

**В. Ф. Филаретов<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб., filaretov@inbox.ru,

**А. С. Губанков<sup>1, 2</sup>**, канд. техн. наук, доц., gubankov@iacp.dvo.ru,

**И. В. Горностаев<sup>1, 2</sup>**, мл. науч. сотр., gornostaev\_iv@mail.ru,

<sup>1</sup>Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,

<sup>2</sup>Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

## Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть II<sup>1,2</sup>

Статья посвящена вопросам сохранения динамической точности управления рабочих инструментов многостепенных манипуляторов (ММ) при их перемещениях по произвольным пространственным траекториям с учетом конструктивных ограничений во всех степенях подвижности и особых случаев расположения их звеньев.

Во второй части статьи рассмотрен метод, который за счет введения дополнительной (избыточной) степени подвижности ММ, обеспечивающей его перемещение вблизи объектов работ, не допускает вход манипулятора в заранее непредсказуемые особые положения, выход рабочих инструментов на границы его рабочей области, а также выход некоторых его степеней подвижности на ограничения, приводящие к резкому снижению точности работы манипулятора в процессе выполнения любых технологических операций при заранее неизвестных траекториях движения. На основе этого метода синтезирована система, которая позволяет автоматически формировать программные сигналы для всех степеней подвижности ММ с учетом текущих программных положений и ориентаций рабочих инструментов, заданных в абсолютной системе координат, не создавая аварийные ситуации и поддерживая высокое качество выполняемых предписанных операций и работ. Выполненное моделирование подтвердило работоспособность и высокую эффективность предложенного метода.

**Ключевые слова:** многостепенный манипулятор, избыточная степень подвижности, ограничения, особые положения, обратная задача кинематики

### 3. Задание индикаторов, сигнализирующих о приближении манипулятора к его особым положениям

В процессе решения поставленной задачи создания метода автоматического перемещения рабочих инструментов (РИ) многостепенных манипуляторов (ММ) по произвольным пространственным траекториям без снижения динамической точности управления рассмотрим синтез системы, которая при подходе РИ к границам рабочей области ММ, а программных значений всех обобщенных координат ММ — к их ограничениям или к особым положениям [1] автоматически перемещает основание ММ по координате  $q_7$  вдоль оси  $Ox$  (см. рис. 1 [2]) таким образом, чтобы полностью исключить появление описанных в первой части статьи [2] нежелательных ситуаций.

Для реализации этой системы вводится несколько специальных функций-индикаторов, текущие значения которых должны указывать на приближение ММ к его особым (критическим) положениям. Для удобства анализа возникающих ситуаций диапазоны возможных изменений этих индикаторов целесообразно установить единными от 0 (наиболее благоприятное положение ММ) до 1 (его критическое положение).

Значение первого индикатора  $J_1$  стремится к 1, когда какая-либо из обобщенных координат  $q_i$  приближается к своим ограничениям (1) [2], и равно 0, когда все степени подвижности находятся в своих средних положениях  $q_{ci} = (q_{i\min} + q_{i\max})/2$  ( $i = 1, 6$ ). В качестве такого индикатора может быть использована функция

$$J_1 = \max_{i=1,6} \{2|q_i - q_{ci}| / |q_{i\max} - q_{i\min}| \},$$

где  $|q_{i\max} - q_{i\min}|$  — ширина диапазона изменения  $q_i$ , имеющая значение, вдвое превышающее наибольшее возможное значение  $|q_i - q_{ci}|$ . С учетом ранее принятых диапазонов  $[-\pi; \pi]$  изменения всех обобщенных координат ММ можно использовать выражение

<sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках грантов № 19-08-00347 и 20-08-00701.

<sup>2</sup>Часть I опубликована в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление", 2022, Т. 23, № 1.

$$J_1 = \max_{i=1,6} \{ |q_i| / \pi \}. \quad (16)$$

Значение второго индикатора

$$J_2 = 1 - \sqrt{R'_x^2 + R'_y^2} / (L_2 + L_3) \quad (17)$$

стремится к 1, когда ММ приближается к первым трем особым положениям [3, 4] (см. рис. 4, *a*—*e* [2]), в которых точка  $R'$  располагается на связанной с основанием ММ оси  $O'z'$ , и равно 0, когда точка  $R'$  максимально удалена от этой оси и при этом выполняется равенство  $\sqrt{R'_x^2 + R'_y^2} = L_2 + L_3$  (см. рис. 1 [2]).

Третий индикатор  $J_3$  указывает на приближение ММ к его четвертому особому положению (см. рис. 4, *g* [2]), в котором  $q_5 = 0$ . В этом положении значение  $J_3$  равно 1, а при достижении  $q_5$  границ изменения ( $q_{5\min}$  или  $q_{5\max}$ ) равно 0. В результате можно записать

$$J_3 = \begin{cases} 1 - q_5 / q_{5\min}, & \text{если } q_5 < 0; \\ 1 - q_5 / q_{5\max}, & \text{если } q_5 > 0, \end{cases}$$

а с учетом принятых диапазонов  $[-\pi; \pi]$ :

$$J_3 = 1 - |q_5| / \pi. \quad (18)$$

Значение четвертого индикатора  $J_4$  равно 1, если РИ подходит к границе рабочей области, где  $q_3 = 0$  (см. рис. 1 и 4, *b* [2]), и равно 0, если  $q_3 = q_{3\min}$  или  $q_3 = q_{3\max}$ . Таким образом, можно записать, что

$$J_4 = \begin{cases} 1 - q_3 / q_{3\min}, & \text{если } q_3 < 0; \\ 1 - q_3 / q_{3\max}, & \text{если } q_3 > 0, \end{cases}$$

