

УДК 629.78 : 681.51

ЭКОНОМИЧНОЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ВРАЩЕНИЯ УПРУГОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2016 С.Е. Сомов

Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 06.12.2016

Представляются алгоритмы экономичного широтно-импульсного управления электрореактивными двигателями в режиме торможения вращения упругого космического аппарата и приведены результаты исследования разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: космический аппарат, торможение вращения, электрореактивный двигатель

Работа поддержана РФФИ (грант 14-08-01091) и отделением ЭММПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 13).

ВВЕДЕНИЕ

После отделения спутника в транспортной конфигурации от ракеты-носителя возникает вращение космического аппарата (КА) с вектором угловой скорости произвольного направления. Далее выполняется механическое раскрытие упругой конструкции солнечных батарей (СБ) и после затухания их колебаний спутник продолжает кувыркаться – вращаться с вектором угловой скорости ω также произвольного направления и модулем до 5 град/с. Первоочередная задача состоит в успокоении (остановке вращения) КА для последующего определения направлений на внешние ориентиры в связанной с корпусом КА системе координат (ССК). В связи этим в статье рассматриваются вопросы экономичного широтно-импульсного управления КА при его успокоении с помощью электрореактивных двигателей (ЭРД).

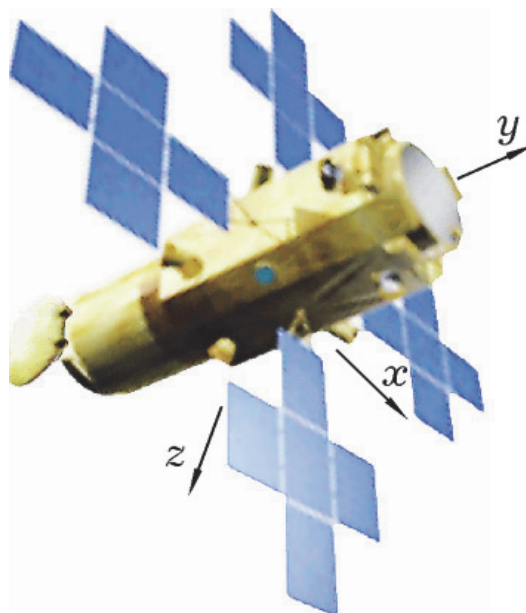


Рис. 1. Схема КА землеобзора

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Предполагается совпадение положений центра масс КА и полюса O в ССК $Oxuz$. На рис. 1 приведена схема спутника землеобзора с 4 упругими панелями СБ и указана ССК, а на рис. 2 – схема корректирующей двигательной установки (КДУ).

Орты e_p , $p = 1 \div 8$, осей сопел 8 ЭРД имеют в ССК представления в виде столбцов

$$e_1 = -e_8 = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta \\ C_\alpha S_\beta \\ S_\alpha \end{bmatrix}; \quad e_2 = -e_7 = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta \\ C_\alpha S_\beta \\ -S_\alpha \end{bmatrix};$$

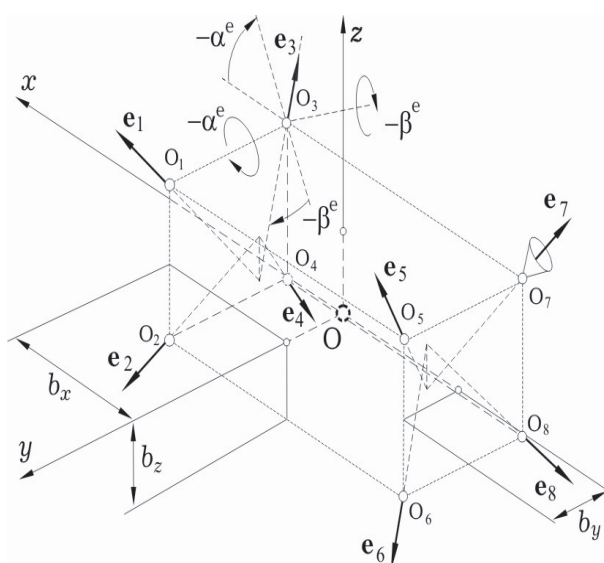


Рис. 2. Схема КДУ на основе 8 ЭРД

Сомов Сергей Евгеньевич, научный сотрудник отдела «Динамика и управление движением». E-mail: s_somov@mail.ru

$$\mathbf{e}_3 = -\mathbf{e}_6 = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta \\ -C_\alpha S_\beta \\ S_\alpha \end{bmatrix}; \quad \mathbf{e}_4 = -\mathbf{e}_5 = \begin{bmatrix} C_\alpha C_\beta \\ -C_\alpha S_\beta \\ -S_\alpha \end{bmatrix},$$

где $S_x = \sin x$, $C_x = \cos x$, $x = \alpha^e, \beta^e$. Векторы $\mathbf{p}_p, p = 1 \div 8$, точек O_p приложения вектора тяги ЭРД в ССК (рис. 2) представляются столбцами

