

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДРЕВОВИДНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ШЕСТИНОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА

Е.Е. Акылбеков

e.akyzbekov@bk.ru

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

---

### Аннотация

Предложена кинематическая схема древовидного исполнительного механизма шестиногого шагающего робота. Рассмотрены математические модели кинематики и динамики его исполнительного механизма. Представлены значения модифицированных параметров Денавита — Хартенберга, матрицы достижимости звеньев исполнительного механизма и вектора  $Z$ , характеризующий пространственное расположение осей вращения кинематических пар. Уравнения динамики получены с использованием принципа Д'Аламбера. Представлены результаты исследования динамики исполнительного механизма шестиногого шагающего робота. 3D-модель исполнительного механизма такого робота разработана с помощью программного комплекса SolidWorks, а с помощью MATLAB построены зависимости моментов и мощностей в сочленениях от времени.

### Ключевые слова

Шестиногие шагающие роботы, синтез кинематической структуры, модифицированные системы координат Денавита — Хартенберга, матрица достижимости, уравнение динамики исполнительного механизма шестиногого шагающего робота, математическое моделирование

Поступила в редакцию 12.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

В настоящее время большое внимание уделяется увеличению производительности труда и повышению эффективности выполняемых работ в сферах деятельности, связанных с перемещением грузов на большие расстояния в условиях низкой проходимости и с минимальным участием человека. Такие сложные задачи возникают при транспортировании грузов специального назначения и при ликвидации последствий техногенных катастроф.

Большинство существующих разработок мобильных роботов представляют собой самоходное шасси (гусеничное или колесное) с манипулятором, средствами «очувствления» или другим функциональным оборудованием. При этом в большинстве случаев управление роботом осуществляется посредством кабеля или с помощью радиоэлектронной связи, что ограничивает применение таких машин. В этой связи ведутся активные работы, посвященные созданию модели шагающего робота, способного решить обозначенные выше задачи.

Шагающие роботы обладают высокой проходимостью в условиях пересеченной местности, завалах, зданиях и различных сооружениях, также характеризуются отсутствием пробуксовки. Данные роботы в процессе движения используют для опоры малую площадь в дискретных точках местности, что делает данный вид транспорта эффективным в условиях отсутствия непрерывной колеи, наличия на дороге камней и кочек.

Для решения поставленной задачи необходимо [1]:

- 1) решить проблему управления ходьбой;

- 2) разработать конструкции исполнительного механизма (ИМ) с использованием оригинальных решений;
- 3) создать систему «очувствления», ориентации и навигации;
- 4) разработать систему взаимосвязанных приводов;
- 5) создать систему управления и разработать алгоритмы управления;
- 6) выбрать источники питания с высокой удельной мощностью.

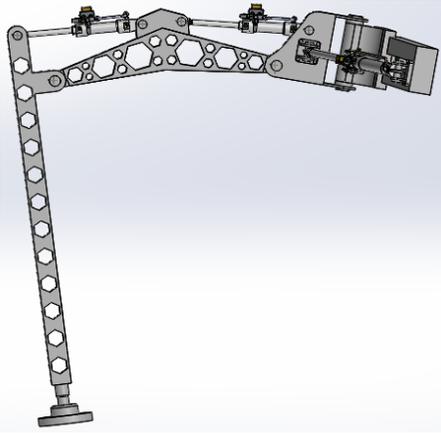


Рис. 1. Отдельная нога исследуемого робота

В МГТУ им Н.Э. Баумана ведутся научные исследования, направленные на создание шестиногих шагающих роботов. Одной из первоочередных задач при создании таких роботов является проектирование их ИМ с электрогидравлическим следящим приводом (ЭГСП). Рассмотрим кинематическую схему древовидного ИМ шестиногого шагающего робота [1, 2]. Каждая конечности обладает тремя степенями подвижности (рис. 1). В соответствии с правилами построения модифицированной системы координаты (СК) Денавита—Хартенберга. Получены численные значения параметров кинематической

схемы для основных и вспомогательных СК, которые представлены соответственно.

