

© 2023 г. **В.Ю. РУТКОВСКИЙ**, д-р техн. наук (vglum@ipu.ru),  
В.М. ГЛУМОВ, д-р техн. наук (vglum@ipu.ru)  
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

## УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ СВОБОДНО ЛЕТАЮЩЕГО КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА С ПОЛЕЗНЫМ ГРУЗОМ

Рассматриваются режимы управления свободно летающим космическим манипуляционным роботом при транспортировке и установке элемента на большую космическую конструкцию. Предлагается решение задачи экономии рабочего тела газо-реактивных двигателей корпуса робота при движении по траектории за счет использования подвижности манипулятора с электромеханическими приводами для угловой стабилизации механической системы, состоящей из робота и транспортируемого элемента. Получены условия обеспечения устойчивости движения манипулятора в рабочей зоне при установке элемента на собираемую конструкцию. Определяется область устойчивости, которая позволяет выбирать начальную конфигурацию манипулятора перед установкой элемента и допустимое ее изменение в процессе установки. Синтез алгоритмов управления основан на принципе построения динамических систем с обратной связью.

*Ключевые слова:* свободно летающий космический манипуляционный робот, рабочая зона, техническая управляемость, алгоритм управления, устойчивость движения.

**DOI:** 10.31857/S0005231023100082, **EDN:** YBULNK

### 1. Введение

В космической технологии для обслуживания и сборки на орбите космических аппаратов (КА) различного назначения предполагается использовать космические роботы с манипуляторами (КРМ), которые имеют возможность свободно перемещаться в космическом пространстве благодаря собственной системе передвижения независимо от КА, доставившего робот в заданную точку пространства [1]. Целесообразность разработки именно этого типа устройств космической робототехники была заявлена в 1974 г. на шестом Симпозиуме ИФАК по управлению в пространстве, который проходил под руководством академика Б.Н. Петрова [2]. В настоящее время известны [3] два способа соединения в космосе кораблей и модулей: прямая стыковка и причаливание с помощью манипулятора. Последний термин используется при определении целого ряда операций, например при мягкой стыковке, при укладке полезного груза в приемный отсек грузового корабля и т.п. К этому же типу операции относится рассматриваемая в данной работе задача присоединения строительного элемента к собираемой на орбите большой космической конструкции (БКК) с помощью КРМ. Как и в [3], предполагается, что масса элемента БКК может заметно превышать массу манипулятора, хват которого с удерживаемым грузом может находиться на значительном удалении от

центра масс корпуса КМР и механической системы в целом. Используемый для управления манипулятором кинематический алгоритм, преобразующий сигналы управления в требуемые скорости вращения приводов, учитывает геометрические и кинематические ограничения, определяемые текущей конфигурацией манипулятора.

Конструктивно свободно перемещающийся КРМ выполняется в виде платформы с присоединенным к ней манипулятором (или несколькими манипуляторами). Платформа оснащается устройствами управления и совокупностью исполнительных органов, обеспечивающих требуемую ориентацию и желаемую траекторию движения платформы в космическом пространстве. Подобные КРМ получили в зарубежной литературе название *Free-flying robot* [4, 5]. В одной из первых отечественных публикаций предложена методика анализа динамики манипулятора на подвижном основании и приведены результаты решения задачи захвата в инерциальном пространстве полезного груза с помощью свободно летающего космического манипуляционного робота (СКМР) для случаев его стабилизируемого и нестабилизируемого корпуса [6].

При выполнении в космосе сборочной операции существует два этапа. На первом этапе решается задача сближения СКМР с зоной установки строительного элемента, завершающаяся зависанием робота в окрестности точки стыковки элемента с БКК. Граница рабочей зоны определяется с одной стороны условиями безопасности (отсутствием возможных контактов СКМР с БКК при выполнении операции установки элемента из состояния «зависания») и условиями достижимости цели (установка элемента с заданной ориентацией в требуемой точке БКК) [7, 8]. Последнее определяет содержание второго этапа сборочной операции. Первый этап сборочной операции реализуется с помощью системы управления поступательным и угловым движениями СКМР за счет реактивных сил и моментов, прикладываемых со стороны исполнительных органов к корпусу робота. Манипулятор с транспортируемым элементом на данном этапе является неподвижным, а его конфигурация по возможности должна быть максимально близка к оптимальной [7].

Перечень задач, возникающих при синтезе системы управления СКМР, можно найти в [1]. Из указанного перечня в настоящей работе рассматриваются задачи, возникающие при управлении манипулятором во время движения СКМР к рабочей зоне и внутри нее. При управлении манипулятором СКМР в его рабочей зоне в режиме свободного дрейфа робота (*free-floating mode*), когда отключена система управления угловым положением его корпуса, возникают сложности, к которым относятся сужение рабочей зоны [4, 9] и наличие динамических сингулярностей [10, 11]. Динамика и кинематика механической структуры СКМР в таком режиме существенно усложняются из-за возмущающего влияния движений манипулятора на положение корпуса [12, 13]. Поэтому в данной работе рассматривается вариант управления манипулятором на основе принципа обратной связи с использованием информации об угловом положении корпуса робота и оценок отклонения концевой точки манипулятора от точки цели [14, 15].

В предлагаемой статье предлагаются решения двух задач. Первая задача возникает при необходимости экономии рабочего тела газо-реактивных

двигателей СКМР во время движения по траектории. Для решения задачи предлагается использовать подвижность манипулятора. Вторая задача связана с обеспечением устойчивости движения манипулятора СКМР в рабочей зоне при установке транспортируемого элемента на БКК.

