

УДК 629.78 : 681.51

УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ ПРИ СМЕНЕ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

© 2022 С.А. Бутырин^{1,2}, Е.И. Сомов^{1,2}, С.Е. Сомов^{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 15.01.2022

Разработаны методы управления космическим роботом-манипулятором при смене топливных баков двигательной установки при одновременной стабилизации углового движения механической связки робота с геостационарным спутником. Определяются требования к электромеханическим приводам робота-манипулятора и представляются результаты компьютерной имитации динамических процессов.

Ключевые слова: геостационарный спутник связи, смена топливных баков, управление космическим роботом.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-96-104

Работа поддержана РФФИ, грант 20-08-00779.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возросшими требованиями к глобальности, скорости и объемам информационного обмена в настоящее время многие страны приступили к реализации низкоорбитальных спутниковых систем связи, состоящих из тысяч мини-спутников на орбитах высотой от 500 до 1600 км. Достойный ответ традиционной космической связи на основе геостационарных платформ противостоит этим вызовам. Такие перспективные платформы собираются на геостационарной орбите (ГСО) космическими роботами-манипуляторами (КРМ) из сменных и пополняемых компонентов, а затем регулярно обслуживаются КРМ в течение нескольких десятилетий.

Традиционные геостационарные спутники связи (ГСС) имеют гарантированный срок службы до 15 лет. При продлении срока службы

ГСС важнейшей является проблема дозаправки топливом их электрореактивных двигательных установок (ЭДУ). В системе управления движением (СУД) КРМ применяются исполнительные органы в виде кластера гироскопов (ГД) – двухстепенных силовых гироскопов и ЭДУ на основе как плазменных, так и каталитических электрореактивных двигателей (ЭРД) [1,2]. В штатном режиме СУД измерение координат движения космического аппарата (КА) выполняется бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС) с коррекцией сигналами от навигационных спутников GPS/ ГЛОНАСС и звездных датчиков.

В статье рассматриваются вопросы управления КРМ при дозаправке ЭДУ на основе смены топливных баков. Предлагается стратегия и разрабатываются методы управления КРМ в этом режиме при одновременной стабилизации углового движения механической связки КРМ с ГСС. Определяются требования к электромеханическим приводам робота-манипулятора и представляются результаты компьютерной имитации динамических процессов.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ И СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается задача управления КРМ при смене топливных баков двигательной установки ГСС. Предполагается, что КРМ и ГСС жестко состыкованы, а механические манипуляции с баками происходят в автоматическом режиме. Концевое звено манипулятора содержит специальный механизм – ключ, который при замыкании жестко удерживает очередной топливный бак.

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

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

Сомов Сергей Евгеньевич, научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; научный сотрудник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ. E-mail s_somov@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

Целями исследования являются: анализ стратегии управления – последовательности действий манипулятора при захвате/освобождении баков и их перемещениях в заданные положения; выбор кинематической схемы манипулятора, числа его звеньев, их геометрических и инерционных характеристик, а также параметров электромеханических приводов; расчет рабочей зоны манипулятора; оценка динамических характеристик СУД при угловой стабилизации связки КРМ и ГСС в процессе смены баков. Компоновка жесткой сцепки КРМ с ГСС, для компактности без отображения панелей солнечных батарей (СБ), представлена на рис. 1, где все размеры указаны в метрах.

На рисунке 1 приведены используемые формы и размеры компонентов механической связки: корпус КРМ – цилиндр диаметром 1 м и длиной 2.5 м с установленными на нем манипулятором и контейнерами с баками, частично вы-

ступающими за его обвод; корпус ГСС – цилиндр диаметром 1.1 м и длиной 2.7 м. Было принято, что каждый сменный топливный бак имеет размеры $0.4 \times 0.4 \times 0.5$ м, объем 80 литров, масса полного бака равна 90 кг, а пустого бака – 10 кг. При выбранных геометрических параметрах на каждой из двух продольных сторон корпуса КРМ допускается размещение до пяти контейнеров. Для начала последовательности смены топливных баков один из контейнеров в корпусе КРМ должен быть пустым, см. например, контейнер **a** на рис. 1.

На рисунке 2 представлена кинематическая схема бортового манипулятора антропоморфной структуры с 4 звеньями ($i = 1, 2, \dots, 4 \equiv 1 \div 4$) и 6 степенями свободы, которым соответствуют угловые координаты q_s , $s = 1 \div 6$. Здесь указаны концы звеньев манипулятора в точках **A**, **B**, **C** и конечная точка **D** ключа замкового механиз-