а с учетом принятых диапазонов  $[-\pi; \pi]$ :

$$J_4 = 1 - |q_3| / \pi. \quad (19)$$

Каждый из четырех указанных индикаторов (16)–(19) может изменяться в диапазоне  $J_{ith} \in [0, 1]$  ( $i = \overline{1, 4}$ ) и сигнализирует о приближении ММ к перечисленным критическим положениям. Если начинает выполняться условие  $J_i \geq J_{ith}$ , то основание ММ смещается по координате  $q_7$ , что приводит к изменению проекции рабочей точки инструмента (РТИ)  $r'$  на ось  $O'x'$  и, следовательно, согласно выражениям (2)–(9) и (13)–(15) [2] — к формированию новых значений  $q_i$  ( $i = 1, 6$ ). Заметим, что автоматическое смещение ММ по координате  $q_7$  вдоль оси  $Ox$  выполняется в сторону уменьшения значения  $J_i$ . Для упрощения описания ра-

боты синтезируемой ниже системы значения  $J_{ith}$  для всех четырех индикаторов  $J_i$  будут приняты одинаковыми, а смещение основания ММ будет происходить, когда наибольшее значение непрерывно рассчитываемых  $J_i$  превысит заранее назначенное значение  $J_{th}$ . В общем случае значения  $J_{ith}$  могут быть различными с учетом кинематической схемы конкретного ММ.

Введенные индикаторы ниже будут использованы для автоматического выбора исходной конфигурации ММ перед началом его работы и для корректного последующего выполнения всех необходимых движений РИ с учетом указанной исходной конфигурации.

#### 4. Описание алгоритма автоматического выбора исходной конфигурации ММ и системы управления его избыточной степенью подвижности

Полученные в первой части статьи выражения (2)–(9) и (13)–(15) [2] показывают, что при решении обратной задачи кинематики (ОЗК) для выбора конкретной конфигурации ММ (см. рис. 1 [2]) должны быть заданы элементы вектора  $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$ , которые для исключения одновременного скачкообразного изменения значений нескольких обобщенных координат в процессе его движения должны быть постоянными (параметры  $k_4, k_5, k_6$  рассчитываются автоматически при решении ОЗК). Значения элементов этого вектора желательно выбирать такими, чтобы исходная конфигурация ММ в начале траектории его движения была наиболее удалена от всех его особых положений. Для этого с учетом известных значений элементов векторов  $\mathbf{r}$  ( $r_x = r'_x + q_7, r_y = r'_y, r_z = r'_z$ ),  $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ ,  $\mathbf{b} = \mathbf{b}'$ , соответственно определяющих требуемые положение РТИ и пространственную ориентацию РИ в абсолютной системе координат (СК)  $Oxyz$ , и  $q_7$  в начале соответствующей траектории движения РИ перед началом перемещения ММ согласно выражениям (2)–(9) и (13)–(15) [2] выполняются решения ОЗК для всех возможных конфигураций ММ, определяемых различными значениями элементов вектора  $\mathbf{K}$ . Так как каждый из элементов  $k_1, k_2, k_3$  может принимать всего два возможных значения (см. пояснения к формулам (2), (5) и (13) [2]) при заданных  $\mathbf{r}, \mathbf{a}, \mathbf{b}$  и  $q_7$ , то существует всего восемь различных вариантов вектора  $\mathbf{K}$ . Затем для этих восьми векторов

**К** определяется восемь соответствующих им векторов  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \dots q_6]^T$ , для которых затем рассчитываются соответствующие значения индикаторов  $J_i$  ( $i = 1, 4$ ). В итоге исходная конфигурация ММ выбирается такой, при которой для конкретного вектора **K** значение наибольшего из четырех введенных индикаторов оказывается минимальным. Это может быть выполнено, например, с помощью метода, описанного в работе [5]. В дальнейшем значение элементов этого вектора **K** при отработке ММ текущей траектории не меняется.

Работа системы по аналогии с алгоритмом, изложенным в работе [6], начинается с перемещения РТИ ММ в начало программной траектории с ориентацией его РИ, задаваемой векторами **a**, **b**, которые формируются программным устройством (ПУ) в абсолютной СК *Oxyz*. При этом начальное положение основания ММ на оси *Ox* (см.  $q_7$  на рис. 1 [2]) выбирается таким, чтобы исходная точка траектории движения РИ ММ находилась в его рабочей области. Для этого значения  $q_7$  проводится расчет координат РТИ (вектор **r**) в связанной с основанием ММ СК *O'x'y'z'*, для которых согласно описанному выше алгоритму формируется исходная конфигурация ММ, определяемая выбранным вектором **K**. Затем с использованием выражений (2)–(9) и (13)–(15) [2] выполняется решение ОЗК и вычисляются начальные значения элементов вектора  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \dots q_6]^T$ , которые поступают на входы соответствующих следящих электроприводов ММ.

После перемещения РИ в начало траектории программные сигналы на выходе ПУ, определяющие векторы **r**, **a**, **b** и, следовательно, вектор **q**, начинают дискретно изменяться. В результате обеспечиваются требуемые перемещения этого РИ во времени по задаваемым траекториям из их исходных точек с одновременным расчетом значений всех индикаторов  $J_i$  ( $i = 1, 4$ ).