## 2. Особенности механической структуры СКМР

Механическая структура СКМР представляет собой совокупность соединенных с помощью шарниров элементов. Основной элемент — корпус, оснащенный системой управления и реактивными двигателями. К корпусу присоединяются многозвенные манипуляторы. На концевом звене каждого манипулятора жестко закрепляется схват — устройство для захвата и удержания груза во время манипуляционных операций СКМР. Данная механическая структура характеризуется большим числом степеней свободы и взаимным влиянием движений ее элементов. Корпус СКМР реагирует на динамические силы реакции, возникающие при движениях звеньев манипуляторов. При управлении конфигурацией и угловыми движениями в такой механической системе необходимо учитывать динамическую связь между корпусом и манипуляторами [15].

Для иллюстрации характерных особенностей механической структуры СКМР рассматривается вариант ее плоского движения с одним трехзвенным манипулятором [16]. В качестве обобщенных координат, определяющих положение корпуса СКМР в инерциальной системе координат (СК)  $SXY$ , оси которой связаны с БКК, приняты  $X_0, Y_0$  — координаты центра масс корпуса,  $\vartheta$  — угол поворота корпуса, которые являются элементами вектора  $q_K = (X_0, Y_0, \vartheta)^T$ . Вектор обобщенных координат  $q_\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)^T$  межзвенных углов, определяющих конфигурацию манипулятора. Вектор  $\rho_{BA} = (X_\varepsilon, Y_\varepsilon)^T$  регулируемых координат, содержащий отклонения концевой точки переносимого груза  $B = (X_B, Y_B)$  от точки цели  $A = (X_A, Y_A)$ , определенных в инерциальной СК,  $X_\varepsilon = X_A - X_B, Y_\varepsilon = Y_A - Y_B$ .

Плоское движение рассматриваемого варианта механической структуры СКМР описывается следующим уравнением относительно вектора  $q = (q_K, q_\alpha)^T$  [15, 16]:

$$(1) \quad A(q)\ddot{q} = M(q, u) + F(q, \dot{q}),$$

где  $A(q) \in R^{6 \times 6}$  — матрица, содержащая блоки симметричных матриц массово-инерционных параметров корпуса  $A_{11}(q) \in R^{3 \times 3}$  и манипулятора  $A_{22}(q) \in R^{3 \times 3}$ , а также коэффициентов динамического взаимодействия корпуса  $A_{12}(q) \in R^{3 \times 3}$  и звеньев манипулятора  $A_{21}(q) \in R^{3 \times 3}$ , при этом  $A_{12}(q) = A_{21}(q)$ ;  $M(q, u) = (M_K, M_\alpha)^T$ ,  $M_K \in R^3$  — вектор управляющих воздействий, прикладываемых к корпусу робота,  $M_\alpha \in R^3$  — вектор управляющих воздействий приводов на звенья манипулятора, возникающих при подаче на входы приводов управляющих напряжений  $u(t)$ ;  $F(q, \dot{q}) = (f_K(q, \dot{q}), f_\alpha(q, \dot{q}))^T$  — вектор нелинейных функций возмущений от Кориолисовых и центробежных сил. Выражения для вычисления элементов матриц и векторов приведены в [16].

В данной работе предполагается использование в приводах звеньев манипулятора электрических двигателей постоянного тока с независимым возбуждением [16]. Динамика каждого  $j$ -го привода ( $j = \overline{1, 3}$ ) в первом приближении, когда не учитываются постоянная времени двигателя и механические нелинейности, описывается уравнениями вида [16, 17]

$$(2) \quad J_j i_{pj} \ddot{\alpha}_j = (k_{bj} k_{aj})^{-1} u_j(t) - k_{aj}^{-1} i_{pj} \dot{\alpha}_j - M_{Rj}(t), \quad j = \overline{1, 3},$$

где  $\alpha_j \in q_\alpha$ ,  $J_j$  — приведенный к валу двигателя момент инерции  $j$ -го привода,  $i_{pj}$  — передаточное число редуктора,  $M_{Rj}$  — момент динамической нагрузки на валу двигателя, действующего со стороны манипулятора,  $k_{bj}, k_{aj}$  — постоянные коэффициенты.

Для снижения энергетических затрат при управлении манипулятором СКМР часто используются в приводах звеньев самотормозящиеся механические передачи [15, 16]. Свойство самоторможения обеспечивается наложением импульсной связи на перемещающееся звено манипулятора, в результате чего имеем  $\dot{\alpha}_j = 0$  и  $u_j = 0$ . Следствием самоторможения является исчезновение в (1) уравнения по координате  $\alpha_j$ , что математически выражается в понижении (или повышении) порядка системы (1) на  $2 \times r$  единицы, где  $r$  — число одновременно заторможенных (или расторможенных) звеньев манипулятора. Модель СКМР (1), (2) используется для синтеза алгоритмов управления движением робота на режимах функционирования манипулятора [15].

При синтезе алгоритмов управления угловым движением СКМР необходимо учитывать наличие свойства технической управляемости, которое является необходимым условием работоспособности робота [18]. Для СКМР свойство технической управляемости заключается в том, что угловое движение корпуса робота и движения звеньев манипулятора должны быть управляемыми. Это означает, что при подаче сигналов управления на изменение их положения эти изменения осуществлялись бы в требуемом направлении и с заданной скоростью. Анализ свойства управляемости объектов типа СКМР целесообразно проводить на основе упрощенной модели углового движения механической системы робота при следующих предположениях [18]: для каждого  $q_i$  существует  $M_i$  с ограничением  $|M_i| \leq M_i^{\max} > 0$ ,  $i = \overline{1, 6}$ ; желаемой реакцией на  $M_i^{\max} > 0$ , при  $M_j = 0$ ,  $i, j = \overline{1, 6}$ ,  $j \neq i$ , в момент времени  $t = t_0$  при  $q_i(t) = 0$ ,  $\dot{q}_i(t) = 0$ ,  $\ddot{q}_i(t) = 0$  ( $t < t^*$ ) является  $q_i(t) \geq 0$  при  $t > t^*$ ;  $\dot{q}$  достаточно малые, чтобы считать равными нулю члены полной модели движения, которые зависят от произведений скоростей  $\dot{q}$ ; допускается линеаризация уравнений модели движения относительно положения  $q = q^*$ , где  $q_i^* = \text{const}$ ,  $i = \overline{1, 6}$ .