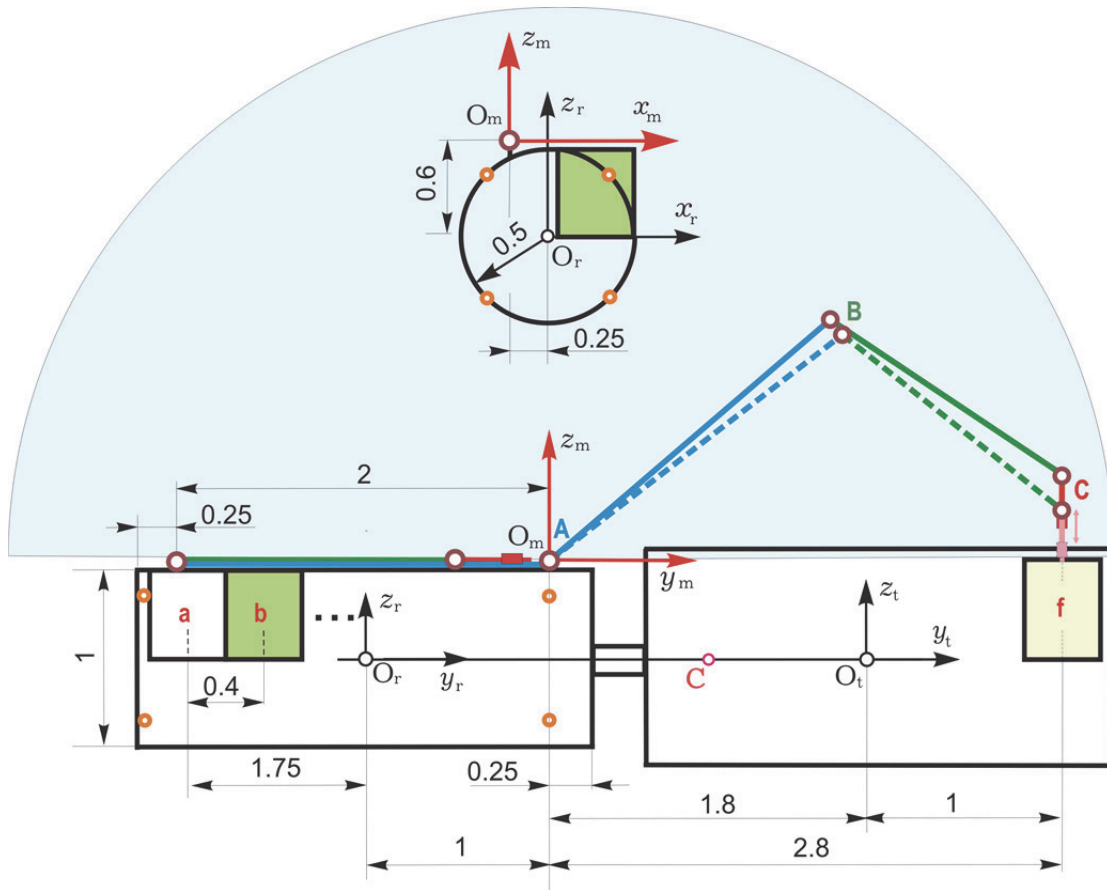


Рис. 1. Схема управления манипулятором и его рабочая зона при смене топливных баков

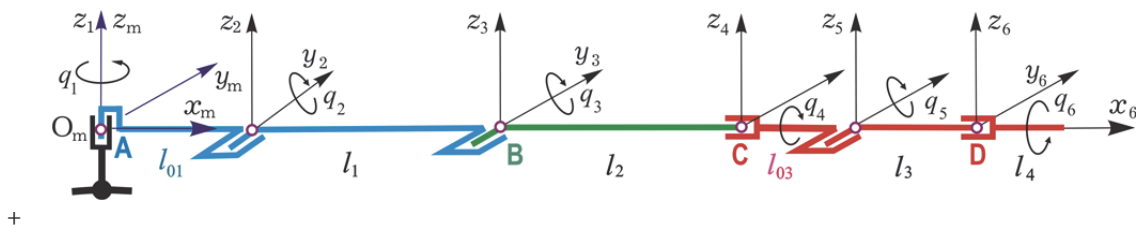


Рис 2. Кинематическая схема манипулятора

ма. В точках **A** и **C** применяются двухстепенные шарниры, которые однозначно формализуются двумя стандартными одноосными шарнирами при значениях длины фиктивных звеньев $l_{01} = l_{03} = 0$, см. рис. 2. Последний шарнир обеспечивает вращение ключа открытия/закрытия замка вокруг продольной оси бака, а остальные – совмещение точки **C** манипулятора с заданной в рабочей зоне при произвольной ориентации последнего звена.

Манипулятор закреплен на корпусе КРМ стойкой (master) в точке O_m системы координат $O_m x_m y_m z_m$, которая фиксирована в системе координат $O_r x_r y_r z_r$, связанной с корпусом КРМ (robot) в его центре масс O_r , см. рис. 1. Захват бака достигается перемещением ключа по нормали к плоскости крышки бака (см. рис. 1) с последующим его поворотом на угол $\pi/2$.

Применяемая стратегия смены топливных баков ЭДУ использует такие положения:

- 1) пустые баки поочередно перемещаются манипулятором из контейнеров ГСС в контейнеры КРМ, а заполненные топливом баки – наоборот, из контейнеров КРМ в контейнеры ГСС;
- 2) установка баков в контейнеры завершается их автоматической механической фиксации;
- 3) включение /отключение системы подачи топлива от каждого бака к ЭДУ осуществляется роботизированным мехатронным модулем, встроенным в каждый контейнер ГСС.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При описании движения механической связки КРМ с ГСС применяются (i) экваториальная инерциальная системы координат (ИСК) I_{\oplus} с началом в центре Земли O_{\oplus} , (ii) связанная система координат (ССК) **B** ($Ox y z$) с началом в полюсе O , которая совпадает с системой координат $O_r x_r y_r z_r$, КРМ (iii) орбитальная система координат (ОСК) **O** ($Ox^o y^o z^o$) с началом в полюсе O и ортами $\mathbf{r}^o, \boldsymbol{\tau}^o, \mathbf{n}^o$, которая имеет следующие направления осей и ортов: ось Ox^o направлена по радиали \mathbf{r}^o , ось Oz^o – по нормали \mathbf{n}^o к плоскости орбиты, а ось Oy^o – по трансверсали $\boldsymbol{\tau}^o$ и направлена в сторону орбитального движения, см. рис 1, где представлена также система координат $O_t x_t y_t z_t$, связанная с корпусом ГСС (цель, target) в его центре масс O_t .

Далее используются общепринятые обозначения $\text{col}(\cdot) = \{\cdot\}$, $\text{line}(\cdot) = [\cdot]$, $(\cdot; \cdot)$, $[\times \cdot]$, $(\cdot)^t$, $[\mathbf{a} \times]$ и \circ, \sim для векторов, матриц и кватернионов, матриц $[\alpha]_i$ стандартного элементарного поворота вокруг i -ой оси на угол α , $i = 1 \div 3$, а также $C_\alpha \equiv \cos \alpha$, $S_\alpha \equiv \sin \alpha$.

