

**ОПИСАНИЕ КИНЕМАТИКИ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ
МЕТОДОМ БЛОЧНЫХ МАТРИЦ**А.Г. Лесков¹

agleskov@rambler.ru

К.В. Бажинова^{1,2}

bazhinova@bk.ru

Е.В. Селиверстова^{1,2}

feoktistovaev@mail.ru

¹ Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
пос. Орево, Московская обл., Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены вопросы описания кинематики многозвенных исполнительных механизмов антропоморфных роботов, способных выполнять многие задачи, возникающие в процессе трудовой деятельности человека, в том числе в экстремальных условиях (например, в открытом космосе, при работе с опасными объектами и др.). Предложен метод математического описания таких механизмов с использованием математического аппарата блочных матриц. Метод позволяет записывать громоздкие кинематические соотношения для многозвенного механизма антропоморфного робота в компактной форме. Формирование блочных матриц подчинено наглядным правилам, что делает предложенный подход удобным инструментом для вычислений на ЭВМ. Приведен пример, иллюстрирующий применение метода блочных матриц для описания кинематики робототехнической системы — антропоморфного робота-космонавта, перемещающегося в невесомости и связанного с неподвижным основанием многозвенным страховочным фалом

Ключевые слова

Антропоморфный робот, разветвленная кинематическая цепь, блочная матрица, задачи кинематики

Поступила в редакцию 26.03.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Назначение первых робототехнических систем — облегчение деятельности человека и улучшение условий его труда при выполнении простейших манипуляционных операций. В последнее время все более актуальной становится проблема расширения спектра выполняемых роботами операций. Одно из направлений решения этой задачи — разработка и использование антропоморфных роботов, кинематические схемы которых напоминают кинематическую схему тела человека.

Подобные роботы планируется использовать также в космической отрасли — на борту космической станции (КС) и во время внекорабельной деятельности. Например, при выполнении различных операций на КС космонавты не могут обойтись без помощников, в качестве которых в настоящее время выступают другие члены экипажа. Поэтому применение антропоморфных роботов-помощников существенно повысит эффективность использования времени всех космонавтов и

уменьшит время их пребывания в открытом космосе. Для решения этих задач разработаны два антропоморфных робота: Robonaut-2 [1] (совместная разработка NASA и GM) и SAR-400 [2] (НПО «Андроидная техника» по заказу корпорации «Роскосмос»).

Современные антропоморфные роботы имеют в своем составе многозвенные механизмы, реализующие функции рук, ног, туловища и других частей тела человека. При этом роботы могут располагаться на подвижном основании.

Запись уравнений кинематики подобных механизмов в явной форме [3–5] осложнена из-за высокой размерности. Это обстоятельство делает актуальной разработку и применение специальных подходов, которые позволят записывать уравнения в компактной форме. Одним из примеров работ, выполненных в этом направлении, является [6].

Другим подходом к описанию многозвенных механизмов является метод, использующий для записи кинематических соотношений блочные матрицы. Метод блочных матриц для описания многозвенных механизмов с простой кинематической цепью впервые был применен в [7], в последующем метод получил развитие в направлении описания кинематики механизмов с разветвленной структурой [8]. Достоинства метода блочных матриц — компактность получаемых уравнений и достаточная степень общности, при которой в каждом конкретном случае не требуется дополнительная алгоритмическая проработка.

В настоящей работе метод блочных матриц развит в направлении описания кинематики более сложных механизмов, в том числе исполнительных механизмов антропоморфных роботов.

Описание исполнительного механизма с простой (линейной) кинематической цепью. Полагаем, что в составе исполнительного механизма имеется n звеньев. Они связаны между собой попарно и нумеруются, начиная от основания, с которым связана инерциальная система координат (СК) — $СК_0$. При этом звенья с большими номерами находятся дальше от основания, чем звенья с меньшими номерами (рис. 1).

