

УДК 621.865.8.001

А. Г. Лесков, А. А. Карандаев

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХЗВЕННОГО  
МЕХАНИЗМА ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ СЪЕМОЧНОЙ  
АППАРАТУРЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО  
АППАРАТА**

*Рассмотрена задача наведения камеры, размещенной на малогабаритном космическом аппарате, с использованием многозвенных поворотных механизмов. Показано, что использование подобных механизмов позволяет существенно снизить воздействие, оказываемое движущейся камерой на космический аппарат. Получены соотношения и выработаны рекомендации по планированию траекторий движения двухзвенного поворотного механизма, выбору его геометрических и инерционных параметров, в том числе обеспечивающих заданный диапазон перемещений камеры с учетом ограничений углов поворота звеньев и исключающих возникновение сингулярностей. Исследования основаны на представлении системы наведения как многомерной динамической системы.*

**E-mail: micropower@mail.ru**

**Ключевые слова:** двухзвенный поворотный механизм, компенсация динамического взаимовлияния, система наведения камеры, одностепенной поворотный механизм, планирование траекторий, изоклины нулевых возмущений.

**Введение.** Широкое использование снимков Земли из космоса выдвигает на передний план задачи повышения периодичности и оперативности получения снимка заданной местности минимальным числом космических аппаратов (КА). Особую ценность представляют снимки высокого разрешения (от 10 до 2 м). Основным недостатком съемочной аппаратуры такого разрешения является низкая ширина полосы захвата (100...20 км) [1]. Перспективные задачи мониторинга наземных процессов требуют проведения одним КА серии до 10...20 детальных съемок отдельных районов, доступных для обзора в течение ограниченного промежутка времени (как правило, 1,5...2 мин). Решение данной задачи во многом определяется быстродействием системы перенацеливания камеры в плоскости, перпендикулярной вектору движения КА по орбите.

Информативность съемки поверхности Земли с высоты типовой околоземной орбиты (500...700 км) обеспечивается при углах нацеливания камеры не более  $40^\circ \dots 45^\circ$  относительно направления в надира. Зона эффективного обзора вокруг подспутниковой точки составляет при этом от  $600 \times 600$  км до  $1000 \times 1000$  км (в зависимости от высоты

орбиты). Для возможности проведения съемки 10...20 районов за время пролета над такой территорией система наведения камеры должна обеспечивать выполнение следующих требований: время наведения на углы  $1^\circ \dots 5^\circ$  и  $40^\circ \dots 45^\circ$  — 0,2...1 с и 2,5...3 с соответственно; максимальная угловая скорость перенацеливания относительно орбитальной системы координат (СК) —  $25^\circ/\text{с}$ . С учетом тенденций развития космических систем наблюдения реализация таких характеристик для класса малых КА массой 100...200 кг является наиболее актуальной.

Традиционные способы перенацеливания камеры путем поворота корпуса КА не обеспечивают вышеуказанного быстродействия [2]. Кроме того, такие способы перенацеливания снижают эффективность работы его отдельных служебных систем, поскольку при этом нарушается ориентация панелей солнечных батарей, панелей теплоотвода, антенн радиоаппаратуры и других приборов, требующих относительно постоянной ориентации в орбитальной СК.

В связи с вышеизложенным актуальным представляется исследование возможностей применения для наведения камеры поворотных механизмов. Ключевой задачей при этом является исследование возможностей наведения камеры с одновременной стабилизацией КА.

**Использование одностепенных поворотных механизмов для наведения камеры на малом КА.** Тенденцией развития КА дистанционного зондирования Земли является уменьшение их массогабаритных характеристик. В настоящее время задачи съемки с высоким разрешением решаются с использованием спутников массой 100...300 кг.

В работе [2] были выполнены исследования процессов наведения камеры высокого разрешения, размещенной на спутнике малой массы. Масса спутника принималась равной 100 кг, масса камеры — 80 кг. Такие параметры соответствуют, например, спутнику класса “микро” [3], камере высокого пространственного разрешения [4]. Отметим, что ключевой проблемой наведения тяжелой камеры одностепенным поворотным механизмом является сильное динамическое взаимовлияние между КА и камерой. При поворотах камеры на углы до  $40^\circ \dots 45^\circ$  угловые возмущения КА составляют  $25^\circ \dots 30^\circ$ . При характеристиках наведения, указанных ранее, компенсировать возмущения спутника с помощью известных электромеханических средств стабилизации не представляется возможным.

Известны примеры КА, использующих для перенацеливания оптической оси камеры поворотное зеркало перед ее объективом (КА Terra, США; КА Spot-4, Spot-5, Франция) [5–7]. Масса данных КА составляет несколько тонн.

По оценкам разработчиков современных оптико-электронных приборов высокого разрешения при диаметре камеры 300...350 мм масса зеркала даже в облегченном исполнении составляет 20...25 кг, диаметр — не менее 500 мм, толщина основания составляет 80...100 мм.

Движение такого зеркала при его установке на малом КА массой 150... 200 кг будет приводить к неизбежным возмущениям КА.

**Компенсация динамического влияния камеры на КА при использовании двухзвенного поворотного механизма.** Анализ зависимости перемещения КА от перемещения камеры, управляемой одноступенным механизмом, выявил возможность компенсации динамического влияния камеры на КА введением в систему как минимум одной дополнительной управляемой координаты в плоскости наведения камеры. В настоящей работе рассматривается введение этой координаты в структуру поворотного механизма. Таким образом, поворотный механизм представляет собой двухзвенник, размещенный на свободном основании (на КА). Движение системы КА на свободном основании + камера на двухзвенном поворотном механизме рассматривается в плоскости, перпендикулярной траектории полета. Эквивалентная кинематическая схема такой системы представляется как некоторый механизм (рис. 1), состоящий из пяти звеньев, сочлененных последовательно. Движение звеньев механизма описывается с помощью обобщенных координат:  $q_1$  и  $q_2$  — линейные перемещения КА в направлении взаимно перпендикулярных осей в плоскости;  $q_3$ ,  $q_4$  и  $q_5$  — вращение КА и звеньев поворотного механизма соответственно. При этом геометрические и инерционные параметры поступательно перемещающихся звеньев принимаются нулевыми. На рис. 1 приняты следующие обозначения: Ш<sub>1</sub>, Ш<sub>2</sub>, Ш<sub>3</sub> и Ш<sub>4</sub>, Ш<sub>5</sub> — сочленения меха-