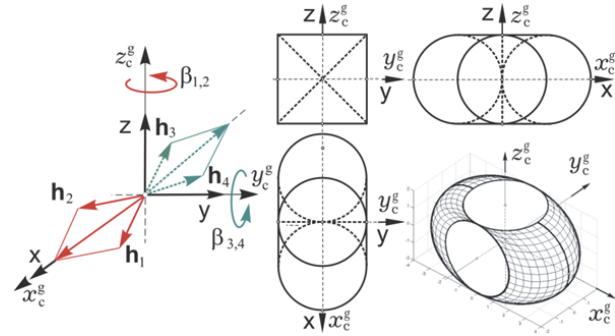


Рис. 3. Схема СК и область вариации его КМ

Для управления ориентацией связки КРМ с ГСС применяется силовой гироскопический кластер (СКГ) на основе четырех ГД по схеме 2-SPE с ортами векторов кинетических моментов (КМ) $\mathbf{h}_p(\beta_p)$, $p = 1 \div 4$, см. рис. 3, где приведена также область вариации нормированного вектора КМ $\mathbf{h}(\boldsymbol{\beta}) = \sum \mathbf{h}_p(\beta_p)$ кластера со столбцом $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_p\}$ и ее проекции на плоскости базиса $Ox_c^g y_c^g z_c^g$. Применяемый явный аналитический закон настройки СКГ (распределения трехмерного вектора его управляющего момента $\mathbf{M}^g = \{M_i^g\}$ между четырьмя ГД) позволяет исключить избыточность данного кластера с вектором кинетического момента $\mathbf{H} = h_g \mathbf{h}(\boldsymbol{\beta})$, где h_g – одинаковое для всех четырех ГД постоянное значение модуля собственного КМ.

Ориентация ССК **B** в ИСК I_{\oplus} определяется кватернионом $\Lambda = (\lambda_0, \boldsymbol{\lambda})$, где $\boldsymbol{\lambda} = \{\lambda_i\}$, вектором модифицированных параметров Родрига (МПР) $\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_i\} = \mathbf{e} \mathbf{g} (\Phi/4)$ с ортом \mathbf{e} оси Эйлера и углом Φ собственного поворота.

В ИСК I_{\oplus} кинематические уравнения для вектора \mathbf{r}_o расположения КРМ, кватерниона Λ и вектора МПР $\boldsymbol{\sigma}$ имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_o &= \mathbf{r}'_o + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_o; & \dot{\Lambda} &= \Lambda \circ \boldsymbol{\omega} / 2; \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}} &= \frac{1}{4} (1 - \sigma^2) \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\omega}) \boldsymbol{\sigma}, \end{aligned} \quad (1)$$

где вектор $\boldsymbol{\omega}$ представляет абсолютную угловую скорость корпуса КРМ и используется обозначение $(\cdot)'$ локальной производной по времени. Кватернион Λ^o ориентации базиса **O** относительно базиса I_{\oplus} определяется

уравнением $\dot{\Lambda}^o = \Lambda^o \circ \omega^o / 2$, углами рыскания $\phi_1 = \psi$, крена $\phi_2 = \varphi$ и тангажа $\phi_3 = \theta$ в последовательности 132, а также матрицей направляющих косинусов координатного перехода от ОСК к ССК $C^o = [\phi_2]_2 [\phi_3]_3 [\phi_1]_1$. В свою очередь, погрешность ориентации базиса \mathbf{B} в орбитальном базисе \mathbf{O} определяется кватернионом $\mathbf{E} = \tilde{\Lambda}^o \circ \Lambda \equiv (e_0, \mathbf{e})$, где $e_0 = C_{\Phi^e/2}$, $\mathbf{e} = S_{\Phi^e/2} \mathbf{e}^e$ с ортом оси Эйлера \mathbf{e}^e и углом ошибки Φ^e , матрицей $C^e = \mathbf{I}_3 - 2[\mathbf{e} \times] \mathbf{Q}_e^t$, где $\mathbf{Q}_e = \mathbf{I}_3 e_0 + [\mathbf{e} \times]$, вектором угловой погрешности $\delta\phi \equiv \{\delta\phi_i\} = \{2e_0 e_i\}$ и вектором МПР $\sigma^e = \{\sigma_i^e\} = \mathbf{e}^e \text{tg}(\Phi^e / 4)$. При этом вектор $\delta\omega$ погрешности угловой скорости определяется как $\delta\omega = \omega - C^e \omega^o(t)$.

При моделировании движения связки КРМ с ГСС применяется векторная форма классических уравнений Эйлера-Лагранжа [3].

В ССК $Oxyz$ с полюсом O векторы ρ_i , $i = 1 \div 4$ определяют положения центров масс c_i звеньев манипулятора с массами m_i и собственными тензорами инерции \mathbf{J}_i^c , а векторы $\rho_r = 0$ и ρ_t – положения центров масс O_r и O_t робота (индекс r) и цели (индекс t) с массами и собственными тензорами инерции m_r, \mathbf{J}_r^c и m_t, \mathbf{J}_t^c соответственно. Положение центра масс C связки КРМ и ГСС (робот, манипулятор с 4 звеньями и цель, см. рис. 1) суммарной массы $m = m_r + \sum m_i + m_t$ определяется вектором $\rho_c = \{x_c, y_c, z_c\}$ по соотношению

$$\mathbf{L} \equiv m \rho_c = m_r \rho_r + \sum m_i \rho_i + m_t \rho_t,$$

где введен вектор статического момента \mathbf{L} . Тензор инерции \mathbf{J} механической системы в полюсе O вычисляется по соотношению

$$\mathbf{J} \equiv \|\mathbf{J}_j\| = \mathbf{J}_r^o + \sum \mathbf{J}_i^o + \mathbf{J}_t^o,$$