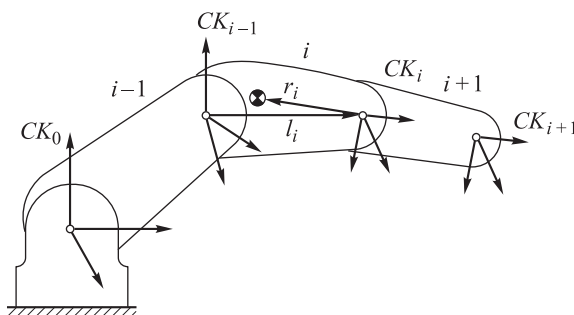


Рис. 1. Пример механизма с простой кинематической цепью

Матрицы поворота СК смежных звеньев $\tau_{i-1,i} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) определяются стандартными процедурами, предполагающими их представление в виде

произведений трех матриц элементарных поворотов последовательно вокруг каждой координатной оси.

Параметры звеньев задаются в СК, связанной с соответствующими звеньями. К параметрам звеньев относятся векторы длин звеньев $l_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, равные смещениям СК_i относительно СК_{i-1}, и вектор координат центров масс звеньев $r_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ (см. рис. 1).

Запись кинематических соотношений для механизмов с простой кинематической цепью с использованием блочных матриц. Для механизмов с простой кинематической цепью, которая состоит из n звеньев, последовательно связанных между собой кинематическими парами 5-го класса, векторы $t_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ смещений СК звеньев относительно СК₀, заданные в СК этих же звеньев, определяются по формуле [9]:

$$t_i = \sum_{j=1}^i \tau_{i,j} l_j, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где $\tau_{i,j} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ — матрицы поворота системы координат СК_j относительно системы координат СК_i, которые определяются из соотношения

$$\tau_{i,j} = \left(\prod_{k=j}^{i-1} \tau_{k,k+1} \right)^T. \quad (2)$$

В методе блочных матриц [8] уравнения (1) записываются так:

$$t = \tau l, \quad (3)$$

где $t \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$, $l \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ — блочные векторы с элементами t_i и l_i ; $\tau \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$ — блочная нижняя треугольная матрица, недиагональными элементами которой выступают матрицы $\tau_{i,j}$, а элементами главной блочной диагонали — единичные матрицы $\tau_{i,i} = E \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Уравнения (3) в отличие от уравнений (1) записываются в «безындексной» форме, что делает их более компактными. Уравнения (3) справедливы для механизмов с произвольным числом звеньев. В составе исполнительного механизма могут присутствовать и вращательные, и поступательные кинематические пары в произвольной комбинации.

Центральное место в методе блочных матриц занимает алгоритм определения матрицы τ в виде

$$\tau = \sum_{i=0}^{n-1} Y^i, \quad (4)$$

где $Y \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$ — блочная матрица, формируемая по правилу $Y_{ij} = \tau_{i,j}$, где $\tau_{i,j}$ — матрицы поворота СК смежных звеньев. Индексы i и j соответствуют номерам блочной строки и блочного столбца матрицы Y . Из определения матрицы Y следует, что для механизмов с неразветвленной структурой ненулевыми блоками матрицы Y являются только элементы первой блочной поддиагонали.

С помощью матрицы τ рассчитываются блочные векторы линейных $V \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ и угловых $\omega \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ скоростей звеньев механизма, составленных из векторов линейных и угловых скоростей каждого звена [10, 11].

Блочный вектор угловых скоростей звеньев механизма определяется из соотношения

$$\omega = \tau \nu \sigma \dot{q}, \quad (5)$$

где $\nu \in \mathbb{R}^{3n \times n}$ — блочная диагональная матрица, ненулевые элементы которой составлены из n (3×1) векторов ν_i проекций осей Z СК $_{i-1}$ на оси СК $_i$; $\dot{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ — вектор скоростей сочленений исполнительного механизма; $\sigma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица индикаторов типов кинематических пар сочленений звеньев. Если i -е сочленение — вращательная кинематическая пара, то $\sigma_i = 1$, если i -е сочленение — поступательная кинематическая пара, то $\sigma_i = 0$.