Линеаризованная в положении  $q^*$  модель углового движения имеет вид

$$(3) \quad A(q^*) \Delta \ddot{q} = P(q^*) M(q),$$

где  $\Delta q = q - q^*$ ,  $A(q^*)$  — положительно определенная матрица,  $P(q^*)$  — матрица связи обобщенных сил с вектором управляющих сил и моментов [18].

СКМР с моделью (3) является управляемым по  $\Delta q_i$   $i = \overline{1, 6}$  в положении  $q = q^*$ , если при нулевых начальных условиях  $\Delta q_i(t) = 0$ ,  $\Delta \dot{q}_i(t) = 0$ ,

$\Delta\ddot{q}_i(t) = 0 \forall t < t_0$  и при подаче в момент времени  $t_0$  максимального по модулю управления  $|M_i(t)| = M_i^{\max} \forall t \geq t_0$  возникает ускорение  $\Delta\ddot{q}_i(t) \geq \eta_i \neq 0$  одного знака с  $M_i(t)$ , причем это происходит независимо от присутствия или отсутствия других управляющих воздействий  $M_j(t)$  ( $j = \overline{1,6}; j \neq i$ ),  $\eta_i$  — характерные для механической системы известные величины. В [18] доказана теорема, в соответствии с которой управляемость СКМР в окрестности точки  $q = q^*$  определяется только конструктивными параметрами механической системы робота, а не вектором ограничений на управление  $M^{\max}$ .

### 3. Управление траекторным движением СКМР

Рассмотрим часть траектории движения СКМР, которая начинается с момента выключения маршевого двигателя и заканчивается в момент достижения границы рабочей области манипулятора. На этом участке траектории система управления движением СКМР должна решать задачу устранения остаточной боковой скорости и бокового отклонения робота от линии визирования, а также стабилизацию углового положения его корпуса. Если в качестве исполнительных органов используются газовые реактивные двигатели, то возникает задача сокращения расхода находящегося на борту СКМР рабочего тела двигателей. Указанную задачу при формировании управления предлагается решать методом совместного использования газовых реактивных сопел и моментных приводов манипулятора. В дальнейшем такое управление для краткости будем называть экономичным управлением.

При движении СКМР с переносимым элементом БКК по траектории его манипуляторы должны быть зафиксированы в положении, обеспечивающем совмещение центра масс механической системы робота с центром приложения управляющих сил [7]. Манипулятор с переносимым элементом является неподвижным, и задачи управления траекторным и угловым движением СКМР решаются с помощью базовых алгоритмов, формирующих управляющие воздействия  $M_j$ , прикладываемые к корпусу робота со стороны газовых реактивных сопел. При экономичном управлении на рассматриваемом участке траектории предлагается обеспечить ограниченную подвижность манипулятора. В этом случае требуемая угловая стабилизация корпуса осуществляется за счет реализации обмена движениями между корпусом робота и звеньями манипулятора путем приложения управляющих моментов со стороны электромеханических приводов манипулятора, электрическая энергия которых может восстанавливаться. Наличие ограничений на допустимые перемещения звеньев манипулятора при управлении с их помощью угловым положением корпуса СКМР может привести к состоянию, при котором углы поворотов звеньев достигают предельных значений, и дальнейшее управление указанным электромеханическим способом становится невозможным. В процессе восстановления исходной конфигурации манипулятора требуемая угловая ориентация корпуса обеспечивается с помощью газовых реактивных сопел. Для краткости этот процесс восстановления назовем режимом «разгрузки» манипулятора.

При формировании алгоритмов экономичного управления необходимо учитывать следующие особенности: существуют ограниченные области изме-

нения координат звеньев манипулятора ( $|\alpha_i(t)| \leq \alpha_{i \max}$ ,  $|\dot{\alpha}_i(t)| \leq \dot{\alpha}_{i \max}$ ); отклонение звеньев манипулятора от исходного положения приводит к смещению центра масс СКМР относительно центра приложения сил и, следовательно, является параметрическим возмущением в системе ориентации робота; газовые реактивные исполнительные органы — релейные, моменты электро-механических приводов ограничены; во всей области изменения координат системы (1) выполнены условия технической управляемости по отношению к вектору  $q_\alpha$ .

Пусть  $u_\vartheta(\vartheta, \dot{\vartheta}, t)$  — базовые алгоритмы управления ориентацией СКМР и  $u_\alpha(\alpha, t)$  — алгоритмы управления конфигурацией манипулятора. При экономичном управлении, предполагая первоначально использовать только управляющее воздействие  $M_{\alpha 1}$  от привода плечевого звена манипулятора, уравнения движения СКМР представим в виде

$$(4) \quad A_1(q)\ddot{q}_1 = F_q + F_q^d,$$

где  $q_1 = (\vartheta, \alpha_1, X_0, Y_0)^T$ ,  $F_q = (0, M_{\alpha 1}, 0, F_y)^T$  — вектор используемых управлений,  $F_q^d = (M_\vartheta^d, 0, 0, 0)^T$  — вектор учитываемых возмущений,  $A_1(q) = [a_{ij}(\alpha_1, \lambda)]$  — симметричная матрица,  $\lambda$  — вектор параметров СКМР и элемента БКК.