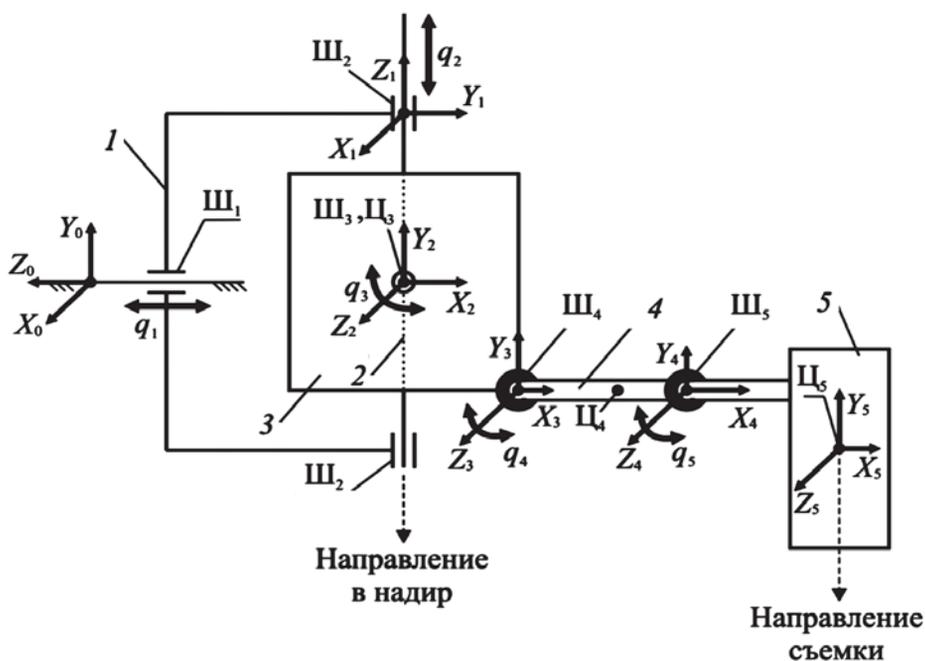


Рис. 1. Эквивалентная кинематическая схема системы КА + двухзвенный поворотный механизм

низма, характеризуемые координатами КА ( $q_1, q_2, q_3$ ) и координатами двухзвенника ( $q_4, q_5$ ) соответственно; цифрами 1, 2, 3, 4, 5 обозначены звенья пятизвенного механизма;  $\Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$  — центры масс звеньев 3, 4, 5. В качестве базовой выбрана орбитальная СК.

В рассматриваемом механизме сочленения  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  полагаются свободными. В сочленениях  $\Pi_4, \Pi_5$  размещены следящие приводы вращательного движения по координатам поворотного механизма ( $q_4, q_5$ ). Динамика каждого из этих приводов описывается соотношениями вида [8]

$$\mu_{дi} = W_{вxi}(p)q_{вxi} - W_{выxi}(p)q_i,$$

где  $i = 4, 5$ ;  $W_{вxi}(p)$  и  $W_{выxi}(p)$  — передаточные функции привода от входной координаты до моментной точки и от выходной координаты до моментной точки;  $q_{вxi}$  и  $q_i$  — входная и выходная координаты привода.

Уравнения динамики пятизвенного механизма в матричной форме имеют вид [9]

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b} = \boldsymbol{\mu}_д,$$

где  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$  ( $i, j = 1 \dots 5$ ) — матрица инерционных коэффициентов;  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T$  — вектор выходных обобщенных координат;  $\mathbf{b} = [b_i]$  ( $i = 1 \dots 5$ ) — вектор центробежных и кориолисовых сил и моментов, действующих на звенья;  $\boldsymbol{\mu}_д = [0 \ 0 \ 0 \ \mu_{д4} \ \mu_{д5}]^T$  — вектор сил и моментов, развиваемых приводами системы.

Уравнения динамики системы получаем при совместном рассмотрении уравнений механизма и приводов. С учетом введенных обозначений эти уравнения имеют вид

$$\boldsymbol{\mu}_д = \mathbf{W}_{вх}(p)\mathbf{q}_{вх} - \mathbf{W}_{вых}(p)\mathbf{q},$$

$$\boldsymbol{\mu}_д = \mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}; \tag{1}$$

$$\beta_{oy} = \sum q_i, \quad i = 3, 4, 5,$$

где  $\mathbf{q}_{вх} = [0 \ 0 \ 0 \ q_{вх4} \ q_{вх5}]^T$  и  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5]^T$  — вектор входных (заданных) и выходных обобщенных координат;  $\boldsymbol{\mu}_д = [0 \ 0 \ 0 \ \mu_{д4} \ \mu_{д5}]^T$  — вектор сил и моментов, развиваемых приводами системы;  $\mathbf{W}_{вх}(p) = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ W_{вх4}(p) \ W_{вх5}(p)]$  и  $\mathbf{W}_{вых}(p) = \text{diag}[0 \ 0 \ 0 \ W_{вых4}(p) \ W_{вых5}(p)]$  — матрицы передаточных функций от входных и выходных координат до точек моментов;  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$  ( $i, j = 1 \dots 5$ ) — матрица инерционных коэффициентов исполнительного механизма;  $\mathbf{b} = [b_i]$  ( $i = 1 \dots 5$ ) — вектор моментов центробежных и кориолисовых сил, действующих на звенья;  $\beta_{oy}^*$  и  $\beta_{oy}$  — заданная и действительная ориентация камеры в плоскости базовой СК.

