

УДК 629.78 : 681.51

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЛАСТЕРОВ МАХОВИКОВ И ГИРОДИНОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ РОБОТОМ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

© 2021 Е.И. Сомов^{1,2}, С.А. Бутырин^{1,2}, Т.Е. Сомова²

¹ Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Самара, Россия

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 06.04.2021

Проводится сравнительный анализ динамических свойств кластеров двигателей-маховиков и гироскопов для управления ориентацией космического робота при до-выведении на геостационарную орбиту и сближении с геостационарным спутником для его технического обслуживания. Представляются результаты анализа для типовых поворотных манёвров робота и выделяются условия, при которых проявляются преимущества кластера гироскопов.

Ключевые слова: космический робот, управление ориентацией, маховики, гироскопы, сравнение динамических свойств

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-84-90

Работа поддержана РФФИ, грант 20-08-00779.

ВВЕДЕНИЕ

Информационные спутники на геостационарной орбите (ГСО) имеют необходимый срок службы до 25 лет при их обслуживании космическими роботами-манипуляторами (КРМ) с системой управления движением (СУД), где используются электрореактивные двигательные установки (ЭДУ) с закрепленными на корпусе КРМ электрореактивными двигателями (ЭРД) двух типов: (i) плазменные ЭРД для до-выведения КРМ на ГСО и сближения с геостационарным спутником; (ii) термokatалитические ЭРД с широтно-импульсной модуляцией тяги при техническом обслуживании такого спутника, включая его облёт для визуальной инспекции состояния, причаливание, дозаправка топливом его ЭДУ и др. В процессе длительного (около 3 месяцев при 125 витках орбиты [1,2]) до-выведения СУД на каждом витке должна обеспечивать по два пространственных поворотных маневра (ПМ) корпуса КРМ на угол $\Phi \leq \pi$ вокруг соответствующей оси Эйлера при регу-

лярном наведении крупногабаритных панелей солнечных батарей (СБ) на Солнце для энергоснабжения плазменной ЭДУ. Аналогичные пространственные ПМ корпуса КРМ необходимо выполнять при его сближении с геостационарным спутником и инспекции его состояния.

Для управления ориентацией информационных спутников (связи, телевидения, наблюдения Земли) традиционно применяются электромеханические приводы в виде кластеров реактивных двигателей-маховиков (ДМ) либо двухступенных силовых гироскопов – гироскопов (ГД). Выбор электромеханического привода СУД любого космического аппарата (КА) основан на требованиях его целевых задач. Здесь основными являются динамические показатели – размер и форма областей вариации векторов механического момента и кинетического момента (КМ), потребные мощность и энергия кластеров ДМ и ГД, а дополнительными показателями – масса, габариты, а также технологическая сложность и надежность при длительной работе в космических условиях.

Задача данной статьи заключается в сравнительном анализе основных динамических характеристик кластеров ДМ и ГД для управления ориентацией КРМ при до-выведении на ГСО, сближении с геостационарным спутником и визуальной инспекции его технического состояния.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАХОВИКОВ И ГИРОДИНОВ

Реактивный маховик (reaction wheel, RW) по существу является электрическим двигателем с массивным маховиком, который с переменной скоростью вращается относительно

Сомов Евгений Иванович, ведущий научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail e_somov@mail.ru

Бутырин Сергей Анфимович, старший научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник лаборатории «Моделирования систем управления» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ, E-mail butyrinsa@mail.ru

Сомова Татьяна Евгеньевна, научный сотрудник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ. E-mail te_somova@mail.ru

оси, неподвижной в корпусе КА, и при изменении вектора КМ \mathbf{h}_w с ограниченным модулем $|\mathbf{h}_w| \equiv h_w \leq h_w^m$ создаёт вектор механического момента $\mathbf{m}_w = \dot{\mathbf{h}}_w$ с модулем $|\mathbf{m}_w| \equiv m_w$.

Гиродин также имеет массивный ротор с постоянным модулем $h_g = \text{const}$ вектора собственного КМ $\mathbf{h}_g(\beta)$, но такой ротор может поворачиваться электроприводом на произвольный угол β в экваториальной плоскости относительно оси его подвеса с фиксированным в корпусе КА ортом \mathbf{g} , создавая при этом вектор механического момента $\mathbf{m}_g(\beta) = \dot{\beta} \mathbf{g} \times \mathbf{h}_g(\beta)$ с модулем $|\mathbf{m}_g| \equiv m_g = h_g \dot{\beta}$. Отметим, что направление механического момента $\mathbf{m}_g(\beta)$ изменяется в плоскости, ортогональной как орту \mathbf{g} оси подвеса ГД, так и вектору $\mathbf{h}_g(\beta)$ его КМ, в отличие от варианта применения ДМ, где направление механического момента \mathbf{m}_w зафиксировано в корпусе КА.