Предлагаемый метод построения модифицированной СК Денавита—Хартенберга позволяет определить значения параметров основных и вспомогательных СК древовидного ИМ шестиногого шагающего робота. Значения параметров Денавита—Хартенберга для основных и вспомогательных систем координаты ИМ шестиногого шагающего робота представлены в [1, 2].

**Матрица достижимости ИМ шестиногого шагающего робота.** Матрица достижимости для ИМ шестиногого шагающего робота отвечает следующим условиям: каждый элемент  $d_{ij} = 1$ , если звено  $i$  достижимо из звено  $j$ , и  $d_{ij} = 0$ , если звено  $i$  не достижимо из звена  $j$ . Древовидная кинематическая структура также может быть описана с помощью матрицы достижимости  $D$ , определяющей порядок следования звеньев исполнительного механизма друг относительно друга [1, 2].

Вектор  $\vec{Z}$ , который определяет последовательность ортов осей  $Z$ , соответствующих сочленениям, соединяющим звенья ИМ робота с четырьмя звеньями-отцами, подробно описаны в [1, 2]. Таким образом, определены все параметры, характеризующие проектируемую древовидную кинематическую структуру ИМ шестиногого шагающего робота.

Методам математического описания кинематики и динамики ИМ роботов посвящена обширная литература, например [3]. Одним из широко применяемых подходов является использование при записи кинематических соотношений матриц однородных преобразований размера  $(4 \times 4)$ . Такой подход позволяет наиболее удобной форме составить уравнения благодаря единообразному

описанию преобразований перемещений в поступательных и вращательных кинематических парах. Данный метод базируется на теории графов, преобразованиях Денавита—Хартенберга и теории матриц [4].

Рассмотрим порядок назначения СК связанных со звеньями древесного ИМ [5]. С каждым звеном ИМ связывается столько СК, сколько звеньев-сыноней оно имеет. Одна из СК, связанных со звеном, назначается за основную, остальные являются вспомогательными [1, 2]. Запишем кинематические и динамические зависимости для всех звеньев ИМ с древесной КС, а также выражения, определяющие ускорения центров масс звеньев [6, 7].

Проектирование ИМ. 3D-модель ИМ шестиного шагающего робота с ЭГСП создана с помощью SolidWorks. Это программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленных предприятий на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. На начальном этапе проектирования создана 3D-модель в виде стержней (рис. 2), чтобы получить расчет значений масс, координат центров масс, тензоров инерции. В соответствии с КС разработана 3D-модель ИМ шестиного шагающего робота с ЭГСП (рис. 3) [8].