Выполним линеаризацию уравнений (1) в окрестности некоторого стационарного положения и перейдем к рассмотрению матричной

передаточной функции  $\mathbf{W}(p)$  системы. Матричная передаточная функция устанавливает связь между векторами входных и выходных обобщенных координат в приращениях ( $\Delta \mathbf{q}_{\text{вх}}$  и  $\Delta \mathbf{q}$ ) и имеет следующий вид:

$$\mathbf{W}(p) = [\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)]^{-1} \mathbf{W}_{\text{вх}}(p) =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & N_{14}(p)W_{\text{вх}4}(p) & N_{15}(s)W_{\text{вх}5}(p) \\ 0 & 0 & 0 & N_{24}(p)W_{\text{вх}4}(p) & N_{25}(s)W_{\text{вх}5}(p) \\ 0 & 0 & 0 & N_{34}(p)W_{\text{вх}4}(p) & N_{35}(s)W_{\text{вх}5}(p) \\ 0 & 0 & 0 & N_{44}(p)W_{\text{вх}4}(p) & N_{45}(s)W_{\text{вх}5}(p) \\ 0 & 0 & 0 & N_{54}(p)W_{\text{вх}4}(p) & N_{55}(s)W_{\text{вх}5}(p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где передаточные функции  $N_{ij}(p)$  при обращении матрицы  $\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)$  определяются как отношения алгебраических дополнений  $A_{ji}(p)$  этой матрицы к ее определителю

$$N_{ij}(p) = A_{ji}(p) / \det[\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)].$$

Рассматривая связь между обобщенными координатами системы по третьей строке матрицы (2) и принимая во внимание свойство симметричности матрицы алгебраических дополнений, получаем зависимость приращения выходной координаты КА  $\Delta q_3$  от приращений входных обобщенных координат двухзвенного механизма  $\Delta q_{\text{вх}4}$  и  $\Delta q_{\text{вх}5}$ :

$$\Delta q_3 = \frac{A_{34}(p)}{\det[\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)]} W_{\text{вх}4}(p) \Delta q_{\text{вх}4} +$$

$$+ \frac{A_{35}(p)}{\det[\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)]} W_{\text{вх}5}(p) \Delta q_{\text{вх}5}, \quad (3)$$

где  $A_{34}(p)$ ,  $A_{35}(p)$  – алгебраические дополнения матрицы  $\mathbf{A}p^2 + \mathbf{W}_{\text{вых}}(p)$ .

Алгебраические дополнения  $A_{34}(p)$  и  $A_{35}(p)$  после необходимых преобразований определяются следующими выражениями:

$$A_{34}(p) = -p^8 M_{a34} - p^6 W_{\text{вых}5}(p) D_{124}; \quad (4)$$

$$A_{35}(p) = p^8 M_{a35} - p^6 W_{\text{вых}4}(p) D_{125}, \quad (5)$$

где  $M_{a34}$ ,  $M_{a35}$  – миноры матрицы инерции  $\mathbf{A}$  по элементам  $a_{34}$ ,  $a_{35}$ ;  $D_{124}$ ,  $D_{125}$  – определители блоков (размера  $3 \times 3$ ) матрицы инерции  $\mathbf{A}$  вида

$$D_{124} = \det \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{bmatrix}; \quad D_{125} = \det \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из выражения (3) следует, что нулевое приращение углового положения КА ( $\Delta q_3 = 0$ ) обеспечивается при формировании приращений заданных координат звеньев поворотного механизма, пропорционально связанных между собой коэффициентом относительных приращений

$$k_{\text{отн}} = \frac{\Delta q_{\text{вх5}}}{\Delta q_{\text{вх4}}} = - \frac{A_{34}(p)W_{\text{вх4}}(p)}{A_{35}(p)W_{\text{вх5}}(p)}. \quad (7)$$

Рабочая область приводов — область низкой частоты. Характерным для этой области является отсутствие динамического влияния между приводами [8]. Для области низких частот алгебраические дополнения (4) и (5) определяются слагаемыми минимальной степени  $p$ .

Соотношение (7) после выполнения преобразований приводится к виду

$$k_{\text{отн. нч}} = - \frac{D_{124}W_{\text{вх4}}(p)W_{\text{вых5}}(p)}{D_{125}W_{\text{вх5}}(p)W_{\text{вых4}}(p)}.$$

В низкочастотной области имеет место соотношение  $W_{\text{вх}i}/W_{\text{вых}i} = 1$ . Таким образом, коэффициент относительных приращений в низкочастотной области  $k_{\text{отн. нч}}$  определяется только через мгновенные значения элементов матрицы инерции (6) системы с пятью степенями подвижности:

$$k_{\text{отн. нч}} = - \frac{D_{124}}{D_{125}}. \quad (8)$$

Коэффициент в левой части уравнения (8) устанавливает закон формирования управляющих воздействий приводов (плановую траекторию движения) двухзвенного механизма, при выполнении которого вращение камеры не приводит к возникновению вращательного движения КА.

Определенное ранее условие отсутствия вращения КА (8) подтверждается математическими соотношениями, полученными С. Дубовским из законов сохранения момента количества движения при рассмотрении двухзвенного манипулятора на КА [10].

**Формирование траекторий движения двухзвенного механизма.** Закон формирования траекторий движений двухзвенного механизма для перемещения камеры по заданной траектории  $\beta_{\text{оy}}^*(t)$ , при котором не происходит вращения КА, определяется решением матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} A_{34}(p)W_{\text{вх4}}(p) & A_{35}(p)W_{\text{вх5}}(p) \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_{\text{вх4}} \\ \Delta q_{\text{вх5}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \beta_{\text{оy}}^* \end{bmatrix},$$

где  $\Delta \beta_{\text{оy}}^*$  — приращение заданной траектории движения камеры в окрестности некоторой точки;  $\Delta q_{\text{вх4}}$ ,  $\Delta q_{\text{вх5}}$ ,  $A_{34}(p)$ ,  $A_{35}(p)$ ,  $W_{\text{вх4}}(p)$ ,  $W_{\text{вх5}}(p)$  — определены ранее.