где при единичном тензоре \mathbf{E}

$$\mathbf{J}_r^o = \mathbf{J}_r^c; \mathbf{J}_i^o = \mathbf{J}_i^c + m_i (\mathbf{E} \rho_i^t \rho_i - \rho_i \rho_i^t);$$

$$\mathbf{J}_t^o = \mathbf{J}_t^c + m_t (\mathbf{E} \rho_t^t \rho_t - \rho_t \rho_t^t).$$

При векторе \mathbf{v}_o скорости полюса O поступательное движение связки КРМ с ГСС описывается векторным уравнением

$$m \dot{\mathbf{v}}_o - \mathbf{L} \times \dot{\omega} = \omega \times (\mathbf{L} \times \omega) - \sum_i (m_i (2\omega \times \rho_i' + \rho_i'')) + \mathbf{P}^e + \mathbf{F}^{\text{gr}}, \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{v}}_o = \mathbf{v}'_o + \omega \times \mathbf{v}_o$; $\rho_i' = \sum_s ((\partial \rho_i / \partial q_s) \dot{q}_s)$;

$$\rho_i'' = \sum_s ((\partial \rho_i / \partial q_s) \ddot{q}_s + \sum_k (\partial^2 \rho_i / \partial q_k \partial q_s) \dot{q}_k \dot{q}_s),$$

векторы \mathbf{P}^e и \mathbf{F}^{gr} представляют силы тяги ЭДУ, центрированной в полюсе O , и гравитации.

Через ω_i обозначим вектор угловой скорости i -го звена манипулятора в ССК. Производная этого вектора по времени имеет вид $\dot{\omega}_i = \omega_i' + \omega \times \omega_i$. В ССК $Oxyz$ с полюсом O вращательное движение связки указанных твердых тел описывается векторным уравнением

$$\mathbf{L} \times \dot{\omega}_o + \mathbf{J} \dot{\omega} = -\mathbf{L} \times (\omega \times \mathbf{v}_o) - \omega \times (\mathbf{J} \omega + \mathbf{H}) - \mathbf{R} + \mathbf{M}^g + \mathbf{M}^e + \mathbf{M}^{\text{gr}}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{R} = \sum_i (\mathbf{J}_i^o \dot{\omega}_i + \omega \times \mathbf{J}_i^o \omega_i + \omega_i \times \mathbf{J}_i^o (\omega + \omega_i) + m_i \rho_i \times (\omega \times (\omega \times \rho_i) + 2\omega \times \rho_i' + \rho_i'')) ,$$

векторы $\mathbf{M}^g = -\mathbf{H}'$ и $\mathbf{M}^e \equiv \mathbf{M}$ представляют управляющие моменты СГК с вектором КМ \mathbf{H} и ЭДУ на основе 8 каталитических ЭРД, а вектор \mathbf{M}^{gr} – гравитационный момент.

Векторные уравнения Эйлера (2), (3) дополняются стандартными уравнениями Лагранжа по степеням подвижности q_s манипулятора, где в правых частях наряду с обобщенными силами Q_s , представляющими моменты электромеханических приводов, имеются механические моменты [3], которые обусловлены пространственным движением связки КРМ с ГСС.

При цифровом управлении $\mathbf{u}_k^g(t) = \{u_{pk}^g(t)\}$ СГК с периодом T_u , где для $k \in \mathbb{N}_0 \equiv \{0, 1, 2, \dots\}$ компоненты $u_{pk}^g(t) = u_{pk}^g \forall t \in [t_k, t_{k+1})$, $t_{k+1} = t_k + T_u$ формируют вектор управляющего момента СГК

$$\mathbf{M}_k^g(t) = -h_g \mathbf{A}_h(\beta(t)) \mathbf{u}_k^g(t); \dot{\beta}(t) = \mathbf{u}_k^g(t), \quad (4)$$

где матрица Якоби $\mathbf{A}_h(\beta) = \partial \mathbf{h}(\beta) / \partial \beta$.

В процессе угловой стабилизации связки КРМ с ГСС в ОСК при законе наведения $\Lambda^o(t), \omega^o(t), \dot{\omega}^o(t) = \varepsilon^o(t)$ после дискретной фильтрации измеренных значений вектора углового рассогласования $\varepsilon_l^a \equiv -\delta\phi_l$, $l \in \mathbb{N}_0$ с периодом $T_q^a = T_u / 4$ формируются значения вектора $\varepsilon_k^{\text{af}}$, $k \in \mathbb{N}_0$, которые применяются в алгоритме управления СГК с периодом T_u в виде

$$\mathbf{g}_{k+1}^a = \mathbf{B}^a \mathbf{g}_k^a + \mathbf{C}^a \varepsilon_k^{\text{af}}; \tilde{\mathbf{m}}_k = \mathbf{K}^a (\mathbf{g}_k^a + \mathbf{P}^a \varepsilon_k^{\text{af}}); \mathbf{M}_k^g = \omega_k \times \mathbf{G}_k + \mathbf{J} (\mathbf{C}_k^e \varepsilon_k^o + [\mathbf{C}_k^e \omega_k^o \times] \omega_k + \tilde{\mathbf{m}}_k). \quad (5)$$

Здесь вектор $\mathbf{G}_k = \mathbf{J} \omega_k + \mathbf{H}_k$ и используют постоянные диагональные матрицы $\mathbf{K}^a, \mathbf{B}^a, \mathbf{C}^a$ и \mathbf{P}^a . Далее вектор \mathbf{M}_k^g с помощью явного

закона распределения команд между четырьмя ГД [4] «пересчитывается» в столбец $\mathbf{u}_k^g = \{u_{pk}^g\}$ командных сигналов управления гиродинами, которые фиксируются на полуинтервалах цифрового управления СГК с периодом T_u при формировании его управляющего момента $\mathbf{M}_k^g(t)$ по соотношениям (4).