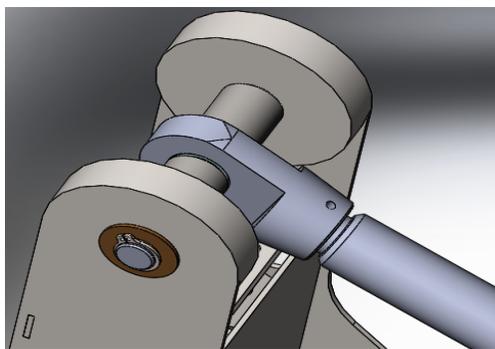


Рис. 2. Стержень крепления гидроцилиндра к 9-му звену

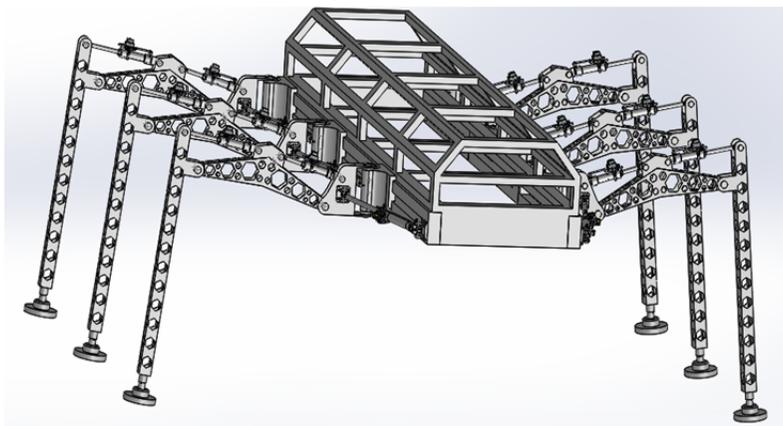


Рис. 3. Общий вид 3D-модели ИМ шестиного шагающего робота с ЭГСП

Расчет значений масс, координат центров масс, тензоров инерции. Сначала определим некоторые параметры звеньев:

- 1) массу;
- 2) координаты центров масс звеньев, связанных с основными СК этих звеньев;
- 3) моменты инерции звеньев относительно СК, оси которых параллельны

осям основной связанной СК этих звеньев, а начало координат находится в центре масс звеньев;

4) координаты точек приложения внешних сил к звеньям ИМ в связанных основных СК этих звеньев;

5) координаты точек приложения сил реакции к звеньям механизма в связанных основных СК этих звеньев. Силы реакции опоры приложены в двух точках на левой и правой стопах, которые находятся на осевой линии стопы на мысках. Точки опоры обозначены синими треугольниками;

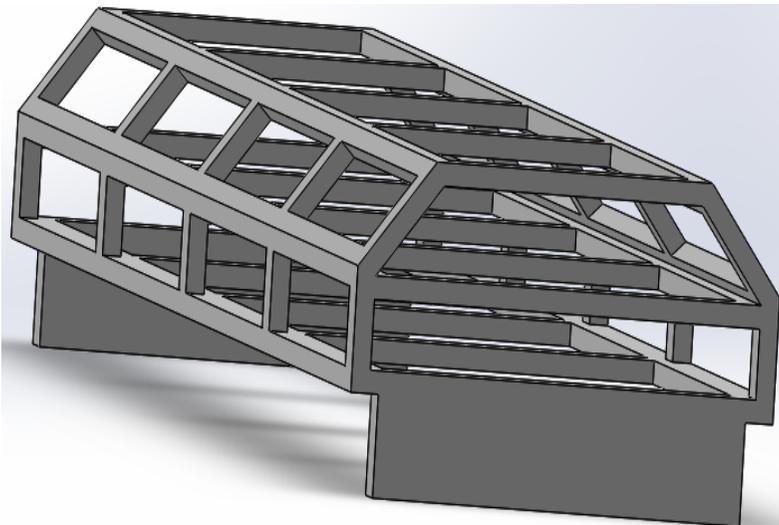
Отметим, что в массу звена 6 включена масса полезной нагрузки равная 120 кг.

Массо-инерционные параметры ИМ шестиногого шагающего робота были получены по результатам 3D-моделирования в программном комплексе SolidWorks. На рис. 4–7 представлены 3D-модели ИМ, а в таблицах 1–4 — соответствующие им массо-инерционные параметры ИМ шестиногого шагающего робота [8].

Таблица 1

**Массо-инерционные параметры звена 6**

Масса, кг	$M = 273,96875268$
Координаты центра масс, м	$X = 0,00000000$
	$Y = 0,12605061$
	$Z = -2,45700000$
Тензоры инерции, кг×м <sup>2</sup>	$I_x = 802,18663871$
	$I_y = 839,18240432$
	$I_z = 59,06744677$
	$I_{xy} = 0,00000000$
	$I_{xz} = 0,00000000$
	$I_{yz} = 0,00000000$