Если при очередном дискретном изменении параметров траектории движения РИ значение  $J$  остается меньше или равно заранее заданному значению  $J_{th}$ , то основание ММ остается неподвижно ( $q_7 = \text{const}$ ), иначе оно смещается по оси *Ox* в сторону уменьшения  $J$ . Для определения направления смещения этого основания одновременно дополнительно рассчитывается значение наибольшего из индикаторов  $J_+$  для ММ, основание которого сдвинуто по оси *Ox* на расстояние  $q_7 + \Delta q_7$ , где  $\Delta q_7$  — малая положительная величина. Если начинает выполняться не-

равенство  $J < J_+$ , то на текущем шаге формирования траектории основание ММ начинает дополнительно смещаться со скоростью  $\dot{q}_7 < 0$ , иначе  $\dot{q}_7 > 0$ . Эта скорость может настраиваться в процессе выполнения технологической операции по методу, описанному в работах [7, 8], или просто быть постоянной (эмпирически подобранный), как указано ниже.

Если несмотря на любое смещение основания ММ по оси *Ox* величина  $J$  продолжает увеличиваться, то это сигнализирует о неминимуме приближении ММ к его особым положениям. Это возможно при недостаточном значении  $\dot{q}_7$  или при одновременном возрастании различных индикаторов, значения которых начинают превышать пороговое значение  $J_{th}$  при движении основания ММ в различные стороны. Для исключения этих случаев требуется, соответственно, или увеличивать скорость  $\dot{q}_7$ , или добавлять вторую избыточную степень подвижности ММ, или обеспечивать его остановку для исключения опасных (аварийных) ситуаций. Эта остановка должна проводиться при выполнении условия  $J > J_{cr}$ , где  $J_{cr} \in [J_{th}, 1]$  — критическое пороговое значение наибольшего из индикаторов.

На рис. 5 представлена обобщенная схема устройства, обеспечивающего формирование всех основных программных сигналов  $q_i$  ( $i = 1, 6$ ) и дополнительное смещение основания ММ по его избыточной степени подвижности. На этом рисунке введены следующие обозначения: ПУ — программное устройство, задающее текущие программные значения координат РТИ (элементы вектора  $\mathbf{r} = [r_x \ r_y \ r_z]^T$ ) в СК *Oxyz*, а также значения элементов векторов **a**, **b** и **K**; Д — датчик положения, измеряющий текущее значение  $q_7$ ; И — источник постоянного сигнала  $\Delta q_7 > 0$ ;  $r'_{x+} = r_x - (q_7 + \Delta q_7)$ ; ОЗК — блоки решения ОЗК ММ, которые с учетом выражений (2)–(9) и (13)–(15) [2] формируют векторы обобщенных координат **q** и **q<sub>+</sub>**, соответственно, для двух различных положений основания ММ —  $q_7$  и  $q_7 + \Delta q_7$ ; С — контроллеры, рассчитывающие текущие значения всех четырех индикаторов и выбирающие из них наибольшие  $J$  и  $J_+$ , соответственно, для двух различных положений основания ММ —  $q_7$  и  $q_7 + \Delta q_7$ ; 1 — релейный элемент, определяющий значение и знак постоянной скорости  $\dot{q}_7$ ; 2 — ключ, обеспечивающий подключение выхода релейного элемента 1 ко входу электропривода, управляющего координа-

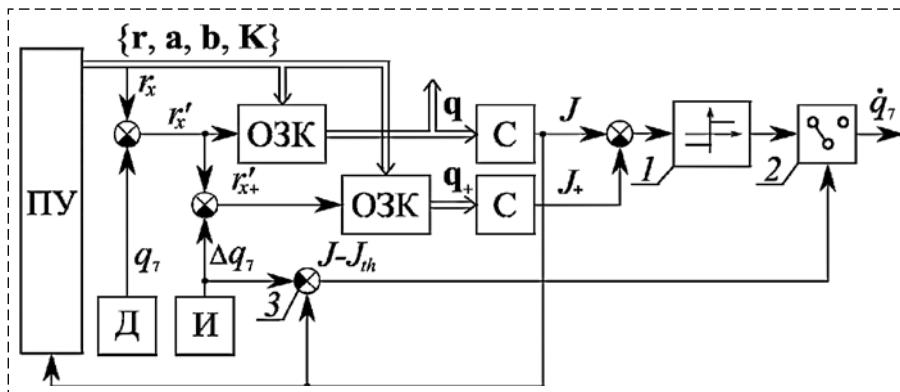


Рис. 5. Обобщенная схема устройства формирования программных сигналов для всех степеней подвижности ММ

**Fig. 5. Generalized scheme of the device for generating reference signals for all degrees of freedom of the MM**

той  $q_7$ ; 3 — сумматор, формирующий сигнал  $J - J_{th}$  (его вход со стороны блока И имеет коэффициент усиления  $J_{th}/\Delta q_7$ ).

Перед началом движения ММ на выходе ПУ (рис. 5) формируются программные значения элементов векторов  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$ , определяющие исходное положение и ориентацию РИ в СК  $Oxyz$ , а также значения элементов вектора  $\mathbf{K}$ , задающего одну из восьми возможных конфигураций ММ. С учетом выражений (2)–(9) и (13)–(15) [2] на выходе ОЗК формируется вектор  $\mathbf{q}$ , а на выходе С — соответствующий ему сигнал  $J$ , поступающий на вход ПУ и сохраняемый в его памяти. Затем через равные фиксированные интервалы времени, необходимые для выполнения всех расчетов в блоках ОЗК и С, на выходе ПУ формируются новые векторы  $\mathbf{K}$ , соответствующие всем другим возможным конфигурациям ММ, для которых также сохраняются значения  $J$ . После сохранения последнего восьмого значения  $J$  в ПУ определяется та исходная конфигурация ММ, для которой значение  $J$  будет наименьшим. Вектор  $\mathbf{K}$ , соответствующий этой конфигурации, сохраняется на выходе ПУ. При выбранном значении  $\mathbf{K}$  запускается работа ММ, и он принимает благоприятную для него возможную исходную конфигурацию после поступления на все входы соответствующих следящих электроприводов многозвенника рассчитанных (для текущих значений векторов  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{K}$  и с учетом значения выходного сигнала датчика  $\Delta = q_7$ ) исходных значений элементов вектора  $\mathbf{q}$ , перемещая РИ в начало его программной траектории.