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{p}_2 = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ -b_z \end{bmatrix}; \\ \mathbf{p}_3 &= \begin{bmatrix} b_x \\ -b_y \\ b_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{p}_4 = \begin{bmatrix} b_x \\ -b_y \\ -b_z \end{bmatrix}; \\ \mathbf{p}_5 &= \begin{bmatrix} -b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{p}_6 = \begin{bmatrix} -b_x \\ b_y \\ -b_z \end{bmatrix}; \\ \mathbf{p}_7 &= \begin{bmatrix} -b_x \\ -b_y \\ b_z \end{bmatrix}; \quad \mathbf{p}_8 = \begin{bmatrix} -b_x \\ -b_y \\ -b_z \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Каждый ЭРД имеет широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) тяги, что описывается нелинейными непрерывно-дискретными соотношениями $p_p(t) = P^m \text{PWM}(t - T_u^e t_r, \tau_m, v_{pr}) \forall t \in [t_r, t_{r+1})$

с периодом T_u^e и временным запаздыванием T_u^e . Здесь функции

$$\text{PWM}(t, t_r, \tau_m, v_{pr}) \equiv \begin{cases} \text{sign } v_{pr} & t \in [t_r, t_r + \tau_{pr}) \\ 0 & t \in [t_r + \tau_{pr}, t_{r+1}) \end{cases};$$

$$\tau_{pr} = \begin{cases} 0 & |v_{pr}| \leq \tau_m \\ \text{sat}(T_u^e, |v_{pr}|) & |v_{pr}| > \tau_m \end{cases},$$

$$t_r = r T_u^e, \quad t_{r+1} = t_r + T_u^e; \quad r \in N_0 \equiv [0, 1, 2, 3, \dots],$$

где P^m – номинальное значение тяги, одинаковое для всех ЭРД в составе КДУ. В ССК вектор тяги p -го ЭРД вычисляется по формуле $\mathbf{P}_p(t) = -p_p(t) \mathbf{e}_p$, а векторы силы \mathbf{R}^e и момента \mathbf{M}^e КДУ – по соотношениям $\mathbf{R}^e = \sum \mathbf{P}_p(t)$ и $\mathbf{M}^e = \sum [\mathbf{p}_p \times] \mathbf{P}_p(t)$.

В режиме успокоения КА применяется блок простых гироскопических датчиков угловой скорости при дискретном выходном сигнале $\boldsymbol{\omega}_s \equiv \boldsymbol{\omega}(t_s) = \{\omega_s\}$ с периодом T_q , $t_s = s T_q$, $t_{s+1} = t_s + T_q$, $s \in N_0$ при наличии шумов и дискретизации по уровню.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Модель вращательного движения КА с упругими панелями СБ в режиме успокоения представляется в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{D}_q \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K}; \\ \mathbf{D}_q^t \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{A}^q \ddot{\mathbf{q}} &= -\mathbf{A}^q (\mathbf{V}_q \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{W}_q \mathbf{q}). \end{aligned} \quad (1)$$

где $\mathbf{K} = \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}$ является вектором кинетического момента (КМ) корпуса КА, а $\mathbf{M} = \mathbf{M}^e = \{M_i^e\} = \{M_i\}$ – вектором внешнего управляющего момента, формируемый КДУ на основе 8 ЭРД.

Пусть в момент времени $t = 0$ известен вектор $\boldsymbol{\omega}_0 = \boldsymbol{\omega}(0)$ произвольного направления с модулем $|\boldsymbol{\omega}_0| = \omega_0 \leq \bar{\omega}_0$ при заданном значении $\bar{\omega}_0$. Тогда при известном тензоре инерции \mathbf{J} корпуса КА в этот момент времени становится известным значение вектора КМ $\mathbf{K}(0) = \mathbf{K}_0 \equiv \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}_0$ с модулем K_0 . Вектор $\boldsymbol{\omega}$ измеряется и затем фильтруется с периодом T_q , вектор момента $\mathbf{M}^e = \mathbf{M}$ КДУ формируется при ШИМ тяги 8 ЭРД с периодом T_u^e . Задача успокоения вращательного движения КА состоит в разработке экономичного закона управления $\mathbf{M}^e \equiv \mathbf{M} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\omega})$, который начиная с момента времени T_u^e обеспечивает выполнение условия $\boldsymbol{\omega}(t) \in \mathbf{S}_\omega \{ \boldsymbol{\omega}(t) : |\boldsymbol{\omega}(t)| \leq \Delta_\omega^0 \forall t \geq T_u^e \}$, где скалярная постоянная величина Δ_ω^0 определяет размер множества \mathbf{S}_ω .

ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОЕ НЕПРЕРЫВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В классе локально-оптимальных непрерывных законов успокоения КА наиболее популярны [1-3] закон управления с минимальным принуждением и закон управления, оптимальный по быстродействию. При моделировании КА в виде свободного твердого тела из (1) следует модель движения

$$\dot{\mathbf{K}} = \mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K}, \quad (2)$$

где принято обозначение $\dot{\mathbf{K}} \equiv \mathbf{K}^* = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}}$.

Для определения структуры вектора непрерывного управляющего момента $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\omega})$ из условия минимума принуждения $M^2 = |\mathbf{M}|^2$ введем функцию Ляпунова $v = K^2 = \langle \mathbf{K}, \mathbf{K} \rangle$ и вычислим ее производную в силу (2) в виде

$$\begin{aligned} \dot{v} &= 2 \langle \mathbf{K}, \dot{\mathbf{K}} \rangle \\ &= 2 \langle \mathbf{K}, \mathbf{M} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K} \rangle = 2 \langle \mathbf{K}, \mathbf{M} \rangle. \end{aligned}$$

При выборе линейного закона управления

$$\mathbf{M} = -a \mathbf{K} = -a K \mathbf{k} \quad (3)$$

с ортом $\mathbf{k} = \mathbf{K} / K$ и постоянным параметром

$a > 0$ имеем $\dot{v} = -2a < \mathbf{K}, \mathbf{K} > = -2av$ и прямым интегрированием получается соотношение $v(t) = v_0 \exp(-2at)$, где $v_0 = K_0^2 = < \mathbf{K}_0, \mathbf{K}_0 >$ и $\mathbf{K}_1 = \mathbf{J} \boldsymbol{\omega}_1$. Отсюда следуют явные соотношения для оценки изменения во времени модуля вектора КМ $K(t) = K_0 \exp(-at)$, вектора кинетического момента $\mathbf{K}(t) = \mathbf{K}_0 \exp(-at)$ и вектора внешнего управляющего момента $\mathbf{M}(t) = -a \mathbf{K}_0 \exp(-at)$.

При выборе непрерывного закона управления в виде

$$\mathbf{M} = -m \mathbf{K} / K = -m \mathbf{k}, \quad (4)$$

ограниченного по модулю постоянным параметром $m > 0$, имеем

$$\begin{aligned} \dot{v} &= -2m < \mathbf{K}, \mathbf{K} > / K \\ &= -2m v / \sqrt{v} = -2m \sqrt{v}, \end{aligned}$$

следовательно $d v / \sqrt{v} = -2m dt$ и интегрированием получаются соотношения $2(v^{1/2} - v_0^{1/2}) = -2m t$, $v^{1/2}(t) = K(t) = K_0 - m t$. Этот закон управления является оптимальным по быстродействию.

ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЯ КДУ

При формировании команды $\mathbf{M}_r = -a \mathbf{K}_r$ для вектора управляющего момента, где $\mathbf{K}_r = \mathbf{K}(t_r)$ и $\boldsymbol{\omega}_r = \boldsymbol{\omega}(t_r)$, на каждом полуинтервале времени $t \in [t_r, t_{r+1})$ с заданным периодом T_u^e сначала определяется вектор потребного постоянного импульса (pulse) управляющего момента по формуле

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_r^p &\equiv \int_{t_r}^{t_{r+1}} \mathbf{M}(\tau) d\tau = -a \int_{t_r}^{t_{r+1}} \mathbf{K}(\tau) d\tau \\ &= -\mathbf{K}_r (1 - \exp(-a T_u^e)) \end{aligned}$$

и затем эта векторная команда поступает на КДУ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) тяги восьми ЭРД. Естественно возникает вопрос: каким же образом можно создать вектор потребного импульса момента $\mathbf{M}^p(t)$ произвольного направления в ССК, если орты \mathbf{e}_p осей сопел ЭРД фиксированы в ССК и каждый ЭРД может находиться только в двух состояниях – включен (тяга $p_p(t) = P^m$) либо выключен (тяга $p_p(t) = 0$)? Именно для решения этой проблемы и применяется ШИМ тяги всех 8 ЭРД, которая обеспечивает выполнение заданного значения вектора $\mathbf{M}^p(t)$ в моменты времени $t = t_r = r T_u^e$.

Для схемы КДУ на рис. 2 орты \mathbf{r}_p векторов $\boldsymbol{\rho}_p$ вычисляются как $\mathbf{r}_p = \boldsymbol{\rho}_p / \rho$, где скаляр $\rho = (b_x^2 + b_y^2 + b_z^2)^{1/2}$ является единым модулем точек O_p приложения векторов тяги ЭРД в ССК.