В статье решаются следующие задачи:

- (i) обоснование кинематической схемы, параметров манипулятора и его рабочей зоны;
- (ii) синтез законов наведения схвата манипулятора;
- (iii) оценка потребных характеристик электромеханических приводов манипулятора;
- (iv) компьютерный анализ динамики СУД при смене топливных баков ЭДУ.

ПАРАМЕТРЫ МАНИПУЛЯТОРА И ЕГО РАБОЧАЯ ЗОНА

Будем считать, что начало O_m системы координат (СК) манипулятора $O_m x_m y_m z_m$ определяется вектором $\mathbf{r}_m = \{-0.2, -1, -0.6\}$ м в СК $O_r x_r y_r z_r$ корпуса КРМ, см. рис. 1, где также показаны контейнеры \mathbf{a} (пустой) и \mathbf{b} с центрами крышек $\{0.55, -1.75, -0.1\}$ м и $\{0.55, -1.35, -0.1\}$ м, соответственно. Здесь центры крышек баков лежат в одной плоскости, т.е. рабочая зона манипулятора должна располагаться над плоскостью крышек ($z_m \geq 0$) и в ней не должно быть мешающих элементов конструкции КРМ и ГСС.

Положение центра масс ГСС относительно полюса O определяется вектором $\mathbf{r}_t = \{0, 2.8, 0\}$ м. Пустой (заменяемый) бак \mathbf{f} в системе координат ГСС $O_t x_t y_t z_t$ имеет координаты центра крышки $\{0, 1, 0\}$ м. Расстояние от контейнера \mathbf{a} КРМ до бака в контейнере \mathbf{f} ГСС составляет 5.6 м. Из простых геометрических расчетов следует, что для суммы длин первых двух звеньев манипулятора должно выполняться условие $l_1 + l_2 \geq 3.3$ м. Этим условиям удовлетворяет манипулятор с кинематической схемой на рис. 2 при длинах звеньев

$$l_1 = 2 \text{ м}, l_2 = 1.5 \text{ м}, l_3 = 0.5 \text{ м},$$

когда $l_4 = 0$ (без бака) и $l_4 = 0.25$ м (с баком), и с рабочей зоной в виде полусферы с радиусом 3 м, выделенной на рис. 1 голубым цветом, при следующих ограничениях на угловые координаты:

$$\begin{aligned} -\pi &\leq q_1 \leq \pi, \quad 0 \leq q_2 \leq \pi; \\ -\pi &\leq q_i \leq \pi, \quad i = 3 \div 6. \end{aligned} \quad (6)$$

С каждым i -ым ($i = 1 \div 4$) звеном связывается СК с началом в точке сопряжения i -ой пары звеньев, см. рис. 2. Кинематическая модель манипулятора обязательно включает формулы решения прямой и обратной задачи кинематики [5].

Прямая задача состоит в расчете векторов декартовых координат $\mathbf{r}(\mathbf{q})$, линейных скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ и ускорений $\mathbf{w}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$ заданных точек в кинематической цепи манипулятора, а также кватернионов либо матриц ориентации, в системе координат манипулятора $O_m x_m y_m z_m$ при заданных значениях векторов угловых координат $\mathbf{q} = \{q_s\}$, $s = 1 \div 6$, скоростей $\dot{\mathbf{q}}$ и ускорений $\ddot{\mathbf{q}}$ звеньев. Для решения прямой задачи кинематики используется обратный рекуррентный переход из i -ой в $(i - 1)$ -ую СК, начиная с последнего звена до стойки при $i = 1$ [6].

Обратная задача кинематики манипулятора состоит в определении вектора угловых координат $\mathbf{q} = \{q_s\}$ по заданным декартовым координатам вектора $\mathbf{r}_D = \{x_D, y_D, z_D\}$ точки D схвата и ориентации СК последнего звена манипулятора относительно СК $O_m x_m y_m z_m$ стойки (master) при ограничениях (6). В общем случае решение обратной задачи неоднозначно. Для схемы на рис. 2 единственное решение этой задачи получается однозначно при наличии возможности перемещения звена 3 с точкой D в отрицательном направлении оси $O_m z_m$, см. рис. 1.

ЗАКОНЫ НАВЕДЕНИЯ СХВАТА И УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ

Синтез законов программного наведения схвата манипулятора при переходах между целевыми состояниями с краевым условиям по каждой из угловых координат q_s включает два аспекта: (i) расчет значений времени начала t_i (initial), завершения t_f (final) и длительности $T_m = t_f - t_i$ выполнения каждого этапа и (ii) формирование временных зависимостей углов $q_s(t)$, скоростей $\dot{q}_s(t)$ и ускорений $\ddot{q}_s(t)$ при ограничениях на углы (6), а также на модули скоростей и ускорений

$$|\dot{q}_s(t)| \leq \dot{q}^*, \quad |\ddot{q}_s(t)| \leq \ddot{q}^* \quad \forall t \in T_m \equiv [t_i, t_f] \quad (7)$$

при заданных значениях параметров \dot{q}^* и \ddot{q}^* . Здесь каждый из последовательных этапов перемещения включает стандартные участки разгона, движения с постоянной скоростью и торможения.

При цифровом управлении редукторными электроприводами по степеням подвижности манипулятора применяются адаптивно-робастные алгоритмы с эталонной моделью наведения [7].

