УДК 517.977

Глумов В.М., Суханов В.М.

АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МАНИПУЛЯЦИОННОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕГО КОСМИЧЕСКОГО РОБОТА

В [1] была получена упрощенная модель плоского движения свободнолетающего космического манипуляционного робота (КМР), состоящего из несущего тела и шарнирно присоединенного к нему трёхзвенного манипулятора:

$$\begin{aligned} &\tilde{A}_{11}\ddot{q}^{\varepsilon} + \tilde{A}_{12}\ddot{q}^{\alpha} = M^0, \\ &A_{22}^d \ddot{q}^{\alpha} = M^{\alpha}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $q^{\varepsilon} = (X_{\varepsilon}, Y_{\varepsilon}, \vartheta)$, $q^{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, $X_{\varepsilon} = X_A - X_s$, $Y_{\varepsilon} = Y_A - Y_s$ – координаты текущего отклонения концевой точки s манипулятора от цели A (рис. 1). Элементы $\tilde{a}_{ij}(q)$ матриц $\tilde{A}_{11}$, $\tilde{A}_{12}$ и $A_{22}^d = \operatorname{diag} A_{22}$, в общем случае зависящие от переменных $q = (q^0, q^{\alpha})$, где $q^0 = (X_0, Y_0, \vartheta)$, линейно связаны с приведенными в [2] соответствующими элементами $a_{ij}(q)$ матриц полных исходных уравнений КМР вида : $A(q)\ddot{q} + f(q, \dot{q}) = M$.

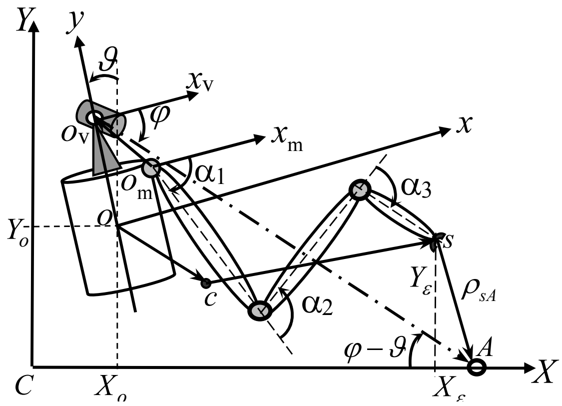

Рисунок 1 – Свободнолетающий КМР

Представленные в скалярной форме уравнения многосвязной системы (1) имеют вид

$$\begin{aligned} &\tilde{a}_{11}\ddot{X}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{12}\ddot{Y}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{13}\ddot{\vartheta} = -(\tilde{a}_{14}a_{44}^{-1}M_{\alpha 1} + \tilde{a}_{15}a_{55}^{-1}M_{\alpha 2} + \tilde{a}_{16}a_{66}^{-1}M_{\alpha 3}), \\ &\tilde{a}_{21}\ddot{X}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{22}\ddot{Y}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{23}\ddot{\vartheta} = -(\tilde{a}_{24}a_{44}^{-1}M_{\alpha 1} + \tilde{a}_{25}a_{55}^{-1}M_{\alpha 2} + \tilde{a}_{26}a_{66}^{-1}M_{\alpha 3}), \\ &\tilde{a}_{31}\ddot{X}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{32}\ddot{Y}_{\varepsilon} + \tilde{a}_{33}\ddot{\vartheta} = -(\tilde{a}_{34}a_{44}^{-1}M_{\alpha 1} + \tilde{a}_{35}a_{55}^{-1}M_{\alpha 2} + \tilde{a}_{36}a_{66}^{-1}M_{\alpha 3}), \\ &a_{44}\ddot{\alpha}_1 = M_{\alpha 1}, \\ &a_{55}\ddot{\alpha}_2 = M_{\alpha 2}, \\ &a_{66}\ddot{\alpha}_3 = M_{\alpha 3}. \end{aligned} \tag{2}$$

Переменность коэффициентов $\tilde{a}_{ij}$ обусловлена зависимостью от координат углового положения корпуса КМР ϑ и шарнирных углов манипулятора α_i. При этом диапазон возможных изменений коэффициентов является ограниченным, поскольку координаты, влияющие на переменность коэффициентов, входят в них как тригонометрические функции, по модулю не превышающие единицы. Следует отметить, что в процессе реализации манипуляционного управления КМР могут возникать состояния, при которых коэффициенты $\tilde{a}_{ij}$ меняют знак на противоположный, т.е. становятся отрицательными, провоцируя неустойчивость движения.

