

## Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц

© А.Г. Лесков<sup>1</sup>, К.В. Бажинова<sup>2</sup>, С.Д. Морошкин<sup>1</sup>, Е.В. Феоктистова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Дмитров Московской обл., 141801, Россия

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены вопросы описания кинематики многозвенных исполнительных механизмов манипуляционных роботов с разветвленной цепью. Предложен метод построения аналитических и алгоритмических моделей таких механизмов с использованием математического аппарата блочных матриц. Метод позволяет в общем виде решать прямую и (в двух частных случаях) обратную кинематические задачи для рассматриваемых механизмов. Приведен пример, иллюстрирующий применение метода блочных матриц для описания кинематики манипуляционной системы, состоящей из промышленного манипулятора Kawasaki FS20N и трехпалой кисти Schunk SDH-2.*

**Ключевые слова:** манипуляционные роботы, разветвленная кинематика, блочные матрицы, задачи кинематики.

**Введение.** Манипуляционные системы роботов представляют собой многозвенные исполнительные механизмы (ИМ), оснащенные комплексом приводов, средствами очувствления и управления. Кинематические схемы ИМ достаточно разнообразны. В простейшем случае ИМ — это  $n$ -звенный механизм, звенья которого образуют линейную разомкнутую кинематическую цепь. Подобные ИМ позволяют реализовать только простейшие манипуляционные операции, например перенос одним манипулятором в свободном пространстве жесткозахваченного объекта. Значительно большими возможностями обладают манипуляционные системы, ИМ которых представляют собой разветвленную структуру. Такие системы способны решать задачи двурукого манипулирования некооперируемыми объектами, захвата объектов многопальцевыми захватными устройствами, в том числе при размещении манипуляторов на колесном, шагающем или свободно летающем носителе. Число степеней свободы у таких систем может достигать десятков единиц. Уравнения кинематики и динамики этих систем в развернутом виде весьма громоздки и неудобны для решения задач анализа и управления.

Более конструктивным представляется подход к математическому моделированию ИМ с использованием специальных методов, поз-

воляющих, во-первых, записывать уравнения в компактной форме и, во-вторых, не требующих алгоритмической проработки в каждом конкретном случае. Одним из широко применяемых подходов является использование при записи кинематических соотношений матриц однородных преобразований размера  $(4 \times 4)$  [1]. Такой подход позволяет составить уравнения в более компактной форме за счет единообразного описания преобразований перемещений в поступательных и вращательных кинематических парах. Однако необходимость индексации переменных сохраняется. Кроме того, непосредственное применение матриц  $(4 \times 4)$  в вычислениях снижает показатели быстродействия вследствие необходимости выполнения пустых операций умножения на ноль и единицу.

В данной работе предлагается при построении аналитических и алгоритмических моделей кинематики ИМ с разветвленной кинематической цепью использовать математический аппарат блочных матриц. Рассмотрим метод блочных матриц [2, 3] применительно к ИМ с линейной кинематической цепью.

**Метод блочных матриц (аналитическая форма).** ИМ состоит из  $n$  звеньев, связанных между собой последовательно, начиная от основания, кинематическими парами 5-го класса. Векторы  $\mathbf{t}_i$  линейных координат звеньев такого механизма относительно инерциальной системы координат (СК)  $СК_0$  можно представить в виде

$$\mathbf{t}_i = \sum_{j=1}^i \tau_{ij} \mathbf{l}_j, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $\tau_{ij}$  — матрицы поворота системы координат  $СК_i$  относительно системы координат  $СК_j$ ;  $\mathbf{l}_j$  — вектор смещения  $СК_j$  относительно  $СК_{j-1}$ .

В методе блочных матриц уравнения (1) имеют вид

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\tau} \mathbf{l}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{t}$ ,  $\mathbf{l}$  — блочные векторы с элементами  $\mathbf{t}_i$  и  $\mathbf{l}_i$  соответственно;  $\boldsymbol{\tau}$  — блочная матрица с элементами  $\tau_{ij}$ , причем  $\tau_{ii}$  — единичная матрица размера  $(3 \times 3)$ .

В зависимости от вида  $j$ -й кинематической пары (поступательная или вращательная) в уравнении (2) переменными являются либо матрицы  $\mathbf{l}_i$ , либо входящие в состав  $\tau_{ij}$  матрицы  $\tau_{j+1,j}$ .