Далее при анализе мгновенной мощности (размерность [Вт (w)]=[кг м²/с³] = [Нм/с]) и потребляемой энергии (размерность [Дж (j)]=[Вт с]) кластеров ДМ и ГД в международной системе единиц на некотором интервале $t \in [0, T]$ применяются следующие соотношения [3]:

мощность $P_w(t)$ и потребляемая энергия $E_w(t)$ одного ДМ

$$P_w(t) = 1000 m_w + 4.51 h_w^{0.47},$$

$$E_w(t) = \int_0^t P_w(\tau) d\tau; \quad (1)$$

мощность $P_g(t)$ и потребляемая энергия $E_g(t)$ одного ГД

$$P_g(t) = 20 h_g^{0.4} \dot{\beta}(t) + 4.51 h_g^{0.47},$$

$$E_g(t) = \int_0^t P_g(\tau) d\tau. \quad (2)$$

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используются простая явная модель углового движения КРМ в виде свободного твердого

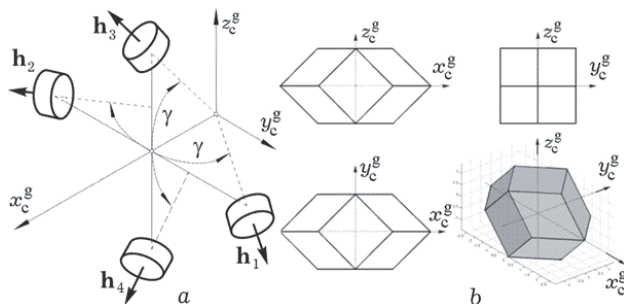


Рис. 1. Схема GE и область вариации КМ

тела с массой m и тензором инерции \mathbf{J} , который на заданном интервале времени $t \in [0, T]$ совершает пространственный ПМ с помощью кластера четырех ДМ по схеме *General Electric (GE)*, рис.1, либо кластера на основе двух пар ГД по кратной схеме *Scissored Pair Ensemble (2-SPE)*, рис. 2. Применяются инерциальная система координат (ИСК) $O_{\oplus} X^1 Y^1 Z^1$, связанная с КРМ система координат (ССК) $Oxyz$, стандартные символы $\{\cdot\} = \text{col}(\cdot)$, $[\cdot] = \text{line}(\cdot)$, $(\cdot)^t, [\cdot \times]$ и \circ, \sim для векторов, матриц и кватернионов, а также $S_\alpha \equiv \sin \alpha$, $C_\alpha \equiv \cos \alpha$ и $i = 1, 2, \dots, m \equiv 1 \div m$.

Пространственное угловое перемещение ССК робота в ИСК определяется кватернионом ориентации $\mathbf{\Lambda}(t)$, векторами угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ и углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \dot{\boldsymbol{\omega}}(t)$. Вектор КМ любого из двух рассматриваемых кластеров представляется в ССК столбцом $\mathbf{H} = \{\mathbf{H}_i\}$, $i = 1 \div 3$. При отсутствии внешних возмущающих моментов будем считать, что вектор кинетического момента КРМ совместно с любым из двух электромеханических приводов удовлетворяет условию

$$\mathbf{G} = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega}(t) + \mathbf{H}(t) \equiv \mathbf{0}. \quad (3)$$

В этом случае модель углового движения робота имеет простейший вид

$$\dot{\mathbf{\Lambda}} = \mathbf{\Lambda} \circ \boldsymbol{\omega} / 2; \quad \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) = -\mathbf{H}^*(t) \equiv \mathbf{M}, \quad (4)$$

где столбец $\mathbf{M} = \{\mathbf{M}_i\}$ представляет вектор управляющего момента соответствующего кластера и применяется символ $(\cdot)^*$ локальной производной вектора по времени.

Пусть для простоты каноническая система координат $O_c^g x_c^g y_c^g z_c^g$ (рис. 1a) кластера ДМ совпадает с ССК. Тогда матрица $\mathbf{A}_4 = [\mathbf{a}_p]$, $p = 1 \div 4$, расположения осей вращения ДМ в ССК формируется из столбцов

$$\mathbf{a}_1 = \{C_\gamma, S_\gamma, 0\}; \quad \mathbf{a}_2 = \{C_\gamma, -S_\gamma, 0\};$$

$$\mathbf{a}_3 = \{C_\gamma, 0, S_\gamma\}; \quad \mathbf{a}_4 = \{C_\gamma, 0, -S_\gamma\},$$

столбец $\mathbf{h} = \{h_p\}$, составленный из КМ h_p отдельных ДМ, связан с вектором \mathbf{H} КМ этого кластера соотношением $\mathbf{H} = \mathbf{A}_4 \mathbf{h}$, а вектор управляющего момента кластера ДМ $\mathbf{M} = -\mathbf{H}^* = -\mathbf{A}_4 \mathbf{h}^*$.