Для анализа устойчивости свободного движения по координатам α_1 и α_2, предполагая, что концевое звено зафиксировано ($\alpha_3 = \text{const}$) и управление по координате ϑ отсутствует, уравнения (2) представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{X}_\varepsilon &= d_{11} M_{\alpha 1} + d_{12} M_{\alpha 2}, \\ \ddot{Y}_\varepsilon &= d_{21} M_{\alpha 1} + d_{22} M_{\alpha 2}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где управляющие шарнирные моменты $M_{\alpha i}$ предполагаются сформированными в виде

$$M_{\alpha 1} = k_{0x}(k_{1x} X_\varepsilon + k_{2x} \dot{X}_\varepsilon),\ M_{\alpha 2} = k_{0y}(k_{1y} Y_\varepsilon + k_{2y} \dot{Y}_\varepsilon), \qquad (4)$$

(коэффициенты $K_{ij} = (k_{0x}, k_{1x}, ..., k_{2y})$ выбираются с учётом выполнения определённых требований к устойчивости и качеству переходного процесса); коэффициенты d_{ij}, $i, j = 1, 2$ являются функциями, зависящими от координат вектора q.

Пример компьютерного вычисления зависимостей $d_{ij}(\alpha_1)$ при $\alpha_2 = \pi/4 = \text{const}$ приведен на рисунке 2, содержащем точки ($\alpha_1 = -0,3,;0,65$) смены знаков графиков функций $d_{ii}(\alpha_1)$, в которых может произойти нарушение приведенных ниже условий устойчивости движения по регулируемым координатам X_ε, Y_ε.

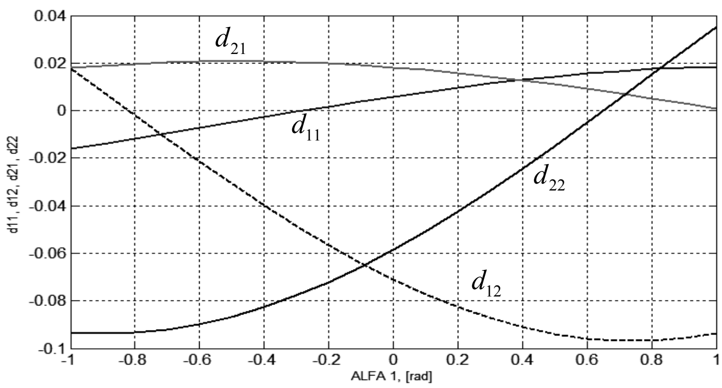

Рисунок 2 – Графики изменения коэффициентов модели КМР

Приведенный пример показывает, что в общем случае переменность коэффициентов $d_{ij}(q)$ в уравнениях КМР (3) при неизменных параметрах управлений (4) может приводить к нарушению хотя бы одного из необходимых условий устойчивости в системе (3), имеющих для рассматриваемого частного случая следующий вид:

$$(k_{0x}k_{2x}d_{11} + k_{0y}k_{2y}d_{22}) < 0\,, \quad \operatorname{sign} d_{12} \neq \operatorname{sign} d_{21} \text{ при } \operatorname{sign} k_{0ч} = \operatorname{sign} k_{0y}\,, \quad d_{11}d_{22} > d_{12}d_{21}\,. \quad (5)$$

Необходимое и достаточное условие устойчивости для системы (3), (4) определяется на основе алгебраического критерия Гурвица при выполнении третьего необходимого условия в (5) в виде $D_3 > 0$. D_3 – диагональный минор третьего порядка матрицы Гурвица, составленного из коэффициентов характеристического уравнения рассматриваемой системы. На основе использования условия $D_3 > 0$ была определена область значений углов α_1 и α_2, при которых движение КМР остается устойчивым при постоянных параметрах алгоритма (4).

Поскольку при управлении КМР координаты ϑ и α_i, как правило, являются измеряемыми, то переменные коэффициенты $\tilde{a}_{ij}$ а, следовательно, и коэффициенты $d_{ij}(q)$ легко могут вычисляться во времени, что позволяет прогнозировать динамику процессов управления КМР, контролируя приведенные выше условия устойчивости и осуществляя в соответствующие моменты времени адаптивную перестройку параметров алгоритма (4).

Сохранение устойчивости движения системы (3), (4) и обеспечение требуемой динамики осуществляется на основе метода адаптивного управления, в соответствии с которым коэффициенты алгоритма (4) перестраиваются в зависимости от изменения параметров объекта (2).