Уравнения (2) в отличие от уравнений (1) записывают в «безындексной» форме, что делает их очень компактными. Уравнения охватывают ИМ с произвольным числом звеньев. В составе ИМ могут присутствовать и вращательные и поступательные кинематические пары в произвольной комбинации.

Параметры звеньев задаются в СК, связанных со звеньями ИМ. Все вычисления проводятся в этих же СК.

**Метод блочных матриц (алгоритмическая форма).** Рассмотрим следующие алгоритмы.

*Алгоритмы прямого и обратного хода.* Матрица  $\tau$  имеет обратную матрицу в виде

$$\tau^{-1} = I - Y, \quad (3)$$

где  $I$  — единичная блочная матрица, диагональные элементы которой единичные матрицы размера  $(3 \times 3)$ ;  $Y$  — блочная матрица, у которой ненулевыми являются только элементы первой блочной поддиагонали, причем  $Y_{ij} = \tau_{i,i-1}$ .

Умножив матрицу  $\tau^{-1}$  на левую и правую части уравнения (2), получим

$$\mathbf{t} = \mathbf{l} + Y\mathbf{t}, \quad (4)$$

что соответствует цепочке рекуррентных соотношений вида

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{l}_i + \tau_{i,i-1}\mathbf{t}_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (5)$$

получивших название уравнений «прямого хода» [4].

Отметим, что по аналогии с уравнениями (2)–(4) можно записать уравнения вида (5) и для матрицы  $\tau^t$ . Эти уравнения вида

$$\mathbf{t}_{i-1} = \mathbf{l}_{i-1} + \tau_{i-1,i}\mathbf{t}_i, \quad i = n, n-1, \dots, 2,$$

получили название алгоритмов «обратного хода» [4]. Алгоритмы «прямого-обратного» хода являются наиболее экономичными при компьютерной реализации. Их трудоемкость линейно возрастает с увеличением числа звеньев ИМ.

*Алгоритм «Косынка».* Матрица  $\tau$  может быть представлена в виде

$$\tau = \sum_{j=0}^{n-1} Y^j. \quad (6)$$

Поэтому вычисления по формуле (2) можно осуществлять таким образом:

$$\mathbf{t} = \mathbf{l} + Y(\mathbf{l} + Y(\mathbf{l} + \dots Y(\mathbf{l} + Y\mathbf{l}))).$$

Как следует из уравнения (6), вычисления состоят в  $(n-1)$ -кратном умножении матрицы  $Y$  на вектор  $\mathbf{l}$  и сложении полученного результата с этим вектором. Компьютерная реализация алгоритма «Косынка» приведена в работе [3]. Данный алгоритм более трудоемок по сравнению с алгоритмами прямого-обратного хода (квадра-

тичная зависимость от числа звеньев). Достоинством алгоритма «Косынка» является то, что в отличие от алгоритмов прямого-обратного хода можно оперировать не только с векторами, но и с матрицами, что важно при расчете более сложных соотношений, например матрицы инерции ИМ.

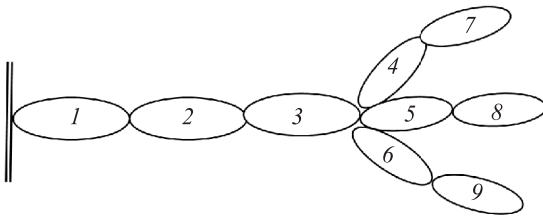
**Метод блочных матриц в расчетах кинематики ИМ разветвленной структуры.** Соотношения метода блочных матриц можно достаточно просто применить и в случае ИМ древовидной структуры. При этом, как будет показано ниже, вид уравнений (2)–(4) и (6) остается постоянным, изменяется лишь структура матриц  $\tau$  и  $Y$ . Правила построения этих матриц заключаются в следующем.

По-прежнему полагаем, что в составе ИМ имеется  $n$  звеньев. Эти звенья связаны между собой попарно. Звенья нумеруются, начиная от основания. При этом звенья с большими номерами должны находиться дальше от основания, чем звенья с меньшими номерами. В первую очередь прирастают номера звеньев, сопряженных в точках ветвления. Порядок рассмотрения точек ветвления может быть произвольным.