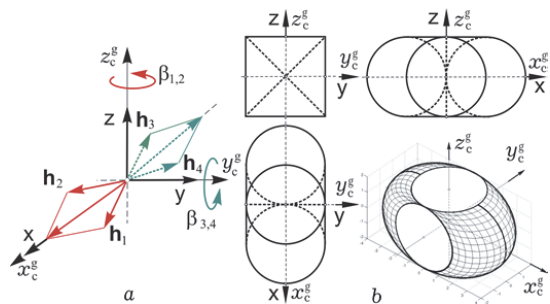


Рис. 2. Схема 2-SPE и область вариации КМ

Наконец, если не учитывать моменты сил сухого по осям вращения ДМ, то столбец управляющих моментов $\mathbf{m} = \{m_p\}$ по этим осям ДМ вычисляется по явному соотношению

$$\mathbf{m} = \{m_p\} = \mathbf{h}^* + J_r \mathbf{A}_4^t \dot{\boldsymbol{\omega}}, \quad (5)$$

где используется осевой момент инерции J_r маховика, одинаковый для всех ДМ. Каждый ДМ имеет ограниченные по модулю ресурсы по управляющим и кинетическим моментам, именно $|m_p(t)| \leq m^m$ и $|h_p(t)| \leq h^m$.

Столбец $\mathbf{H}(\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{h}_g \mathbf{h}(\boldsymbol{\beta}) \equiv \mathbf{h}_g \Sigma \mathbf{h}_p(\boldsymbol{\beta}_p)$ представляет вектор КМ кластера ГД по схеме 2-SPE, см. рис. 2а, с векторами КМ $\mathbf{h}_p(\boldsymbol{\beta}_p) = \mathbf{h}_g \mathbf{h}_p(\boldsymbol{\beta}_p)$ отдельных ГД, $p = 1 \div 4$, где $|\mathbf{h}_p| = 1$ и столбец $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_p\}$ составлен из произвольных углов поворота ГД относительно осей их подвеса в корпусе робота. Вектор управляющего момента кластера ГД представляется столбцом

$$\mathbf{M} = \{M_i\} = -\mathbf{H}^* = -\mathbf{h}_g \mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}) \dot{\boldsymbol{\beta}}, \quad (6)$$

где прямоугольная матрица $\mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}) = \partial \mathbf{h}(\boldsymbol{\beta}) / \partial \boldsymbol{\beta}$ и все компоненты столбца $\dot{\boldsymbol{\beta}} = \{\dot{\beta}_p\}$, которые считаются управлениями гиродвинов, имеют ограничение $|\dot{\beta}_p(t)| \leq \dot{\beta}^m \quad \forall p = 1 \div 4$.

Ставится задача расчета и сравнения динамических показателей кластеров ДМ и ГД (области вариации векторов кинетического и управляющего моментов, см. рис. 1 б и 2 б, потребляемые мощность и энергия) для управления ориентацией КРМ в типовых пространственных ПМ в процессах его до-выведения на ГСО, сближения с геостационарным спутником и его инспекции.

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КЛАСТЕРОВ ПРИ ТИПОВЫХ МАНЕВРАХ РОБОТА

Для расчета динамических характеристик кластеров ДМ и ГД используется постановка классической обратной задачи динамики твердого тела: известно изменение его координат в процессе пространственного углового перемещения на интервале времени $t \in [0, T]$ – кватернион $\boldsymbol{\Lambda}(t)$, векторы угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ и углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \dot{\boldsymbol{\omega}}(t)$, необходимо определить вектор управляющего воздействия для электромеханического привода, который создаёт вектор управляющего механического момента, прилагаемого к подвижному твердому телу.

Сравниваемые кластеры обладают координатной избыточностью, поэтому необходимо наложить дополнительные связи для её исключения.