При обозначениях

$$\boldsymbol{\tau}_r = \{\tau_{pr}\}; \quad \mathbf{D}^e = \{[\mathbf{e}_p], [\mathbf{r}_p \times \mathbf{e}_p]\};$$

$$\tilde{\mathbf{r}}^p = \mathbf{R}^p / P^m; \quad \tilde{\mathbf{m}}^p = \mathbf{M}^p / (P^m \rho)$$

и $\mathbf{t}^p = \{\tilde{\mathbf{r}}^p, \tilde{\mathbf{m}}^p\}$, где векторы \mathbf{R}^p и \mathbf{M}^p представляют импульсы векторов сил $\mathbf{R}^e = \mathbf{R}$ и моментов $\mathbf{M}^e = \mathbf{M} \equiv \{M_1, M_2, M_3\}$ КДУ, заданные в ССК, принципиальная проблема заключается в решении векторного уравнения $\mathbf{D}^e \boldsymbol{\tau}_r = \mathbf{t}^p$, $\tau_{pr} \in R_+^8$, $\mathbf{t}^p \in R^6$ при условии $0 \leq \tau_{pr} \leq T_u^e$ $\forall p = 1 \div 8$ относительно компонентов вектора-столбца $\boldsymbol{\tau}_r = \{\tau_{pr}\}$, когда прямоугольная матрица \mathbf{D}^e и вектор-столбец $\mathbf{t}^p \in R^6$ заданы.

При использовании псевдообратной матрицы $(\mathbf{D}^e)^\# \equiv (\mathbf{D}^e)^t (\mathbf{D}^e (\mathbf{D}^e)^t)^{-1}$ разработанный закон распределения длительностей τ_{pr} тяги всех 8 ЭРД на каждом полуинтервале времени $t \in [t_r, t_{r+1})$ ШИМ их тяги с периодом T_u^e имеет простую алгоритмическую форму [4,5]:

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\tau}}_r &\equiv \{\tilde{\tau}_{pr}\} = (\mathbf{D}^e)^\# \mathbf{t}^p; \quad \tilde{\tau}_{pr} =: \tilde{\tau}_{pr} - \min(\tilde{\tau}_{pr}), \\ \text{if } q &\equiv \max(\tilde{\tau}_{pr}) > T_u^e \text{ then } \tau_{pr} = \tilde{\tau}_{pr} - T_u^e \tilde{\tau}_{pr} / q. \end{aligned} \quad (5)$$

Последняя строка в алгоритме (5) явно указывает на возможную ограниченность вектора управляющего момента КДУ на полуинтервале времени $t \in [t_r, t_{r+1})$ при большом значении параметра $a > 0$. Искомые векторы тяги \mathbf{R} и момента \mathbf{M} КДУ определяются соотношениями $\mathbf{R}(t) = P^m \tilde{\mathbf{r}}(t)$ и $\mathbf{M}(t) = P^m \rho \tilde{\mathbf{m}}(t)$. В рассматриваемой задаче успокоения КА потребный импульс вектора сил КДУ $\mathbf{R}^p = \mathbf{0}$, поэтому здесь соблюдается условие $\mathbf{R}(t_r) = P^m \tilde{\mathbf{r}}(t_r) = \mathbf{0}$.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ УСПОКОЕНИЯ СПУТНИКА

Пусть КА массой $m = 1000$ кг движется по солнечно-синхронной орбите и при 4 раскрытых панелях СБ (см. рис. 1) его тензор инерции $\mathbf{J} = \text{diag}\{812; 587; 910\}$ кг м². В рамках модели (1) значения парциальных частот первого тона Ω_j^1 и декремента δ упругих колебаний каждой панели СБ таковы: $\Omega_j^1 \approx 0.6$ р/с (частота ≈ 0.1 Гц) и $\delta = 0.01$. Имитация работы КДУ выполнена при конструктивных параметрах $b_x = 1$ м, $b_y = 0.7$ м, $b_z = 0.6$ м, $\alpha^e = \pi/3$, $\beta^e = \pi/6$ (рис. 2), номинальной тяге каждого ЭРД $P^m = 83$ мН, периоде ШИМ тяги ЭРД $T_u^e = 64$ с, запаздывании $T_{zu}^e = 0.25$ с и минимальной длительности включения $\tau_m = 2$ с. Было принято, что измерение вектора $\boldsymbol{\omega}$ при СКО шума $\sigma_\omega = 0.0033$ град/с и дискретная фильтрация выполняются с периодом $T_q = 1$ с, а процесс

успокоения вращения КА считается завершённым в момент времени T_ω при выполнении условия $\omega(t) \in S_\omega \{ \omega(t) : |\omega(t)| \leq \Delta_\omega^0 \forall t \geq T_\omega \}$, где $\Delta_\omega^0 = 0.1$ град/с. При этом орт вектора начальных условий $\omega_0 = \{ \omega_{oi} \}$, $|\omega_0| = 5$ град/с генерировался в произвольном случайном направлении. Далее приводятся результаты для значения вектора начальных условий $\omega_0 = \{ \omega_{oi} \}$ при $\omega_{oi} = 5/\sqrt{3}$ град/с.

