

Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е., Сомова Т.Е.

## НАВЕДЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ СВОБОДНОЛЕТАЮЩИМ РОБОТОМ ПРИ СБЛИЖЕНИИ С ПАССИВНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

### Введение

Разработка методов управления движением космических роботов-манипуляторов (КРМ) для механического захвата, транспортировки и сервисного обслуживания пассивных космических объектов (ПКО) в условиях неопределенности и неполноты измерения состояния является актуальной научной проблемой.

Целью данной статьи является разработка стратегии наведения и управления КРМ, а также оценка потребных ресурсов его системы управления движением (СУД). Рассматриваются задачи наведения и управления движением КРМ при его сближении с вращающимся ПКО в дальнем космосе, когда можно пренебречь внешними возмущениями, которые влияют на движения ПКО и КРМ. При этом регулярно используются инерциальная система координат (ИСК) и система координат, связанная с корпусом КРМ, которую обычно называют связанной системой координат (ССК), а также стандартные обозначения  $\text{co}(\cdot) = \{\cdot\}$ ,  $\text{line}(\cdot) = [\cdot]$ ,  $(\cdot)^t$ ,  $[\mathbf{a}\times]$  и  $\circ, \sim$  для векторов, матриц и кватернионов.

### 1. Математические модели и постановка задачи

Предполагается совпадение положений центра масс КРМ и полюса  $O$  в ССК  $Ox_1y_1z_1$ . На рис. 1 представлена симметричная схема двигательной установки (ДУ) на основе 8 реактивных двигателей (РД). Орты  $\mathbf{e}_p$ ,  $p = 1, \dots, 8 \equiv 1 \div 8$ , осей сопел РД имеют в ССК представления в виде столбцов:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 = -\mathbf{e}_8 &= \{C_\alpha C_\beta, C_\alpha S_\beta, S_\alpha\}; \\ \mathbf{e}_2 = -\mathbf{e}_7 &= \{C_\alpha C_\beta, C_\alpha S_\beta, -S_\alpha\}; \\ \mathbf{e}_3 = -\mathbf{e}_6 &= \{C_\alpha C_\beta, -C_\alpha S_\beta, S_\alpha\}; \\ \mathbf{e}_4 = -\mathbf{e}_5 &= \{C_\alpha C_\beta, -C_\alpha S_\beta, -S_\alpha\}, \\ S_x &\equiv \sin x, C_x \equiv \cos x, x = \alpha^e, \beta^e. \end{aligned}$$

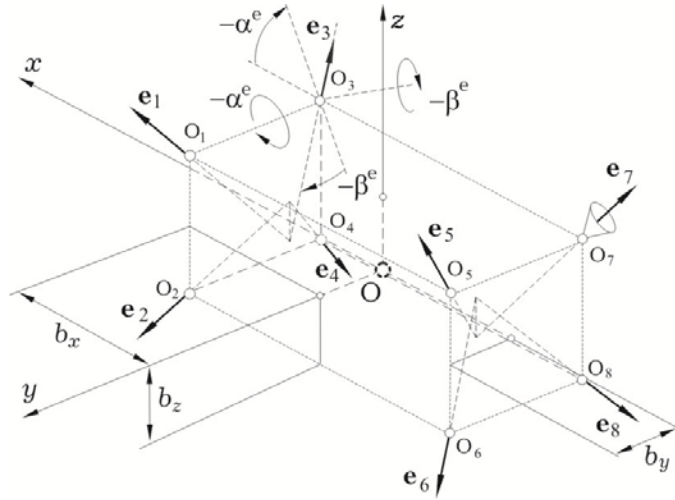


Рис. 1. Схема ДУ на основе 8 РД

Векторы  $\mathbf{p}_p$ ,  $p = 1 \div 8$ , точек  $O_p$  приложения вектора тяги РД в ССК (см. рис. 1) представляются столбцами:

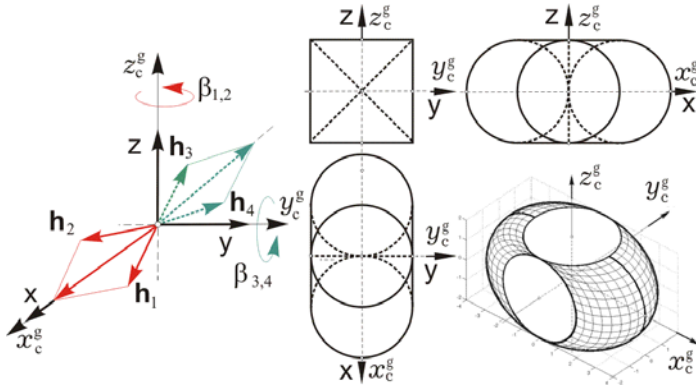
$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= \{b_x, b_y, b_z\}; & \mathbf{p}_2 &= \{b_x, b_y, -b_z\}; & \mathbf{p}_3 &= \{b_x, -b_y, b_z\}; & \mathbf{p}_4 &= \{b_x, -b_y, -b_z\}; \\ \mathbf{p}_5 &= \{-b_x, b_y, b_z\}; & \mathbf{p}_6 &= \{-b_x, b_y, -b_z\}; & \mathbf{p}_7 &= \{-b_x, -b_y, b_z\}; & \mathbf{p}_8 &=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

