

УДК 626.022

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

**В.Ф. Филаретов<sup>1,2</sup>, А.С. Губанков<sup>1,2</sup>,  
И.В. Горностаев<sup>2,3</sup>, А.Ю. Коноплин<sup>2,3</sup>**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН<sup>1</sup>  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup>  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>3</sup>

Рассмотрены особенности решения обратной задачи кинематики для подводных манипуляторов с кинематической схемой типа PUMA, имеющих конструктивные ограничения перемещений в соответствующих степенях подвижности, обусловленные установкой этих манипуляторов на подводные аппараты. Предложен метод, который за счет придания манипулятору дополнительной (избыточной) степени подвижности посредством перемещений подводного аппарата вблизи объекта работ не допускает заранее непредсказуемого выхода любой степени подвижности этого манипулятора на ограничения, а также выхода его рабочего инструмента за границы рабочей зоны. При этом траектории движения манипулятора могут быть заранее определены или формироваться непосредственно в процессе выполнения задаваемых манипуляционных операций. Разработанный метод позволяет автоматически сохранять плавные движения рабочих инструментов путем исключения нежелательных (неожиданных) реверсов исполнительных приводов манипуляторов, не создавая аварийных ситуаций и не снижая качества выполняемых работ.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время появляется возможность автоматического выполнения многих подводных технологических и исследовательских операций [1, 2 и др.] с помощью многозвенных манипуляторов (ММ), устанавливаемых на подводные аппараты (ПА). Наблюдается постоянное расширение областей использования ПА, оснащаемых ММ, за счет выполнения операций по селективному взятию образцов геологических пород и животных, определению состава и плотности грунта с помощью специальных щупов и буров, монтажу гидросооружений, откручиванию вентиляей, очистке конструкций от обрастаний и др.

Но управление этими ММ осложняется наличием кинематических ограничений в их степенях

подвижности, особыми (вырожденными) положениями, характеризующимися неоднозначностью решения обратных задач кинематики (ОЗК), а также ограниченностью рабочих зон, в которых их рабочие инструменты (РИ) могут подойти к объектам работ с заданными углами сервиса. В зависимости от вида выполняемых технологических операций эти рабочие зоны для одних и тех же манипуляторов могут быть различными. Кроме того, часто даже внутри рабочей зоны возникают ситуации, при которых в процессе движения некоторые степени подвижности ММ выходят на ограничения или в указанные особые положения, и для продолжения движения РИ по заданным пространственным траекториям требуется использовать часто непредсказуемые реверсы в соответствующих степенях подвижности многозвенника.

При появлении в некоторых степенях подвижности ММ режимов непредсказуемого реверса во время выполнения технологических операций, требующих затрат времени на их завершение, остальные степени продолжают отрабатывать программные сигналы без задержек. В результате происходит сход РИ с задаваемых траекторий, приводящий к браку или даже аварийным ситуациям, для исключения которых требуется или полностью останавливать выполнение работ на указанных участках, или дополнительно менять закон формиро-

<sup>1</sup> 690041, Владивосток, ул. Радио, 5. Тел.: 8 (423) 2310439. E-mail: filaretov@inbox.ru, gubankov@iacp.dvo.ru

<sup>2</sup> 690000, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: 8 (423) 2433472. E-mail: gornostaev\_iv@students.dvfu.ru

<sup>3</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8 (423) 2226416. E-mail: konoplin@marine.febras.ru

вания программных значений всех обобщенных координат, проводя предварительные трудоемкие исследования работы ММ в процессе выполнения конкретных операций. Кроме того, при решении подводных манипуляционных задач часто невозможно заранее точно определить форму объекта работ, а также взаиморасположение ПА и этого объекта. В таких случаях не удается заранее задать конкретные траектории движения РИ и проверить их отработку, а приходится формировать эти траектории непосредственно в процессе выполнения манипуляционных операций, минуя этап контрольного тестирования.

Одним из возможных и наиболее простых способов устранения указанного недостатка в работе ММ является дополнительное линейное перемещение его основания, жестко закрепленного на ПА. Это перемещение позволит полностью исключить в процессе работы неожиданные реверсы в степенях подвижности ММ. Для этого необходимо просто линейно перемещать ПА относительно объекта работ, используя высокоточные системы навигации [3–5]. Очевидно, что указанное перемещение ПА приведет к созданию избыточной степени подвижности ММ, а следовательно, и к необходимости нового решения ОЗК для конкретных кинематических схем многосвязных звеньев.

В настоящее время известно несколько методов решения ОЗК для различных ММ с избыточными степенями подвижности [6–10]. При численном решении ОЗК наиболее широкое распространение получило использование псевдообратных матриц Якоби [7, 8]. При этом в работе [7] учитываются ограничения по положению всех степеней подвижности ММ, а в работе [8] рассмотрен метод управления манипуляторами типа «хобот» с большим числом степеней подвижности,

который при решении ОЗК позволяет избежать столкновений с препятствиями. К недостаткам указанных и многих других численных методов решения ОЗК следует отнести большое количество необходимых вычислительных операций, не позволяющее выполнять расчеты непосредственно при выполнении манипуляций.

К другому способу решения ОЗК относятся методы, основанные на использовании нечеткой логики [9]. Эти методы не требуют больших вычислительных затрат и позволяют учитывать ограничения, накладываемые на обобщенные координаты ММ. Но, как и численные методы, они не учитывают возможности входа ММ в особые положения.

Известны также методы, использующие для решения указанной задачи нейронные сети [10]. Они позволяют однозначно решать ОЗК с заданной точностью и с учетом ограничений на обобщенные координаты ММ, имеющих избыточные степени подвижности. Но они тоже не гарантируют, что на каком-либо участке траектории не возникнет режим нежелательного реверса ни в одной из степеней подвижности.