Изменение координаты  $\vartheta$  определяется решением уравнения (4) в виде

$$(5) \quad \ddot{\vartheta} = k_0(k_\alpha M_{\alpha 1} + k_d M_\vartheta^d + k_y F_y),$$

где  $k_0 = (\det[A_1(q)])^{-1}$ ;  $k_\alpha(\alpha_1, \lambda) = -D_{21}q$  — коэффициент эффективности воздействия  $M_{\alpha 1}$  на  $\vartheta$ , является алгебраическим дополнением элемента  $a_{21}(q)$  для  $\det[A_1(q)]$ ;  $k_d(\alpha_1, \lambda) = D_{11}(q)$  — коэффициент влияния внешнего возмущения  $M_\vartheta^d$  на  $\vartheta$  является алгебраическим дополнением элемента  $a_{11}(q)$  для  $\det[A_1(q)]$ ;  $k_y(\alpha_1, \lambda) = -D_{41}(q)$  — коэффициент влияния канала управления  $F_y$  является алгебраическим дополнением  $a_{41}(q)$  для  $\det[A_1(q)]$ .

Управление  $M_{\alpha 1}$ , стабилизирующее координату  $\vartheta$ , предлагается формировать в виде

$$(6) \quad M_{\alpha 1}[u_{\alpha 1}(t)] = -\tilde{k}_0 k_A(\vartheta + k_\vartheta \dot{\vartheta}),$$

где  $k_A = (k_m k_b)^{-1}$  — статический коэффициент усиления привода;  $\tilde{k}_0$  — перестраиваемый (при необходимости) параметр алгоритма управления  $u_{\alpha 1}(t)$ ,  $k_\vartheta$  — постоянный коэффициент.

Если управление (6) реализуемо, то задача синтеза линейной части базового алгоритма сводится к обеспечению устойчивости и желаемого качества движения (5). Учитывая (6), перепишем (5) в виде

$$(7) \quad \ddot{\vartheta} + k_A k_\vartheta \tilde{k}_0 \bar{k}_\alpha(\alpha_1, \lambda) \dot{\vartheta} + k_A \tilde{k}_0 \bar{k}_\alpha(\alpha_1, \lambda) \vartheta = \bar{M}_\Sigma^d(\alpha_1, \lambda, t),$$

где  $\bar{k}_\alpha(\alpha_1, \lambda) = k_0 k_\alpha(\alpha_1, \lambda)$  — приведенный коэффициент эффективности управления  $M_{\alpha 1}$ , который, в соответствии с теоремой о технической управляемости и [18], удовлетворяет условию  $\bar{k}_\alpha(\alpha_1, \lambda) > 0 \forall (\alpha_1, \alpha_2) \in (0, \pm\pi)$ ;  $\bar{M}_\Sigma^d(\alpha_1, \lambda, t) = \bar{k}_d(\alpha_1, \lambda) M_\vartheta^d + \bar{k}_y(\alpha_1, \lambda) F_y$  — результирующий приведенный возмущающий момент;  $\bar{k}_y(\alpha_1, \lambda) = k_0 k_y(\alpha_1, \lambda)$ ,  $\bar{k}_d(\alpha_1, \lambda) = k_0 k_d(\alpha_1, \lambda)$ .

Если известны параметры  $\lambda$  и  $\alpha_1(t)$  измеряется, то предлагается в (6) формировать алгоритм изменения  $k_0(t)$  из условия постоянства соотношения

$$(8) \quad \tilde{k}_0(t)\bar{k}_\alpha(\alpha_1, \lambda) = K,$$

где  $K$  — постоянная величина, удовлетворяющая желаемому качеству движения  $\vartheta$ .

При реализации (8) коэффициенты в (7) являются постоянными, что гарантирует устойчивость движения по  $\vartheta$ . Достижение требуемой статической точности ориентации СКМР  $|\vartheta(t)| \leq \vartheta_{\min}$ , где  $\vartheta_{\min}$  — заданное значение, при движении (7) с (8) обеспечивается выполнением условия  $k_A \geq (K\vartheta_{\min})^{-1} \times [M_\Sigma^d(\alpha_1, \lambda, t)]_{\max}$ .

Управление (5) реализуется при алгоритме изменения напряжения  $u_{\alpha_1}(t)$ , подаваемого на вход электропривода (2) плечевого звена манипулятора, в виде [16]

$$(9) \quad u_{\alpha_1}(t) = -\frac{\tilde{k}_0}{i_g} \left[ \left( 1 + \frac{k_{\dot{\vartheta}}}{k_m J_m} \right) \vartheta + (k_m J_m)^{-1} \int \vartheta dt + k_{\dot{\vartheta}} \dot{\vartheta} + \frac{k_b J_L}{\tilde{k}_0 J_m} \dot{\alpha}_1 \right],$$

где  $M_L \approx -J_L \ddot{\alpha}_1$ ,  $J_L$  — момент инерции нагрузки, приведенный к плечевому шарниру.

Алгоритм (9) используется до момента достижения  $\vartheta$  области  $|\vartheta(t)| < \vartheta_{\min}$ . Затем система переключается на нелинейный алгоритм, который содержит нелинейности типа зоны нечувствительности и гистерезиса, что позволяет организовать внутри указанной координатой области высокоэкономичные, односторонние автоколебания.