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты имитации процесса успокоения КА при широтно-импульсном управлении по типу «максимального быстрогодействия», который реализуется при значении параметра $a = 0.1$. Здесь формирование векторной команды управления КДУ прекращается с момента времени T_ω при условии $\omega(t) \in S_\omega \{ \omega(t) : |\omega(t)| \leq \Delta_\omega^0 \forall t \geq T_\omega \}$, где $\Delta_\omega^0 = 0.05$ град/с. На этих и последующих рисунках синим цветом выделена принадлежность угловых скоростей и управляющих моментов к каналу 1 (крена), зеленым цветом – к каналу 2 (рыскания) и красным цветом – к каналу 3 (тангажа), рис. 1, а модуль вектора $\omega(t)$ выделен черным цветом. Некоторые подробности переходных процессов при завершении успокоения (остановки вращения) спутника с 4 упругими панелями СБ по типу «максимального быстрогодействия» приведены на рис. 4 и рис. 5.

На рис. 6 представлены результаты имитации процесса успокоения КА без отключения широтно-импульсного управления ЭРД в составе КДУ по типу «наименьшего принуждения», который ре-

ализуется при значении параметра $a = 0.000138$.

Анализ представленных результатов по имитации режима успокоения спутника с применяемыми конструктивными параметрами и КДУ на основе 8 ЭРД при указанном направлении вектора угловой скорости ω_0 с модулем $\omega_0 = \bar{\omega}_0 = 5$ град/с позволяет сделать такие выводы:

- при широтно-импульсном управлении ЭРД по типу «максимального быстрогодействия» гарантируется успокоение вращения КА за время $T_\omega \leq 1$ час;
- при широтно-импульсном управлении ЭРД по типу «минимального принуждения» успокоение вращения КА может достигаться лишь за время $T_\omega \geq 3$ час

Непрерывный закон управления $M(t) = -a K(t) k(t)$ (3) формально можно представить в виде $M(t) = -m(t) k(t)$ (4), где скалярная функция $m(t) = a K(t)$ с постоянным параметром $a > 0$. Ограниченность вектора управляющего момента КДУ $M_k(t)$, который формируется с помощью ШИМ тяги всех восьми ЭРД на полуинтервале времени $t \in [t_r, t_{r+1})$, проявляется в последней строке алгоритма (5). Поэтому для обеспечения экономичности режима успокоения КА по энергопотреблению и расходу топлива КДУ рационально определить такое значение постоянного параметра $a > 0$, при котором сначала реализуется широтно-импульсное управление ЭРД по типу «максимального быстрогодействия», а затем следует автоматический переход к широтно-импульсному управлению ЭРД по типу «минимального принуждения».

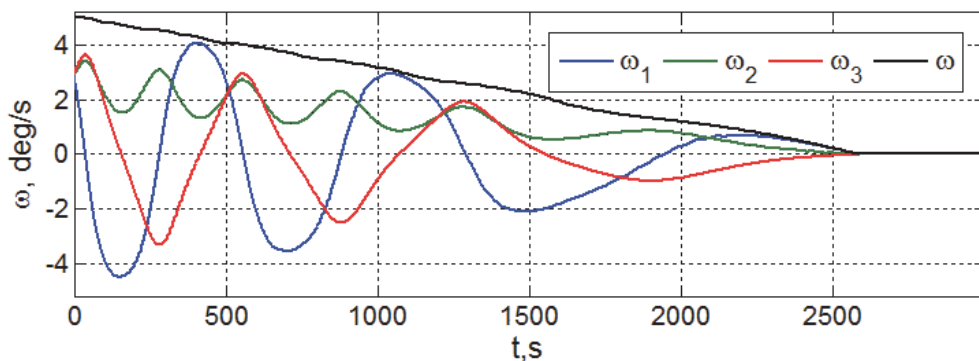


Рис. 3. Переходные процессы при успокоении КА по типу «максимального быстрогодействия»

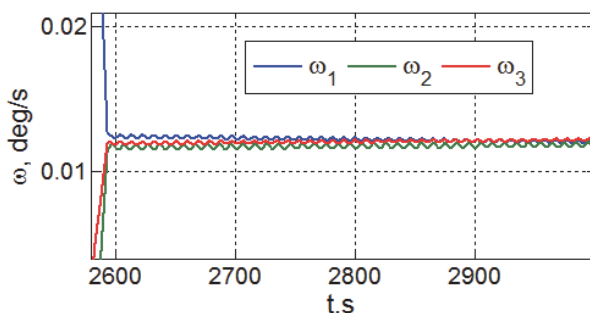


Рис. 4.

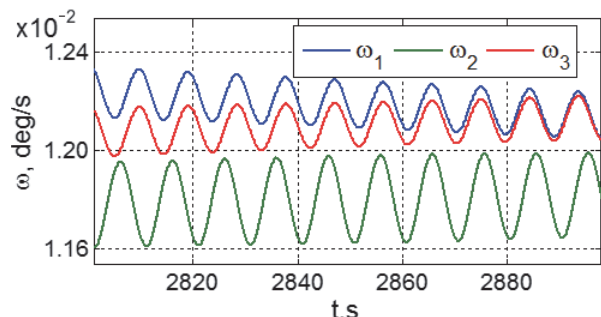


Рис. 5.