ОЦЕНКА МОМЕНТНЫХ СВОЙСТВ ПРИВОДОВ МАНИПУЛЯТОРА

Для простейшей оценки потребных моментных характеристик электромеханических приводов вычисляются обобщенные силы – кру-

тящие моменты на выходных валах приводов манипулятора, когда их нагрузка представлена только обобщенными силами инерции при движении звеньев, а разнообразные моменты сил сопротивления такому движению не учитываются. В этом случае обобщенные силы $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}(t)$ вычисляются по соотношению

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{b}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)), \quad (8)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \mathbf{A}(\mathbf{q}(t))$ – симметричная матрица инерции и $\mathbf{b}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$ – вектор центробежных и кориолисовых сил, приведенных к выходным валам приводов в шарнирах манипулятора.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

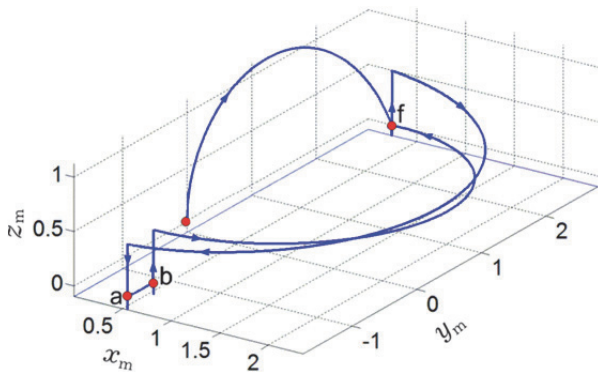


Рис. 4. Траектория схвата манипулятора при замене первого топливного бака ЭДУ

Анализ динамики СУД при смене топливных баков ЭДУ выполнен на основе методов и средств компьютерной имитации для следующих значений инерционных параметров меха-

нической системы твердых тел:

$$m_r = 2800 \text{ кг}; \quad \mathbf{J}_r^c = 10^3 \text{ diag}\{5, 3, 4\} \text{ кгм}^2;$$

$m_t = 3500 \text{ кг}; \quad \mathbf{J}_t^c = 10^3 \text{ diag}\{20, 18, 13\} \text{ кгм}^2;$
 массы первых трёх звеньев манипулятора равны 50, 35 и 15 кг; масса 4-го звена составляет 10 кг (с пустым баком) или 90 кг (с заполненным баком), а сцепка КРМ и ГСС со всеми топливными баками имеет массу $m = 6800 \text{ кг}$.

Было принято, что период цифрового управления СГК $T_u = 4 \text{ с}$, каждый ГД имеет собственный КМ $h_g = 30 \text{ Нмс}$, а ограничения для приводов манипулятора таковы: $\dot{q}^* = 0.025 \text{ с}^{-1}$; $\ddot{q}^* = 0.0125 \text{ с}^{-2}$.

При смене баков манипулятор выполняет типовые действия, поэтому далее кратко приводятся результаты компьютерной имитации замены только первого топливного бака, когда

1) схват переводится из транспортного положения $\mathbf{r}_D = \{x_D, y_D, z_D\} = \{0, 0, 0\}$ сначала к контейнеру ГСС с пустым баком **f** (см. рис. 4), который затем перемещается в пустой контейнер **a** КРМ;

2) схват переходит к контейнеру **b** КРМ и далее перемещает полный бак **b** в контейнер **f** ГСС.

Декартовы координаты целевых точек рабочей зоны манипулятора в его системе координат $O_m x_m y_m z_m$ и последовательность действий во времени представлены в табл. 1.

На рисунках 5 и 6 представлены изменения угловых координат звеньев манипулятора и оценки соответствующих им потребных моментов на выходных валах приводов при замене первого топливного бака. При использовании редукторов с передаточным отношением

Таблица 1. Состояния манипулятора, координаты схвата, время выполнения этапов и их длительность

| № | Последовательность состояний манипулятора и положения хвата | Координаты схвата при завершении этапа, м | | | Отметки времени и длительность, с | | |
|----|---|---|-------|-------|-----------------------------------|-------|-------|
| | | x_D | y_D | z_D | t_i | t_f | T_m |
| 1 | Развертывание, переход к баку f и зависание | 0.25 | 2.8 | 0 | 0 | 102 | 102 |
| 2 | Вставка ключа в пустой бак f ГСС | 0.25 | 2.8 | -0.1 | 102 | 108 | 6 |
| 3 | Закрытие замка и захват бака f | 0.25 | 2.8 | -0.1 | 108 | 175 | 67 |
| 4 | Вытягивание бака f из контейнера f ГСС | 0.25 | 2.8 | 0.25 | 175 | 186 | 11 |
| 5 | Бак f выведен из контейнера f ГСС | 0.25 | 2.8 | 0.5 | 186 | 195 | 9 |
| 6 | Переход к баку a КРМ и зависание | 0.25 | -1.75 | 0.5 | 195 | 309 | 114 |
| 7 | Вставка бака f в контейнер a | 0.55 | -1.75 | -0.1 | 309 | 333 | 24 |
| 8 | Открытие замка бака f в контейнере a КРМ | 0.55 | -1.75 | -0.1 | 333 | 384 | 51 |
| 9 | Зависание над контейнером a КРМ | 0.55 | -1.75 | 0 | 384 | 391 | 7 |
| 10 | Переход к баку b КРМ и зависание | 0.55 | -1.35 | 0 | 391 | 405 | 14 |
| 11 | Вставка ключа и захват бака b КРМ | 0.55 | -1.35 | -0.1 | 405 | 476 | 71 |
| 12 | Вытягивание бака b из контейнера b КРМ | 0.55 | -1.35 | 0.5 | 476 | 503 | 27 |
| 13 | Переход к контейнеру f ГСС и зависание | 0.25 | 2.8 | 0 | 503 | 614 | 111 |
| 14 | Вставка бака b в контейнер f ГСС | 0.25 | 2.8 | -0.1 | 614 | 725 | 111 |