Для однозначного распределения векторов \mathbf{H} и \mathbf{M} между четырьмя ДМ применяется явная

функция настройки кластера ДМ. Вводится вектор $\mathbf{h} \equiv \{x, y, z\} = \mathbf{H}/h^m = \mathbf{A}_4 \mathbf{h}$ нормированного КМ кластера МД с компонентами $x = x_1 + x_2$, где $x_1 = C_\gamma(h_1 + h_2)$; $x_2 = C_\gamma(h_3 + h_4)$ и $y = S_\gamma(h_1 - h_2)$; $z = S_\gamma(h_3 - h_4)$, а также нормированный вектор КМ двигателей-маховиков $\mathbf{h} = \{h_p\}$, $h_p = \mathbf{h}_p / h^m$ с условием $|h_p| \leq 1$. Распределение векторов \mathbf{h} и \mathbf{M} осуществляется по явному закону

$$f_p = \tilde{x}_1 - \tilde{x}_2 + \rho(\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 - 1) = 0, \quad (7)$$

где $0 < \rho < 1$, $\rho = \text{const}$; $\tilde{x}_1 = x_1 / q_y$;

$$\tilde{x}_2 = x_2 / q_z, \quad q_s = (4C_\gamma^2 - s^2)^{1/2}, \quad s = y, z,$$

и далее при обозначениях $a \equiv x/2$, $b \equiv q_y q_z - a^2$ по соотношениям:

$$(i) \quad q \equiv q_y + q_z;$$

$$\Delta \equiv (q/\rho)(1 - (1 - 4\rho[(q_y - q_z)a + \rho b]/q^2)^{1/2});$$

$$x_1 = (x + \Delta)/2, \quad x_2 = (x - \Delta)/2;$$

(ii) определение вектора \mathbf{h}^* по явной формуле

$$\mathbf{h}^* = \{(\{\mathbf{A}_4, \mathbf{a}^f\}^{-1} \{-\mathbf{M}, 0\})\},$$

где строка $\mathbf{a}^f = [a_p^f] \equiv \partial f_p / \partial \mathbf{h}$ имеет компоненты

$$a_{1,2}^f = \frac{2C_\gamma}{q_y^3} [2C_\gamma^2 \pm S_\gamma^2 h_2 (h_1 - h_2)] [1 + \rho \frac{C_\gamma (h_3 + h_4)}{q_z}];$$

$$a_{3,4}^f = \frac{2C_\gamma}{q_z^3} [2C_\gamma^2 \mp S_\gamma^2 h_4 (h_3 - h_4)] [1 + \rho \frac{C_\gamma (h_1 + h_2)}{q_y}];$$

(iii) вычисление столбца \mathbf{m} управляющих моментов ДМ по явному соотношению (5).

Аналогичный прием используется для явной настройки кластера ГД. Вводится вектор $\mathbf{h} \equiv \{x, y, z\} = \mathbf{H}/h_g$ нормированного КМ кластера ГД с компонентами $x = \Sigma x_p$, $y = \Sigma y_p$ и $z = \Sigma z_p$, где

$$x_p = \cos \beta_p, \quad y_p = \sin \beta_p, \quad p = 1, 2;$$

$$x_p = \sin \beta_p, \quad z_p = \cos \beta_p, \quad p = 3, 4,$$

и формируются значения функций

$$q_s = (4 - s^2)^{1/2}, \quad s = y, z;$$

$$\tilde{x}_1 = (x_1 + x_2) / q_y; \quad \tilde{x}_2 = (x_3 + x_4) / q_z.$$

Затем для распределения векторов \mathbf{H} и \mathbf{M} между четырьмя ГД применяется закон настройки (7), получают значения переменных $x_1 = (x + \Delta)/2$, $x_2 = (x - \Delta)/2$ и в результате искомым столбец $\dot{\boldsymbol{\beta}}$, составленный из командных скоростей прецессии ГД $\dot{\beta}_p$, вычисляется по явной формуле

$$\dot{\boldsymbol{\beta}} = \{(\{\mathbf{A}_h(\boldsymbol{\beta}), \mathbf{a}^f\})^{-1} \{-\mathbf{M}/h_g, 0\}\}, \quad (8)$$

где строка $\mathbf{a}^f = [a_p^f] \equiv \partial f_p / \partial \boldsymbol{\beta}$. Как отмечено выше, в процессе до-выведения КРМ на ГСО с

помощью плазменной ЭДУ корпус космического робота разворачивается на каждом витке орбиты и здесь допускаются большие длительности разворотов. При сближении же с геостационарным спутником, а также визуальной инспекции его технического состояния, КРМ должен выполнять более быстрые пространственные ПМ. Данные обстоятельства учитывались при назначении типовых поворотных манёвров робота, в процессе выполнения которых сравниваются динамические характеристики электромеханических кластеров ДМ и ГД.