Выполненный анализ показал, что задача автоматического управления подводными ММ, имеющими механические ограничения на степени подвижности, в настоящее время еще далека от своего эффективного решения, которое по-прежнему остается актуальным.

В результате целью данной работы является сохранение требуемой точности контурного управления ММ путем исключения нежелательных реверсов их исполнительных приводов за счет введения избыточной степени подвижности и формирования специальных программных сигналов, исключающих выход ММ в зоны неоднозначного решения ОЗК

или на механические ограничения их степеней подвижности. Эта задача решается для ММ с наиболее распространенной принципиальной кинематической схемой типа PUMA, состоящей из трех переносных и трех ориентирующих степеней подвижности и предполагающей массогабаритные характеристики этого ММ, соизмеримые с массогабаритными характеристиками ПА. Кроме того, общность решения указанной задачи сохраняется и для манипуляторов с другими кинематическими схемами.

### 1. Особенности решения обратной задачи кинематики для ММ типа PUMA

Шестистепенной манипулятор с кинематической схемой типа PUMA, установленный на ПА, схематично представлен на рис. 1. На этом рисунке введены следующие обозначения:  $Oxyz$  – неподвижная (абсолютная) прямоугольная система координат (СК);  $O'x'y'z'$  – подвижная прямоугольная СК, жестко связанная с основанием ММ, закрепленным в точке  $O'$  на корпусе ПА;  $q_i$  – обобщенная координата  $i$ -й степени подвижности ММ ( $i = \overline{1,6}$ );  $L_j$  – длины соответствующих звеньев манипулятора ( $j = \overline{1,3}$ );  $L_4$  – расстояние между точкой  $W$  ММ и рабочей точкой инструмента (РТИ);  $a = [a_x \ a_y \ a_z]^T$  и  $b = [b_x \ b_y \ b_z]^T$  – единичные векторы, расположенные в плоскости схвата и определяющие его ориентацию в СК  $O'x'y'z'$ ;  $e_i$  – единичные векторы, совпадающие с осями шарниров  $i$ -х степеней подвижности ММ ( $i = \overline{1,6}$ );  $p$  – продольная ось ПА, параллельная оси  $Ox$  абсолютной СК и располагающаяся с этой осью в одной вертикальной плоскости;  $r = [r_x \ r_y \ r_z]^T$ ,  $R = [R_x \ R_y \ R_z]^T$  – соответственно векторы, задающие положения РТИ и точки  $W$  пятого шарнира ММ в СК  $O'x'y'z'$ ;  $q_7$  – ве-

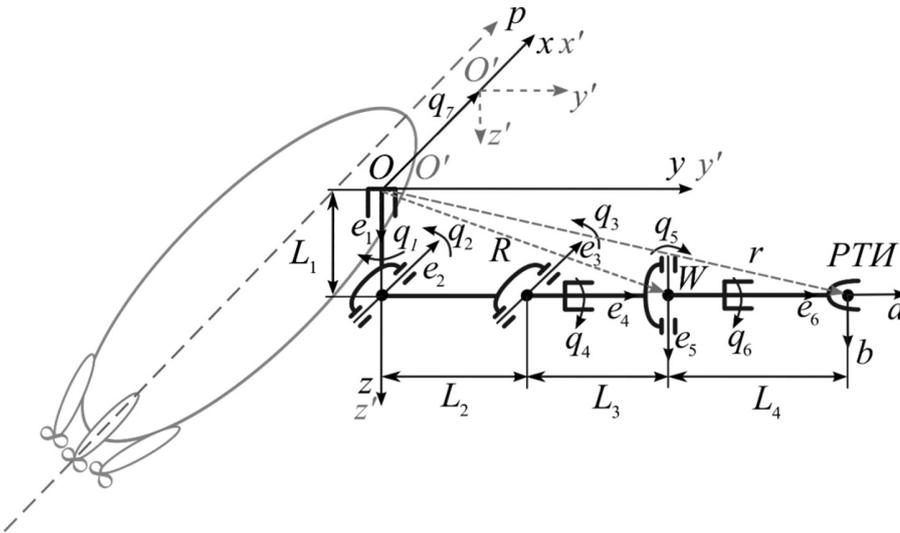


Рис. 1. Кинематическая схема шестистепенного ММ типа PUMA, закрепленного на ПА

личина смещения начала СК  $O'x'y'z'$  вместе с ПА по оси  $x$  в СК  $Oxyz$ .

В момент начала выполнения манипуляционных операций СК  $Oxyz$  и  $O'x'y'z'$  совпадают, а в дальнейшем их оси или совпадают, или остаются параллельными. При этом ось  $Oz$  всегда направлена вертикально вниз, а ось  $Oy$  составляет с предыдущими двумя осями правую СК.

На  $q_i$  накладываются следующие ограничения:

$$q_{i\min} < q_i < q_{i\max} \quad (i = \overline{1,6}), \quad (1)$$

где  $q_{i\min}$  и  $q_{i\max}$  – минимальное и максимальное значения  $q_i$ , определяемые рабочей зоной ММ, закрепленного на ПА, которая расположена в его передней полусфере, где устанавливаются основные сенсоры, видеокамеры, фонари и другое оборудование. В этом случае на все степени подвижности ММ накладываются ограничения:  $q_{i\min} = -\pi/2$  и  $q_{i\max} = \pi/2, i = \overline{1,6}$ . При этом ограничения  $q_{7\min}$  и  $q_{7\max}$  определяются областью возможных перемещений ПА вблизи объекта работ.