При цифровом управлении ДУ каждый РД имеет кусочно-постоянное значение тяги  $p_p(t) \in [0, P^m] \quad \forall t \in [t_r, t_{r+1})$ ,  $r \in N_0 \equiv [0, 1, 2, \dots)$  с периодом  $T_u^c$  и запаздыванием  $T_{zu}^c$ , где  $P^m > 0$  – максимальное значение тяги, одинаковое для всех РД. При отсутствии квантования по уровню формирование реактивной тяги представляется соотношением  $p_p(t) = Zh(t - T_{zu}^c, t_r, T_u^c, v_{pr}) \quad \forall t \in [t_r, t_{r+1})$ , где функция  $y_r(t) = Zh(t, t_r, T_u^c, x_r) = x_r \quad \forall t \in [t_r, t_{r+1})$  описывает процесс фиксации сигнала  $x_r$  на полуинтервале  $[t_r, t_{r+1})$ . Здесь при обозначениях  $\mathbf{p}_r = \{p_{pr}\}$  – вектор-столбец, составленный из значений тяги всех 8 РД;  $\mathbf{t}_r^e = \{\mathbf{P}_r^e, \mathbf{M}_r^e\}$  – столбец, составленный из заданных в ССК векторов силы  $\mathbf{P}_r^e$  и момента  $\mathbf{M}_r^e$  ДУ;  $\mathbf{D}^e = \{[\mathbf{e}_p], [\mathbf{p}_p \times \mathbf{e}_p]\}$  – прямоугольная матрица. Проблема заключается в решении уравнения  $\mathbf{D}^e \mathbf{p}_r = \mathbf{t}_r^e$ ,  $\mathbf{p}_r \in R_+^8$ ,  $\mathbf{t}_r^e \in R^6$  при условии  $0 \leq p_{pr} \leq P^m \quad \forall p = 1 \div 8$  относительно компонентов вектора-столбца  $\mathbf{p}_r = \{p_{pr}\}$ . Закон распределения цифровых значений тяги всех 8 РД на каждом полуинтервале времени  $t \in [t_r, t_{r+1})$  с периодом  $T_u^c$  имеет следующую алгоритмическую форму:

$$\hat{\mathbf{p}}_r \equiv \{\hat{p}_{pr}\} = (\mathbf{D}^e)^\# \mathbf{t}_r^e; \quad \tilde{p}_{pr} = \hat{p}_{pr} - \min(\hat{p}_{pr}); \quad \text{if } q \equiv \max(\tilde{p}_{pr}) > P^m \text{ then } p_{pr} = \tilde{p}_{pr} / q.$$

В ССК вектор тяги  $p$ -го РД вычисляется по формуле  $\mathbf{p}_p(t) = -p_p(t) \mathbf{e}_p$ , а векторы

силы  $\mathbf{P}^e$  и момента  $\mathbf{M}^e$  ДУ – в виде  $\mathbf{P}^e = \Sigma \mathbf{p}_p(t) = \mathbf{P} \equiv \{P_1, P_2, P_3\}$  и  $\mathbf{M}^e = \Sigma [\mathbf{p}_p \times] \mathbf{p}_p(t)$ . Для управления ориентацией КРМ применяется силовой гироскопический кластер (СГК)



четырёх гироскопов (ГД). На рис. 2 представлена каноническая схема 2-SPE, состоящая из двух пар ГД с ортами кинетических моментов (КМ)  $\mathbf{h}_p(\beta_p)$ ,  $p = 1 \div 4$ ; область вариации нормированного вектора КМ  $\mathbf{h}(\beta) = \Sigma \mathbf{h}_p(\beta_p)$  кластера, где столбец

Рис. 2. Схема СГК и область вариации его КМ  $\beta = \{\beta_p\}$ , и ее проекции на плоскости симметрии гироскопического базиса  $Ox_c^g y_c^g z_c^g$ . Все внутренние сингулярные состояния схемы 2-SPE являются проходимыми [1, 2], применяемый явный аналитический закон настройки СГК позволяет исключить избыточность кластера с вектором КМ  $\mathbf{H} = h_g \mathbf{h}(\beta)$ , где  $h_g$  – одинаковое для всех ГД значение модуля собственного КМ. При цифровом управлении  $\mathbf{u}_k^g(t) = \{u_{pk}^g(t)\}$  с периодом  $T_u$ , где  $u_{pk}^g(t) = u_{pk}^g \quad \forall t \in [t_k, t_{k+1})$ ,  $t_{k+1} = t_k + T_u$  и  $k \in \mathbb{N}_0$ , СГК формирует вектор управляющего гироскопического момента  $\mathbf{M}_k^g(t) = -h_g \mathbf{A}_h(\beta(t)) \mathbf{u}_k^g(t)$ ;  $\dot{\beta}(t) = \mathbf{u}_k^g(t)$ , где прямоугольная матрица  $\mathbf{A}_h(\beta) = \partial \mathbf{h}(\beta) / \partial \beta$ .