Введем матрицы поворота СК всех смежных звеньев  $\tau_{ij}$ , где  $i > j$ . Число таких матриц  $n - 1$ . Далее заполняется матрица  $Y$ . В ней на место элементов  $Y_{ij}$  помещаются матрицы  $\tau_{ij}$ , связывающие СК смежных звеньев. Остальные элементы этой матрицы принимаем равными 0 (3×3). Матрица  $\tau$  рассчитывается из уравнения (6). Верхний предел суммы равен числу звеньев наиболее длинной ветви «дерева» кинематической схемы ИМ. При этом все соотношения для матриц  $\tau$  и  $Y$ , полученные применительно к ИМ с линейной кинематической цепью, сохраняются.

Процедуру построения моделей кинематики ИМ с использованием блочных матриц рассмотрим на примере манипуляционной системы, состоящей из шестизвенного промышленного робота Kawasaki FS020N, оснащенного трехпалой кистью Schunk SDH2. Каждый из пальцев кисти имеет два звена, сочлененных шарнирами 5-го класса.

Кинематическая схема ИМ приведена на рис. 1. Каждое из звеньев кисти оснащено тактильными датчиками, позволяющими определить координаты точек захвата объекта в СК звеньев. В процессе работы осуществляется захват объектов с помощью кисти. Решение этой задачи требует определения в базовой СК точек контакта кисти с объектами. Наличие тактильных датчиков на звеньях кисти дает возможность определить координаты точек захвата объекта в СК этих звеньев. Без нарушения общности можно принять векторы  $I_i$  в качестве векторов координат точек захвата.



**Рис. 1.** Кинематическая схема ИМ:  
1–9 — звенья робота

В рассматриваемом примере будем считать, что промышленный робот состоит только из трех звеньев. Это допущение не влияет на общность изложения, однако позволяет уменьшить объем выкладок и делает их более наглядными. Кисть Schunk SDH устроена таким образом, что звенья 4 и 5 могут синхронно поворачиваться вокруг осей, перпендикулярных плоскости основания кисти, в противоположных направлениях на один и тот же угол (в рассматриваемом примере угол поворота считается константой).

Звенья на рис. 1 пронумерованы, начиная от основания. Следуя изложенному выше правилу, составляем блочную матрицу  $Y$ . Размер этой матрицы (по блокам)  $(9 \times 9)$ . Учитывая, что в этой матрице ненулевыми являются только матрицы, связывающие СК смежных звеньев (блоки матрицы  $Y$ ), и эти матрицы присутствуют только по одной в каждой из строк, запишем матрицу  $Y$  так: строка 2 — матрица  $\tau_{21}$ , строка 3 — матрица  $\tau_{32}$ . Для следующих строк, соответственно,  $\tau_{43}$ ,  $\tau_{53}$ ,  $\tau_{63}$ ,  $\tau_{74}$ ,  $\tau_{85}$ ,  $\tau_{96}$ . Эти матрицы являются функциями координат сочленений. Исходя из вышеизложенного, для определения линейных координат всех звеньев ИМ рассматриваемой структуры достаточно вычислить эти матрицы. Так, для изучаемого механизма уравнения алгоритма прямого хода будут иметь следующий вид:

$$\mathbf{t}_1 = \mathbf{l}_1; \quad \mathbf{t}_2 = \mathbf{l}_2 + \tau_{21} \mathbf{t}_1; \quad \mathbf{t}_3 = \mathbf{l}_3 + \tau_{32} \mathbf{t}_2; \quad \mathbf{t}_4 = \mathbf{l}_4 + \tau_{43} \mathbf{t}_3;$$

$$\mathbf{t}_5 = \mathbf{l}_5 + \tau_{53} \mathbf{t}_3; \quad \mathbf{t}_6 = \mathbf{l}_6 + \tau_{63} \mathbf{t}_3; \quad \mathbf{t}_7 = \mathbf{l}_7 + \tau_{74} \mathbf{t}_4;$$

$$\mathbf{t}_8 = \mathbf{l}_8 + \tau_{85} \mathbf{t}_5; \quad \mathbf{t}_9 = \mathbf{l}_9 + \tau_{96} \mathbf{t}_6.$$