Блочный вектор линейных скоростей звеньев механизма определяется из соотношения

$$V = -(\lambda(r) + \tau \lambda(l)) \tau \nu \sigma \dot{q} + \tau \nu (E - \sigma) \dot{q}, \quad (6)$$

где $\lambda(\bullet) \in \mathbb{R}^{3n \times 3n}$ — блочная матрица диагонального вида, ненулевые элементы которой — матрицы размера (3×3), составленные из компонент векторов r_i и l_i ; $r \in \mathbb{R}^{3n \times 1}$ — блочный вектор координат центров масс звеньев с элементами r_i ; $E \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — единичная матрица. Отметим, что элементы блочных векторов ω и V записываются в проекциях на оси связанных со звеньями СК.

Описание антропоморфного робота. Полагается, что в составе антропоморфного робота имеется n звеньев. Звенья связаны между собой попарно и нумеруются, начиная от основания, с которым связана СК $_0$. Звенья с большими номерами находятся дальше от основания, чем звенья с меньшими номерами. Звенья каждого из ответвлений кинематической цепи нумеруются последовательно, начиная от звена, прикрепленного к точке ветвления. При рассмотрении первого ответвления номера его звеньев начинаются с номера, на единицу большего, чем номер корневого звена; номера звеньев следующего ответвления начинаются с номера, на единицу большего, чем номер последнего звена предыдущего ответвления. Порядок рассмотрения ответвлений произвольный. Геометрические и инерционные параметры звеньев аналогичны параметрам звеньев механизма с линейной структурой.

В качестве примера рассматривается антропоморфный робот-космонавт, свободно перемещающийся в невесомости. Робот связан с основанием посредством фала, который представляется в виде трехзвенного механизма. С местом крепления фала связана СК $_0$. Нумерация звеньев робота приведена на рис. 2.

В состав антропоморфного робота (см. рис. 2) входят 25 звеньев, пронумерованных от основания. Звенья с номерами от 1 до 3 — фал, который связывает робот с неподвижным основанием, расположенным на корпусе МКС. Звенья 4, 6, 12, 18 и 22 — фрагменты туловища робота. Они используются для описания