Пусть в ССК, вращающейся относительно ИСК с вектором угловой скорости  $\omega(t) \equiv \{\omega_i(t)\}$ ,  $i = 1 \div 3$ , задан вектор  $\mathbf{a}(t) \equiv \{a_i(t)\}$ . В ИСК этот вектор отображается в виде  $\mathbf{a}^1(t) \equiv \{a_i^1(t)\}$ . Угловое положение ССК относительно ИСК определяется кватернионом  $\Lambda = (\lambda_0, \lambda)$ ,  $\lambda = \{\lambda_i\}$ , который изменяется согласно кинематическому уравнению  $\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega / 2$ . Далее применяется вектор модифицированных параметров Родрига (МПП)  $\sigma = \{\sigma_i\} = \mathbf{e} \operatorname{tg}(\Phi / 4)$  с ортом оси Эйлера  $\mathbf{e}$  и угла  $\Phi$  собственного поворота, который однозначно связан с кватернионом  $\Lambda$  прямыми  $\sigma = \lambda / (1 + \lambda_0)$  и обратными  $\lambda_0 = (1 - \sigma^2) / (1 + \sigma^2)$ ,  $\lambda = 2\sigma / (1 + \sigma^2)$  соотношениями. Предполагая отсутствие всех внешних возмущений в дальнем космосе, модель пространственного движения КРМ при отображении на оси ССК принимается в виде

$$\mathbf{r}_r^* + \omega \times \mathbf{r}_r = \mathbf{v}_r; \quad \mathbf{v}_r^* + \omega \times \mathbf{v}_r = \mathbf{w}, \quad \dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega / 2; \quad \mathbf{J} \dot{\omega} + \omega \times \mathbf{G}^0 = \mathbf{M}^g, \quad (1)$$

где  $\mathbf{a}^*(t) \equiv \partial \mathbf{a} / \partial t$  является локальной производной вектора  $\mathbf{a}(t)$  по времени в ССК. Здесь первые два уравнения с векторами положения  $\mathbf{r}_r$  и скорости  $\mathbf{v}_r$  описывают поступательное движение КРМ (*robot*, нижний индекс  $r$ ), где вектор  $\mathbf{w} = \{w_i\} \equiv \mathbf{P}/m$  является управляющим ускорением, а вторые два уравнения представляют управляемое вращательное движение КРМ с тензором инерции  $\mathbf{J}$ , где  $\mathbf{G}^0 = \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{H}$  является вектором КМ системы твердых тел. Будем для простоты считать, что в ИСК поступательное движение ПКО с векторами положения  $\mathbf{r}_t^1$  и скорости  $\mathbf{v}_t^1$  (*target*, нижний индекс  $t$ ) является прямолинейным и равномерным, а его вращательное движение происходит вокруг фиксированного в ИСК орта  $\mathbf{e}_t^0$  вектора угловой скорости. В ССК векторы дальности  $\Delta \mathbf{r}$  до цели и рассогласования  $\Delta \mathbf{v}$  между скоростями КРМ и ПКО вычисляются по соотношениям  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_t - \mathbf{r}_r$  и  $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_t - \mathbf{v}_r$  соответственно. Завершение сближения КРМ с ПКО начинается при дальности  $\Delta r_t \approx 500$  м, когда КРМ располагается внутри конуса с началом в центре масс ПКО, осью симметрии по отрицательному направлению орта скорости  $\mathbf{v}_t^1$  цели и углом полураствора 60 град. Задача состоит в синтезе законов наведения и управления движением КРМ, при которых робот за заданное время сближается с целью до дальности  $\Delta r_t \approx 30$  м, когда орт  $\mathbf{e}_x$  его бортовой видеокамеры становится параллельным орту  $\mathbf{e}_t^0$  вектора угловой скорости ПКО, и стабилизации такого положения КРМ относительно подвижной цели с точностью  $\approx 0,3$  м.