Для расчета угловых координат звеньев представленные выше соотношения следует дополнить уравнениями расчета матриц поворота СК звеньев относительно инерциальной СК. Эта процедура состоит в перемножении матриц поворота смежных звеньев, расположенных на месте пересечения строк и столбцов, определенных индексами этих матриц, начиная от большего к меньшему. Так, например, матрица  $\tau_{90}$  примет вид

$$\tau_{90} = \tau_{96} \tau_{63} \tau_{32} \tau_{21} \tau_{10},$$

где  $\tau_{10}$  — матрица поворота СК 1-го звена относительно инерциальной СК.

Блочная матрица  $\tau$ , согласно уравнению (6), имеет вид

$$\tau = I + Y + Y^2 + Y^3 + Y^4.$$

Максимальная степень матрицы  $Y$  на единицу меньше длины наиболее протяженной ветви, начиная от основания. Выписывая только ненулевые элементы строк матриц  $Y$  в степени 2, 3 и 4, получим:

для матрицы  $Y^2$   $\tau_{31}, \tau_{42}, \tau_{52}, \tau_{62}, \tau_{73}, \tau_{83}, \tau_{93}$ ;

для матрицы  $Y^3$   $\tau_{41}, \tau_{51}, \tau_{61}, \tau_{72}, \tau_{82}, \tau_{92}$ ;

для матрицы  $Y^4$   $\tau_{71}, \tau_{81}, \tau_{91}$ .

Представленные выше выражения позволяют решать задачи определения положения звеньев ИМ манипулятора в декартовом пространстве. Знание положения звеньев необходимо для организации обратной связи в задачах планирования и реализации траекторий движения, а также для исключения соударения звеньев. В такой постановке эта задача получила название прямой (позиционной) задачи кинематики манипуляционных роботов. Управление манипуляторами требует решения прямой и обратной кинематических задач. При решении обратной кинематической задачи (ОКЗ) полагают, что декартовы координаты некоторых звеньев ИМ известны. Решением ОКЗ являются значения координат сочленений, при которых ИМ занимает заданное положение в пространстве.

Для многозвенных ИМ решение ОКЗ может быть неоднозначным либо вообще отсутствовать. В рамках преодоления этой проблемы применяются специальные меры [5]. Неоднозначность исключается путем введения дополнительных переменных. Конфигурации, в которых решения отсутствуют, исключаются и при управлении их избегают.

Используя блочные матрицы, можно получить решение ОКЗ в общем виде в двух следующих случаях.

1. Известны и линейные координаты и матрицы поворота СК смежных звеньев. Требуется определить векторы  $\mathbf{l}_i$ . В такой постановке ОКЗ представляет интерес при наличии в составе ИМ поступательных кинематических пар. Координаты таких пар определяют значения соответствующих им векторов  $\mathbf{l}_i$ , зная которые, находят значения координат соответствующих сочленений из простых геометрических соотношений. Решение ОКЗ следует непосредственно из соотношения (4):

$$\mathbf{l} = (I - Y)\mathbf{t}.$$

2. Известны линейные координаты звеньев, требуется определить угловые координаты сочленений.

В такой постановке ОКЗ представляет интерес при наличии в составе ИМ вращательных кинематических пар, а также в задачах безопасности. Из соотношения (4) следует

$$Y\mathbf{t} = \mathbf{t} - \mathbf{l}.$$

Последнее соотношение является аналогом уравнений (5):

$$\tau_{i,i-1} \mathbf{t}_{i-1} = \mathbf{t}_i - \mathbf{l}_i. \quad (7)$$

Матрицу  $\tau_{i,i-1}$  можно представить в виде

$$\tau_{i,i-1} = \alpha_i \tau_{zi},$$

где матрица  $\tau_{zi}$  описывает поворот вокруг оси  $z_i$ , а матрица  $\alpha_i$  — начальную ориентацию осей СК смежных звеньев. Матрица  $\tau_{zi}$  зависит только от координаты  $q_i$   $i$ -го сочленения (если сочленение вращательного вида).