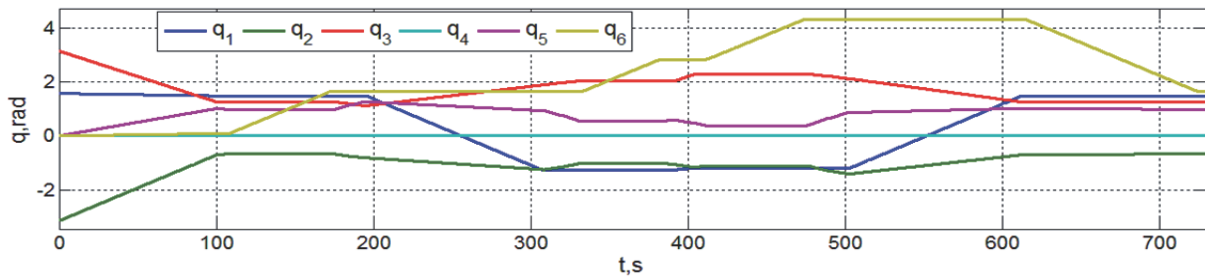


Рис. 5. Изменение угловых координат манипулятора при замене первого топливного бака

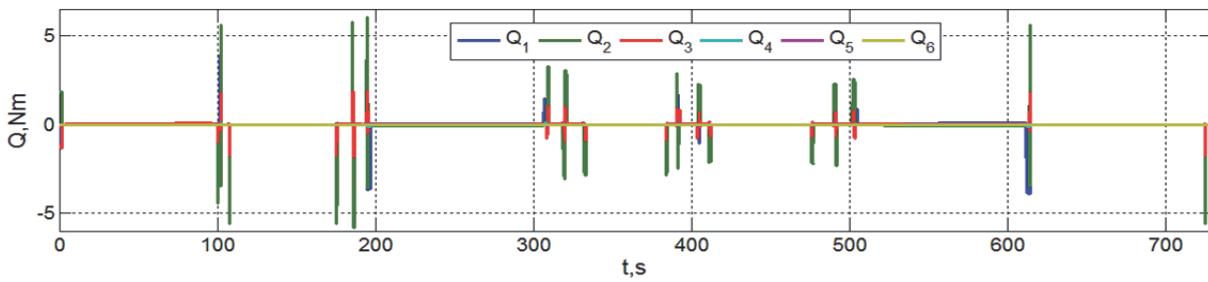


Рис. 6. Оценки потребных моментов на выходных валах приводов манипулятора

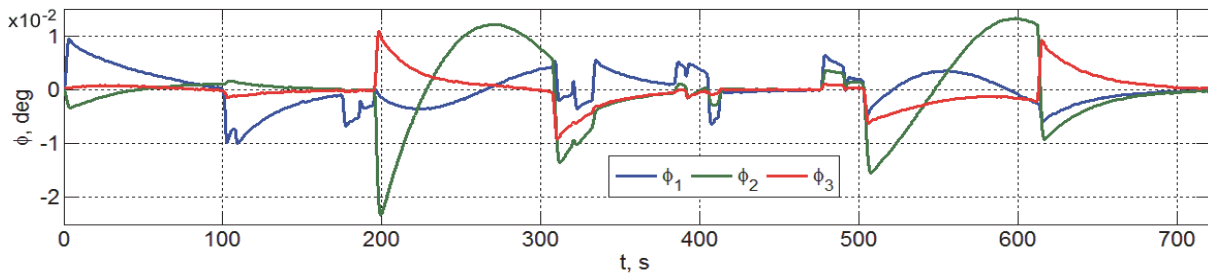


Рис. 7. Угловое отклонение ССК относительно ОСК при смене топливного бака

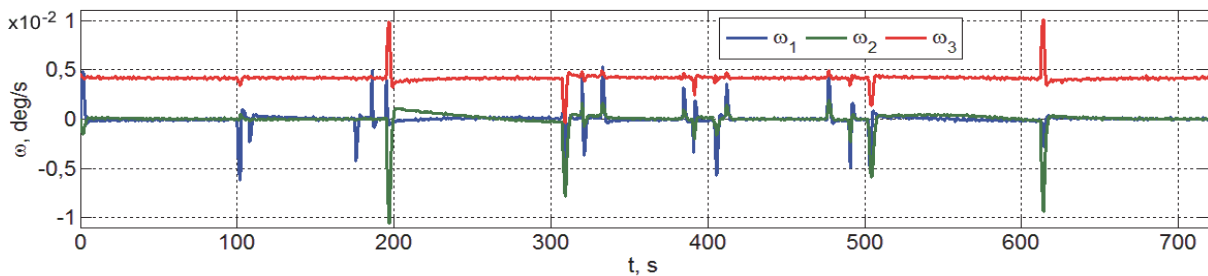


Рис. 8. Изменение вектора угловой скорости связки КРМ и ГСС при смене бака

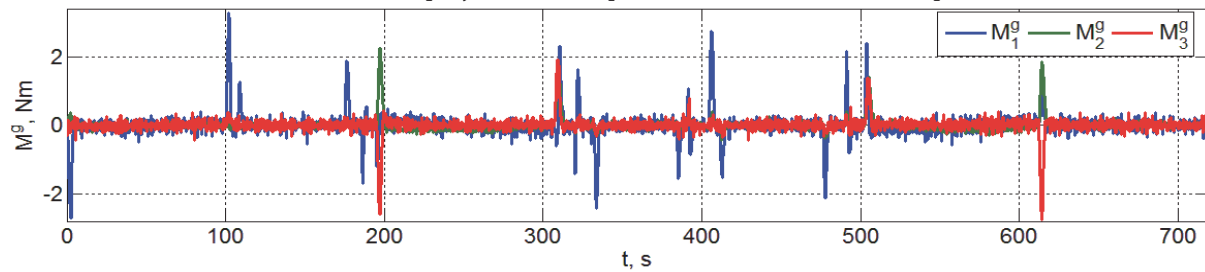


Рис. 9. Управляющий момент силового гироскопического кластера при смене бака

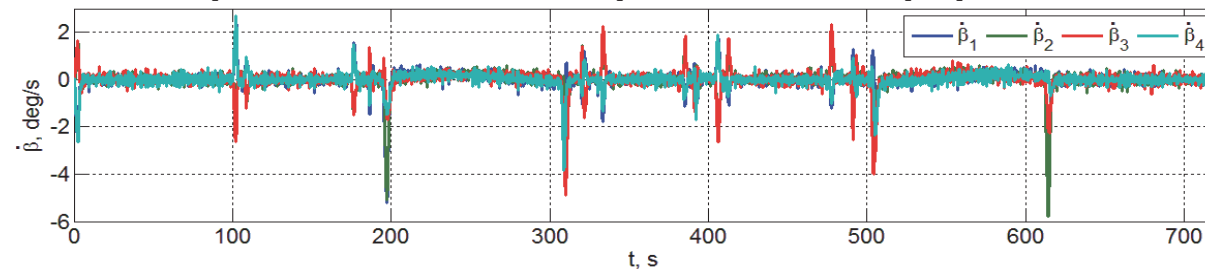


Рис. 10. Изменения угловых скоростей гироскопов при смене топливного бака

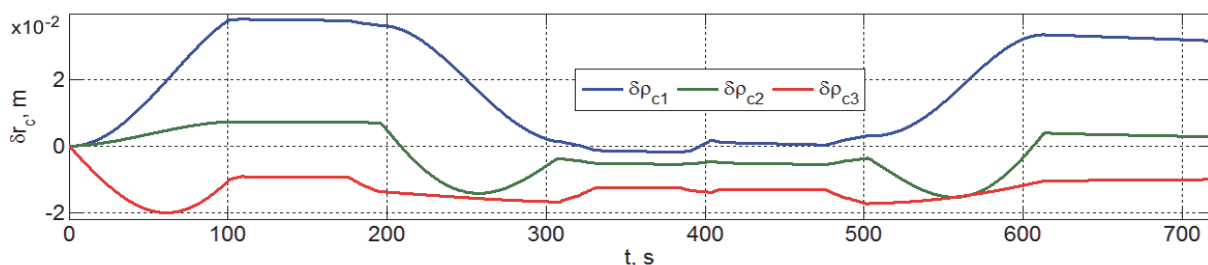


Рис. 11. Изменение вектора положения центра масс связки КРМ и ГСС при смене бака

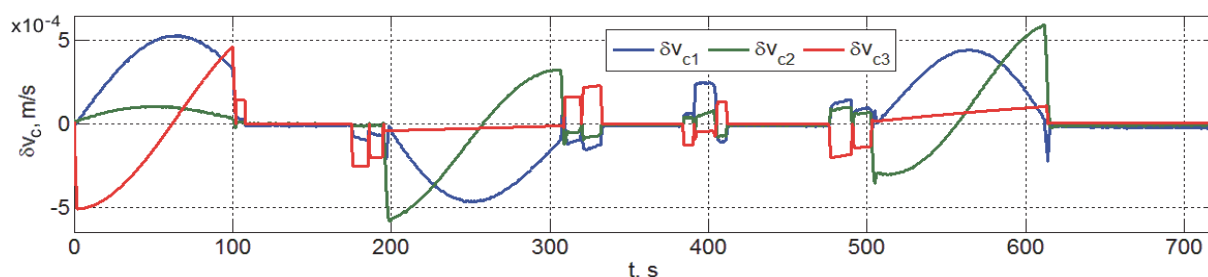


Рис. 12. Изменение вектора скорости центра масс связки КРМ и ГСС при смене бака

1:400 потребные моменты с учетом возможных потерь не превысят 10 Нм, что позволяет использовать шаговые двигатели с номинальным моментом 0.025 Нм и максимальной скоростью 100 об/мин.

Изменения кинематических параметров ориентации связки КРМ и ГСС относительно ОСК при смене бака приведены на рис. 7 и 8, а соответствующие изменения вектора управляющего момента СГК и угловых скоростей гироскопов – на рис. 9 и 10.

Наконец, на рисунках 11 и 12 представлены изменения векторов положения и скорости поступательного движения центра масс связки КРМ и ГСС при смене бака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко представлены стратегия и методы управления космическим роботом-манипулятором при смене топливных баков электро-реактивной двигательной установки геостационарного спутника связи. Для конкретных исходных данных установлены требования к электромеханическим приводам манипулятора и представлены результаты компьютерной имитации динамических процессов при смене топливных баков с одновременной угловой стабилизацией механической связки робота и геостационарного спутника в орбитальной системе координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е. Управление космическим роботом-манипулятором при встрече и механическом захвате пассивного спутника // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Том 20, № 6. С. 202-209.