**Рис. 4.** Звено 6: общий вид

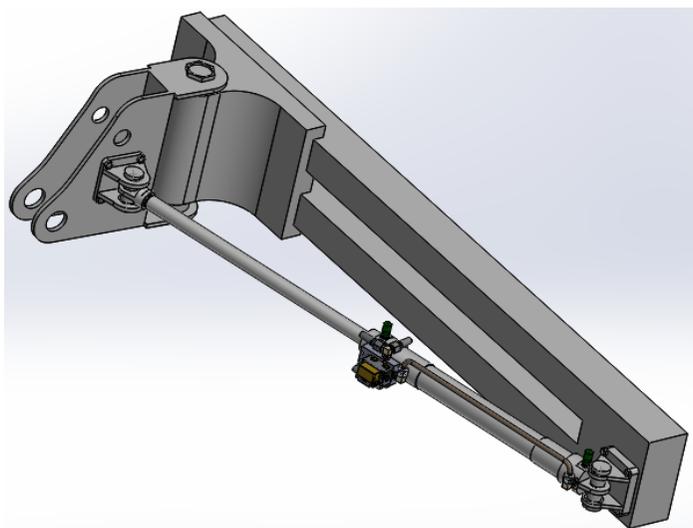


Рис. 5. Звено 7: общий вид

Таблица 2

Массо-инерционные параметры звена 7

Масса, кг	$M = 52,32386971$
Координаты центра масс, м	$X = -0,06282376$
	$Y = 0,45634786$
	$Z = -0,30080411$
Тензоры инерции, кг×м <sup>2</sup>	$I_x = 13,49338501$
	$I_y = 1,05839814$
	$I_z = 12,91464416$
	$I_{xy} = 0,06913661$
	$I_{xz} = 0,06317457$
	$I_{yz} = -0,32067097$

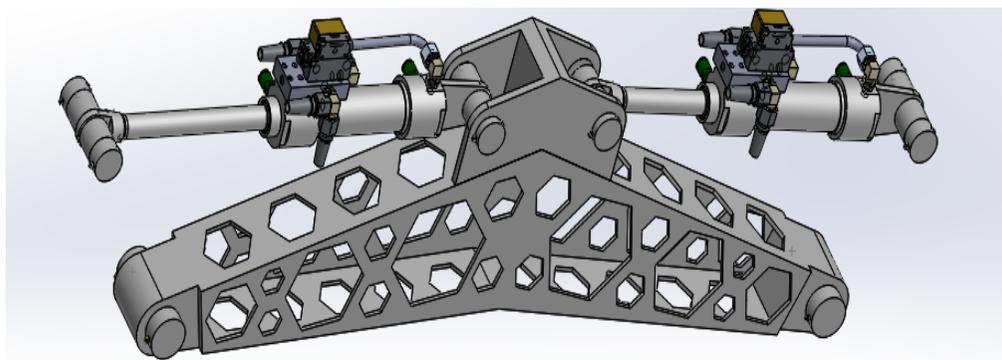


Рис. 6. Звено 8: общий вид

Таблица 3

## Массо-инерционные параметры звена 8

Масса, кг	$M = 15,77239660$
Координаты центра масс, м	$X = -0,55035444$
	$Y = 0,09995378$
	$Z = 0,05859106$
Тензоры инерции, кг×м <sup>2</sup>	$I_x = 0,20675041$
	$I_y = 2,04283198$
	$I_z = 2,23353723$
	$I_{xy} = 0,42230795$
	$I_{xz} = -0,00027089$
	$I_{yz} = 0,00010048$

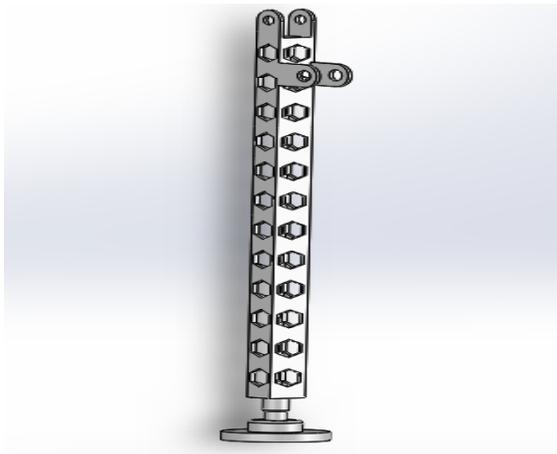


Рис. 7. Звено 9: общий вид

Таблица 4

## Массо-инерционные параметры звена 9

Масса, кг	$M = 18,59672067$
Координаты центра масс, м	$X = -0,64066769$
	$Y = -0,00538784$
	$Z = -0,00214568$
Тензоры инерции, кг×м <sup>2</sup>	$I_x = 0,07986181$
	$I_y = 7,59254192$
	$I_z = 7,59853861$
	$I_{xy} = 0,08200509$
	$I_{xz} = 0,01118603$
	$I_{yz} = 0,00009586$

