \begin{bmatrix} -\sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \sin \alpha & \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \alpha & \sin \beta \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha \\ -\cos \beta & -\cos \beta & -\cos \beta & -\cos \beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а корреляционная матрица:

$$D = [M^T M]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4\sin^2 \beta \sin^2 \alpha} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4\sin^2 \beta \cos^2 \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4\cos^2 \beta} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

то след корреляционной матрицы ошибок результирующего вектора управления, получим в следующем виде:

$$F = SpD = \frac{1}{4\sin^2 \beta \sin^2 \alpha} + \frac{1}{4\sin^2 \beta \cos^2 \alpha} + \frac{1}{4\cos^2 \beta}. \quad (7)$$

Анализ выражения (7), показывает, что его слагаемые представляют собой гиперболические функции. Для значения следа дисперсионной матрицы очевиден тот факт, что чем меньше это значение, тем приемлемей распределение управляющего момента по осям связанной с МКА системой координат. Поскольку, полученные функции имеют гиперболический вид, то экстремум функций совпадает с ее минимумом.

Минимум зависимости (7) определим для случая выполнения условия  $\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0 \cup \frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$ :

$$\frac{\delta F}{\delta \alpha} = -\frac{\cos \alpha}{2\sin^2 \beta \sin^3 \alpha} + \frac{\sin \alpha}{2\sin^2 \beta \cos^3 \alpha} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\delta F}{\delta \beta} = -\frac{\cos \beta}{2\sin^3 \beta \sin^2 \alpha} - \frac{\cos \beta}{2\sin^3 \beta \cos^2 \alpha} + \frac{\sin \beta}{2\cos^3 \beta} = 0. \quad (9)$$

Выполнив ряд преобразований с равенством (8), получим:

$$\cos \alpha = \sin \alpha. \quad (10)$$

Тождество (10) выполнимо при условии, что:

$$\alpha = 45^\circ. \quad (11)$$

Используя результат для угла  $\alpha$ (11), и выполнив ряд преобразований с тождеством (9), определим значение для угла  $\beta$ :

$$\beta = \arctg(\sqrt{2}) = 54,735^\circ \approx 55^\circ. \quad (12)$$

Полученные значения углов (11) – (12) четырехгранной пирамиды (рис.1), представляют собой параметры расположения избыточного количества ДМ, позволяющие равномерно распределять результирующий управляющий момент по осям связанной системы координат для симметричного МКА. Кроме того, результаты (10) – (11) полностью обеспечивают выполнение условия (2) для симметричного МКА при условии работоспособности всех четырех ДМ.

#### 4. Определение конфигурация схемы избыточных ДМ симметричного МКА при полном отказе одного

Определим параметры четырехгранной пирамиды ДМ для симметричного МКА при полном отказе одного из ДМ. Для случая полного отказа одного ДМ матрица направляющих косинусов (4) примет вид:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \sin\beta \sin\alpha & \sin\beta \cos\alpha & -\cos\beta \\ \sin\beta \sin\alpha & -\sin\beta \cos\alpha & -\cos\beta \\ -\sin\beta \sin\alpha & -\sin\beta \cos\alpha & -\cos\beta \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Корреляционная матрица ошибок результирующего вектора управляющего момента при одном полностью неработоспособном ДМ равна:

$$D = [M^T M]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2\sin^2\beta \sin^2\alpha} & -\frac{1}{2\sin^2\beta \sin 2\alpha} & \frac{1}{2\sin\alpha \sin 2\beta} \\ -\frac{1}{2\sin^2\beta \sin 2\alpha} & \frac{1}{2\sin^2\beta \cos^2\alpha} & -\frac{1}{2\sin\alpha \sin 2\beta} \\ \frac{1}{2\sin\alpha \sin 2\beta} & -\frac{1}{2\sin\alpha \sin 2\beta} & \frac{1}{2\cos^2\beta} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

След матрицы (14) с учетом (3) будет равен:

$$F = SpD = \frac{1}{2\sin^2\beta \sin^2\alpha} + \frac{1}{2\sin^2\beta \cos^2\alpha} + \frac{1}{2\cos^2\beta}. \quad (15)$$

Несложно показать, что независимо от того, какой из четырех ДМ полностью не работоспособен, в общем виде след корреляционных матриц ошибок результирующего вектора управляющего момента для каждого случая будет иметь вид идентичный (15). Кроме того, полученная зависимость следа матрицы от углов установки ДМ для случая, когда работоспособными остаются только три ДМ (15) аналогична по структуре полученной ранее зависимости следа матрицы для 4-х работоспособных ДМ (7), и, соответственно, принимает минимальное значение при аналогичных углах установки. Отличны зависимости (15) и (7) только масштабными коэффициентами, которые показывают, что при отказе одного из ДМ след матрицы увеличивается, что соответствует ухудшению распределения результирующего управляющего момента по осям связанной с МКА системы координат.