В результате уравнения (7) можно представить в виде

$$\tau_{zi} \mathbf{t}_{i-1} = \alpha_i^l \alpha_i^T (\mathbf{t}_i - \mathbf{l}_i).$$

Последнее соотношение содержит только два неизвестных:  $\sin q_i$  и  $\cos q_i$ , которые определяются в результате решения системы из двух уравнений с двумя неизвестными.

Решение ОКЗ в общем случае получить не удастся. Это объясняется нелинейностью и громоздкостью уравнений кинематики ИМ. Чаще всего решение ОКЗ находят геометрическими методами для каждого конкретного манипулятора.

В рассматриваемой задаче будем считать, что уравнения ОКЗ для робота Kawasaki FS020N известны и позволяют определить координаты сочленений, исходя из заданных линейных и угловых координат точки на фланце для установки схвата. Также примем, что координаты точки захвата объекта известны. По известным координатам точки захвата определяем координаты точки на фланце, предполагая, что осуществлен центральный захват и точка захвата находится на перпендикуляре, проведенном из точки на фланце к точке захвата.

Рассмотрим более подробно особенности решения прямой и обратной задач кинематики. Введем СК, связанную с трехпалой кистью таким образом, что ее центр располагается в точке  $O$  крепления кисти к манипулятору (рис. 2). Ось  $OZ_B$  базовой СК пересекает фланец рабочего органа в геометрическом центре. Ось  $OX_B$  находится в плоскости рабочей зоны второго пальца. Ось  $OY_B$  дополняет СК до правой тройки векторов. Каждая фаланга кисти имеет свою СК, такую, что ось  $OZ_{ij}$  ( $i = 0, 1$  — номер фаланги,  $j = 1, 2, 3$  — номер пальца) для нее совпада-

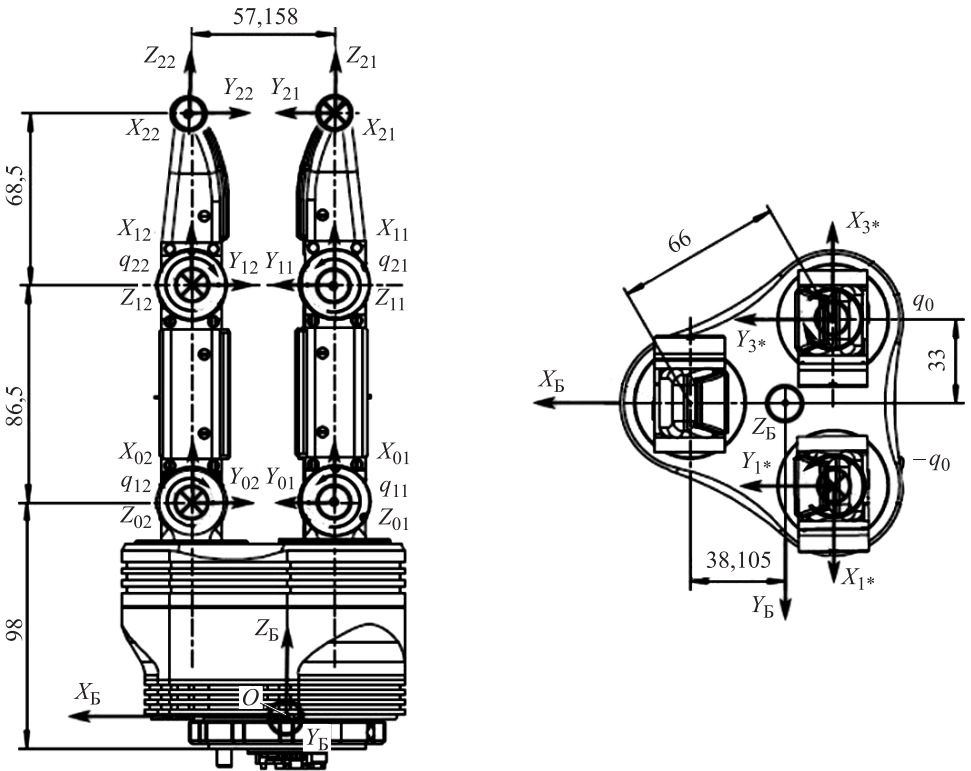


Рис. 2. СК трехпалой кисти

ет с положительным направлением поворота, а ее центр совпадает с геометрическим центром «сустава». С концом каждого пальца связана СК, ось  $OZ_{2j}$  которой направлена вдоль последней фаланги.