Решение данного уравнения для области низких частот имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta q_{\text{вх}4} &= -\frac{D_{125}}{D_{124} - D_{125}} \Delta \beta_{\text{оу}}^* = k_{\beta q4} \Delta \beta_{\text{оу}}^*; \\ \Delta q_{\text{вх}5} &= \frac{D_{124}}{D_{124} - D_{125}} \Delta \beta_{\text{оу}}^* = k_{\beta q5} \Delta \beta_{\text{оу}}^*. \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициенты  $k_{\beta q4}$ ,  $k_{\beta q5}$  принято называть коэффициентами распределения заданного значения перемещения камеры на звенья поворотного механизма (далее по тексту – коэффициенты распределения). Коэффициенты распределения зависят от конфигурации системы. При этом целесообразно вычислять коэффициенты распределения в зависимости от входных значений ( $q_{\text{вх}3} = 0$ ,  $q_{\text{вх}4}$ ,  $q_{\text{вх}5}$ ) вектора заданных обобщенных координат.

Уравнения (9) удобно проиллюстрировать графически, рассматривая траектории перемещения точек, соответствующих значениям входных координат звеньев на плоскости ( $q_{\text{вх}4}$ ,  $q_{\text{вх}5}$ ). Принято называть данные траектории изоклинами нулевых возмущений (далее по тексту – изоклины).

Пример построения изоклин для системы, параметры которой указаны в табл. 1, приведен на рис. 2.

Таблица 1

**Геометрические и инерционные параметры системы наведения, полученные при проектировании**

| Инерционные параметры                               |  |   |  |   |   |  |
|---|--|---|--|---|---|--|
| $m_3$ , кг  | $m_4$ , кг   | $m_5$ , кг  | $J_3$ , кг·м <sup>2</sup>  | $J_4$ , кг·м <sup>2</sup>   | $J_5$ , кг·м <sup>2</sup>   |  |
| 100   | 10   | 80  | $\begin{bmatrix} 10,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 10,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 10,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,5 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,5 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 8,0 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 4,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 8,0 \end{bmatrix}$ |  |
| Геометрические параметры                            |  |   |  |   |   |  |
| $l_3$ , м   | $l_4$ , м  | $l_5$ , м   | $r_3$ , м  | $r_4$ , м   | $r_5$ , м   |  |
| $\begin{bmatrix} +0,5 \\ -0,5 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} +0,7 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} +0,3 \\ -0,3 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0,5 \\ +0,5 \\ 0,0 \end{bmatrix}$                                      | $\begin{bmatrix} -0,1 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$                                    | $\begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$                                     |  |

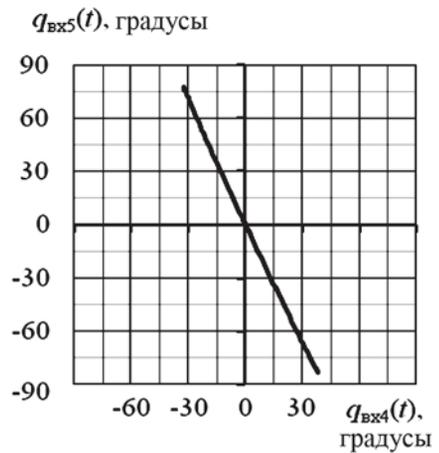
В табл. 1 обозначено:  $m_i$  – масса звена  $i$ ;  $J_i$  – тензор инерции  $i$ -го звена в системе координат, оси которой параллельны осям СК $_i$ , а начало совмещено с центром масс звена  $i$ ;  $l_i$  – длина  $i$ -го звена (вектор, проведенный из начала СК $_{i-1}$  к началу СК $_i$ ; вектор задается в исходном положении  $i$ -го звена в проекциях на оси СК $_i$ );  $r_i$  – вектор координат центра масс  $i$ -го звена (вектор, проведенный из начала СК $_i$  в центр масс звена  $i$ , задается в проекциях на оси СК $_i$ ).

**Результаты численного моделирования.** Далее в качестве примера приведены результаты моделирования процессов наведения камеры с помощью двухзвенного механизма. Основание (КА) предполагается свободным. Моделирование проводилось с использованием разработанного авторами программного обеспечения, реализующего расчет программных траекторий (9) и численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений (1). Закон движения камеры был задан синусоидой  $\beta_{\text{оу}}^* = A_{\beta} \sin(\omega t)$  с амплитудой  $A_{\beta} = 45^{\circ}$  и частотой  $\omega = 0,45 \text{ с}^{-1}$ . Такие параметры соответствуют динамическим характеристикам наведения, близким к требуемым. Геометрические и инерционные параметры системы приведены в табл. 1. В качестве двигателей приводов рассматривались шаговые двигатели [11], учитывались механические свойства муфт и редукторов.

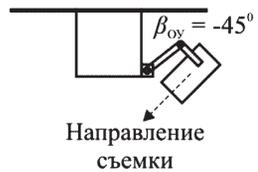
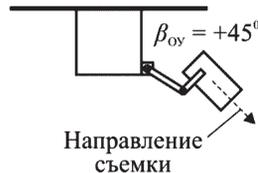
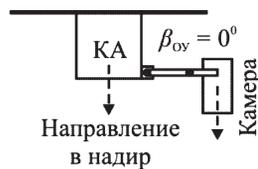
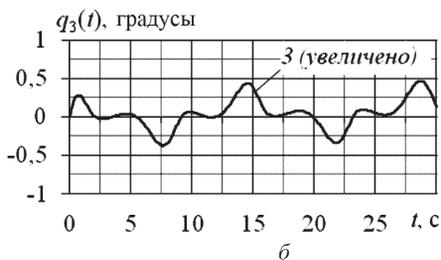
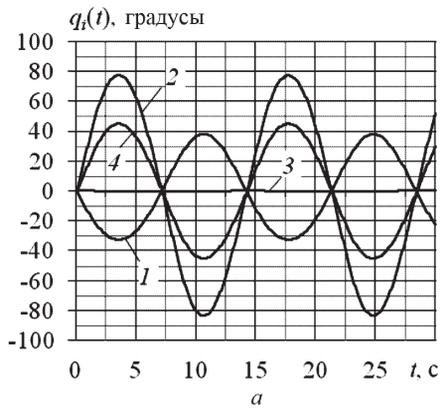
Результаты моделирования, представленные на рис. 3, подтверждают принципиальную возможность компенсации (за счет надлежащего выбора траекторий движения поворотного механизма) влияния процессов наведения камеры на ориентацию КА. Наведение камеры по заданной траектории осуществляется посредством синхронного, противоположно направленного движения звеньев механизма по вычисленным ранее траекториям. Максимальные возмущения КА не превышают  $0,5^{\circ}$ .