Кроме того, по своему виду зависимости (15) и (7) аналогичны (1), что позволяет сравнением зависимостей формировать требования к количеству и параметрам ДМ избыточного блока ЭМИО.

#### Заключение

Рассмотрена задача выбора количества элементов в избыточном блоке ЭМИО и варианты расположения ДМ в этом блоке с целью обеспечения требуемого распределения результирующего управляющего момента по осям связанной системы координат симметричного МКА.

Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач параметрической оптимизации, являющихся актуальными для МКА в условиях экономии энергопотребления и минимизации массогабаритных показателей

Предложен подход к решению поставленной задачи путем сведения ее к задаче определения параметров расположения на основании минимизации следа корреляционной матрицы ошибок вектора управления.

#### Литература

1. Игнатов А.И. Анализ динамических возможностей систем управления малым малым космическим аппаратом, построенных на базе двигателей-маховиков / А.И. Игнатов, А.А. Давыдов, В.В. Сазонов. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005. – 30 с.
2. Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований ПО проекту «КОРОНАС -ФОТОН»: труды рабочего совещания / Институт космических исследований РАН под ред. Р.Р. Назирова. И.В. Чулкова, В.Н. Юрова. – Т.: ИКИ РАН, 2009. – 250 с.

3. Фирсов С.Н. Диагностирование функционального состояния электромеханического блока космического аппарата / С.Н. Фирсов, А.Н. Таран // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 2 (83). – С. 174-181.

*Поступила в редакцию 1.11.2010*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. авиационных приборов и измерений Н.В. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

**ФОРМУВАННЯ НАДЛИШКОВОГО БЛОКУ ДВИГУНІВ-МАХОВИКІВ  
СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ І СТАБІЛІЗАЦІЇ СИМЕТРИЧНОГО  
МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМІЧНОГО АПАРАТА**

*О.О. Лученко, О.М. Таран, С.М. Фірсов*

У статті відображена необхідність та актуальність застосування надлишкових схем електромагнітних виконавчих органів для вирішення завдань орієнтації та стабілізації малих космічних апаратів. Також показано, що відсутня альтернатива застосування в якості виконавчих механізмів двигунів-маховиків, які за ресурсними і точнісними показниками у багато разів перебільшують інші виконавчі органи керування. Отримано аналітичні співвідношення, що дозволяють визначити необхідні параметри двигунів-маховиків, а також параметри компоновальної схеми. Отримано підхід до оцінювання ефективності застосування тієї чи іншої компоновки двигунів-маховиків, заснований на оцінці сліду кореляційної матриці помилок моментів управління.

**Ключові слова:** надмірність, двигуни-маховики, електромагнітні виконавчі органи управління, матриця напрямних косинусів, відмова.

**FORMATION OF REDUNDANT-MOTOR FLYWHEEL SYSTEM ORIENTATION  
AND STABILIZATION OF SYMMETRIC SMALL-SIZED SPACE AIRCRAFT**

*O.A. Luchenko, A.N. Taran, S.N. Firsov*

The article reflects the need and relevance of the use of redundant circuits of electromagnetic executive bodies to solve the problems of orientation and stabilization of the small space aircrafts. Also shows that there is no alternative to use as the executive mechanism of engine flywheels, which has resource and accuracy many times exceeds the other executive bodies. Analytical relations that allow determine the necessary parameters of the engine flywheel and the parameters of assembly scheme are obtained. The approach to evaluation of the effectiveness of a particular engine layout which is based on the estimation of the trace of the control moments errors correlation matrix is offered.

**Key words:** redundancy, engines, flywheels, electromagnetic executive unit, directing cosine matrix, fault.

**Лученко Олег Алексеевич** – Генеральный директор – Главный конструктор ОАО «Хартрон-Плант», Харьков, Украина.

**Таран Александр Николаевич** – ассистент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Фирсов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательными аппаратами Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.