В общем случае остаточные ненулевые начальные условия  $\vartheta_0, \dot{\vartheta}_0$  и вынужденные движения, порождаемые внешними возмущениями, гасятся в соответствии с алгоритмом вида (9) изменением координат  $\alpha_i(t)$ . Процесс гашения завершается либо установившимися малыми колебаниями в области  $|\vartheta(t)| \leq \vartheta_{\min}$ , либо выходом  $\alpha_i(t)$  на ограничения. В последнем случае возникает необходимость возвращения манипулятора в исходное положение (режим «разгрузки» манипулятора), чтобы иметь возможность опять использовать подвижность манипулятора для реализации принятого способа управления ориентацией СКМР. В режиме «разгрузки» манипулятора под действием собственного управления  $M_\alpha(u_\alpha)$  его звенья переводятся в исходное состояние  $\alpha_i(t) \rightarrow \alpha_i^*$  с одновременным удержанием  $\vartheta$  в области  $|\vartheta(t)| \leq \vartheta_{\min}$ . Угловая стабилизация корпуса осуществляется с помощью момента  $M_\vartheta(u_\vartheta) \leq M_\vartheta^{\max}$ , где  $M_\vartheta^{\max}$  — существующее ограничение. Задача управления роботом в таком режиме представляет собой задачу многосвязного регулирования в существенно нелинейной системе с ограничениями на управляющие воздействия.

При описании режима «разгрузки» в (4) необходимо принять

$$F_q = (M_\vartheta, M_{\alpha_1}, 0, F_y)^T.$$

Тогда поведение координаты  $\vartheta$  описывается уравнением

$$(10) \quad \ddot{\vartheta} = \bar{k}_{M\vartheta}(\alpha_1, \lambda) M_\vartheta(u_\vartheta) + f_p(\alpha_1, \lambda),$$

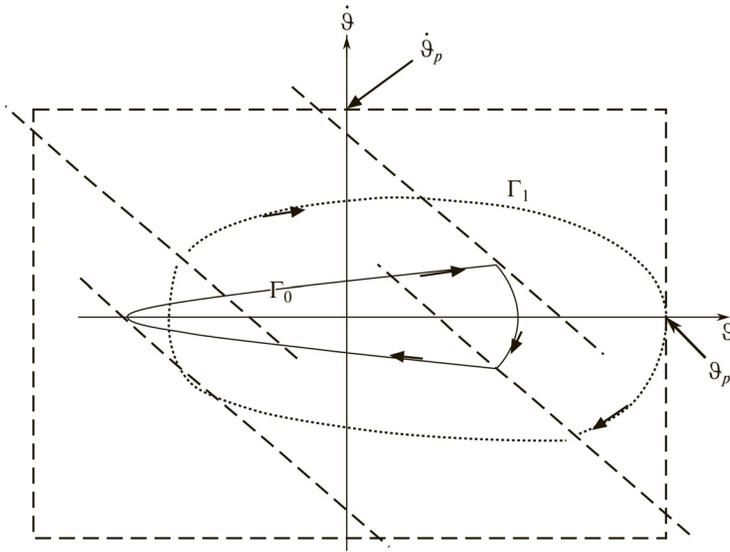


Рис. 1. Предельные циклы в режиме разгрузки манипулятора.

где  $\bar{k}_{M\vartheta}(\alpha_1, \lambda)$  — коэффициент эффективности воздействия  $M_{\vartheta}(u_{\vartheta})$ , вычисляемый аналогично для (5);  $f_p(\alpha_1, \lambda) = \bar{M}_{\Sigma}^d(\alpha_1, \lambda, t) + \bar{k}_{\alpha}(\alpha_1, \lambda)M_{\alpha 1}$  — возмущения при  $|\vartheta(t)| \leq \vartheta_{\min}$ .

При синтезе алгоритмов управления координатами  $\vartheta$  и  $\alpha$  необходимо учитывать противоречивость требований к работе каждой из подсистем. Минимизация времени переключки вышедшего на ограничение звена манипулятора предполагает использование максимально достижимых (с учетом существующих ограничений) скоростей  $\dot{\alpha}_{1\max}$  выходного вала привода. Однако возникающие при этом в подсистеме регулирования  $\vartheta$  возмущения  $f_p(\alpha_1, \lambda)$  при ограничении  $M_{\vartheta}^{\max}$  могут привести к нарушению требований точности ориентации. В этом случае скорость переключки звена манипулятора должна быть ограничена величиной, меньшей  $\dot{\alpha}_{1\max}$ . Для определения оптимальных значений параметров регулятора, обеспечивающих желаемую динамику режима «разгрузки» целесообразно использовать метод фазовой плоскости на основе (10).

Пусть базовый нелинейный алгоритм стабилизации углового положения СКРМ  $u_{\vartheta}(\vartheta, \dot{\vartheta}, t)$  формирует односторонние автоколебания, отображаемые на фазовой плоскости  $(\vartheta, \dot{\vartheta})$  в виде предельного цикла  $\Gamma_0$ , показанный на рис. 1. В режиме «разгрузки» манипулятора под влиянием  $f_p(\alpha_1, \lambda)$  невозмущенный цикл  $\Gamma_0$  трансформируется в другой устойчивый цикл  $\Gamma_1$ . Цикл  $\Gamma_1$  формируется таким образом, чтобы при максимально возможном значении  $f_{p,\max}(\alpha_1, \lambda)$ , его фазовая траектория не пересекала бы границ допустимых отклонений регулируемых координат ( $|\vartheta| = \vartheta_p, |\dot{\vartheta}| = \dot{\vartheta}_p$ ), отмеченных на рис. 1 пунктирным прямоугольником. После завершения «разгрузки» восстанавливается исходный цикл ( $\Gamma_1 \rightarrow \Gamma_0$ ) и следует возврат к управлению  $M_{\alpha}(u_{\alpha})$ .

Одновременно с управлением ориентацией СКРМ продолжает функционировать система коррекции поперечных смещений корпуса, которая при превышении уровня отклонения  $Y_0 = Y_{0\min}$  формирует управляющее воздействие  $F_y$  в (4). Поскольку при этом конфигурация механической структуры СКРМ не является сбалансированной, то в канале управления ориентацией появляется возмущающий момент  $M_{F_y}^d = F_y x_c$ , компенсация которого воздействием  $M_\alpha(u_\alpha)$  может оказаться недостаточной. Поэтому при действии  $F_y$  в системе управления ориентацией необходимо обеспечить автоматический переход на эффективное нелинейное управление  $M_g(u_g)$ .