Отсчет всех координат начинается из положения ММ, показанного на рис. 1. Движение против часовой стрелки считается поло-

жительным, а по часовой стрелке – отрицательным. Направление вращения определяется относительно соответствующих векторов  $e_i$ , если взгляд направлен от стрелки к основанию каждого вектора  $e_i$ .

Известны аналитическое решение ОЗК для указанного ММ типа PUMA с неподвижным основанием [11] и логические условия для однозначного определения всех его обобщенных координат при работе только в передней полусфере. Эти условия представляют собой функции, определяющие знаки  $q_i$  ( $i = 4, 6$ ) в зависимости от текущего расположения РТИ в рабочей зоне ММ указанной полусферы. Учитывая эти функции, известное решение ОЗК [11] можно переписать в виде:

$$q_1^* = -\arctg \frac{r_x^* - a_x^* L_4}{r_y^* - a_y^* L_4},$$

$$q_2^* = \arcsin \frac{g_3}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} - \arctg \frac{f_3}{f_1},$$

$$q_3^* = \arcsin(f_1 + f_2 \sin q_2^*) - q_2^*,$$

$$q_4^* = \text{sign}(\alpha) \text{sign}(k) \times \arccos \frac{-a_x^* \cos q_1^* - a_y^* \sin q_1^*}{\sin q_5^*},$$

$$q_5^* = \text{sign}(\alpha) \arccos(-a_x^* \sin q_1^* \cos \phi + a_y^* \cos q_1^* \cos \phi + a_z^* \sin \phi),$$

$$q_6^* + \text{sign}(\beta) \arccos[b_x^* (\cos q_1^* \sin q_4^* + \sin q_1^* \sin \phi \cos q_4^*) + b_y^* (\sin q_1^* \sin q_4^* - \cos q_1^* \sin \phi \cos q_4^*) + b_z^* \cos \phi \cos q_4^*], \quad (2)$$

где  $q_i^*$  – программный сигнал (желаемое значение)  $q^i$ , где  $i = \overline{1,6}$ ;  
 $f_1 = (r_x^* - a_x^* L_4 - L_1) / L_3, f_2 = -L_2 / L_3,$   
 $f_3 = (r_y^* - a_y^* L_4) / (L_3 \cos q_1^*);$   
 $g_1 = 2f_1 f_2, g_2 = 2f_2 f_3,$   
 $g_3 = 1 - f_1^2 - f_2^2 - f_3^2; \phi = q_2^* + q_3^*;$   
 $a^* = [a_x^* \ a_y^* \ a_z^*]^T, b^* = [b_x^* \ b_y^* \ b_z^*]^T,$   
 $r^* = [r_x^* \ r_y^* \ r_z^*]^T$  – векторы программных значений  $a, b$  и  $r$ , где  $r_x^* = x^* - q_7^*, r_y^* = y^*, r_z^* = z^*$  в СК  $O'x'y'z'$ , смещенной на расстояние  $q_7^*$  вдоль оси  $Ox$  СК  $Oxyz$ ;  $x^*, y^*, z^*$  – желаемые координаты РТИ в СК  $Oxyz$ ;  $q_7^*$  – программный сигнал  $q_7$ ;

$$\alpha = -\arctg(a_x^* / a_y^*) - q_1^*,$$

$$k = a_z^* - \sin \phi \cos q_5^*, \beta = \gamma_x a_x^* + \gamma_y a_y^*$$

$$\gamma_x = (-\cos q_1^* \sin \phi \cos q_4^* + \sin q_1^* \sin q_4^*) b_z^* - \cos \phi \cos q_4^* b_y^*,$$

$$\gamma_y = \cos \phi \cos q_4^* b_x^* - (\sin q_1^* \sin \phi \cos q_4^* + \cos q_1^* \sin q_4^*) b_z^*.$$

Функции  $\text{sign}(\alpha), \text{sign}(\beta)$  и  $\text{sign}(k)$  не позволяют значениям  $q_i$  ( $i = 4, 6$ ) выходить из диапазона (1), но при этом могут возникать описанные выше реверсы в указанных степенях подвижности ММ. Кроме того, на ограничения (1) могут выходить значения  $q_2^*$  и  $q_3^*$ . В результате движение этого ММ может быть принудительно остановлено с соответствующим сообщением об ошибке. Иначе выход указанных степеней подвижности на упоры приведет к сходу РТИ с программной траектории ее движения.

Более того, в процессе движения ММ необходимо учитывать ещё и возможности его входа в особые положения. Для ММ с кинематической схемой типа PUMA существует

три особых (вырожденных) положения (рис. 2), в которых две степени подвижности могут двигаться в противоположных направлениях при фиксированном положении и ориентации РТИ [12]. В этих положениях ОЗК ММ решается неоднозначно. Эти положения характеризуются обнулением определителя матрицы Якоби (якобиана) манипулятора, которое приводит к тому, что даже малые перемещения РТИ или изменения векторов  $a^*$  и  $b^*$  могут приводить к существенным изменениям обобщенных координат.

В первом особом положении ММ (рис. 2, а) РТИ, точка  $W$  и его основание лежат на одной вертикальной прямой. Поэтому одно-

начного определения  $q_1^*$  и  $q_6^*$  не существует. Такую конфигурацию ММ может принимать при работе с объектами, расположенными прямо под ПА. Во втором вырожденном положении (рис. 2, б) три звена ММ лежат на одной прямой и неопределенными являются значения  $q_1^*$  и  $q_4^*$ . В третьем особом положении (рис. 2, в) третье и четвертое звенья ММ лежат на одной прямой, а  $q_5^* = 0$ . В этом случае неопределенными являются значения  $q_4^*$  и  $q_6^*$ . Все перечисленные особые положения могут возникать даже при перемещении РИ внутри рабочей зоны ММ.