## 2. Законы пространственного наведения

В ИСК модель поступательного движения КРМ принимает классический вид  $\dot{\mathbf{r}}_r^1 = \mathbf{v}_r^1$ ;  $\dot{\mathbf{v}}_r^1 = \mathbf{w}^1$ , где вектор ускорения  $\mathbf{w}^1 = \mathbf{w}^1(t) = \Lambda(t) \circ \mathbf{w} \circ \tilde{\Lambda}(t)$  представлен в ИСК с помощью кватерниона  $\Lambda(t)$ . При отсутствии вращения ( $\boldsymbol{\omega} \equiv \mathbf{0}$ ) ориентация КРМ в ИСК определяется постоянным кватернионом  $\Lambda_*$ ; ССК имеет фиксированное угловое положение в исходной ИСК и, следовательно, по существу является локальной ИСК, развернутой относительно исходной. С целью упрощения реализации требуемого вектора ускорения  $\mathbf{w}$  с помощью ДУ в ССК принимается следующая стратегия построения законов наведения КРМ, состоящая из трех этапов: 1) разгон робота с постоянным вектором линейного ускорения  $\mathbf{w}$  в ССК при фиксированной ориентации КРМ в исходной ИСК в процессе его поступательного движения; 2) прямолинейное равномерное движение центра масс КРМ с одновременным разворотом его корпуса для ориентации

орта  $\mathbf{e}_x$  бортовой видеокамеры в ИСК параллельно известному орту  $\mathbf{e}_i^o$  вектора угловой скорости ПКО; 3) поступательное движение центра масс КРМ в локальной ИСК по траектории векторного сплайна соответствующего порядка с точным выполнением заданных краевых условий.

Синтез закона углового наведения КРМ (поворотного маневра) на некотором интервале времени  $t \in [t_i^p, t_f^p]$  с заданными краевыми условиями:

$$\Lambda(t_i^p) = \Lambda_i; \omega(t_i^p) = \omega_i; \varepsilon(t_i^p) = \varepsilon_i; \quad \Lambda(t_f^p) = \Lambda_f; \omega(t_f^p) = \omega_f; \varepsilon(t_f^p) = \varepsilon_f; \dot{\varepsilon}(t_f^p) = \dot{\varepsilon}_f$$

выполняется при ограничениях на модули векторов его угловой скорости  $\omega(t)$ , углового ускорения  $\varepsilon(t)$  и производной  $\dot{\varepsilon}(t)$  по времени. При балансе СУД КРМ по вектору КМ  $\mathbf{G}^o$  с условием  $\mathbf{G}^o \equiv \mathbf{0}$  модель динамики принимает вид  $\dot{\omega} = \varepsilon$  с вектором углового ускорения  $\varepsilon = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{M}^g$ , а модель углового движения – кинематическое представление  $\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \omega / 2$ ;  $\dot{\omega} = \varepsilon$ ;  $\dot{\varepsilon} = \varepsilon^* = \mathbf{v}$ . Разработанный метод синтеза законов углового наведения КА, основанный на необходимом и достаточном условии разрешимости классической задачи Дарбу, представлен в [3,4]. Здесь этот метод применяется для пространственного углового наведения КРМ.

### 3. Законы управления пространственным движением

Пусть задан закон углового наведения КРМ  $\Lambda^p(t), \omega^p(t), \dot{\omega}^p(t) = \varepsilon^p(t)$  в ИСК. Кватерниону  $\mathbf{E} = (e_0, \mathbf{e}) = \tilde{\Lambda}^p \circ \Lambda$  с вектором  $\mathbf{e} = \{e_i\}$  соответствует вектор параметров Эйлера  $\mathbf{E} = \{e_0, \mathbf{e}\}$  и матрица погрешности  $\mathbf{C}^e = \mathbf{I}_3 - 2[\mathbf{e} \times] \mathbf{Q}_e^t$ , где  $\mathbf{Q}_e = \mathbf{I}_3 e_0 + [\mathbf{e} \times]$ . После дискретной фильтрации измеренных с периодом  $T_q$  значений вектора углового рассогласования  $\varepsilon_l = -2e_{0l} \mathbf{e}_l$ ,  $l \in \mathbb{N}_0$ , формируются значения вектора  $\varepsilon_k^f, k \in \mathbb{N}_0$ , цифрового закона управления СГК с периодом  $T_u$ :

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

Здесь  $\mathbf{C}_k^e = \mathbf{C}^e(\mathbf{E}_k)$ ,  $\mathbf{G}_k^o = \mathbf{J} \omega_k + \mathbf{H}_k$  и используются диагональные матрицы  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{P}$ . Далее вектор  $\mathbf{M}_k^g$  с помощью явного закона распределения команд между 4 ГД «пересчитывается» в столбец  $\mathbf{u}_k^g = \{u_{pk}^g\}$  сигналов управления ГД, которые фиксируются на полуинтервалах цифрового управления СГК с периодом  $T_u$  для формирования его управляющего момента  $\mathbf{M}_k^g(t)$ .