После завершения переходных процессов во всех электроприводах начинается движение РИ ММ по траектории. Для этого на выходе ПУ по

программе в реальном масштабе времени изменяются значения векторов  $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  (непрерывно или через дискретные промежутки времени в зависимости от способа реализации этой системы). Это приводит к изменению сигналов  $\mathbf{q}$  и  $J$  на выходах блоков ОЗК и С, соответственно. Если выполняется условие  $J \leq J_{th}$ , то основание ММ остается неподвижным и значение  $q_7$  не изменяется. Если это неравенство справедливо, то сигнал  $J - J_{th} \leq 0$  на выходе сумматора 3 размыкает

ключ 2, и сигнал  $\dot{q}_7$  остается нулевым. Если же начинает выполняться неравенство  $J - J_{th} > 0$ , то начинается перемещение основания ММ по координате  $q_7$ . Для определения направления указанного перемещения на выходах вторых блоков ОЗК и С формируются сигналы  $q_+$  и  $J_+$  (рис. 5), соответствующие величине  $r'_{x+}$ , равной значению проекции РТИ  $r'$  на ось  $O'x'$  для ММ, основание которого сдвинуто по оси  $Ox$  на расстояние  $q_7 + \Delta q_7$ . С учетом указанных значений  $J$  и  $J_+$  на выходе релейного элемента 1 формируется сигнал постоянной скорости  $\dot{q}_7$ , знак которого совпадает со знаком разности  $J - J_+$  (или равен 0, если  $J = J_+$ ), а ключ 2 замыкается, подключая выход релейного элемента 1 к выходу системы. Сигналы  $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \dots \ q_6]^T$  и  $\dot{q}_7$  отрабатываются соответствующими следящими электроприводами, перемещая РИ по траектории. При этом система управления степенью подвижности  $q_7$  не обязательно должна обеспечивать высокую точность движений, так как при пересчете координат РТИ из СК  $Oxyz$  в СК  $O'x'y'z'$  используется не программное, а непрерывно измеряемое датчиком  $\Delta$  значение  $q_7$ .

Если же в процессе работы системы начинает выполняться условие  $J > J_{cr}$ , проверяемое в ПУ, то РИ останавливается, и работа ММ прекращается. При этом сигналы **г**, **а** и **б** на выходе ПУ фиксируются во избежание аварийных ситуаций.

Из описания работы системы (рис. 5) следует, что сигнал  $J_+$  необходим только для определения знака скорости  $\dot{q}_7$  (направление движения ММ по координате  $q_7$ ), когда  $J > J_{th}$ . При выполнении условия  $J \leq J_{th}$  (при покоящемся основании ММ) вычисление сигнала  $J_+$

можно не проводить, экономя вычислительный ресурс системы.

За счет избыточного перемещения основания ММ по координате  $q_7$  вблизи объекта работ предложенная система обеспечивает исключение всех описанных выше нежелательных положений ММ.

#### 4. Результаты численного моделирования

Исследование разработанной системы формирования программных сигналов было проведено для ММ (см. рис. 1 [2]), обобщенные координаты которого изменялись в диапазонах  $[-\pi; \pi]$  [2]. Длины звеньев этого ММ  $L_1 = L_2 = L_3 = 0,5$  м,  $L_4 = 0,15$  м, их массы:  $m_1 = 25$  кг,  $m_2 = m_3 = 15$  кг, масса груза  $m_g = 5$  кг. Моменты инерции  $J_{si}$  и  $J_{ni}$   $i$ -х звеньев ММ относительно их продольных осей и осей, проходящих через центры масс и перпендикулярных их продольным осям:  $J_{s1} = 0,1$  кг·м $^2$ ,  $J_{s2} = 0,007$  кг·м $^2$ ,  $J_{s3} = 0,005$  кг·м $^2$ ,  $J_{n2} = 0,55$  кг·м $^2$ ,  $J_{n3} = 0,31$  кг·м $^2$ . Электроприводы ММ имеют параметры:  $K_{yi} = 1$ ,  $i_{pi} = 100$  ( $i = 1,7$ );  $R_i = 0,5$  Ом,  $L_i = 0,01$  Гн,  $K_{Mi} = 0,04$  Н·м/А,  $K_{oi} = 0,04$  В·с/рад,  $J_{Ei} = 10^{-3}$  кг·м $^2$  ( $i = 1,3$  и 7);  $R_i = 1,4$  Ом,  $L_i = 0,02$  Гн,  $K_{Mi} = 0,06$  Н·м/А,  $K_{oi} = 0,06$  В·с/рад,  $J_{Ei} = 0,3 \cdot 10^{-3}$  кг·м $^2$  ( $i = 4,6$ ). Номинальный момент инерции вала  $i$ -го электродвигателя и вращающихся частей редуктора, используемый в законе самонастройки [7, 9–12] для компенсации взаимовлияний между степенями подвижности ММ, равен  $J_{nom\ i} = 10^{-4}$  кг·м $^2$  ( $i = 1,3$  и 7). В электроприводах использованы типовые ПИД регуляторы, описываемые уравнениями

$$U_i = k_{pi}\varepsilon_i + k_{Ii}\int \varepsilon_i dt + k_{di}\dot{\varepsilon}_i,$$

где  $\varepsilon_i$  — ошибка управления соответствующего электропривода ( $i = 1,7$ );  $k_{pi} = 1883$ ,  $k_{fi} = 130$ ,  $k_{di} = 140$  ( $i = 1,3$  и 7);  $k_{pi} = 2800$ ,  $k_{Ii} = 100$ ,  $k_{di} = 100$  ( $i = 4,6$ ). Ограничения линейных зон сигналов управления всех электроприводов  $U_i = \pm 22,5$  В. Скорость движения РТИ по задаваемой траектории задается равной 0,5 м/с.