При работе с протяженными объектами возможно вытягива-

ние ММ на максимальную длину, т.е. обнуление  $q_3^*$  и  $q_5^*$ . Это также приведет к экстренной остановке манипулятора. Подробные пояснения этой ситуации будут даны ниже.

Рассмотренные механические ограничения и особые положения ММ, не позволяющие подводным ММ эффективно выполнять требуемые операции при заранее известных или неизвестных траекториях движения их РТИ, можно исключить, вводя избыточные степени подвижности. При этом указанные траектории формируются только в процессе перемещения ММ на основе информации, получаемой от бортовых сенсоров ПА [1, 2].

## 2. Моделирование работы ММ при выполнении манипуляционной операции при неподвижном основании работа

Для демонстрации особенностей решения ОЗК для ММ типа PUMA были рассмотрены изменения программных сигналов во всех его степенях подвижности при перемещении РТИ по пространственной траектории, проекция которой на вертикальную плоскость  $Oxz$  и законы изменения  $x^*$ ,  $y^*$ ,  $z^*$  показаны на рис. 3, 4 соответственно. При моделировании были приняты следующие значения параметров ММ и ограничений на его обобщенные координаты:  $L_1 = 0,4$  м,  $L_2 = L_3 = 0,7$  м,  $L_4 = 0,1$  м, для вращательных степеней подвижности  $q_{i\min} = -\pi/2$ ,  $q_{i\max} = \pi/2$  ( $i = 1, 6$ ).

РТИ начинает движение из положения 1 (рис. 3), перемещается по прямой через точку 2, переходит по дуге на другой прямолинейный участок, на котором проходит точку 3, далее по дуге переходит на третий прямолинейный участок, где проходит точку 4, по кривой линии минует последовательно точки 5 и 6, затем по часовой стрелке проходит через точку 7

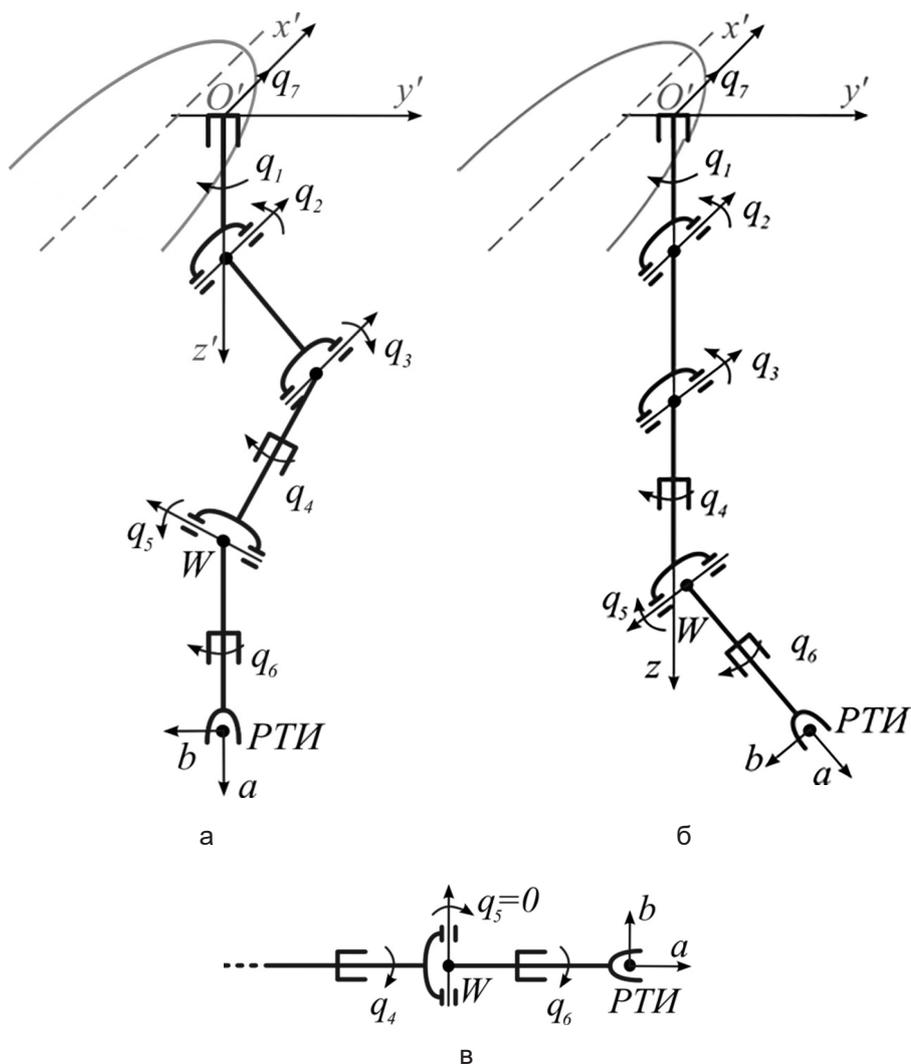


Рис. 2. Особые положения ММ PUMA: первое (а), второе (б), третье (в)

и, последовательно минуя точки 6, 8 и 9, возвращается в точку 4, далее по прямой движется к точке 10, где переходит на кривую, на которой проходит точку 11, по часовой стрелке перемещается по овальной линии и подходит к конечной точке 12. Во время движения РТИ на интервалах траектории от точки 1 до 9 и от точки 10 до точки 12 векторы  $a^* = [0\ 1\ 0]^T$  и  $b^* = [0\ 0\ 1]^T$  постоянны. От точки 9 до точки 10 эти векторы изменяются по законам, показанным на рис. 5. Неизменная скорость перемещения РТИ вдоль указанной программной траектории составляет 0,3 м/с.