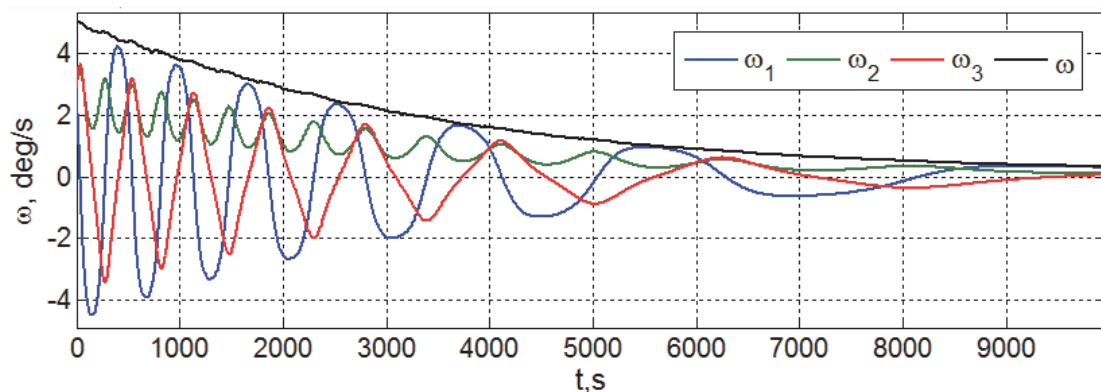


Рис. 6. Переходные процессы при успокоении КА с минимальным принуждением

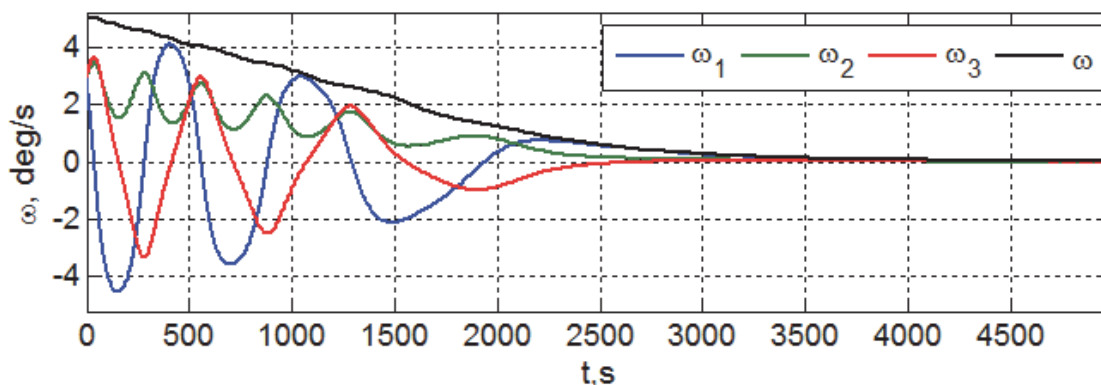


Рис. 7. Переходные процессы при успокоении КА

В результате выполненных численных исследований был обоснован выбор постоянного параметра $a = 0.0015$, при котором достигается компромисс между быстродействием успокоения КА и экономичностью этого режима по энергопотреблению и расходу топлива КДУ. На

рис. 7 представлены переходные процессы при успокоении КА с таким значением параметра a . Здесь начиная с момента времени $t = 2176$ с при значении модуля угловой скорости $\omega = 0.985$ град/с реализуется ШИМ тяги ЭРД по типу «минимального принуждения», а вход модуля $\omega(t)$