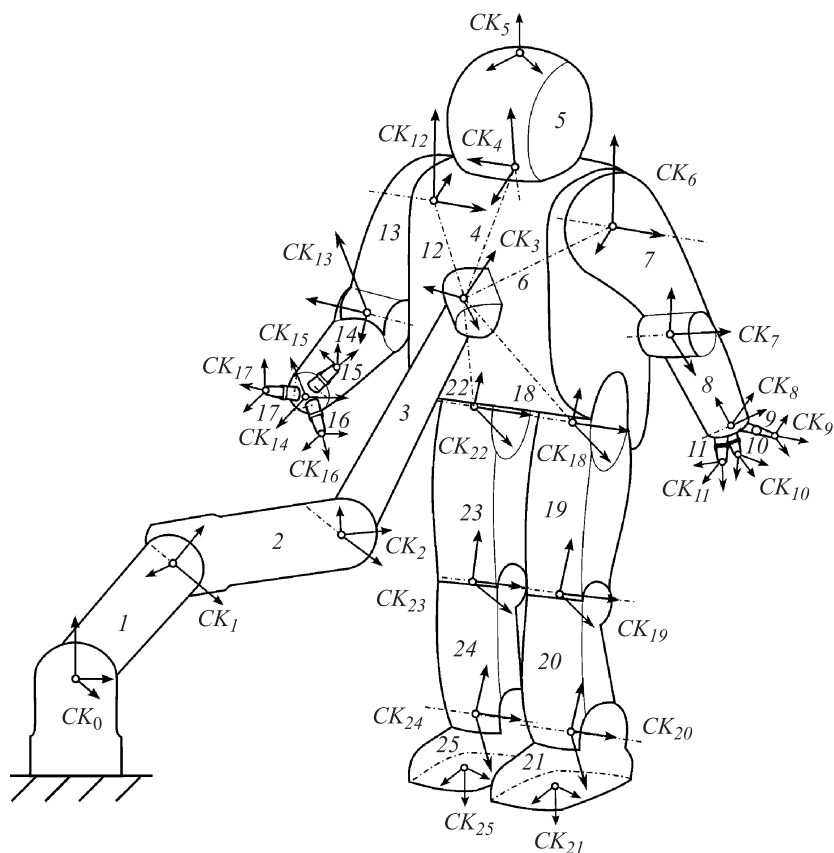


Рис. 2. Механизм антропоморфного робота-космонавта

связи головы, рук и ног робота с точкой ветвления, расположенной на туловище. Звено 5 — голова робота. Звенья 7, 8, 13 и 14 — руки робота. Звенья 9, 10, 11, 15, 16, 17 — пальцы кистей. Звенья 19, 20, 21, 23, 24 и 25 — ноги робота.

Запись кинематических соотношений для механизма антропоморфного робота. Соотношения метода блочных матриц можно достаточно просто распространить на случаи исполнительных механизмов с разветвленной древовидной структурой [8]. Такую структуру имеет и механизм антропоморфного робота.

Для механизмов такого типа вид уравнений (3), (4), (5) и (6) по сравнению с механизмами с линейной кинематической схемой не изменяется. Изменяется лишь структура матриц Y и τ . Правила построения этих матриц следующие.

В матрицах Y аналогично случаю механизмов с линейной кинематической цепью на место элементов $Y_{i,j}$ помещаются матрицы $\tau_{i,j}$, связывающие СК смежных звеньев. Остальные блочные элементы этой матрицы полагаются равными нулевым матрицам $Z \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Матрица τ рассчитывается по формуле (4). Верхний предел суммы в (4) полагается равным числу звеньев наиболее длинной ветви «дерева» кинематической схемы исполнительного механизма.

Пользуясь предложенной методикой, составим блочные матрицы Y и τ антропоморфного робота (см. рис. 2). Число блоков размера (3×3) в этих матрицах составляет 25×25 — в соответствии с общим числом звеньев робота. Полный размер этих матриц составляет (75×75) .

Сначала составляем матрицу Y (рис. 3). Порядок формирования этой матрицы следующий.

1. Формируем блоки (отдельные элементы конструкции), которые могут быть представлены как механизмы с линейной структурой. Сочленениям фала соответствуют матрицы поворота $\tau_{2,1}$ и $\tau_{3,2}$. Шее и голове робота соответствуют матрицы $\tau_{4,3}$ и $\tau_{5,4}$. Плечу и предплечью левой руки соответствуют матрицы поворота $\tau_{7,6}$ и $\tau_{8,7}$, то же для правой руки — $\tau_{13,12}$ и $\tau_{14,13}$. Бедру, голени и стопе левой ноги соответствуют матрицы поворота $\tau_{19,18}$, $\tau_{20,19}$ и $\tau_{21,20}$, то же для правой ноги — $\tau_{23,22}$, $\tau_{24,23}$ и $\tau_{25,24}$.

2. Формируем блоки в местах соединения отдельных элементов — точках ветвления. Местам крепления рук и ног робота к туловищу соответствуют матрицы $\tau_{6,3}$, $\tau_{12,3}$, $\tau_{18,3}$ и $\tau_{22,3}$. Запястью левой руки, к которому крепятся пальцы «кисти», соответствуют матрицы $\tau_{9,8}$, $\tau_{10,8}$ и $\tau_{11,8}$, запястью правой руки — матрицы $\tau_{15,14}$, $\tau_{16,14}$ и $\tau_{17,14}$.