Законы изменения программных значений всех обобщенных координат ММ в процессе перемещения РТИ по указанной выше траектории, полученные с помощью уравнений (2) при  $q_7^* = 0$ , представлены на рис. 6. Из этого рисунка видно, что в момент времени 1,5 с (см. точку 2 на рис. 3) координаты  $q_4^*$  и  $q_6^*$  меняются скачком от  $-1,25$  рад до  $1,25$  рад и от  $1,25$  рад до  $-1,25$  рад соответственно. Указанное происходит потому, что в этой точке меняется знак переменной  $\alpha$ , которая определяет знаки  $q_4^*$  и  $q_5^*$ , а следовательно, и  $q_6^*$ . При этом  $q_5^*$  проходит через ноль, вытягивая последние два звена ММ в одну прямую линию и входя в третье особое положение.

В момент времени 5 с (точка 3, рис. 3) программные значения  $q_4^*$

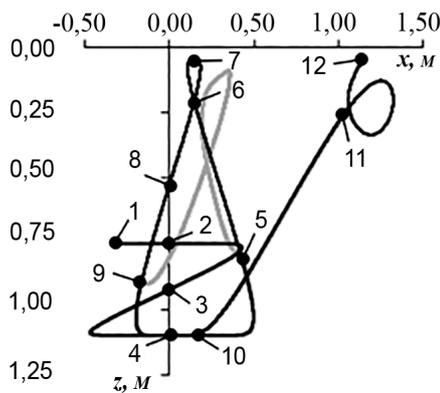


Рис. 3. Проекция траектории движения РТИ на вертикальную плоскость

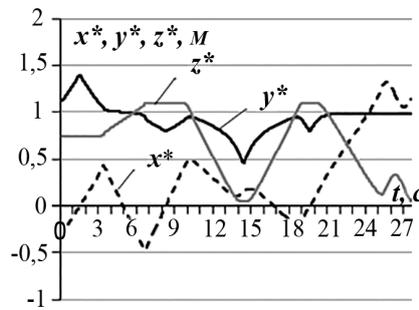


Рис. 4. Законы изменения значений  $x^*, y^*, z^*$

и  $q_6^*$  доходят до ограничений  $\pm \pi/2$  и вместе с  $q_5^*$  меняют свои знаки. Это происходит из-за срабатывания описанных выше логических условий. Такие же перебросы происходят и в моменты времени 16,8 с и 19,6 с в точках 8 и 4 соответственно.

В момент времени 8,3 с (точка 4, рис. 3) ММ входит в третье особое положение, но при этом  $q_4^*$  и  $q_6^*$  равны нулю. Поэтому ни в одной степени подвижности ММ не возникает режим нежелательного реверса.

Из рис. 6 видно, что в интервале времени от 11,2 с (точка 5) до 18,2 с (точка 9) координата  $q_3^*$  принимает значение, по модулю большее  $\pi/2$ . То есть на этом участке или произойдет аварийная остановка ММ, или РТИ сойдет с программной траектории и пройдет по кривой линии, показанной на рис. 3 серым цветом.

Реально движение РТИ завершается в точке 11 (момент времени 24,6 с), в которой происходит выход

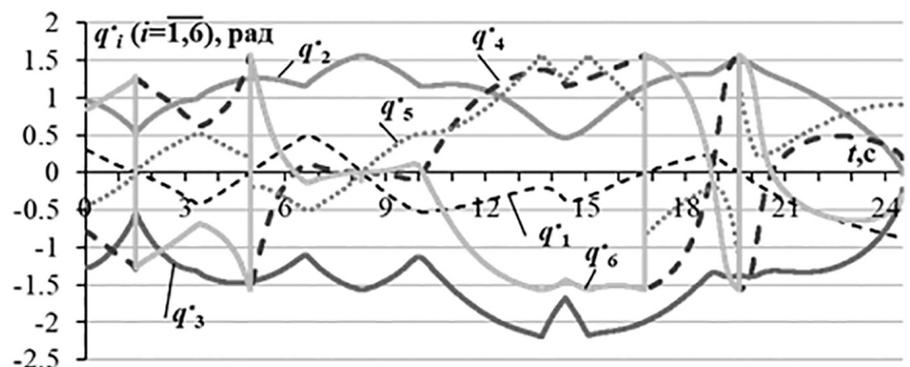


Рис. 6. Законы изменения  $q_i^*, i = \overline{1,6}$  при неподвижном основании ММ

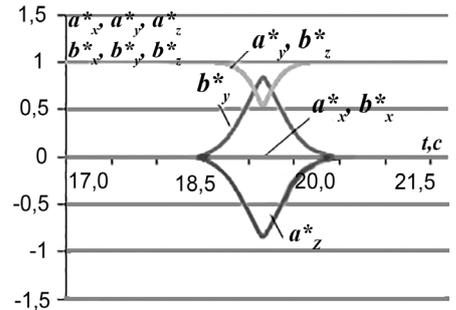


Рис. 5. Законы изменения координат векторов  $a^*$  и  $b^*$

инструмента на границу досягаемости ММ ( $q_3^* = 0$ ). То есть дальнейшее перемещение РТИ по участку траектории между точками 11 и 12 становится невозможным.