Координаты промышленного робота обозначим  $q_1, q_2, q_3$ . Угловые координаты сочленений кисти обозначим двойными индексами:  $q_{11}, q_{21}$  для первого пальца (см. рис. 1, звенья 4 и 7),  $q_{12}, q_{22}$  — для второго пальца (звенья 5 и 9) и  $q_{13}, q_{23}$  — для третьего (звенья 6 и 9). Углы поворота звеньев 4 и 5 вокруг осей  $OZ_j^*$  на рис. 2 (направлены от плоскости рисунка) обозначены координатами  $\pm q_0$ . Значения этих углов принимаются постоянными.

Решение прямой задачи кинематики для рассматриваемого примера находим из уравнения (2). При вычислениях учитывается, что СК точки крепления оснований звеньев 4, 5 и 6 смещены относительно СК звена 3 путем видоизменения формул расчета векторов  $\mathbf{l}_4, \mathbf{l}_5$  и  $\mathbf{l}_6$ :

$$\mathbf{l}_4 = \tau_{13.B} \mathbf{l}_{03.B} + \mathbf{l}_{13.03};$$

$$\mathbf{l}_5 = \tau_{11.B} \mathbf{l}_{01.B} + \mathbf{l}_{11.01};$$

$$\mathbf{l}_6 = \tau_{12.B} \mathbf{l}_{02.B} + \mathbf{l}_{12.02};$$



где  $\tau_{13.Б}$ ,  $\tau_{11.Б}$ ,  $\tau_{12.Б}$  — матрицы поворота СК  $(X_{13}, Y_{13}, Z_{13})$ ,  $(X_{11}, Y_{11}, Z_{11})$ ,  $(X_{12}, Y_{12}, Z_{12})$  относительно СК  $(X_Б, Y_Б, Z_Б)$ ;  $\mathbf{l}_{03.Б}$ ,  $\mathbf{l}_{01.Б}$ ,  $\mathbf{l}_{02.Б}$  — векторы, связывающие начало СК  $(X_Б, Y_Б, Z_Б)$  с началами СК  $(X_{03}, Y_{03}, Z_{03})$ ,  $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$ ,  $(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ ;  $\mathbf{l}_{13.03}$ ,  $\mathbf{l}_{11.01}$ ,  $\mathbf{l}_{12.02}$  — векторы, связывающие начала СК, отмеченных нижними индексами этих векторов.

В основе решения ОКЗ лежат соотношения для расчета угловых координат каждого из двух звеньев каждого из трех пальцев кисти. Будем считать заданными линейные координаты начала СК, связанной с последними звеньями пальцев, относительно СК, связанных с основаниями пальцев. Эти координаты являются компонентами некоторого вектора  $\mathbf{t}$ . Угловые координаты звеньев обозначим  $q_{1i}$  и  $q_{2i}$ . Для решения поставленной задачи рассмотрим треугольник на рис. 3, где  $t$  — длина отрезка, связывающего начала СК основания и последнего звена пальца;  $l_1$ ,  $l_2$  — длины отрезков, связывающие начала СК двух звеньев одного пальца.

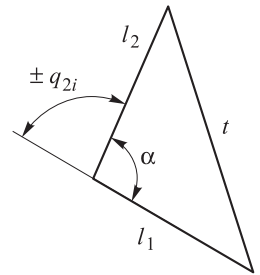


Рис. 3. Расчетная схема для определения угловых координат

По теореме косинусов  $\cos \alpha = (l_1^2 + l_2^2 - t^2) / (2l_1 l_2)$ , тогда  $q_{2i} = 180^\circ \pm \alpha$ .