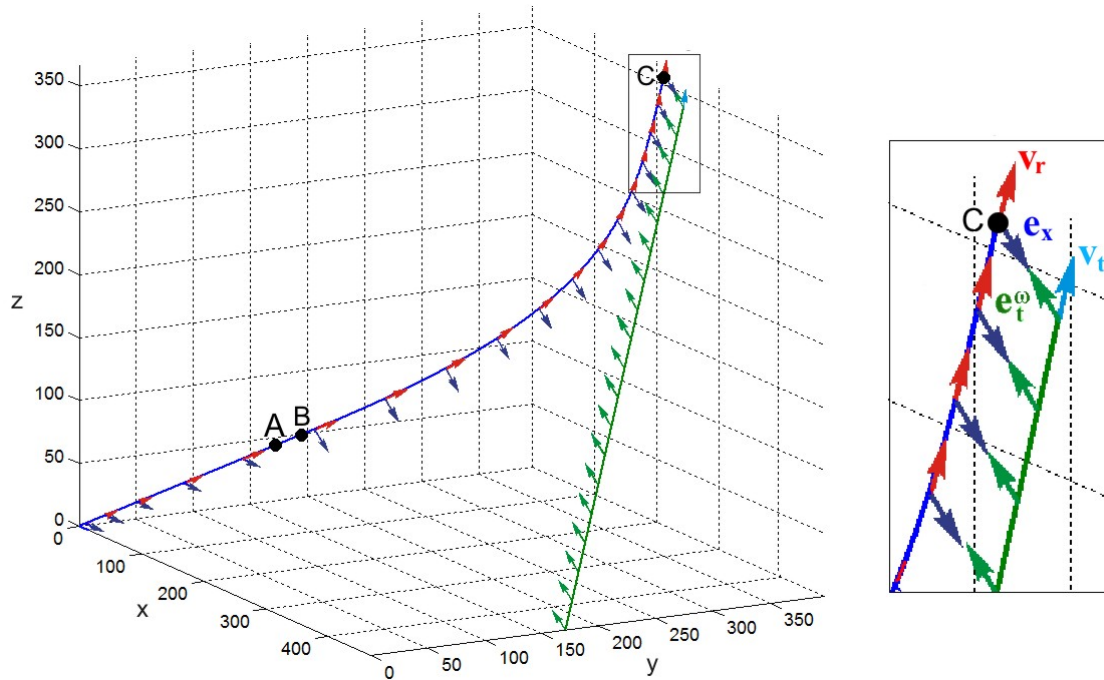


Рис. 3. Сцена пространственного сближения КРМ (синий цвет) с ПКО (зеленый цвет)

При законе наведения  $\Delta \mathbf{r}^p(t), \Delta \mathbf{v}^p(t), \mathbf{w}^p(t)$  в поступательном движении КРМ выполняется фильтрация измеренных с периодом  $T_p$  значений вектора позиционного рассогласования  $\boldsymbol{\varepsilon}_s = (\Delta \mathbf{r}_s^p - \Delta \mathbf{r}_s)$ ,  $s \in N_0$  и с периодом  $T_u^e$  формируются значения вектора  $\boldsymbol{\varepsilon}_r^f$ ,  $r \in N_0$ , которые применяются в законе управления вектором  $\mathbf{P}$  тяги двигательной установки:  $\mathbf{g}_{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{g}_k + \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}_k^f$ ;  $\tilde{\mathbf{w}}_k = \mathbf{K}\mathbf{g}_k + \mathbf{P}\boldsymbol{\varepsilon}_k^f$ ;  $\mathbf{P}_k = \{\mathbf{P}_{ik}\} \equiv \mathbf{P}_k^e = m(\mathbf{w}_k^p + \tilde{\mathbf{w}}_k)$ . Далее вектор  $\mathbf{P}_k$  тяги ДУ распределяется между 8 РД при их цифровом управлении с периодом  $T_u^e$ .

### Результаты имитации

При компьютерной имитации рассматривался космический робот-манипулятор с массой  $m = 1000$  кг и тензором инерции  $\mathbf{J} = \text{diag}\{812; 587; 910\}$  кг м<sup>2</sup>. Было принято, что каждый из восьми РД в составе ДУ имеет максимальное значение тяги  $P^m = 0,5$  Н, расположение РД в ССК определяется плечами  $b_x = 1$  м,  $b_y = 0,7$  м,  $b_z = 0,6$  м и углами их установки  $\alpha^e = 35,25$  град и  $\beta^e = 45$  град (рис. 1). При этом максимальная тяга ДУ по каждой из осей ССК одинакова и составляет 1,15 Н. Каждый из четырех ГД в составе СГК (рис. 2) имеет модуль собственного КМ  $h_g = 30$  Нмс и период цифрового управления  $T_u = 0,25$  с.