Для сравнения на рис. 4 приведены результаты моделирования движения камеры и возмущений КА при использовании одноступенного поворотного механизма. При поворотах камеры на углы  $40^{\circ}$  угловые возмущения КА составляют  $27^{\circ}$ . Для движения камеры в базовой СК по синусоидальному закону с амплитудой  $40^{\circ}$  амплитуда вращения камеры относительно КА составляет  $67^{\circ}$ .

**Выбор рабочей зоны двухзвенного механизма.** Проведенные исследования динамики системы при различных параметрах позволили выявить ряд важных особенностей, которые необходимо учитывать при разработке систем наведения на основе многозвенных механизмов. Первая особенность связана с тем, что параметры законов движения зависят от соотношений геометрических и инерционных параметров звеньев поворотного механизма. Для достижения камерой заданных углов наведения в ряде случаев могут потребоваться слишком

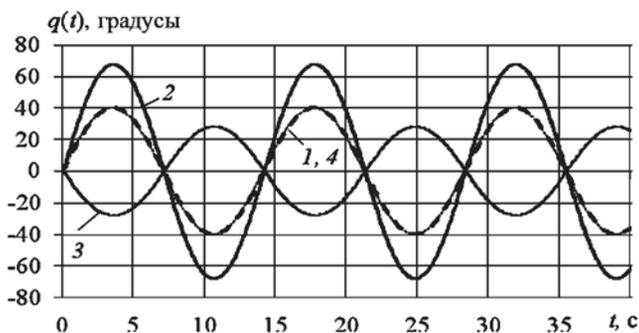


**Рис. 2.** Плановая траектория движения двухзвенного механизма (изоклина нулевых возмущений)



**Рис. 3. Результаты моделирования процесса наведения камеры при использовании двухзвенного механизма:**

*a* — зависимость обобщенных координат всех вращательных звеньев системы от времени; *б* — возмущения углового положения КА в плоскости наведения, вызванные движением камеры; *в* — кинематические эскизы системы в исходном положении и при повороте камеры на максимальные углы в плоскости наведения; 1, 2 — движение звеньев поворотного механизма ( $q_4(t)$  и  $q_5(t)$ ) по плановым траекториям обобщенных координат  $q_{вх4}(t)$  и  $q_{вх5}(t)$ ; 3 — возмущения углового положения КА в плоскости наведения, вызванные движением камеры,  $q_3(t)$ ; 4 — движение камеры в базовой СК  $\beta_{оу}(t)$  по заданному закону вращения  $\beta_{оу}^*(t)$  с учетом возмущений КА



**Рис. 4. Результаты моделирования процессов движения камеры на КА при использовании одноступенного поворотного механизма:**

1 — заданный закон вращения камеры в плоскости базовой СК,  $\beta_{оу}^*(t)$ ; 2 — движение поворотного механизма относительно КА  $q_4(t)$  для отслеживания камерой заданного закона вращения  $q_{вх4}(t)$ ; 3 — движение КА в базовой СК вследствие динамического взаимовлияния,  $q_3(t)$ ; 4 — движение камеры в базовой СК,  $\beta_{оу}(t)$

большие относительные перемещения звеньев механизма. Это отрицательно скажется на свойствах конструкции поворотного механизма и необходимых энергетических затратах. Так, при значениях инерционных параметров, приведенных в табл. 1, и геометрических параметрах системы, приведенных в табл. 2 (длины звеньев механизма  $l_4 = 0,2$  м и  $l_5 = 0,4$  м), относительные перемещения звеньев при повороте камеры на угол  $\beta_{oy}^* = +30^\circ$  составляют  $q_{Bx4} = -72^\circ$ ,  $q_{Bx5} = +102^\circ$  (кривые 1-А и 1-Б, см. рис. 5). Перемещения звеньев в таком диапазоне недопустимо велики, так как могут привести к соударению звена 4 с корпусом КА.

Таблица 2

Геометрические параметры системы наведения при симметричном закреплении камеры

| $l_3, \text{ м}$                                    | $l_4, \text{ м}$                                   | $l_5, \text{ м}$                                   | $r_3, \text{ м}$                                    | $r_4, \text{ м}$                                    | $r_5, \text{ м}$                                  |
|---|--|--|---|---|---|
| $\begin{bmatrix} +0,4 \\ -0,4 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} +0,2 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} +0,4 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0,4 \\ +0,4 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0,01 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$ |

Приведенный на рис. 5 пример иллюстрирует возможность уменьшения диапазонов перемещения 4-го и 5-го звеньев путем надлеж-

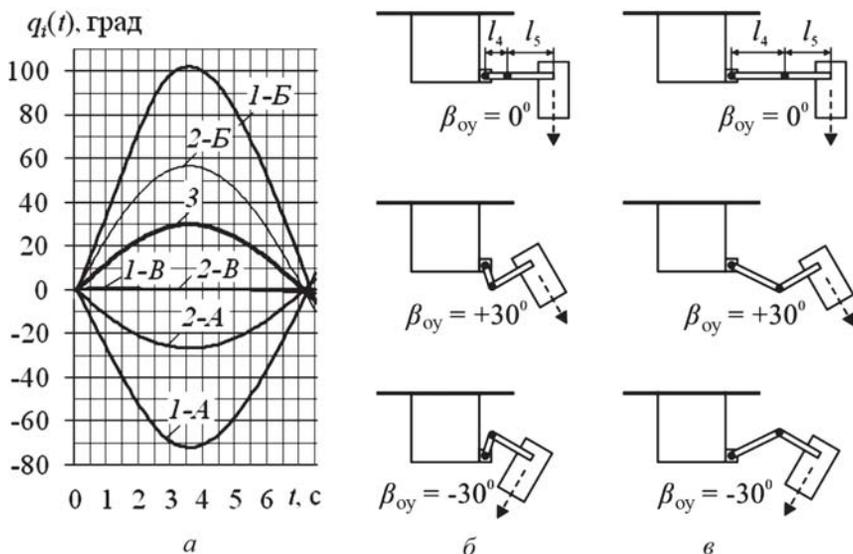


Рис. 5. Относительные перемещения звеньев поворотного механизма при разных соотношениях их длин:

*a* – графики изменения обобщенных координат вращательных звеньев системы в зависимости от времени; *б* – кинематические эскизы системы при  $l_4 = 0,2$  м,  $l_5 = 0,4$  м; *в* – кинематические эскизы системы при  $l_4 = 0,5$  м,  $l_5 = 0,4$  м; 1-А, 1-Б, 1-В – движение поворотного механизма ( $q_4(t)$  и  $q_5(t)$ ) и возмущения КА ( $q_3(t)$ ) при  $l_4 = 0,2$  м,  $l_5 = 0,4$  м; 2-А, 2-Б, 2-В – движение поворотного механизма ( $q_4(t)$  и  $q_5(t)$ ) и возмущения КА ( $q_3(t)$ ) при  $l_4 = 0,5$  м,  $l_5 = 0,4$  м; 3 – заданный закон вращения камеры  $\beta_{oy}^*(t)$  в базовой СК

щего выбора геометрических параметров механизма. Далее приведены соотношения для выбора этих параметров.

При заданном диапазоне вращения камеры  $(-\beta_{\text{оу max}}^* \dots + \beta_{\text{оу max}}^*)$  максимально допустимый диапазон относительных перемещений звеньев  $q_{\text{вх4 max}}$  и  $q_{\text{вх5 max}}$  определяется разработчиком. При этом должно выполняться (с учетом знака) условие

$$\beta_{\text{оу max}}^* = q_{\text{вх4 max}} + q_{\text{вх5 max}}.$$

Анализ кинематической схемы исследуемой системы показал, что необходимым и достаточным условием невыполнения ограничений углов поворота звеньев  $q_{\text{вх4 max}}$  и  $q_{\text{вх5 max}}$  (при максимальном повороте камеры) является выбор коэффициентов распределения по условиям

$$\begin{aligned} |k_{\beta q4}| &\leq |q_{\text{вх4 max}} / \beta_{\text{оу max}}^*|, \\ |k_{\beta q5}| &\leq |q_{\text{вх5 max}} / \beta_{\text{оу max}}^*|. \end{aligned} \quad (10)$$

Данные условия эквивалентны требованию к минимальному коэффициенту относительных приращений

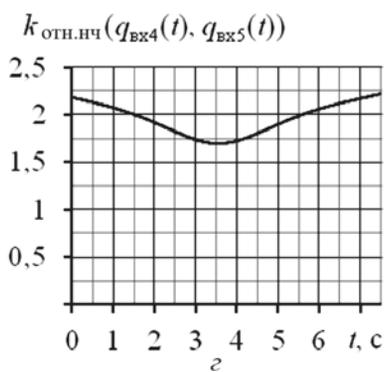
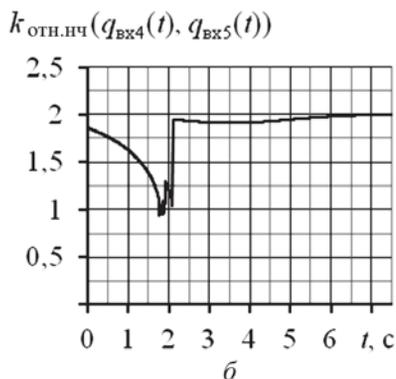
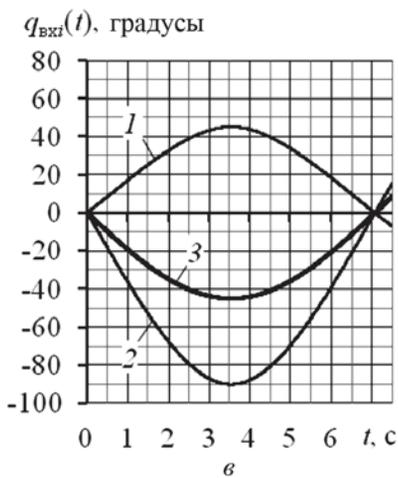
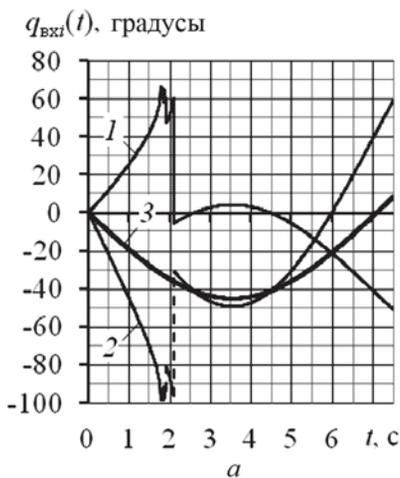
$$|k_{\text{отн.пч}}(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}})| = \frac{D_{124}(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}})}{D_{125}(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}})} \geq \left| \frac{q_{\text{вх5 max}}}{q_{\text{вх4 max}}} \right|. \quad (11)$$

В целях выбора рациональных значений параметров механизма предлагается воспользоваться соотношениями (10) и (11). При этом расчет длины 4-го звена проводится в функции от длины 5-го звена. Расчет выполняется численным методом путем увеличения длины 4-го звена до значения, при котором выполняются указанные условия.

**Исключение сингулярностей.** Другая особенность предложенного способа наведения камеры связана с тем, что при определенных соотношениях длин звеньев может нарушаться непрерывность программных траекторий поворотного механизма. Это связано нарушением условия (11). При определенных конфигурациях кинематической цепи двухзвенного механизма значение коэффициента относительных приращений становится близким к единице и разность  $D_{124}(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}}) - D_{125}(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}})$  в знаменателях коэффициентов распределения (9) стремится к нулю. По этой причине на траекториях возникают разрывы.