#### 4. Управление манипулятором при установке элемента на объект

При управлении манипулятором СКРМ в режиме мягкой установки элемента на БКК в рабочей зоне движение корпуса робота при использовании самотормозящихся приводов манипулятора не вызывает изменения  $q_\alpha$ . Управляемое движение каждого звена не должно изменять величины других межзвенных углов. Это характерное для рассматриваемого класса механических систем свойство обеспечивается, если в процессе проектирования выполнены условия технической управляемости, позволяющие не учитывать взаимовлияние шарниров и, как следствие, считать матрицу  $A_{22}$  диагональной. Движение координат механической системы СКРМ с переносимым элементом БКК в рабочей зоне при  $t \geq t_0$ , где  $t_0$  — момент времени входа в рабочую зону, происходит с достаточно малыми скоростями, что позволяет использовать для синтеза алгоритмов линейные математические модели [15]. При наличии указанных особенностей движение (1) в первом приближении, пренебрегая влиянием на динамику СКРМ функций  $f_K(q, \dot{q})$  и  $f_\alpha(q, \dot{q})$ , слагаемые которых содержат произведения малых величин ( $\dot{q}_i \dot{q}_j$ ),  $i, j = \overline{1, 6}$ , описывается в виде

$$(11) \quad A_r(q)\ddot{q} = M(q, u),$$

где матрица  $A_r(q)$  содержит блоки,  $A_{r,11} = A_{11}$ ,  $A_{r,12} = A_{12}$ ,  $A_{r,21} = 0$ ,  $\dot{q}(t_0) = 0$ .

При выборе в качестве регулируемых координат  $X_\varepsilon, Y_\varepsilon$  управление манипулятором по координатам  $q_\alpha$  является разомкнутым и существует возможность достижения области  $|X_\varepsilon| \leq X_{\varepsilon, \min}$  и  $|Y_\varepsilon| \leq Y_{\varepsilon, \min}$  за счет целенаправленного изменения  $q_\alpha(t)$ , где  $X_{\varepsilon, \min}, Y_{\varepsilon, \min}$  — заданные значения. Использование только вращающихся степеней свободы механической системы СКРМ позволяет пренебречь смещением центра масс корпуса и считать  $q_1, q_2$  постоянными. Если в режиме мягкой установки элемента формируются управления по  $\alpha_1, \alpha_2$  и концевое звено манипулятора зафиксировано ( $\alpha_3$  — постоянная величина), то движение по  $X_\varepsilon$  и  $Y_\varepsilon$  на основе (11) описывается в виде

$$(12) \quad \begin{aligned} \ddot{X}_\varepsilon &= d_{11}(q)M_{\alpha 1} + d_{12}(q)M_{\alpha 2}, \\ \ddot{Y}_\varepsilon &= d_{21}(q)M_{\alpha 1} + d_{22}(q)M_{\alpha 2}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
d_{11}(q) &= b_{\Delta} a_{44}^{-1} [(b_m - a_{23}^2)(a_{14}a_{33} - a_{13}a_{34}) + b_3(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34})], \\
d_{12}(q) &= b_{\Delta} a_{55}^{-1} [(b_m - a_{23}^2)(a_{15}a_{33} - a_{13}a_{35}) + b_3(a_{25}a_{33} - a_{23}a_{35})], \\
d_{21}(q) &= b_{\Delta} a_{44}^{-1} [(b_m - a_{13}^2)(a_{24}a_{33} - a_{23}a_{34}) + b_3(a_{14}a_{33} - a_{13}a_{34})], \\
d_{22}(q) &= b_{\Delta} a_{55}^{-1} [(b_m - a_{13}^2)(a_{25}a_{33} - a_{23}a_{35}) + b_3(a_{15}a_{33} - a_{13}a_{35})], \\
b_{\Delta} &= [a_{33}m_S(b_m - a_{13}^2 - a_{23}^2)]^{-1}, \quad b_m = a_{33}m_S^2, \quad b_3 = a_{13}a_{23}, \quad m_S - \text{масса СКМР}.
\end{aligned}$$

Изменение коэффициентов  $d_{ij}(q)$   $i, j = \overline{1, 2}$  обусловлено их зависимостью от углового положения корпуса СКМР через  $\vartheta$  и от шарнирных углов  $\alpha_1, \alpha_2$ . В процессе управления манипулятором в рабочей зоне могут возникнуть положения его звеньев, при которых коэффициенты  $d_{ij}(q) < 0$ , что вызовет неустойчивость по  $X_{\varepsilon}, Y_{\varepsilon}$ . Если доступна информация о  $X_{\varepsilon}, Y_{\varepsilon}$  и  $\dot{X}_{\varepsilon}, \dot{Y}_{\varepsilon}$ , то устойчивое управление по  $X_{\varepsilon}, Y_{\varepsilon}$  обеспечивается ПД-алгоритмами вида

$$\begin{aligned}
(13) \quad M_{\alpha 1} &= k_{0x}(k_{1x}X_{\varepsilon} + k_{2x}\dot{X}_{\varepsilon}), \\
M_{\alpha 2} &= k_{0y}(k_{1y}Y_{\varepsilon} + k_{2y}\dot{Y}_{\varepsilon}),
\end{aligned}$$