Рассматривался КРМ с массой $m = 3000$ кг и тензором $\mathbf{J} = \text{diag}(3248, 2348, 3640)$ кгм², который оснащен кластером 4 ДМ с углом установки $\gamma = \pi/4$ на рис. 2 а, параметрами $m^m = 0.2$ Нм и $h^m = 30$ Нмс, либо кластером 4 ГД с параметрами $\dot{\beta}^m = 1$ рад/с и $h_g = 30$ Нмс. Отметим, что электромеханические приводы с такими параметрами уже реализованы в России.

Структура тестовых пространственных ПМ робота выбрана в классе его угловых перемещений по кратчайшему пути (вокруг оси Эйлера) из заданного начального (initial) состояния покоя

$$t = t_i = 0; \Lambda(t_i) \equiv \Lambda_i; \omega(t_i) \equiv \omega_i = \mathbf{0} \quad (9)$$

в заданное конечное (final) состояния покоя

$$t = t_f = T; \Lambda(t_f) \equiv \Lambda_f; \omega(t_f) \equiv \omega_f = \mathbf{0}, \quad (10)$$

когда модуль $\varepsilon(t)$ вектора углового ускорения КРМ $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ сначала принимает фиксированные значения $\varepsilon = \varepsilon^* \equiv \text{const} \quad \forall t \in [t_i, t_1)$, $\varepsilon = 0 \quad \forall t \in [t_1, t_2)$ и далее ускорение $\varepsilon(t) \quad \forall t \in [t_2, t_f]$ изменяется по линейному закону с условиями для модулей вектора ускорения $\varepsilon(t_f) = 0$ и вектора угловой скорости $\omega_f = \mathbf{0}$ в момент времени t_f завершения поворотного маневра.

Кватернион $\Lambda(t)$ ориентации КРМ в ИСК представляется в виде $\Lambda(t) = \Lambda_i \circ \Lambda^e(t)$ с кватернионом рассогласования $\Lambda^e(t) = (\cos(\Phi(t)/2), \mathbf{e}^e \sin(\Phi(t)/2)$, где используются угол $\Phi(t)$ собственного поворота при краевых условиях $\Phi(t_i) \equiv \Phi_i = 0$, $\Phi(t_f) \equiv \Phi_f$ и орт \mathbf{e}^e оси Эйлера, который

определяется по значению кватерниона

$$\Lambda^e(t_f) = \tilde{\Lambda}_i \circ \Lambda_f.$$

При движении КРМ вокруг оси Эйлера с заданным вектором углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \varepsilon(t) \mathbf{e}^e$ модуль $\omega(t)$ вектора угловой скорости $\boldsymbol{\omega}(t) = \omega(t) \mathbf{e}^e$ и угол $\Phi(t)$ собственного поворота вычисляются $\forall t \in [t_i, t_f]$ по аналитическим соотношениям

$$\omega(t) = \int_{t_i}^t \varepsilon(\tau) d\tau; \quad \Phi(t) = \int_{t_i}^t \omega(\tau) d\tau.$$

Для сравнения динамических характеристик кластеров ДМ и ГД в процессе до-выведения КРМ на ГСО рассматривался его пространственный поворотный маневр длительностью $T = 600$ с (20 минут) при краевых условиях (9), (10) с численными данными

$$\Lambda_i = (0.9574428, -0.057310, 0, 0.282880);$$

$$\Lambda_f = (0.420565, 0.315970, 0, -0.850464),$$

что приводит к кватерниону рассогласования ориентации $\Lambda^e(t)$ с ортом оси Эйлера

$$\mathbf{e}^e = \{0.330064, -0.041069, -0.943065\}$$

при изменении угла собственного поворота $\Phi(t)$ с краевыми условиями $\Phi_i = 0$, $\Phi_f = 163.44$ град.

На рис. 3 представлены потребные изменения векторов ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ и скорости $\boldsymbol{\omega}(t)$ КРМ $\forall t \in [t_i, t_f]$ для выполнения им пространственного ПМ с учетом заданных ограничений на модули ускорения 0.004 град/с² и скорости 0.6 град/с. Отметим, что в общем случае значение ε^* может отличаться от пикового значения модуля ускорения $\varepsilon(t_2) = 0.004$ град/с², как на рис. 3. Здесь цветом выделены изменения переменных по рысканию (синий цвет, ось x), крену (зеленый, ось y) и тангажу (красный цвет, ось z), а модули векторов отмечены черным цветом.