### 3. Разработка системы формирования программных сигналов, исключающей нежелательные реверсы и выход ММ на ограничения

Для решения поставленной задачи предлагается разработать систему, обеспечивающую формирование программного сигнала для дополнительной степени подвижности  $q_7^*$ , реализуемой посредством линейных перемещений ПА (основания ММ) вдоль оси  $Ox$  таким образом, чтобы при выполнении подводных операций не возникали непредсказуемые реверсы в его приводах. Эта система должна выявлять близость соответствующих обобщенных координат ММ к ограничениям, его конфи-

гурации – к особым положениям, а РИ – к границе рабочей зоны. Для этого вводятся в рассмотрение специальные индикаторы, каждый из которых представляет собой функцию, значения которой условно предполагаются в диапазоне от 0 до 1. Если какая-либо из обобщенных координат подходит к ограничениям (1) или ММ приближается к любому из особых положений, а РИ выходит на границу рабочей зоны, то значение соответствующего индикатора должно стремиться к единице.

В качестве первого индикатора выбрано выражение  $|q_i^*|/q_{i\max}$  ( $i = 1, 7$ ), которое стремится к 1 при подходе какой-либо обобщенной координаты к ограничениям (1). Второй индикатор информирует о приближении конфигурации ММ к первому особому положению (рис. 2, а), в котором происходит одновременное обнуление величин  $a_x^*, a_y^*$  и  $r_x^*, r_y^*$ , т.е. выполняется равенство  $\sqrt{a_x^{*2} + a_y^{*2}} = \sqrt{r_x^{*2} + r_y^{*2}} = 0$ .

Второй индикатор имеет вид

$$(2 - \sqrt{a_x^{*2} + a_y^{*2}} - \sqrt{r_x^{*2} + r_y^{*2}}) / (L_2 + L_3 + L_4) / 2,$$

где сумма  $L_2 + L_3 + L_4$  – максимальное значение длины проекции вектора  $r^*$  на оси  $O'x'$  и  $O'y'$  (эта сумма введена в индикатор только с целью сохранения его величины в диапазоне 0–1). Если конфигурация ММ будет приближаться к первому особому положению, то подкоренные слагаемые будут стремиться к нулю, а значение всего выражения – к единице.

Для оценки близости конфигурации ММ ко второму особому положению (рис. 2, б) вводится третий индикатор вида  $(\pi/2 + |q_2^*| - |q_3^*|)/\pi$ , который принимает значение ноль, когда  $q_2^* = 0$ , а  $|q_3^*| = \pi/2$ , и 1, когда  $q_2^* = \pi/2$  и  $q_3^* = 0$ .

Третье особое положение (рис. 2, в) возникает тогда, когда

$q_5^* = 0$ . Поэтому четвертый индикатор имеет вид  $(1 - 2|q_5^*|/\pi)$ .

Как будет показано ниже, отслеживая предельные значения указанных выше четырех индикаторов и управляя  $q_7^*$ , можно не допустить скачкообразного изменения основных шести координат ММ, если объекты работ все время находятся в рабочей зоне этого ММ. Но при работе с протяженными объектами может потребоваться перемещение РИ в такое программное положение, которое при фиксированном положении основания ММ оказывается недостижимым. Поэтому требуется ввести в рассмотрение новые индикаторы, которые будут сигнализировать о приближении РИ к недостижимым программным положениям.

Если при выполнении операций потребуется переместить РТИ в заданную точку пространства, то нужно просто исключить ситуацию, при которой  $q_3^*$  и  $q_5^*$  одновременно становятся равными нулю (рис. 1), обеспечивая максимальное вытягивание ММ. Для оценки этой ситуации можно использовать пятый индикатор  $1 - (|q_3^*| + |q_5^*|)/\pi$ , стремящийся к единице при  $q_3^* = q_5^* = 0$ . Если  $a^*$  и  $b^*$ , то необходимо уже отслеживать максимальное удаление  $(L_2 + L_3)$  точки W от шарнира 2 ММ (рис. 1) и использовать шестой индикатор  $1 - 2|q_3^*|/\pi$ , который стремится к единице при  $q_3^* = 0$ .

Таким образом, сформированные шесть индикаторов в процессе зада-

ния программных перемещений РИ при выполнении требуемых операций позволяют определить, приближается ли ММ к какому-либо своему особому положению, к ограничению какой-либо степени подвижности или к границе области допустимых положений РИ в пространстве. Анализ величины этих индикаторов позволяет принять решение об изменении значения  $q_7^*$  для исключения указанных негативных ситуаций с целью продолжения успешного выполнения ММ поставленной задачи.

На рис. 7 представлена обобщенная схема устройства, обеспечивающего формирование программных значений  $q_i^*$  ( $i = 1, 6$ ) (выделенное пунктиром) и  $q_7^*$  для успешного выполнения заданных операций. На этом рисунке введены следующие обозначения:

ПУ – программное устройство, задающее текущие программные значения  $x^*, y^*, z^*$ , программную скорость движения  $\dot{q}_7^*$  избыточной степени подвижности, постоянное малое положительное приращение  $\Delta q_7$  координаты  $q_7^*$ , а также пороговую величину  $J_{th}$  из диапазона  $[0, 1]$ ;

ОЗК – блок решения обратной задачи кинематики ММ;

С – контроллеры, формирующие текущие значения всех шести индикаторов и выбирающие максимальный из них;

1 – релейный элемент, замыкающий или размыкающий ключ 2, соединяющий выход релейного элемента 3 с блоком умножения 4.