На рис. 6–10 представлены результаты моделирования ра-

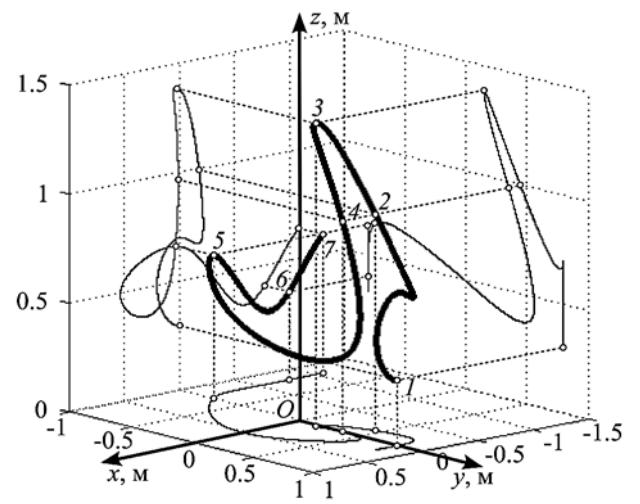


Рис. 6. Программная траектория движения РТИ  
Fig. 6. Reference movement trajectory of the tool-center-point

боты шестистепенного ММ, установленного на подвижном основании (см. рис. 1 [2]), в среде MATLAB. РТИ ММ перемещалась по сложной пространственной траектории (рис. 6), сформированной с помощью параметрических сплайнов третьего порядка [13]. Эта траектория начиналась в исходной точке 1, для которой с использованием системы, изображенной на рис. 5, и описанного в разделе 4 алгоритма элементы матрицы  $\mathbf{K}$  автоматически принимали значения  $\mathbf{K} = [0 \ -1 \ 1]^\top$ , и затем последовательно проходила точки 2–7. Ее вид и ориентация РИ выбирались такими, чтобы при  $q_7 = 0$ , когда СК  $Oxuz$  и  $O'x'y'z'$  совпадают, ММ (см. рис. 1 [2]) последовательно входил в описанные выше нежелательные положения.

Законы изменения программных значений обобщенных координат  $q_i$  ( $i = 1,6$ ) при движении РИ по указанной траектории показаны на

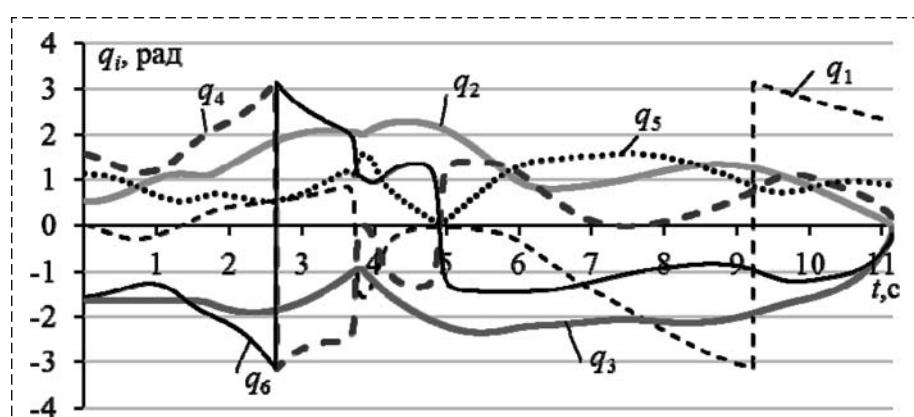


Рис. 7. Законы изменения программных значений  $q_i$  ( $i = 1,6$ ) при  $q_7 = 0$   
Fig. 7. Behavior of reference values  $q_i$  ( $i = 1,6$ ) at  $q_7 = 0$

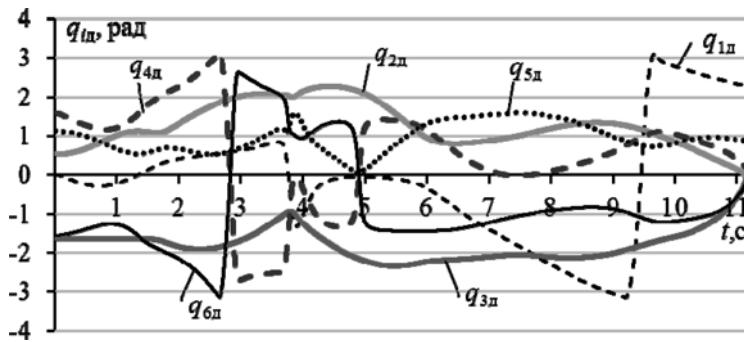


Рис. 8. Законы изменения реальных значений  $q_{i_d}$  ( $i = \overline{1,6}$ ) при неподвижном основании ММ с учетом динамических свойств используемых электроприводов

Fig. 8. Behavior of real values  $q_{i_d}$  ( $i = \overline{1,6}$ ) at the fixed base of the MM with taking into account the dynamic properties of the used electric drives