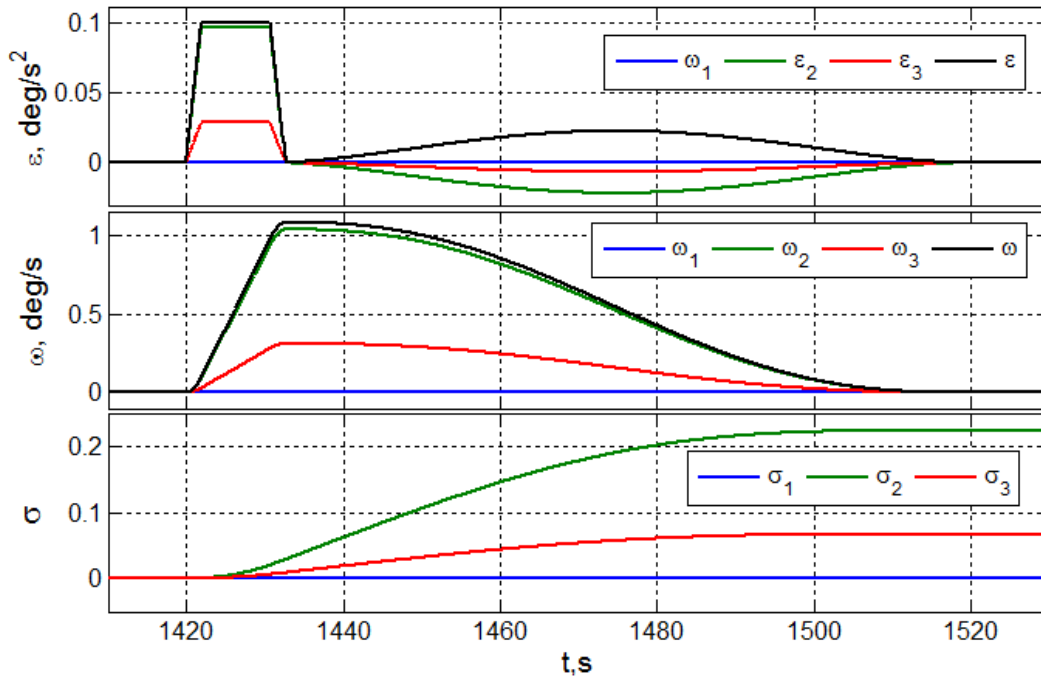


Рис. 4. Закон углового наведения КРМ

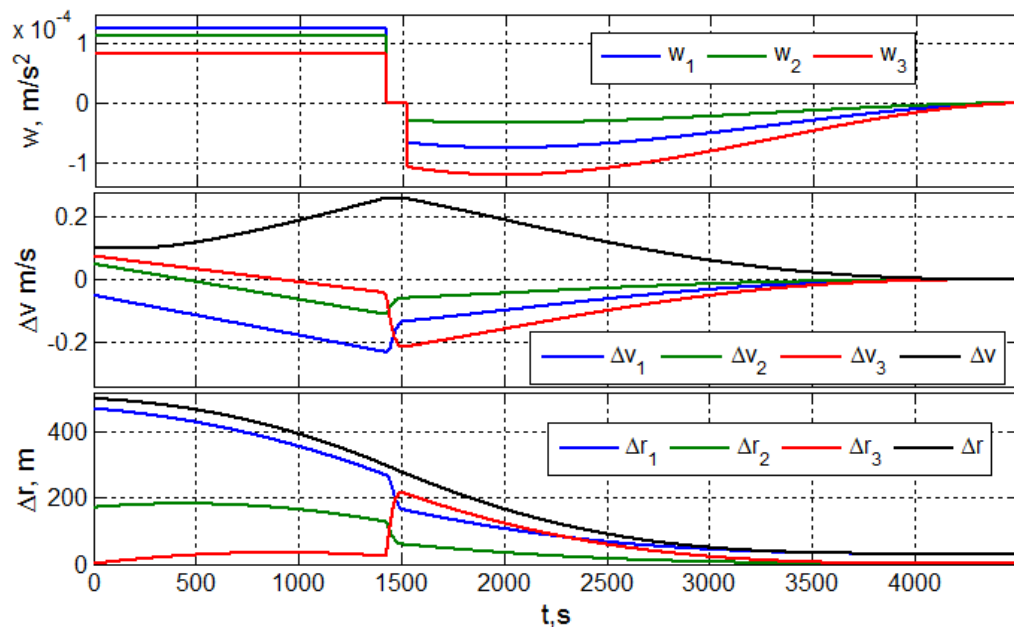


Рис.5. Закон наведения КРМ в поступательном движении с разворотом его корпуса

Пусть в момент времени  $t = t_i = 0$  КРМ неподвижен в ИСК ( $\mathbf{r}_r(t_i) = \mathbf{0}, \mathbf{v}_r(t_i) = \mathbf{0}$ ) и его ССК совпадает с ИСК ( $\Lambda(t_i) = \mathbf{1}, \boldsymbol{\omega}(t_i) = \mathbf{0}$ , орт направления на цель  $\mathbf{c}(t_i) = \{C_\varphi, S_\varphi, 0\}$  при  $\varphi = 20$  град и начальная дальность до цели  $\Delta r(t_i) = \Delta r_i = 500$  м (рис. 3). Поступательное движение цели в ИСК происходит с постоянным вектором скорости  $\mathbf{v}_i^1 = \{-0,05; 0,05; 0,075\}$  м/с и пассивный космический объект вращается в ИСК вокруг орта  $\mathbf{e}_i^0 = \{-0,608; 0,228; 0,760\}$ . В момент времени  $t = t_f = 4250$  с (1,2 ч) требуется