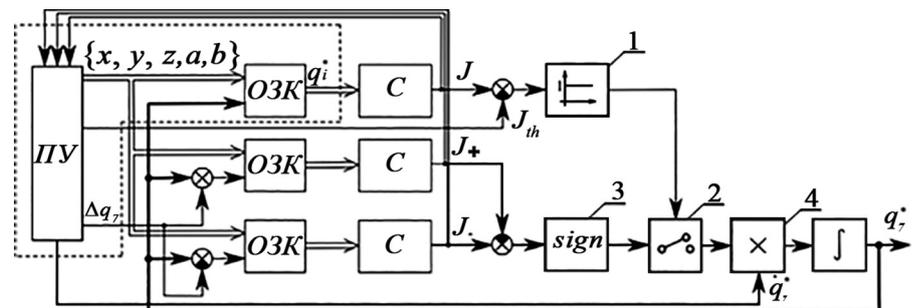


Рис. 7. Обобщенная схема устройства, формирующего программный сигнал управления избыточной степенью подвижности ММ

В процессе управления ММ устройство (рис. 7) рассчитывает значения всех индикаторов, чтобы непрерывно определять, подходит ли ММ к одной из указанных выше запретных зон. Если значение какого-либо индикатора начинает превышать заранее выбранную положительную пороговую величину  $J_{th} < 1$ , которая может быть одинаковой или различной для всех индикаторов, то ПА должен начать перемещать основание ММ вдоль избыточной степени подвижности  $q_7^*$ . Для определения направления перемещения ПА вдоль оси  $Ox$  вначале по формулам (2) в бортовом компьютере решается ОЗК (вычисляются  $q_i^*$  ( $i = \overline{1,6}$ )) и с учетом текущего значения  $q_7^*$  определяется максимальное значение  $J$  из всех шести индикаторов. Одновременно для двух соседних значений обобщенной координаты  $q_7^* \pm \Delta q_7$  производится расчет значений  $J_+$  для  $q_7^* + \Delta q_7$  и  $J_-$  для  $q_7^* - \Delta q_7$  значений, которые сравниваются между собой (рис. 7). В результате если хотя бы один индикатор превышает порог  $J_{th}$ , то ключ 2 замыкается и основание ММ перемещается в сторону с наименьшим значением  $J_+$  или  $J_-$ . При этом все расчеты и перемещения ПА должны выполняться с такой скоростью, чтобы за счет избыточной степени подвижности  $q_7^*$  ММ успевал уменьшить значение соответствующего индикаторного показателя, перемещая ПА со скоростью  $\dot{q}_7^*$ . Если же любые перемещения ПА по координате  $q_7^*$  приводят только к увеличению  $J_+$  и  $J_-$  по сравнению с текущим  $J$ , то выполнение технологической операции прекращается. Это отслеживается в ПУ после сравнения сигналов, получаемых со всех блоков С.

Очевидно, что перемещение по координате  $q_7$  должно использоваться только при необходимости, а в остальные моменты вре-

мени основание ММ должно быть зафиксировано вблизи объекта работ с помощью высокоточных систем стабилизации ПА в режиме зависания в пространстве [14–16].

#### 4. Результаты исследования работы ММ с системой, исключая нежелательные реверсы и выход на ограничения

Для оценки эффективности разработанного метода формирования программного сигнала для избыточной степени подвижности  $q_7$  (рис. 1) при перемещении РТИ по произвольно задаваемой гладкой пространственной траектории (рис. 3) было проведено моделирование в среде MATLAB.

На рис. 8 показаны законы изменения  $q_i^*$ , где  $i = \overline{1,7}$ , при их формировании непосредственно в процессе работы ММ. При этом  $J_{th} = 0,9$ , а  $\dot{q}_7^* = 0,3$  м/с. Из рисунка видно, что при введении сигнала  $q_7^*$  согласно предложенному методу все обобщенные координаты ММ удовлетворяют ограничениям (1).

В момент времени 1,5 с, когда РТИ проходит точку 2 (рис. 3),  $q_5^*$  приближается к нулю. В результате четвертый индикатор превышает значение  $J_{th}$  и начинается отработка ПА ненулевой величины  $q_7^*$ , увеличивая  $q_5^*$  и исключая возникновение третьего особого положения. В результате не происходит скачкообразного изменения координат

$q_4^*$  и  $q_6^*$ , но увеличиваются скорости  $\dot{q}_4^*$  и  $\dot{q}_6^*$ . Такое же увеличение скоростей  $\dot{q}_4^*$  и  $\dot{q}_6^*$  происходит в моменты времени 10 с и 19,5 с. Для точной отработки программных сигналов, изменяющихся с повышенными скоростями на соответствующих участках траектории движения РТИ, можно снижать программную скорость перемещения ММ [17–19].

В интервалах времени от 2 с до 3,7 с к ограничениям приближаются значения  $q_3^*$ ,  $q_4^*$  и  $q_6^*$  в интервале от 8 с до 9,7 с –  $q_2^*$  и  $q_3^*$ , а в интервалах от 9,7 с до 11,6 с и от 21,4 с до 25,9 с – только  $q_3^*$ . В результате первый индикатор начинает превышать  $J_{th}$ , и возникает движение по координате  $q_7^*$ . При этом ограничения (1) не нарушаются.

В интервалах времени от 5,6 с до 6,6 с и от 17 с до 18,6 с РТИ подходит к границе досягаемости ММ ( $q_3^*$  приближается к нулю). При этом уже шестой индикатор превышает  $J_{th}$ , и в указанные промежутки времени ПА опять перемещается по  $q_7^*$ .

Из представленных графиков видно, что основание робота перемещается только в промежутки времени, когда или соответствующие обобщенные координаты подходят к ограничениям (1), или ММ приближается к своему третьему особому положению, или  $q_3^*$  стремится к нулю. Всё остальное время значение  $q_7^*$  не меняется.