Потребные изменения векторов управляющих $\mathbf{M} = \mathbf{J}\boldsymbol{\varepsilon}$ и кинетических $\mathbf{H} = -\mathbf{J}\boldsymbol{\omega}$ моментов сравниваемых электромеханических приводов приведены на рис. 4. Здесь

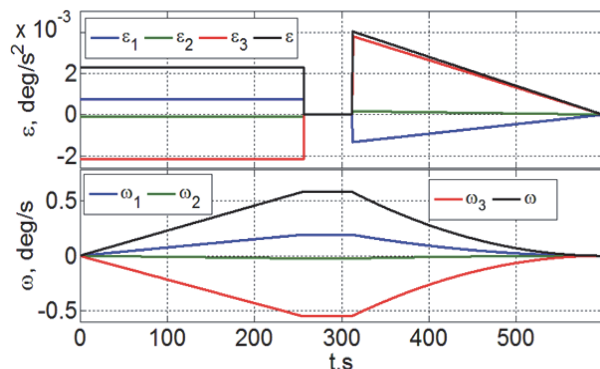


Рис. 3. Угловые ускорения и скорости КРМ

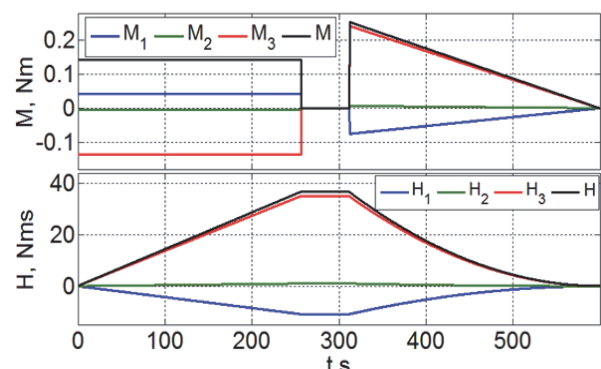


Рис. 4. Управляющие и кинетические моменты

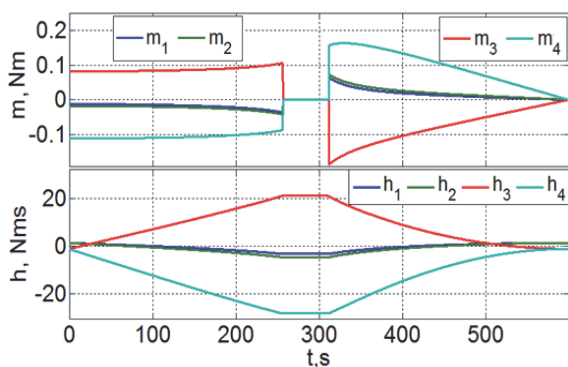


Рис. 5. Управляющие и кинетические моменты двигателей-маховиков

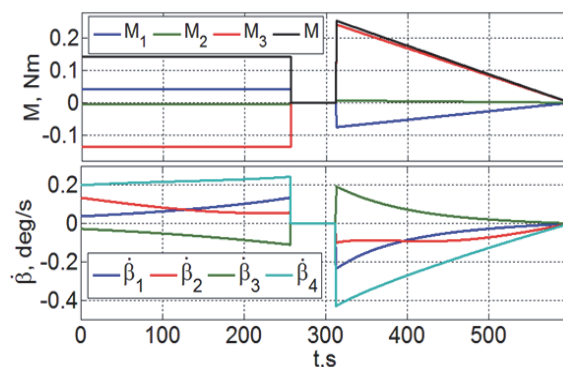


Рис. 7. Управляющие моменты кластера гиродинов и их скорости

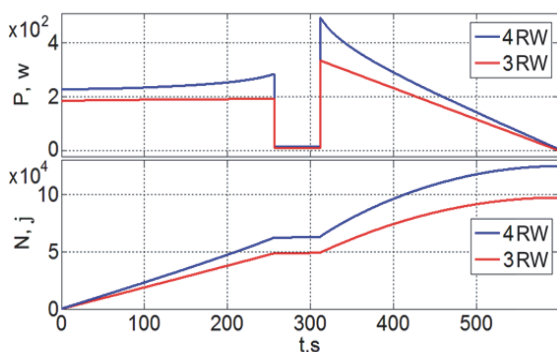


Рис. 6. Мощность и энергия кластеров ДМ

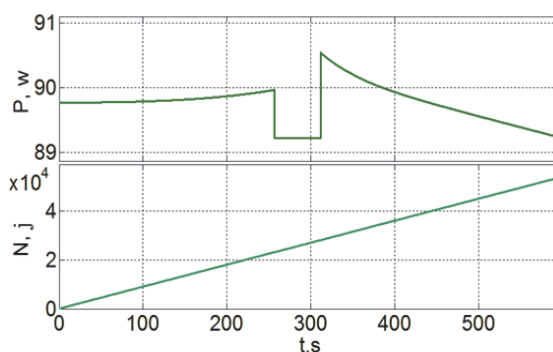


Рис. 8. Мощность и энергия кластера ГД

выделяется ось Oz ССК с самым интенсивным обменом кинетическим моментом, что объясняется наибольшими значениями момента инерции КРМ относительно этой оси и соответствующего компонента орта e^e оси Эйлера. Отметим также, что для выполнения такого пространственного ПМ космического робота компоненты потребных векторов управляющего и кинетического моментов по оси Oz ССК достигают значений 0.24 Нм и 38 Нмс соответственно. Поэтому указанный пространственный ПМ робота невозможно совершить с помощью кластера трёх ДМ по классической схеме без увеличения ограничений каждого ДМ, например до значений $m^m = 0.25$ Нм и $h^m = 40$ Нмс.

Изменения управляющих m_p и кинетических h_p моментов четырех ДМ по схеме GE при выполнении КРМ указанного пространственного ПМ приведены на рис. 5. Здесь можно убедиться, что модули управляющих моментов всех ДМ не превышают заданного значения $m^m = 0.2$ Нм, а модули их КМ также не достигают значения $h^m = 30$ Нмс.