Данные особенности проиллюстрированы на рис. 6, а и б. Параметры системы приведены в табл. 1, длина 4-го звена принята равной 0,5 м. Закон движения камеры задан синусоидой  $\beta_{\text{оу}}^* = -45^\circ \sin(0,45t)$ . Разрывы на программных траекториях возникают при достижении камерой углового положения  $\beta_{\text{оу}}^* = -32^\circ$ .

Далее предложен способ устранения указанных явлений. В его основе — графическое построение множеств значений  $(q_{\text{вх4}}, q_{\text{вх5}})$ , в которых возникают сингулярности, и выбор геометрических параметров



**Рис. 6. Формирование плановых траекторий поворотного механизма при разных соотношениях длин звеньев:**

$a$  и  $b$  — результаты построения плановых траекторий при  $l_4 = 0,5$  м и  $0,65$  м;  $\bar{b}$  и  $\tilde{z}$  — изменение коэффициента относительных приращений при движении звеньев по изоклине при  $l_4 = 0,5$  м и  $0,65$  м;  $1$  и  $2$  — плановые траектории 4-го и 5-го звеньев ( $q_{BX4}(t)$  и  $q_{BX5}(t)$ ) соответственно для движения по изоклине;  $3$  — заданный закон вращения камеры  $\beta_{oy}^*(t)$  в базовой СК

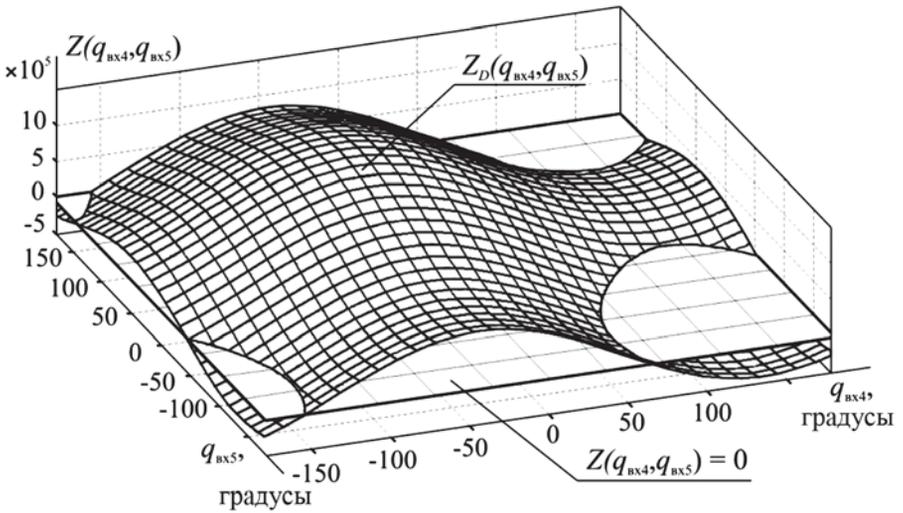
двухзвенного механизма, при которых исключается попадание расчетной точки траектории в данные области.

При этом влиянием координаты  $q_3$  пренебрегаем.

Исходя из этого, предлагается определять границы сингулярных областей в исходном положении системы ( $q_i = 0, i = 1 \dots 5$ ) как пересечение поверхности  $Z_D(q_{BX4}, q_{BX5}) = D_{124}(q_{BX4}, q_{BX5}) - D_{125}(q_{BX4}, q_{BX5})$  с плоскостью  $Z(q_{BX4}, q_{BX5}) = 0$ . В качестве примера на рис. 7,  $a$  для параметров системы, указанных в табл. 1, и при длине 4-го звена, равной  $0,5$  м, показано построение такой поверхности и определение границ возникновения сингулярностей.

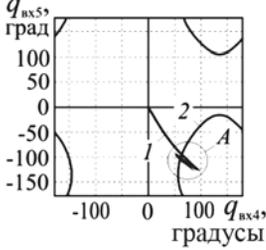
При пересечении изоклиной данных границ происходит нарушение ее непрерывности (рис. 7,  $b$  и  $в$ ). Увеличение длины 4-го звена при выбранной длине 5-го звена приводит к уменьшению областей

при  $l_4 = 0,5$  м



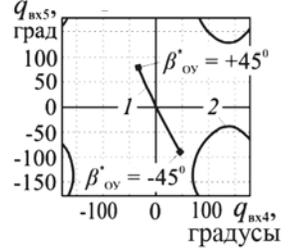
*a*

при  $l_4 = 0,5$  м



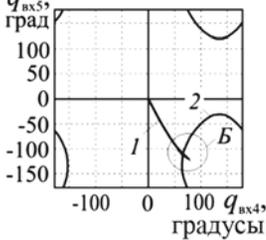
*b*

при  $l_4 = 0,65$  м



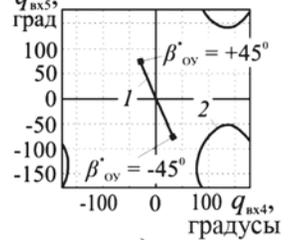
*z*

при  $l_4 = 0,6$  м



*в*

при  $l_4 = 0,75$  м



*д*

**Рис. 7. Определение границ возникновения сингулярностей и настройка геометрических параметров поворотного механизма:**

*a* – поверхность  $Z_D(q_{BX4}, q_{BX5}) = D_{124}(q_{BX4}, q_{BX5}) - D_{125}(q_{BX4}, q_{BX5})$  и плоскость  $Z(q_{BX4}, q_{BX5}) = 0$ ; *b*, *в*, *z*, *д* – изоклины нулевых возмущений (1) и границы возникновения сингулярностей (2)

сингулярностей и протяженности изоклины для достижения граничного положения  $\beta_{0y}^*$ . Это позволяет настроить длину 4-го звена таким образом, чтобы исключалось пересечение изоклины с границами сингулярностей и, как следствие, не возникало нарушения непрерывности плановых траекторий до момента достижения камерой максимальных углов поворота (рис. 7, *з* и *д*). Так, при длине 4-го звена  $l_4 \geq 0,65$  м обеспечивается корректное планирование траекторий поворотного механизма в требуемом диапазоне углов вращения камеры. Результаты построения плановых траекторий и графика коэффициента относительных приращений при  $l_4 = 0,65$  м приведены на рис. 6, *в* и *г*.