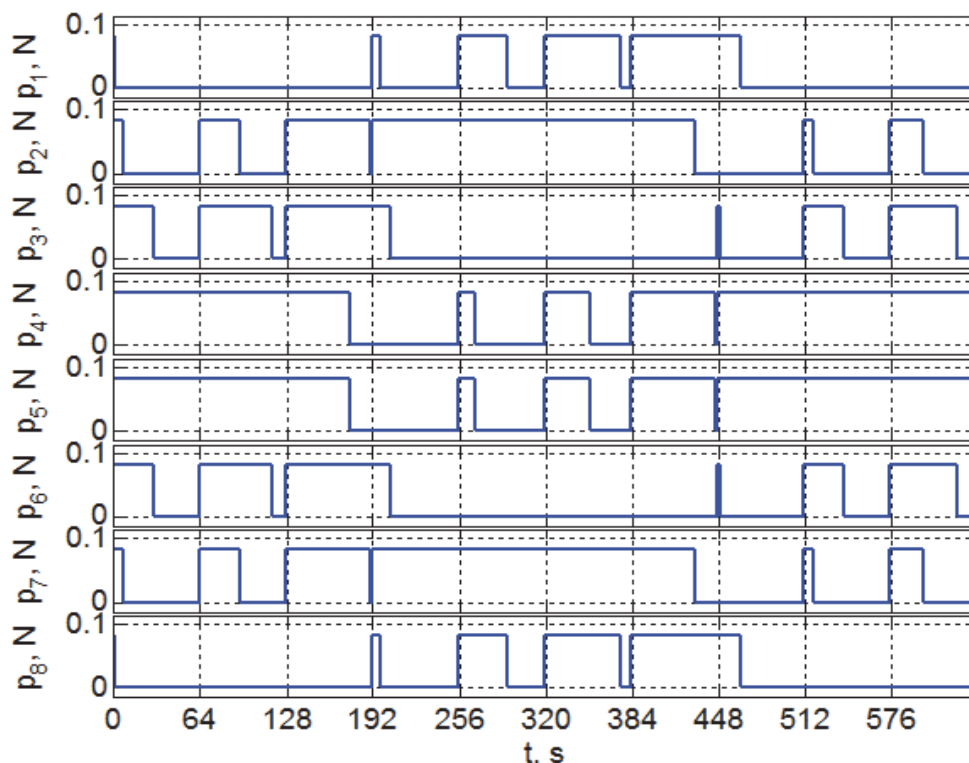


Рис. 8. Временные диаграммы ШИМ тяги ЭРД, первые 10 периодов управления

вектора $\omega(t)$ в «трубку точности» S_ω при значении $\Delta\omega = 0.05$ град/с происходит в момент времени $T_\omega = 4416$ с.

На рис. 8 и 9 приведены временные диаграммы ШИМ тяги всех восьми ЭРД и изменения моментов КДУ по осям ССК на первых 10 периодах управления, а на рис. 10 и 11 – аналогичные характеристики на полном интервале времени выполненной компьютерной имитации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко представлены алгоритмы широтно-импульсного управления ЭРД в режиме успокоения упругого КА и приведены результаты исследования разработанных алгоритмов. Предложена и исследована схема экономичного управления, основанная на сочетании алгоритмов управления ЭРД по типам «максимального быстрогодействия» и «минимального принуждения».