3. Матрицы поворота $\tau_{i,j}$, соответствующие блокам отдельных элементов конструкции с линейной структурой и блокам в местах соединения отдельных элементов, размещаем на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы Y . На рис. 3 для удобства восприятия их расположение отмечено символом « \times ». Все прочие элементы матрицы Y заполняем нулевыми матрицами $Z \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

Теперь формируем матрицу τ (рис. 4). Формально это можно сделать по формуле (4). При этом следует принять $n = 7$. Однако эту операцию можно выполнить, не прибегая к процедуре перемножения, а применяя более простые приемы. Для этого выполняем следующие действия.

1. Переносим ненулевые элементы матриц Y в матрицу τ . На рис. 4 для удобства восприятия элементы, отличные от нулевых матриц, обозначены символом « \times ».

2. Расставляем единичные матрицы $E \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ на месте главной блочной диагонали.

3. Формируем блоки, связывающие каждое звено с $СК_0$. Этим блокам соответствует матрица поворота $\tau_{i,j}$ $СК_i$ относительно $СК_j$, если j -е звено связывает i -е звено с инерциальной СК. Эти матрицы рассчитываются из соотношения (2). Индексы i и j матрицы $\tau_{i,j}$ соответствуют номерам строки и столбца ячейки матрицы τ , в которую помещается матрица $\tau_{i,j}$. Например, в строке с номером 17 будут размещены матрицы $\tau_{17,1}$, $\tau_{17,2}$, $\tau_{17,3}$, $\tau_{17,12}$ и $\tau_{17,13}$, а в строке с номером 25 — матрицы $\tau_{25,1}$, $\tau_{25,2}$, $\tau_{25,3}$, $\tau_{25,22}$ и $\tau_{25,23}$. На рис. 4 для удобства восприятия эти блоки обозначены символом « \bullet ».

Сформированная таким образом матрица τ используется в расчетах линейных координат звеньев (2), а также линейных (6) и угловых скоростей звеньев (5) механизмов антропоморфных роботов.

Выводы. 1. Предложен подход к описанию кинематики многозвенных механизмов антропоморфных роботов с использованием математического аппарата блочных матриц.

2. Механизм робота представляется состоящим из сколь угодно большого числа звеньев, связанных между собой кинематическими парами 5-го класса. Звенья могут быть связаны так, что образуют разветвленные кинематические цепи.

3. Применение математического аппарата блочных матриц позволяет записывать кинематические соотношения в компактной форме. Формирование блочных матриц подчинено простым и наглядным правилам, что делает предложенный подход удобным инструментом при программировании вычислений на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Guizzo E.* How Robonaut 2 will help astronauts in space // IEEE Spectrum: веб-сайт. URL: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/how-robotaut-2-will-help-astronauts-in-space> (дата обращения: 10.03.2018).
2. *Человекоподобный робот-андроид SAR-400:* веб сайт. URL: http://www.robotblog.ru/news/chelovekopodobnyj_robot_android_sar_400/2014-07-31-1505 (дата обращения: 10.03.2018).
3. *Salisbury J., Roth B.* Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands // J. Mech., Trans., Autom. 1983. Vol. 105. No. 1. P. 35–41. DOI: 10.1115/1.3267342
4. *Фу К., Гонсалес Р., Ли К.* Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
5. *Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.* Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 400 с.
6. *Ковальчук А.К., Семенов С.Е., Кузнецов А.К. и др.* Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-треножника // Инженерный вестник. 2013. № 10.
7. *Лесков А.Г., Медведев В.С.* Анализ динамики и синтез управления движением исполнительных органов роботов-манипуляторов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1974. № 6. С. 80–88.
8. *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. № 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-954
9. *Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В.* Кинематика и динамика исполнительных механизмов манипуляционных роботов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 104 с.
10. *Медведев В.С., Лесков А.Г., Ющенко А.С.* Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978. 416 с.
11. *Лесков А.Г., Ющенко А.С.* Моделирование и анализ робототехнических систем. М.: Машиностроение, 1992. 80 с.

Лесков Алексей Григорьевич — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, директор Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево).