в которых коэффициенты  $k_{jx}, k_{jy}$  ( $j = \overline{0, 2}$ ) должны выбираться с учетом выполнения требований к устойчивости нулевого решения системы (12), (13). Эти требования определяются при анализе характеристического уравнения вида

$$\sum_{j=0}^4 c_j \lambda^j = 0,$$

где

$$\begin{aligned}
c_0 &= \Delta d k_{1x} k_{1y}; \quad c_1 = \Delta d (k_{1y} k_{2x} + k_{1x} k_{2y}); \\
c_2 &= \Delta d k_{2x} k_{2y} - (k_{1x} k_{0x} d_{11} + k_{2x} k_{0y} d_{22}); \\
c_3 &= -(k_{1y} k_{0x} d_{11} + k_{2y} k_{0y} d_{22}); \quad c_4 = 1; \\
\Delta d &= k_{0x} k_{0y} (d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}).
\end{aligned}$$

Необходимое условие устойчивости  $c_j > 0 \forall j = \overline{0, 4}$  соблюдается при  $\Delta d > 0$  и  $\text{sign} d_{11} \neq \text{sign} k_{0x}$ ,  $\text{sign} d_{22} \neq \text{sign} k_{0y}$ . Выполнение условия  $\Delta d > 0$  не зависит от значений  $k_{jx}, k_{jy}$ ,  $j = \overline{0, 2}$  и определяется соотношениями

$$\begin{aligned}
(14) \quad &(\text{sign} d_{11} \neq \text{sign} d_{22} \wedge \text{sign} d_{12} = \text{sign} d_{21}) \vee \\
&\vee (\text{sign} d_{11} = \text{sign} d_{22} \wedge \text{sign} d_{12} \neq \text{sign} d_{21}); \\
&(\text{sign} d_{11} = \text{sign} d_{22} \wedge \text{sign} d_{12} = \text{sign} d_{21} \wedge |d_{11} d_{22}| > |d_{12} d_{21}|) \vee \\
&\vee (\text{sign} d_{11} \neq \text{sign} d_{22} \wedge \text{sign} d_{12} \neq \text{sign} d_{21} \wedge |d_{11} d_{22}| < |d_{12} d_{21}|).
\end{aligned}$$

Если изменения  $d_{ij}(q)$  не нарушают условия  $\Delta d > 0$ , то выполнение условий устойчивости обеспечивается изменением значений коэффициентов (13). Если при управлении манипулятором СКМР  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  являются измеряемыми, то  $d_{ij}(q)$  могут вычисляться, что позволяет контролировать условия устойчивости и в соответствующие моменты времени перестраивать коэффициенты в (13).

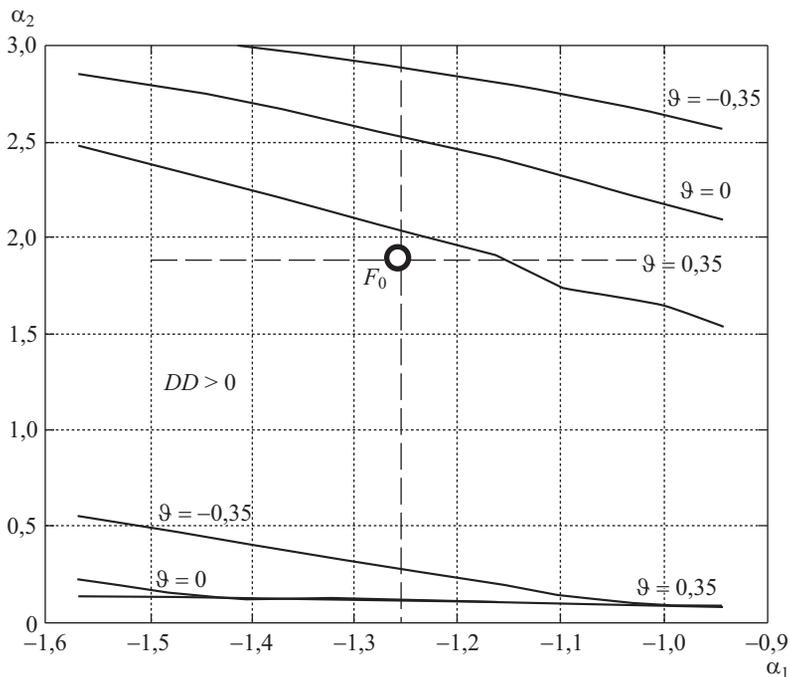


Рис. 2. Влияние угла  $\vartheta$  на границы области устойчивости.

На основе (14) целесообразно сформировать область устойчивости в координатах  $\alpha_1, \alpha_2$ , информация о которой позволяет выбирать начальную конфигурацию манипулятора перед установкой элемента и допустимое изменение  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в процессе его установки. На топологию области устойчивости влияют значения  $\vartheta$  и  $\alpha_3$ , которые определяют взаимное положение корпуса и устанавливаемого элемента. На рис. 2 показана, в качестве примера по данным из [15], часть области устойчивости при  $\alpha_3 = -0,2\pi$  и трех начальных положениях корпуса СКМР ( $\vartheta = [-0,35; 0; 0,35]$ ). Точкой  $F_0$  на рис. 2 обозначено начальное положение звеньев  $\alpha_1(t_0) = -1,26$ ;  $\alpha_2(t_0) = 1,58$ . Из рис. 2 видно, что увеличение положительной величины угла  $\vartheta$  уменьшает область устойчивости, где  $\Delta d > 0$  (на рис. 2 область устойчивости обозначена  $DD > 0$ ), что сокращает диапазон изменения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  при установке элемента манипулятором.

Следует отметить, что изменение угла  $\alpha_3$ , который определяет положение схвата, в меньшей степени влияет на изменение границ области устойчивости, чем изменение углового положения корпуса СКМР.