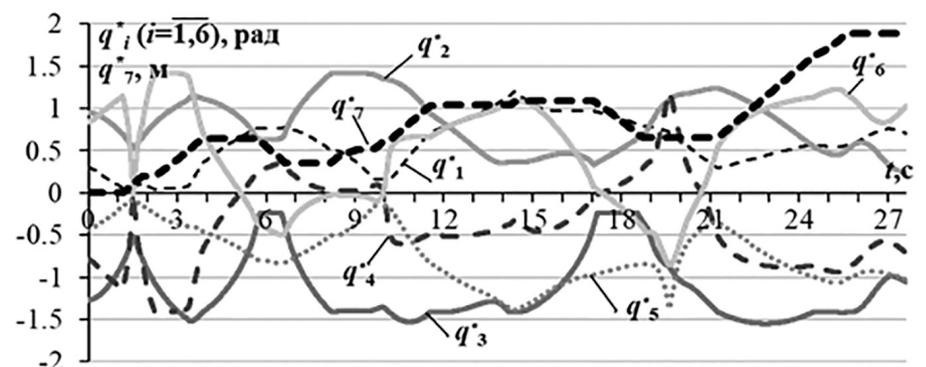


Рис. 8. Законы изменения  $q_i^*$  ( $i = \overline{1,7}$ ) при дополнительном перемещении ПА

Кроме того, за счет введения избыточной степени подвижности РТИ в момент времени 24,6 с (точка 11, рис. 3) не вышла на границу досягаемости и выполняемая технологическая операция не была прервана, а РТИ перемещалась до конца траектории в точке 12 в момент времени 27,7 с. То есть предложенный метод позволяет автоматически перемещать РТИ в ранее недостижимую для ММ область пространства без предварительного определения и задания  $q_7^*$ , а также полностью исключая возникновение нештатных ситуаций.

Аналогичные результаты были получены и при движении РТИ вдоль других программных траекторий и с другой ориентацией инструмента, когда могли проявиться указанные выше негативные эффекты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод автоматического формирования дополнительных перемещений ПА с установленным на его корпусе шестистепенном ММ типа PUMA. Этот метод за счет дополнительных линейных движений ПА позволяет исключить появление нежелатель-

ных реверсов в приводах ММ, приводящих к резкому уменьшению динамической точности перемещения РТИ ММ или к вынужденной остановке выполнения технологических операций при входе некоторых степеней подвижности в ограничения. Результаты выполненного моделирования подтвердили работоспособность и эффективность разработанного метода.

Работа поддержана грантами РФФИ (16-07-00300, 16-38-00187, 16-37-60025, 162904195Офи\_м) и грантом президента РФ (СП-620.2016.5).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Система для автоматического выполнения манипуляционных операций с помощью подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 8. С. 543–549.
2. Rizzini D.L., Kallasi F., Aleotti J., Oleari F., Caselli S. Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks // Computers & Electrical Engineering. 2017. Vol. 58. P. 560–571.
3. Бобков В.А., Мельман С.В., Толстоногов А.Ю., Щербатюк А.Ф. О некоторых алгоритмах визуальной навигации автономного необитаемого подводного аппарата с использованием стереоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2(22). С. 19–24.
4. Бобков В.А., Машенцев В.Ю. Визуальная навигация подводного аппарата для целей локального маневрирования // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2(16). С. 33–37.
5. Pérez-Alcocer R., Torres-Méndez L.A., Olguín-Díaz E., Maldonado-Ramírez A.A. Vision-Based Autonomous Underwater Vehicle Navigation in Poor Visibility Conditions Using a Model-Free Robust Control // Journ. of Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 1–16.
6. Yahya S., Moghavvemi M., Mohamed H.A.F. Redundant manipulators kinematics inversion // Scientific Research and Essays. 2011. Vol. 6, Is. 26. P. 5462–5470.
7. Wang J., Li Y., Zhao X. Inverse Kinematics and Control of a 7-DOF Redundant Manipulator Based on the Closed-Loop Algorithm // Int. Journ. of Advanced Robotic Systems. 2010. Vol. 7, Is. 4. P. 1–10.
8. Espinoza M.S., Goncalves J., Leitao P., Sanchez J.L.G., Herreros A. Inverse Kinematics of a 10 DOF modular hyper-redundant robot resorting to exhaustive and error-optimization methods: A comparative study // Brazilian Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium. Brazil Fortulaza, 2012. P. 125–130.
9. Crenganis M., Bologna O. Efficient method for redundancy resolution of a 7 DoF manipulator // Supliment 1 Buletinul AGIR. 2015. P. 222–229.
10. Oyama E., Nak Young Chong, Agah A., Maeda T. Inverse Kinematics Learning by Modular Architecture Neural Networks with Performance Prediction Networks // Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation. 2001. Vol. 1. P. 1006–1012.
11. Филаретов В.Ф., Алексеев Ю.К., Лебедев А.В. Системы управления подводными роботами / под ред. В.Ф. Филаретова. М.: Круглый год, 2001. 288 с.
12. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.И. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М: Наука, 1978. 400 с.
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 // Proc. of Int. Conf. on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016). Jakarta, Indonesia, 2016. P. 93–96.
14. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.
15. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.
16. Костенко В.В., Павин А.М. Автоматическое позиционирование необитаемого подводного аппарата над объектами морского дна с использованием фотоизображений // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1(17). С. 39–47.
17. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Синтез системы формирования программных сигналов для электроприводов многозвенных манипуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 30–34.
18. Филаретов В.Ф., Губанков А.С. Система формирования предельно высокой скорости движения рабочего органа многостепенного манипулятора по произвольной траектории // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11, № 4. С. 19–25.
19. Filaretov V., Gubankov A. Adaptive system forming extremely high speed of multilink manipulator gripper // 23th DAAAM Int. Symp. on Intelligent Manufacturing and Automation. Zadar, Croatia, 2012. Vol. 1. P. 473–476.