Из изложенного следует, что при разработке системы наведения камеры с использованием многозвенных механизмов геометрические параметры звеньев механизма необходимо выбирать так, чтобы исключить сингулярные области. Приведенные соображения служат основой для такого выбора.

Таким образом, наведение камеры с использованием двухзвенных механизмов позволяет существенно снизить уровень ее динамического влияния на КА при обеспечении высоких динамических характеристик наведения. Следует отметить, что при этом увеличиваются размеры и масса поворотного механизма, что может создать трудности на этапе выведения КА на орбиту. Однако можно предусмотреть вариант размещения поворотного механизма с камерой в сложенном транспортном положении. В рабочее положение механизм переводится в результате его развертывания после выведения КА на орбиту. Увеличение массы поворотного механизма также не является существенным препятствием. Конструктивно звенья поворотного механизма можно выполнить из современных композиционных материалов. Оценка массогабаритных характеристик приводов и звеньев показывает, что в этом случае увеличение массы КА не превышает 10...15% массы КА без такого механизма. Варианты конструктивного исполнения поворотного механизма с камерой на КА массой 100 кг приведены в работе [2].

**Заключение.** Предложен подход к решению задачи наведения массивной камеры, размещенной на малом космическом аппарате, основанный на использовании двухзвенного механизма для поворота камеры относительно одной оси, что позволяет обеспечить высокие динамические показатели системы наведения и практически исключить воздействие камеры на ориентацию самого КА.

Получены математические соотношения для расчета траекторий изменения координат сочленений поворотного механизма. Параметры траекторий рассчитываются с использованием элементов матрицы инерционных коэффициентов всей системы – функций заданных значений координат сочленений.

Результаты выполненных исследований показали, что применение системы наведения с использованием двухзвенного поворотного механизма позволяет:

— повысить оперативность получения снимка за счет возможности наведения камеры с угловой скоростью до  $25^\circ/\text{с}$ , что в 10–12 раз превышает возможности применения типовых двигателей-маховиков и в 3–4 раза превышает возможности применения силовых гироскопических комплексов, используемых для перенацеливания современных КА высокодетальной съемки;

— повысить количественные показатели съемки за счет возможности выполнения одним КА серии до 20 наведений на разные районы, расположенные в зоне обзора площадью до  $800 \times 800$  км (в отличие от максимум 2–3 перенацеливаний КА при использовании типовых двигателей-маховиков);

— обеспечить в режимах перенацеливания камеры стабильную ориентацию панелей солнечных батарей, антенн радиопередачи и других приборов или панелей КА, требующих постоянной орбитальной ориентации;

— при размещении звездного датчика на корпусе самой камеры обеспечить требуемую точность наведения камеры без необходимости задействования бортовой системы стабилизации КА.

Предложенная система может применяться на малых КА для решения задач, аналогичных задачам наведения отдельной камеры: для наведения группы оптических камер, научных приборов геофизического исследования Земли, радиоантенн, а также для наведения и перенацеливания приборов исследования космического пространства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А. Космические системы детального наблюдения Земли // Госцентр “Природа” – Режим доступа: <http://loi.sssc.ru/gis/RS/GOSCENR.html> – 05.05.2010.
2. Лесков А. Г., Карандаев А. А. Повышение оперативности съемки Земли камерами высокого разрешения с применением многозвенных поворотных механизмов // Труды XXI Междунар. науч.-техн. конф. “Экстремальная робототехника–2010”, 2010 г. – С. 271–281.
3. Eves S. Redefining the word “Responsive” in operationally responsive space. Survey satellite technologies limited // 7<sup>th</sup> Responsive Space Conference. – Режим доступа: [http://www.isu-net.edu/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=774&Itemid=26](http://www.isu-net.edu/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=774&Itemid=26) – 05.05.2010.
4. S S T L VHRI-250. Характеристики камеры VHRI-250 // Официальный сайт компании SSTL. – Режим доступа: <http://www.sstl.co.uk/Products/Payloads/Optical>. – 05.05.2010.
5. Агапов В. М. Terra наблюдает Землю // Новости космонавтики. – 2000. – № 2. – С. 31–34.

6. Т а р а с е н к о М. В. Спутник дистанционного зондирования Spot-4 в полете // Новости космонавтики. – 1998. – № 8.
7. Ж у р а в и н Ю. Ariane 4 вывел на орбиту пятый SPOT // Новости космонавтики. – 2002. – № 7.
8. М е д в е д е в В. С., Л е с к о в А. Г., Ю щ е н к о А. С. Системы управления манипуляционных роботов. – М.: Наука, 1978. – 416 с.
9. З е н к е в и ч С. Л., Ю щ е н к о А. С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 480 с.
10. V a f a Z., D u b o w s k y S. On the dynamics of manipulators in space using the virtual manipulator approach // Proc. IEEE International Conf. on robotics and automation (1987). – С. 579–585.
11. К е н и о Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

Статья поступила в редакцию 1.06.2010

Алексей Григорьевич Лесков родился в 1948 г., окончил в 1972 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Специальная робототехника и мехатроника” МГТУ им. Н.Э.Баумана, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 60 научных работ в области робототехники.

A.G. Leskov (b. 1948) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. D. Sc. (Eng.), professor of “Special Robotics and Mechatronics” department of the Bauman Moscow State Technial University, Head of Dmitrovsky Branch of the Bauman Moscow State Technial University. Author of more than 60 publications in the field of robotics.

Андрей Александрович Карандаев родился в 1980 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Аспирант кафедры “Специальная робототехника и мехатроника” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор 5 научных работ в области исследования динамики поворотных механизмов на космических аппаратах.

A.A. Karandaev (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technial University in 2005. Post-graduate of “Special Robotics and Mechatronics” department of the Bauman Moscow State Technial University. Author of 5 publications in the field of dynamics analysis of spacecraft slewing mechanisms.