## 5. Заключение

На основе проведенного анализа особенностей механической структуры СКМР предложено решение задачи сокращения расхода находящегося на борту СКМР рабочего тела газовых реактивных двигателей при транспортировке элемента БКК при сборке ее на орбите. Решение задачи основано на

использовании подвижности манипулятора, что позволяет обеспечить стабилизацию углового положения корпуса СКМР. Формирование управления на отдельных участках траектории движения СКМР реализуется путем совместного использования двух типов исполнительных органов: газовых реактивных сопел и моментных электромеханических приводов манипулятора. Используемые в работе математические модели движения СКМР являются удобными для синтеза алгоритмов управления на основе принципа обратной связи и исследования процессов манипуляционного функционирования СКМР. Алгоритмы управления СКМР, которые удовлетворяют условиям технической управляемости, поддерживают требуемую конфигурацию механической структуры робота при транспортировке элемента БКК и его установке. При достаточно малых шарнирных скоростях манипулятора приведенные в работе алгоритмы обеспечивают в рабочей зоне мягкую установку элемента в заданную точку БКК. Предлагается предварительно определить область устойчивости в пространстве шарнирных углов манипулятора, которая позволит выбрать начальную конфигурацию механической системы робота перед манипуляционной операцией и диапазон изменения шарнирных углов при выполнении операции, обеспечивающий устойчивость движения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Papadopoulos E., Aghili F., Ma O., Lampariello R.* Manipulation and capture in space: A survey // *Front. Robot. AI.* 2021. No. 8. P. 1–36.
2. *Hung J., Irwin J., Moore F.* Free-flying teleoperator for space missions // *Pros. of 6th IFAC Symposium on Control in Space.* 1976. V. 2. Moscow. Nauka. P. 173–180.
3. *Яскевич А.В.* Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза // *Изв. РАН. ТиСУ.* 2004. № 4. С. 157–176.
4. *Dubowsky S., Papadopoulos E.* The Kinematics, Dynamics and Control of Free-Flying and Free-floating Space Robotic Systems // *IEEE Transact. Robot. Automat.* 1993. V. 9. No. 5. P. 531–543.
5. *Moosavian S., Ali A., Papadopoulos E.* Free-flying robots in space: an overview of dynamics modeling, planning and control // *Robotica.* 2007. V. 25. No. 5. P. 537–547.
6. *Popov T.P., Medvedev V.S., Yuschenko A.S.* Free-flying manipulation robot computer control // *Pros. of the 8-th IFAC Symposium on automatic control in space.* 1979. Oxford. UK. Preprints. Pergamon Press. P. 295–301.
7. *Богомолов В.П., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Проектирование оптимальной механической структуры свободнолетающего космического робототехнического модуля как объекта управления. Ч. I // *АиТ.* 1998. № 5. С. 27–40.  
*Bogomolov V.P., Rutkovskii V.Yu., Sukhanov V.M.* Design of an Optimal Mechanical Structure of a Free-flying Space Robotic Module as a Control Object. I // *Autom. Remote Control.* 1998. V. 59. No. 5. Part 1. P. 632–642.
8. *Суханов В.М., Рутковский В.Ю., Глумов В.М.* Определение рабочей зоны и требуемого начального положения свободнолетающего космического робота при захвате цели // *АиТ.* 2014. № 11. С. 150–159.  
*Sukhanov V.M., Rutkovskii V.Yu., Glumov V.M.* Determination of Workspace and Required Initial Position of Free-Flying Space Manipulator at Target Capture // *Autom. Remote Control.* 2014. V. 75. No. 11. P. 953–963.

9. *Vafa Z., Dubowsky S.* On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat. 1985. P. 579–585.
10. *Yoshida K., Umetani Y.* Control of Space Free-Flying Robot // Proc. 29 IEEE Conf. Decision Control. 1990. P. 97–102.
11. *Papadopoulos E., Dubowsky S.* Dynamic Singularities in the Control of Free-floating Space Manipulators // ASME J. Dyn. Syst. Meas., Contr. 1993. V. 115. No. 1. P. 44–52.
12. *Rubus T., Seweryn K., Sasiadek J.Z.* Control system for free-floating space manipulator on nonlinear model predictive control (MMPC) // Intell Robot. Syst. 2017. No. 85. P. 491–509.
13. *Somov Y., Butyrin S., Somova T., Somov S.* Control of a free-flying robot at preparation for capturing a passive space vehicle // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. No. 30. P. 72–76.
14. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М.* Некоторые вопросы управления свободнолетающим космическим манипуляционным роботом // АиТ. 2013. № 11. С. 62–83.  
*Rutkovskii V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M.* Some Issues of Controlling the Free-flying Manipulative Space Robot // Autom. Remote Control. 2013. V. 74. No. 11. P. 1820–1837.
15. *Суханов В.М., Силаев А.В., Глумов В.М.* Уравнения динамики свободнолетающего космического робота для задач управления на основе обратных связей // АиТ. 2015. № 8. С. 153–164.  
*Sukhanov V.M., Silaev A.V., Glumov V.M.* Dynamic Equations of Free-flying Space Robot for Feedback Control Tasks // Autom. Remote Control. 2015. V. 76. No. 8. P. 1446–1454.
16. *Рутковский В.Ю., Суханов В.М., Глумов В.М.* Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации // АиТ. 2010. № 1. С. 80–98.  
*Rutkovskii V.Yu., Sukhanov V.M., Glumov V.M.* Motion Equations and Control of the Free-flying Space Manipulator in the Reconfiguration Mode // Autom. Remote Control. 2010. V. 71. No. 1. P. 70–86.
17. *Крутько П.Д.* Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука. 1991.
18. *Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю., Суханов В.М.* Техническая управляемость автоматизированного космического модуля // АиТ. 2001. № 3. С. 31–44.  
*Glumov V.M., Zemlyakov S.D., Rutkovskii V.Yu., Sukhanov V.M.* Technical Controllability of the Free-flying Automated Space Module // Autom. Remote Control. 2001. V. 62. No. 3. P. 370–382.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галеевым.*

Поступила в редакцию 19.06.2023

После доработки 14.07.2023

Принята к публикации 02.08.2023