обеспечить сближение КРМ с целью при заданной дальности  $\Delta r(t_f) = \Delta r_f = 30$  м и параллельности орта  $\mathbf{e}_x$  орту  $\mathbf{e}_i^o$ , а также последующую стабилизацию такого положения КРМ относительно ПКО с точностью  $\approx 0,1$  м.

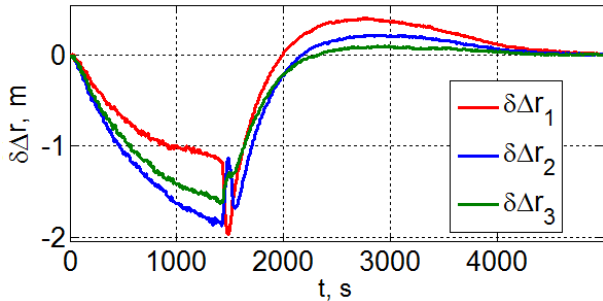


Рис. 6. Ошибки стабилизации дальности

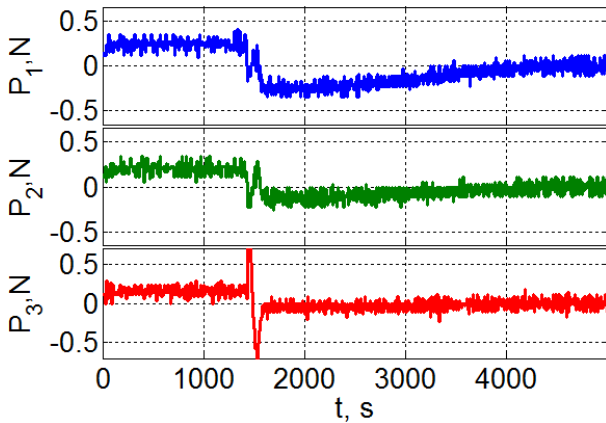


Рис. 7. Компоненты вектора тяги ДУ

В соответствии с принятой стратегией выполнен синтез закона наведения КРМ с тремя этапами:

1) при  $t \in [0; 1420)$  с выполняется разгон робота с постоянным вектором ускорения  $\mathbf{w}$  в ССК, достигаемая им позиция представлена точкой А на рис. 3;

2) при  $t \in [1420; 1520)$  с КРМ совершает равномерное прямолинейное движение с одновременным разворотом его корпуса для ориентации орта  $\mathbf{e}_x$  параллельно орту  $\mathbf{e}_i^o$ , достигаемая им позиция представлена точкой В на рис. 3, а закон углового наведения — на рис. 4, где  $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^p(t)$ ,  $\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}^p(t)$  и  $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^p(t)$ ;

3) при  $t \in [1520; 4250)$  с КРМ выполняет поступательное движение по траектории векторного сплайна шестого порядка с точным выполнением краевых условий  $\Delta r(t_f) = 30$  м,  $\Delta v(t_f) = 0$  и  $\mathbf{w}(t_f) = 0$  в точке С (рис. 3). Закон наведения КРМ в поступательном движении с разворотом его корпуса представлен на рис. 5, где  $\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}^p(t)$ ,  $\Delta \mathbf{v} = \Delta \mathbf{v}^p(t)$  и  $\mathbf{w} = \mathbf{w}^p(t)$ . На интервале времени  $t \in [4250; 5000]$  с дополнительно предъявляется требование стабилизации положения КРМ относительно ПКО с точностью  $\approx 0,3$  м. На рис. 4 и 5 показаны модули соответствующих векторных функций.

Будем считать, что измерение ориентации КРМ выполняется астроинерциальной системой определения углового положения (СОУП). Погрешности ее выходных дискретных сигналов с периодом  $T_q = 0,125$  с содержат центрированный гауссовский шум со среднеквадратичным отклонением (СКО)  $\sigma^a = 1$  угл. сек. После дискретной



фильтрации измеренных значений вектора углового рассогласования формируются значения вектора  $\mathbf{\varepsilon}_k^f$  в цифровом законе управления СГК с периодом  $T_u = 0,25$  с. Как показано в [5], для синтезированного закона углового наведения КА с инерционными параметрами, соответствующими КРМ, достигается точность стабилизации не хуже нескольких угловых секунд, что приемлемо для решения данной задачи.