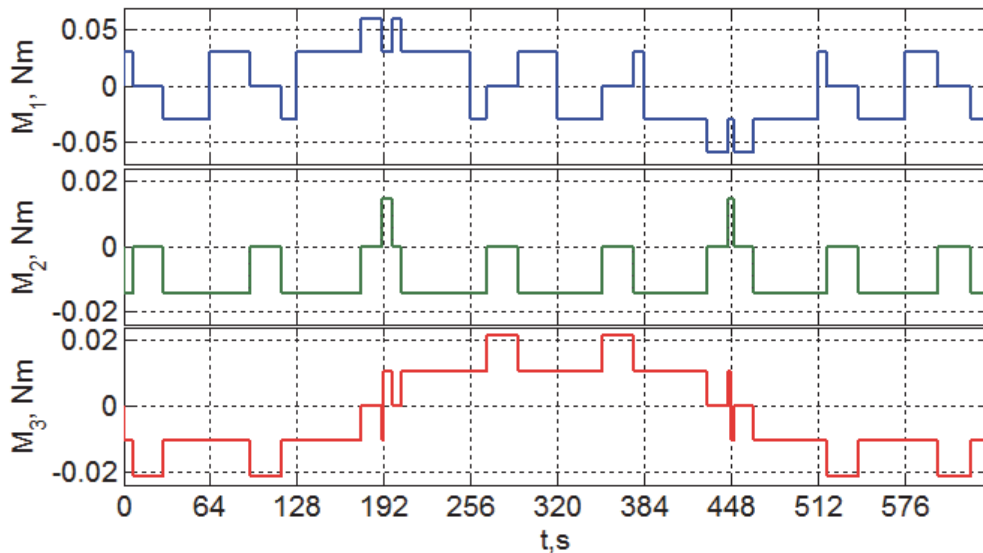


Рис. 9. Изменения моментов КДУ на первых 10 периодах ШИМ тяги ЭРД

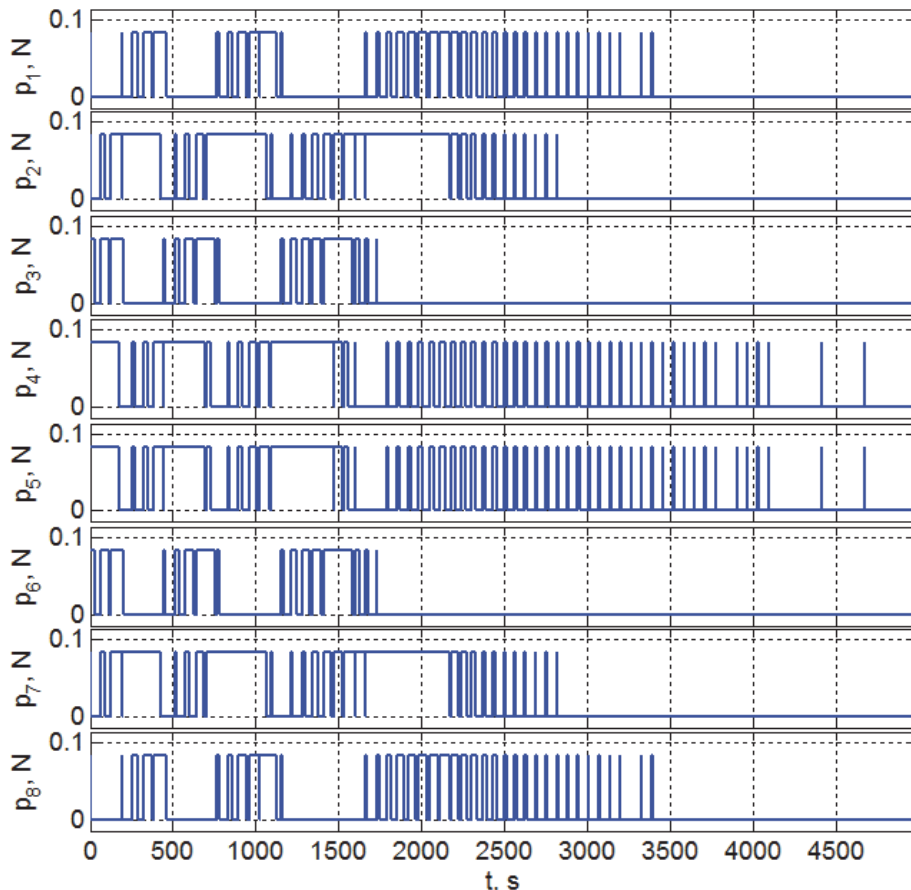


Рис. 10. Временные диаграммы ШИМ тяги восьми ЭРД при успокоении КА

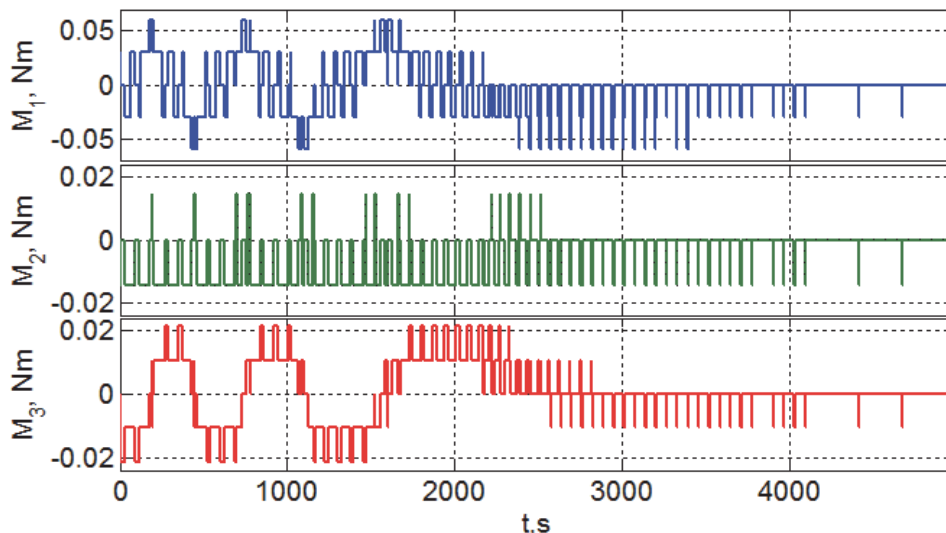


Рис. 11. Изменение моментов КДУ при успокоении КА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноусько Ф.Л., Акуленко Л.Д., Соколов Б.И. Управление колебаниями. М.: Наука, 1980. 384 с.
2. Акуленко Л.Д. Асимптотические методы оптимального управления. М.: Наука, 1987. 368 с.
3. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. М.: Наука, 1977. 248 с.
4. Сомов С.Е. Экономичное широтно-импульсное управление при разгрузке силового гироскопического комплекса системы ориентации мини-спутника // Проблемы управления. 2014. № 4. С. 60-68.
5. Сомов С.Е. Широтно-импульсное управление электрореактивными двигателями при коррекции орбитального движения спутника // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. № 6(3). С. 713-720.

ECONOMICAL PULSE-WIDTH CONTROL OF ELECTRO-REACTION ENGINES DURING BRAKING THE ROTATION OF A FLEXIBLE SPACECRAFT

© 2016 S.Ye. Somov

Samara Scientific Center, Russian Academy of Sciences

We present algorithms for economical a pulse-width control of the electro-reaction engines in the mode of braking of the rotation of a flexible spacecraft. We also present the results on the study of developed algorithms.

Keywords: spacecraft, a braking of rotation, electro-reaction engine.