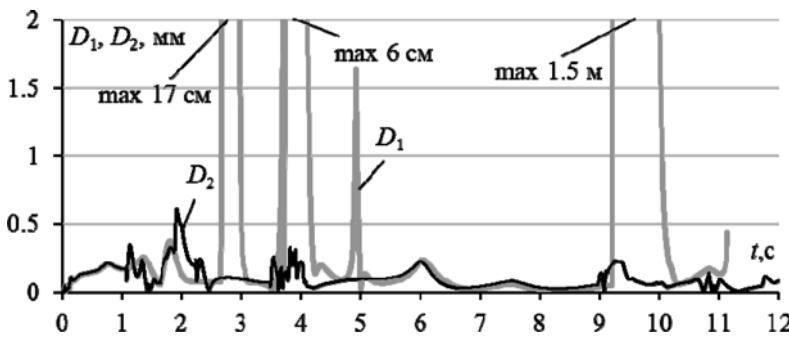


Рис. 9. Законы изменения отклонений РТИ от программной траектории  $D_1$  (при  $q_7 = 0$ ) и  $D_2$  (при  $q_7 = \text{var}$ )

Fig. 9. Behavior of deviations of tool-center-point from reference trajectory  $D_1$  ( $q_7 = 0$ ) and  $D_2$  ( $q_7 = \text{var}$ )

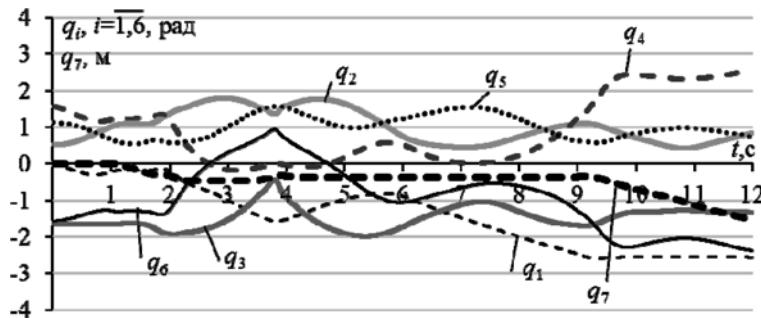


Рис. 10. Законы изменения программных значений  $q_i$  ( $i = \overline{1,6}$ ) и реального значения  $q_7$  при подвижном основании ММ

Рис. 10. Behavior of reference values  $q_i$  ( $i = \overline{1,6}$ ) and real value  $q_7$  at movable base of the MM

рис. 7. Во время этого движения, как будет показано ниже, выполнялся вход ММ в два различных особых положения, трижды — выход трех его степеней подвижности на ограничения и один раз в конце движения — выход РИ на границу рабочей области ММ. Такой выбор траектории позволяет проверить и учесть работу всех описанных выше индикаторов.

Когда РТИ проходила точку 2, знак параметра  $k_4$  в выражении (14) [2] менялся на против-

воположный. Это приводило к тому, что программные значения обобщенных координат  $q_4$  и  $q_6$ , вошедших в ограничения (см. момент времени 2,6 с на рис. 7), скачком меняли свои значения. При прохождении точки 3 ММ подходил к первому особому положению (см. рис. 4, a [2]), в котором точка  $R'$  располагалась строго вертикально над точкой  $O'$ , и значения  $q_1$ ,  $q_4$ ,  $q_6$  резко изменялись (см. 3,7 с на рис. 7). При проходе точки 4 ММ входил в четвертое особое положение (см. рис. 4, e [2]), в котором  $q_5 = 0$  (см. 4,9 с на рис. 7), и происходили реверсы в его четвертой и шестой степенях подвижности. При проходе точки 5 в ограничение входила первая степень подвижности (см. 9,2 с на рис. 7), и затем скачком меняла свое значение с  $-\pi$  на  $\pi$ ; а в точке 6 РИ выходил на границу рабочей области, когда  $q_3 = 0$  (см. 11,2 с на рис. 7), и ММ экстренно останавливался, не выйдя к требуемой точке 7.

Очевидно, что появляющиеся скачки программных значений  $q_i$  ( $i = \overline{1,6}$ ) (рис. 7) не могут отрабатываться мгновенно следящими электроприводами ММ. Поэтому, как только ММ входил в одно из указанных положений, реальные изменения обобщенных координат  $q_{i_d}$  ( $i = \overline{1,6}$ ) (рис. 8) начинали отставать и

отличаться от своих программных значений  $q_i$  ( $i = \overline{1,6}$ ) (см. рис. 7). Это отставание происходило до завершения всех переходных процессов в электроприводах и занимало 0,3...1 с. При этом отклонение  $D_1$  РТИ от программной траектории вблизи особых участков траекторий возрастало до  $\min 1,7$  мм до  $\max 1,5$  м (рис. 9).

Для устранения указанных негативных явлений использована разработанная система

(см. рис. 5), обеспечивающая перемещение основания выбранного ММ по координате  $q_7$  во время приближения его конфигурации к проблемным зонам. При этом удалось автоматически сформировать новый закон коррекции программных значений управления ММ, который обеспечивает точное перемещение РИ по заданным траекториям без появления указанных выше негативных ситуаций, приводящих к опасным перебросам в некоторых степенях подвижности ММ и неожиданным остановкам его работы при входе некоторых степеней подвижности в ограничения.

Результаты исследований показали, что для качественной и корректной работы системы (см. рис. 5) можно принять  $\dot{q}_7 = 0,5 \text{ м/с} = \text{const}$  и  $J_{ith} = J_{ith} = 0,8$ , т. е. все четыре значения  $J_{ith}$  вполне можно выбирать одинаковыми. В этом случае координата  $q_7$  при уже заданной скорости движения РИ в пространстве успевает исключить все нежелательные особенности сочетаний значений всех обобщенных координат ММ, приводящих к появлению четырех указанных выше негативных особых положений многозвенника (см. рис. 4 [2]) и к выходу некоторых его степеней подвижности на ограничения или всего ММ на границы рабочей зоны.