Пусть дальность до цели измеряется лазерными дальномерами КРМ с периодом  $T_p = 1$  с. Для оценки точности стабилизации закона наведения КРМ в поступательном движении предположим, что СКО погрешности измерения дальности  $\sigma^b = 0,025$  м при  $\Delta r(t) \geq 300$  м и период управления ДУ  $T_u^e = 8$  с. По завершению разворота корпуса КРМ при  $\Delta r(t) < 300$  м СКО такой погрешности измерения  $\sigma^b = 0,01$  м и период управления ДУ  $T_u^e = 4$  с. Погрешности стабилизации дальности  $\delta \Delta r_i$  при реализации указанного закона наведения, полученные при компьютерной имитации, представлены на рис. 6. На рис. 7 приведены изменения компонентов  $P_i$  вектора тяги ДУ при цифровом управлении с дискретностью по уровню  $d^e = 0,05$  Н. На рис. 8 представлены изменения компонентов вектора погрешности дальности при завершении сближения и последующей стабилизации положения КРМ относительно цели.

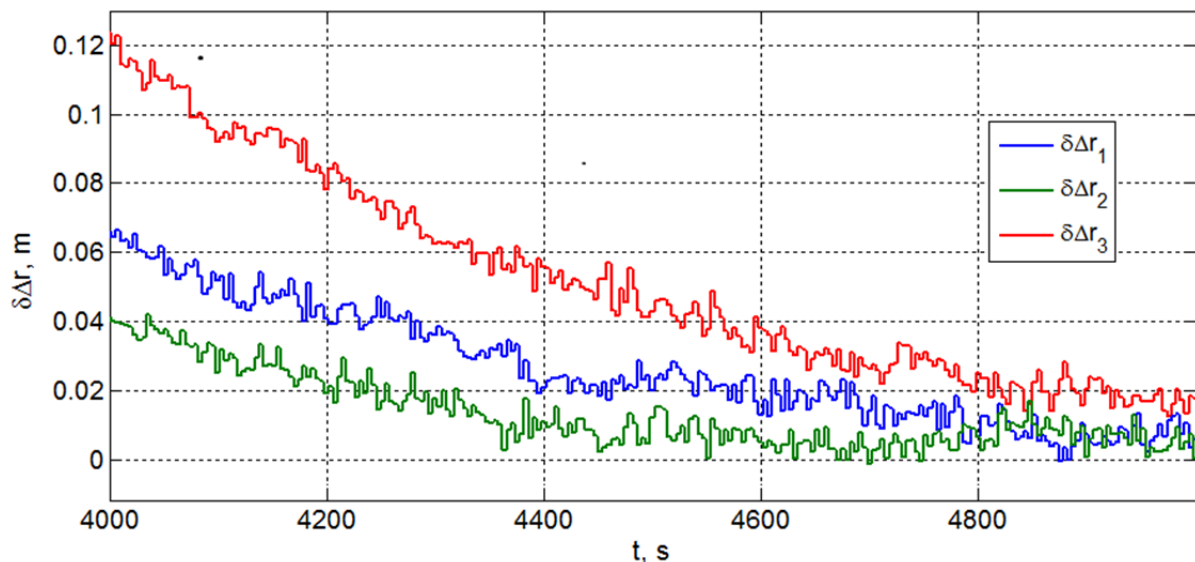


Рис. 8. Погрешности дальности при завершении сближения и стабилизации КРМ

## **Заключение**

Разработанная стратегия пространственного наведения и управления движением КРМ апробированная в задаче завершения сближения свободнолетающего КРМ с вращающимся ПКО (целью) в дальнем космосе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 17-08-01708, 17-48-630637) и Отделения ЭММПУ РАН (программа фундаментальных исследований № 13).

## **Библиографический список**

1. Somov, Ye.I., Platonov, V.N., Sorokin, A.V. Steering the control moment gyroscope clusters onboard high-agile spacecraft // *Automatic Control in Aerospace*. Oxford: Elsevier Ltd. – 2005. – Vol. 1. – P. 137-142.
2. Сомов, Е.И. Анализ сингулярных состояний и синтез явных законов настройки гироскопических кратных схем [Текст] / Е.И. Сомов // *Гироскопия и навигация*. – 2013. – № 1(80). – С. 134-148.
3. Сомов, Е.И. Аналитический синтез программного гиросилового управления свободнолетающим космическим роботом [Текст] / Е.И. Сомов // *Проблемы управления*. – 2006. – № 6. – С. 72-78.
4. Somov, Ye., Butyrin, S., Somova, T. Synthesis of the vector spline guidance laws for a land-survey satellite at scanning observation and rotational maneuvers // *Proceedings of International Conference “Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems”*. – 2016. – P. 1-4.
5. Somov, Ye., Butyrin, S., Somov, S. Attitude guidance, navigation and robust control of an agile land-survey satellite // *Proceedings of 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*. – 2017. – P. 443-448.