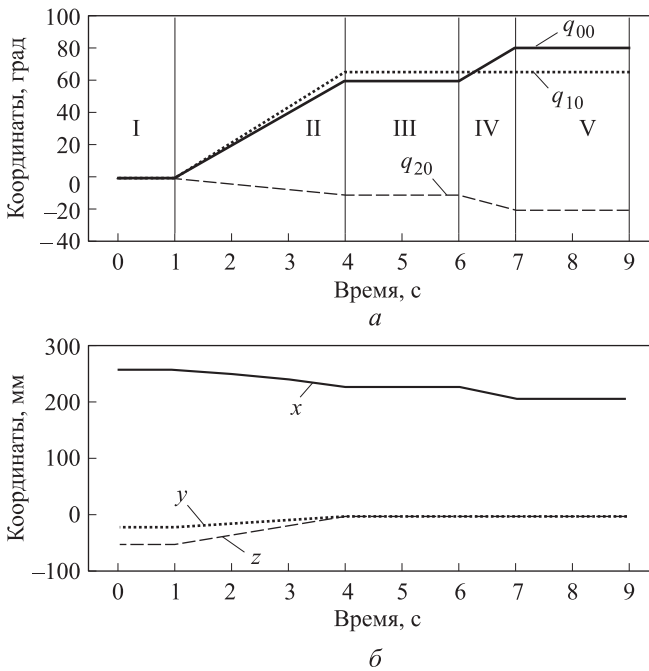


Рис. 4. Временные зависимости угловых координат поворота шарниров (а) и декартовых координат конца третьего пальца (б): I-V — временные интервалы

Движение обоих звеньев пальцев происходит в плоскости рис. 3. Нулевое значение координаты  $q_{1i}$  соответствует случаю, когда начала СК обоих звеньев расположены вдоль одной вертикальной прямой. С учетом этого координату  $q_{1i}$  находим из геометрических соотношений. Обозначим  $l_1 + l_2 \cos q_{2i} = a$ ,  $l_2 \sin q_{2i} = b$ .

Тогда можно записать

$$t_x = -a \sin q_1 - b \cos q_1;$$

$$t_y = -b \sin q_1 + a \cos q_1,$$

где  $t_x$ ,  $t_y$  — проекции вектора  $\mathbf{t}$ .



а



б



в

**Рис. 5.** Внешний вид пальцев трехпалой кисти

Из полученной системы уравнений находим  $\sin q_{1i}$ ,  $\cos q_{1i}$  и  $q_{1i}$ :

$$q_{1i} = \arctg \frac{\sin q_{1i}}{\cos q_{1i}}.$$

На рис. 4 представлена зависимость угловых координат сочленений третьего пальца кисти от декартовых координат конца данного пальца в базовой СК кисти. На временном интервале I палец находится в исходном положении (рис. 5, а). На интервале II палец переходит в такое положение, при котором его конец находится в точке, расположенной над центром базовой СК на заданном расстоянии (рис. 5, б). В этом положении он остается на протяжении временного интервала III. На интервале IV расстояние до базовой СК сокращается на 20 мм (рис. 5, в). В этом положении палец остается в течение временного интервала V.

**Заключение.** Для описания ИМ предлагается применять математический аппарат блочных матриц. Приведены уравнения кинематики ИМ, записанные с использованием блочных матриц, в аналитической и алгоритмической формах, а также пример манипуляционной системы, в состав которой входят манипулятор промышленного робота, оснащенный трехпалой кистью. Представлены конкретные результаты решения прямой и обратной задач кинематики для рассматриваемой кисти.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фу К., Гонсалес Р., Ли К. *Робототехника*. Москва, Мир, 1989, 624 с.
- [2] Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. *Системы управления манипуляционных роботов*. Москва, Наука, 1978, 416 с.
- [3] Лесков А.Г., Ющенко А.С. *Моделирование и анализ робототехнических систем*. Москва, Машиностроение, 1992. 80 с.
- [4] Шахинпур М. *Курс робототехники*. Москва, Мир, 1990, 527 с.

Статья поступила в редакцию 22.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лесков А.Г., Бажинова К.В., Морошкин С.Д., Феоктистова Е.В. Построение моделей кинематики исполнительных механизмов манипуляционных роботов с использованием блочных матриц. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/954.html>

**Лесков Алексей Григорьевич** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [agleskov@rambler.ru](mailto:agleskov@rambler.ru)

**Бажинова Ксения Владимировна** — студентка 6-го курса кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Морошкин Святослав Дмитриевич** — инженер лаборатории Ц-8 Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [svyatoslavdm@gmail.com](mailto:svyatoslavdm@gmail.com)

**Феоктистова Елена Владимировна** — студентка 6-го курса кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [feoktistovaev@mail.ru](mailto:feoktistovaev@mail.ru)