На рис. 6 представлены потребные значения мощности и энергии двух кластеров ДМ для совершения такого пространственного ПМ: кластера четырёх ДМ по схеме GE (4RW) и кластера трёх ДМ по классической схеме (3RW). Здесь видно, что пиковое значение 450 Вт потребной

мощности кластера 4RW превосходит аналогичное значение мощности кластера 3RW. Этот эффект объясняется необходимостью дополнительных энергетических затрат для настройки кластера четырёх ДМ с целью исключения его избыточности.

Рис. 7 представляет изменения вектора момента $\mathbf{M} = \{M_i\}$ кластера 4 ГД по схеме $2-SPE$, соответствующего требуемому (см. рис. 4) при указанном пространственном ПМ робота, и командные скорости прецессии $\dot{\beta}_p$ гиродинов, модули которых не превышают значения 0.45 град/с.

На рис. 8 приведены потребные значения мощности и энергии кластера ГД для такого пространственного ПМ, здесь пиковое значение мощности составляет лишь 90.5 Вт.

Необходимо отметить, что в используемой параметризации ПМ с линейным изменением модуля ускорения $\varepsilon(t)$ на третьем интервале времени $t \in [t_2, t_f]$ можно уменьшить значение момента времени t_2 и при назначении $\varepsilon(t_2) = \varepsilon^*$ обеспечить согласование потребных значений мощности и энергии обоих кластеров в моменты времени t_1 и t_2 поворотного маневра робота. Такое согласование выполняется автоматически при задании $\varepsilon(t) = \varepsilon^* \forall t \in [t_2, t_f]$ и формировании симметричной параметризации пространственного ПМ в виде последовательности разгона с постоянным ускорением,

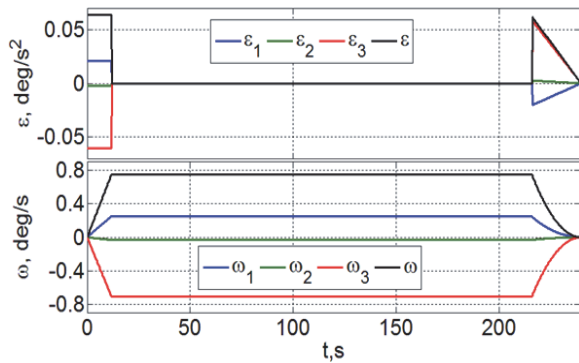


Рис. 9. Угловые ускорения и скорости робота при инспекции состояния спутника на ГСО

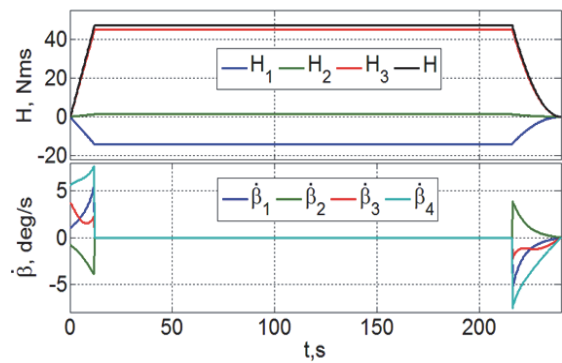


Рис. 10. Кинетические моменты кластера гироцинов и скорости их прецессии

вращения с постоянной скоростью и торможения с таким же замедлением.