2. 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, pp. 421-432.
3. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит. 1961. 824 с.
4. Сомов Е.И. Анализ сингулярных состояний и синтез явных законов настройки гироскопов кратных схем // Гироскопия и навигация. 2013. № 1(80). С. 134-148.
5. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
6. Елисеев С.В., Бутырин С.А., Засядко А.А. Функциональные модули пакета прикладных программ для задач проектирования манипуляционных роботов // Пакеты прикладных программ. Методы и разработки. Новосибирск: Наука, 1981. С. 206-216.
7. Крутько П.Д. Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука. 1991. 336 с.

**CONTROL OF THE ROBOT-MANIPULATOR WHEN CHANGING FUEL TANKS
OF THE GEOSTATIONARY SATELLITE PROPULSION UNIT**

© 2022 S.A. Butyrin^{1,2}, Ye.I. Somov^{1,2}, S.Ye. Somov^{1,2}, T.Ye. Somova²

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

² Samara State Technical University, Samara, Russia

Abstract. Methods have been developed for control of a space robot-manipulator when changing fuel tanks of the propulsion unit while simultaneously stabilizing the angular motion of the robot mechanical mated with a geostationary satellite. The requirements for the electromechanical drives of the robot manipulator are determined and the results on computer simulation of dynamic processes are presented.

Key words: geostationary communications satellite, fuel tank change, space robot control

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-96-104

Sergey Butyrin, Senior Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, 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

Yevgeny Somov, Leading Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, 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 Somov, Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Researcher of Department "Navigation, Guidance, and Motion control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail s_somov@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