Законы формирования системой (см. рис. 5) программных значений  $q_i$  ( $i = \overline{1,6}$ ) ММ с учетом реального значения  $q_7$ , также изменяющегося во времени в процессе отработки заданной траектории (см. рис. 6), показаны на рис. 10. Из этого рисунка видно, что резкие изменения программных значений во всех обобщенных координатах ММ полностью исключаются. При этом первое смещение основания ММ по координате  $q_7$  происходит в интервале времени 1,2...2,2 с, когда начинает выполняться неравенство  $|q_5| < (1 - J_{th})\pi$ , полученное из равенства (18). Из рис. 10 видно, что за счет изменения  $q_7$  к моменту времени 2,6 с выход координат  $q_4$  и  $q_6$  на ограничения (как это имело место (см. рис. 7) при  $q_7 = 0 = \text{const}$ ) был автоматически исключен. По этой же причине в момент времени 3,7 с ММ не вошел в первое особое положение (см. рис. 4, a [2]), а его основание также немного сместилось (рис. 10) по координате  $q_7$ , поскольку начало выполняться неравенство  $|q_3| < (1 - J_{th})\pi$ , полученное из равенства (19). Уже произошедшее к моменту времени 4,9 с смещение ММ по координате  $q_7$  исключило и четвертое особое положение ММ

(см. рис. 4, a [2]), как это происходило ранее при  $q_7 = 0$  (см. рис. 7).

Последнее смещение основания ММ по координате  $q_7$  произошло после 9 с (рис. 10), когда сначала кратковременно вновь выполнялось неравенство  $|q_5| < (1 - J_{th})\pi$ , а затем начало удовлетворяться неравенство  $|q_1| > J_{th}\pi$ , полученное из равенства (16), поскольку к своему ограничению начала приближаться первая степень подвижности ММ, которая в итоге к этому ограничению так и не подошла за счет выполненного дополнительного смещения ММ по координате  $q_7$ . Таким образом, в результате работы синтезированной системы (см. рис. 5) отклонение  $D_2$  РТИ ММ от предписанной траектории не превысило 0,65 мм (см. рис. 9) на всех ее участках, и движение РТИ было завершено полностью (строго в конце заданной траектории) — в точке 7 (см. рис. 6).

Аналогичный результат с отсутствием неожиданных перебросов во всех степенях подвижности ММ и без выходов этих степеней на ограничения был получен и при исследовании работы ММ с синтезированной системой его управления (см. рис. 5) при отработке многих различных сложных пространственных траекторий.

Таким образом, использование предложенного метода и реализующей его системы позволило расширять рабочую область ММ и автоматически полностью исключать возникновения нештатных ситуаций при приближении очередной конфигурации этого ММ к его указанным выше нежелательным положениям при отработке любых задаваемых пространственных траекторий, сохраняя тем самым неизменно высокую точность перемещения РТИ по этим траекториям и полностью исключая возникновение аварийных ситуаций или поломку оборудования.

## Заключение

В работе представлен метод автоматического формирования программных сигналов для всех электроприводов типового шестистепенного манипулятора типа PUMA, имеющего дополнительную избыточную степень подвижности для линейного смещения его основания в горизонтальной плоскости. Этот метод за счет перемещения основания ММ по горизонтали вблизи объекта работ позволяет исключить вход ММ в особые положения его кинемати-

ческой схемы, характеризуемые неоднозначностью решения ОЗК, выход РИ на границы его рабочей области, а также некоторых его степеней подвижности — на ограничения. Это особенно важно, когда в результате устраняется резкое снижение динамической точности контурного управления РИ на отдельных участках рабочих траекторий, полностью исключается возникновение аварийных ситуаций, поломка РИ и оборудования, а также расширяется рабочая область ММ. Кроме того, предложенный метод управления позволяет правильно выбрать одну (из многих возможных) наиболее приемлемую исходную конфигурацию ММ с учетом его кинематической схемы, параметров звеньев и требуемого начального положения РИ. Этот выбор позволяет обеспечить РИ точную отработку траекторий без возможных дополнительных движений основания ММ по координате  $q_7$ , по крайней мере, на начальных участках указанных траекторий. Предложенный метод особо эффективен в случаях, когда планирование траекторий движений РИ ММ осуществляется и продолжается автоматически после их начала с использованием систем технического зрения, т. е. когда эти траектории заранее не известны (при работе ММ в условиях неопределенности окружающей среды) и формируются с учетом непрерывно изменяющейся рабочей обстановки.

Результаты выполненного математического моделирования подтвердили работоспособность и высокую эффективность представленного метода.

## Список литературы

- Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 400 с.
- Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В. Разработка метода формирования программных сигналов для исполнительных электроприводов манипуляторов с избыточными степенями подвижности. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 1. С. 23–30.
- Фу. К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
- Крейг Д. Дж. Введение в робототехнику: механика и управление. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 564 с.
- Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений. М.: Мир, 1973. С. 132–134.
- Filaretov V., Gubankov A., Gornostaeve I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of the Int. Russian Automation Conf. Sochi, Russia, 2019. P. 1–6.
- Филаретов В. Ф., Зуев А. В., Губанков А. С. Управление манипуляторами при выполнении различных технологических операций. М.: Наука, 2018. 232 с.
- Филаретов В. Ф., Губанков А. С., Горностаев И. В. Метод формирования программной скорости движения рабочего инструмента многостепенного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 12. С. 696–705.
- Патент РФ № 2348509. Электропривод робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 7, 2009.
- Патент РФ № 2372185. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.
- Патент РФ № 2372186. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.
- Патент РФ № 2372638. Самонастраивающийся электропривод манипуляционного робота / Филаретов В. Ф., Бюл. № 31, 2009.
- Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaeve I. V. The Formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed // Proceedings of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications. Jakarta, Indonesia, 2016. P. 93–96.

## Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Freedom. Part II

V. F. Filaretov<sup>1</sup>, filaretov@inbox.ru, A. S. Gubankov<sup>1, 2</sup>, gubankov@iacp.dvo.ru,  
I. V. Gornostaeve<sup>1, 2</sup>, gornostaeve\_iv@mail.ru,

<sup>1</sup>Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation,

<sup>2</sup>Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, 690091, Russian Federation

Corresponding author: Gornostaeve I. V., Junior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: gornostaeve\_iv@mail.ru

Accepted on August 17, 2021

### Abstract

The solution of task of maintaining the dynamic accuracy of control of working tools of multilink manipulators (MM) when they move along arbitrary spatial trajectories is presented in this paper. In this case, constructive restrictions in all degrees of freedom (DoF) of manipulators and special cases of location of their links are taken into account. In the first part of the paper the features of the new solution to the inverse kinematics problem are considered and special (singular) positions for 6-DoF

manipulators with PUMA kinematic schemes are described. These singular positions are characterized by ambiguity in solving inverse kinematics problem of these MM. The presented solution of the inverse kinematics problem takes into account various combinations of generalized coordinates of the MM, which ensure the movement of their working tools to the specified positions with the required spatial orientation. In the second part of the paper a method is considered, which, due to use of an additional (redundant) DoF of the MM, which ensures its movement near work objects, does not allow the manipulator to enter unpredictable in advance singular positions, excludes approaching of working tools to the boundaries of MM working area, as well as some of its DoFs — to restrictions leading to a sharp decrease in the accuracy of the manipulator in the process of performing any technological operations with previously unknown trajectories of movement. Based on this method, a system has been synthesized that makes it possible to automatically generate reference signals for all DoFs of MM, taking into account the current reference positions and orientations of the working tools specified in the absolute coordinate system. As a result, emergency situations are not created and the high quality of the prescribed operations and work is maintained. The results of the performed mathematical simulation confirmed the high efficiency of using the proposed approach to the contour control of the MM.

**Keywords:** multilink manipulator, redundant degree of freedom, restrictions, singular positions, inverse kinematics

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (№ 19-08-00347 and 20-08-00701).

Part I was published in the journal "Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie", 2022, vol. 23, no. 1.

For citation:

**Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V.** Development of the Method of Formation the Reference Signals for Electric Actuators of Manipulators with Redundant Degrees of Feedom. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 88—96.

DOI: 10.17587/mau.23.88-96

#### References

1. Popov E. P., Vereshchagin A. F., Zenkevich S. L. Manipulation robots: dynamics and algorithms, Moscow, Nauka, 1978, 400 p. (in Russian).
2. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. Development of the method of formation the reference signals for electric actuators of manipulators with redundant degrees of freedom. Part I, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 3, no. 1, pp. 23—30 (in Russian).
3. Fu K., Gonzalez R., Lee K. Robotics: control, sensing, vision, and intelligence, Moscow, Mir, 1989, 624 p. (in Russian).
4. Craig J. J. Introduction to robotics: mechanics and control, Pearson Education International, 2005, 400 p.
5. Nilsson N. Problem-solving methods in artificial intelligence, Moscow, Mir, 1973, pp. 132—134 (in Russian).
6. Filaretov V., Gubankov A., Gornostaev I., Konoplin A. Synthesis Method of Reference Control Signals for Manipulators Installed on Autonomous Underwater Vehicles, *Proceedings of the Int. Russian Automation Conf.*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1—6 (in Russian).

7. Filaretov V. F., Zuev A. V., Gubankov A. S. Manipulator control during various technological operations, Moscow, Nauka, 2018, 232 p. (in Russian).

8. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The method of formation the reference speed of movement of the working tool of multilink manipulator, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 12, pp. 696—705 (in Russian).

9. Patent RU № 2348509. Robot electrical drive, Filaretov V. F., Bull. № 7, 2009 (in Russian).

10. Patent RU № 2372185. Self-tuning electric drive of manipulation robot, Filaretov V. F., Bull. № 31, 2009 (in Russian).

11. Patent RU № 2372186. Self-tuning electric drive of manipulation robot, Filaretov V. F., Bull. № 31, 2009 (in Russian).

12. Patent RU № 2372638. Self-tuning electric drive for manipulation robot, Filaretov V. F., Bull. № 31, 2009 (in Russian).

13. Filaretov V. F., Gubankov A. S., Gornostaev I. V. The Formation of motion laws for mechatronics objects along the paths with the desired speed, *Proceedings of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications*, Jakarta, Indonesia, 2016, pp. 93—96.



31 мая – 21 июня 2022 г. в Санкт-Петербурге  
на базе ОАО "Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»



## XXVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам

### Тематика конференции

- Инерциальные датчики, системы навигации и ориентации
- Интегрированные системы навигации и управления движением
- Глобальные навигационные спутниковые системы
- Средства гравиметрической поддержки навигации

### В рамках каждого направления рассматриваются:

- схемы построения и конструктивные особенности;
- методы и алгоритмы;
- особенности разработки и применения для различных подвижных объектов и условий движения (аэрокосмические, морские, наземные, подземные);
- испытания и метрология.

### Контактная информация:

Тел.: +7 (812) 499 82 10 +7 (812) 499 81 57  
Факс: +7 (812) 232 33 76 E-mail: icins@eprib.ru