Бажинова Ксения Владимировна — инженер Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево); аспирантка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Селиверстова Елена Владимировна — инженер Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 141801, Московская обл., Дмитровский р-н, пос. Орево); аспирантка кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Описание кинематики антропоморфных роботов методом блочных матриц // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 102–111. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-102-111

KINEMATIC DESCRIPTION OF HUMANOID ROBOTS USING METHOD OF BLOCK MATRICES

A.G. Leskov¹

agleskov@rambler.ru

K.V. Bazhinova^{1,2}

bazhinova@bk.ru

E.V. Seliverstova^{1,2}

feoktistovaev@mail.ru

¹ Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University,
Orevo, Moscow Region, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article is dedicated to kinematic description of complex humanoid robots designed for carrying out multiple tasks that people face during their regular working process, along with tasks connected with dangerous conditions (work in the outer space, dealing with hazardous objects). The method of mathematical description of those complex machines via mathematical apparatus of block matrices was suggested. The approach allows us to describe complex robots via developing kinematical equations in a more compact form. The process of block matrices' forming follows evident rules, which makes the method a convenient tool for developing the computer programs for calculations. To illustrate the practical application of the approach, mathematical apparatus of block matrices was used in order to describe the kinematics of humanoid robot-astronaut moving in conditions of zero gravity being attached to stationary basis via multilink umbilical cable

Keywords

Anthropomorphic robot, branched kinematic chain, block matrix, kinematic tasks

Received 26.03.2018

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Guizzo E. How Robonaut 2 will help astronauts in space. IEEE Spectrum: website. Available at: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/how-robot-2-will-help-astronauts-in-space> (accessed: 10.03.2018).
- [2] Chelovekopodobny robot-android SAR-400: website. Available at: http://www.robotblog.ru/news/chelovekopodobnyj_robot_android_sar_400/2014-07-31-1505 (accessed: 10.03.2018).
- [3] Salisbury J., Roth B. Kinematic and force analysis of articulated mechanical hands. *J. Mech., Trans., Autom.*, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 35–41. DOI: 10.1115/1.3267342
- [4] Fu K.S., González R.C., Lee C.S.G. Robotics: control, sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill, 1987. 580 p.
- [5] Zenkevich S.L., Yushchenko A.S. Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami [Robot control. Fundamentals of manipulating robot control]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 400 p.
- [6] Koval'chuk A.K., Semenov S.E., Kuznetsov A.K., et al. Choice of the kinematic structure and study on dynamics of treelike actuating mechanism of tripod robot. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2013, no. 10.
- [7] Leskov A.G., Medvedev V.S. Dynamics analysis and motion control synthesis of manipulating robot executives. *Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1974, no. 6, pp. 80–88 (in Russ.).
- [8] Leskov A.G., Bazhinova K.V., Moroshkin S.D., Feoktistova E.V. Modeling of robotic arms kinematics by means of block matrixes. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 9 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-954
- [9] Leskov A.G., Bazhinova K.V., Seliverstova E.V. Kinematika i dinamika ispolnitel'nykh mekhanizmov manipulyatsionnykh robotov [Kinematics and dynamics of manipulating robot actuators]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 104 p.
- [10] Medvedev V.S., Leskov A.G., Yushchenko A.S. Sistemy upravleniya manipulyatsionnykh robotov [Control systems of manipulating robots]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 416 p.
- [11] Leskov A.G., Yushchenko A.S. Modelirovanie i analiz robototekhnicheskikh system [Simulation and analysis of robotic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 80 p.

Leskov A.G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation).

Bazhinova K.V. — engineer, Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation); post-graduate student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Seliverstova E.V. — engineer, Dmitrov Branch of Bauman Moscow State Technical University (Orevo, Moscow Region, 141801 Russian Federation); post-graduate student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Leskov A.G., Bazhinova K.V., Seliverstova E.V. Kinematic Description of Humanoid Robots using Method of Block Matrices. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 102–111 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-102-111