Выполненные расчеты показали, что при указанных численных данных и видах параметризации пространственного поворотного маневра КРМ в процессе его до-выведения на ГСО потребная мощность кластера двигателей-маховиков не менее чем в два раза превышает потребную мощность кластера гироцинов, см. рис. 6 и 8.

Как отмечено выше, при сближении КРМ с геостационарным спутником [4], а также при визуальной инспекции его технического состояния с дальности 50 м [5], робот должен выполнять более быстрые пространственные поворотные маневры. Для сравнения динамических характеристик кластеров ДМ и ГД в таких режимах СУД рассматривался пространственный ПМ робота длительностью $T = 240$ с (4 минуты) при краевых условиях (9) и (10) с теми же численными данными для простоты и удобства сопоставления.

Выполненные расчеты показали, что при ограничении модуля управляющего момента каждого ДМ значением $m^m = 0.2$ Нм кластер четырех ДМ не обладает возможностью реализации требуемого пространственного поворотного маневра даже при его простейшей симметричной параметризации, несмотря на достаточный размер области вариации вектора КМ этого кластера.

На рис. 9 представлены изменения потребных угловых ускорений и скоростей КРМ при его типовом пространственном поворотном маневре требуемой длительности в процессе инспекции состояния геостационарного спутника. Соответствующие изменения вектора КМ кластера гироцинов и командных скоростей их прецессии приведены на рис. 10. Здесь ясно демонстрируется, что для выполнения такого пространственного ПМ робота требуются командные скорости прецессии $\dot{\beta}_p$ гироцинов, по модулю не превышающие значения 7.5 град/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен сравнительный анализ динамических свойств минимально-избыточных кластеров двигателей-маховиков и гироцинов для управления ориентацией космического робота при до-выведении на геостационарную орбиту, сближении с геостационарным спутником и визуальной инспекции его технического состояния. Представлены результаты сравнительного анализа кластеров на типовых поворотных маневрах робота и выделены условия, при которых проявляются преимущества кластера гироцинов по энергопотреблению и величине вектора управляющего момента произвольного направления, что особенно важно в режиме причаливания робота [6] к геостационарному спутнику. Такой кластер немного уступает кластеру двигателей-маховиков по дополнительным показателям – массе, габаритам и технологической сложности, что требует компетентности производителей [7] при разработке, реализации и испытаниях как гироцинов с встроенными программными средствами, так и кластеров на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е. Вывод на орбиту и сближение космического робота с геостационарным спутником // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Том 22. № 2. С. 124-131.
2. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е. Дополнительное выведение и сближение космического робота для обслуживания геостационарного спутника // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. Том 23. № 2. С. 75-83.
3. Votel R., Sinclair D. Comparison of control moment gyros and reaction wheels for small Earth-observing satellites. Proc. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC12-X-1. 2012, pp. 1-7.

4. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е. Цифровое и широтно-импульсное управление космическим роботом при сближении с геостационарным спутником // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Том 22. № 5. С. 74-78.
5. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомова Т.Е. Управление космическим роботом при визуальной инспекции состояния геостационарного спутника // Известия Самарского научного центра РАН. 2020. Том 22. № 5, С. 79-83.
6. Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Somova T. Control of robot-manipulator during its preparation and capture of a passive satellite. Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. 2019. Vol. 10, no. 3. P. 421-432.
7. Мкртычян А.Р., Башкеев Н.И., Якимовский Д.О., Акашев Д.И., Яковец О.Б. Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов // Гироскопия и навигация. 2015. №1 (88). С. 93-99.

ANALYSIS OF DYNAMIC PROPERTIES CLUSTERS OF FLYWHEELS AND GYRODYNES FOR CONTROL OF A SPACE ROBOT IN GEOSTATIONARY ORBIT

© 2021 Ye.I. Somov^{1,2}, S.A. Butyrin^{1,2}, T.Ye. Somova²

¹ Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

² Samara State Technical University, Samara, Russia

A comparative analysis of the dynamic properties clusters of flywheels and gyrodines for a space robot attitude control when it is addition launching into geostationary orbit and approaches a geostationary satellite for its maintenance is carried out. The results of the analysis for typical turning maneuvers of the robot are presented and the conditions under which the advantages of the gyrodine cluster are highlighted.

Key words: space robot, attitude control, flywheels, gyrodines, comparison of dynamic properties

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-2-84-90

Yevgeny Somov, Leading Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Head of Department for "Navigation, Guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail e_somov@mail.ru
Sergey Butyrin, Senior Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Head of Laboratory for "Modeling of Control Systems", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail butyrinsa@mail.ru
Tatyana Somova, Researcher of Department "Navigation, guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail te_somova@mail.ru