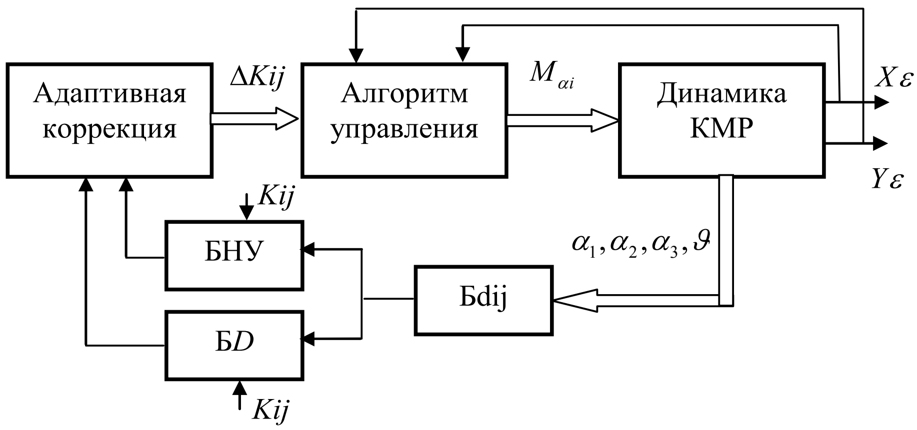

Рисунок 3 – Структура адаптивной системы управления КМР

Структура адаптивной системы управления КМР, представленная на рисунке 3, содержит, кроме блока алгоритмов (4), блок расчета коэффициентов $d_{ij}(q)$, обозначенный на схеме Бdij; БНУ – блок проверки необходимых условий устойчивости (5); БD – блок расчёта текущего значения минора D_3 и блок «адаптивная коррекция», алгоритмы которого осуществляют коррекцию знаков и величин коэффициентов в алгоритме управления КМР (4) по информации, получаемой с выходов блоков БНУ и БD.

В частности, анализ системы (3), (4) показал, что первое из необходимых условий устойчивости в (5) может быть обеспечено за счёт изменения знаков коэффициентов k_{0x}, k_{0y} по результатам вычисления величин $d_{11}(q)$ и $d_{22}(q)$, изменяющихся при манипуляционном функционировании КМР. Данное свойство позволяет существенно упростить алгоритмы адаптивной коррекции коэффициентов системы управления.

Результаты проведенного математического моделирования системы, как в частности видно из рисунка 4 ($X_\varepsilon, Y_\varepsilon \to 0$), подтвердили работоспособность предложенного адаптивного подхода к управлению КМР.

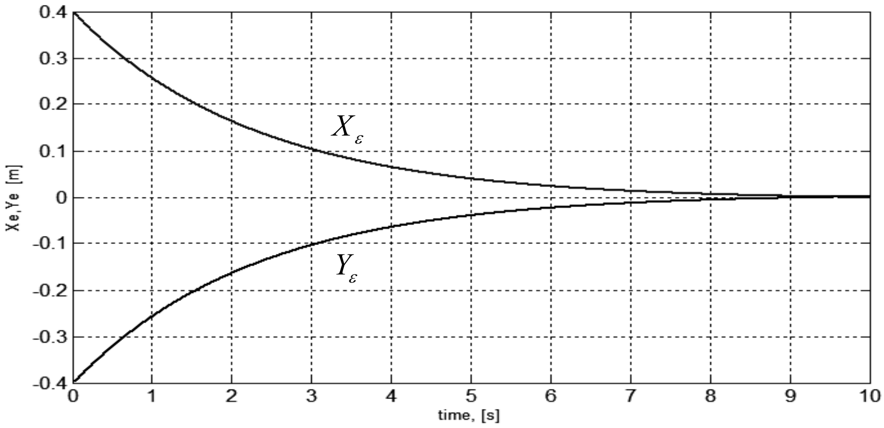

Рисунок 4 – Переходные процессы сближения схвата с целью

Библиографический список

1. Суханов В.М. Уравнения динамики свободнолетающего космического робота для задач управления на основе обратных связей [Текст] / В.М. Суханов, А.В. Силаев, В.М. Глумов // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 8. – С. 153-164.

2. Рутковский В.Ю. Уравнения движения и управление свободнолетающим космическим манипуляционным роботом в режиме реконфигурации [Текст] / В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, В.М. Глумов // Автоматика и телемеханика. – 2010. – №.1. – С. 80-98.