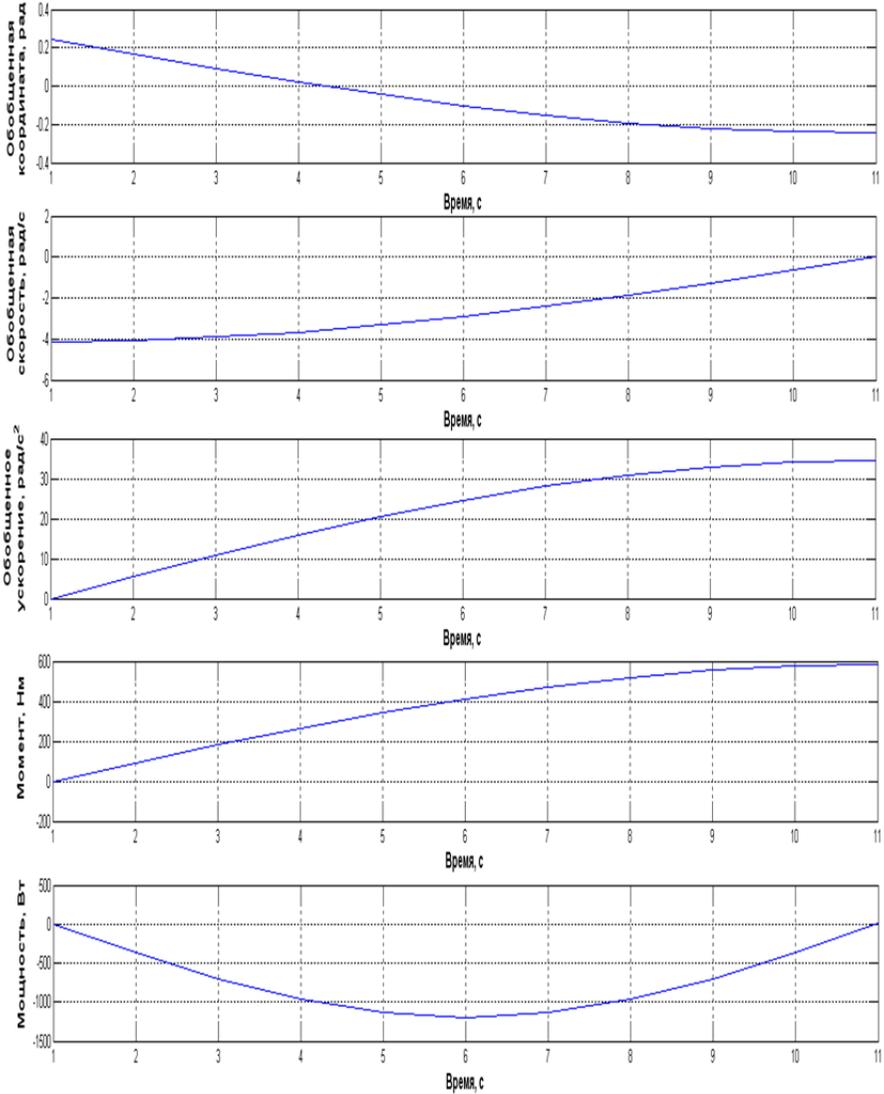
**Выбор закона управления.** Рассмотрим законы изменения обобщенных координат в сочленениях. Запишем законы и диапазоны изменения обобщенных координат для сочленений, оснащенных приводами [8, 9]:

$$q_9(t) = q_{13}(t) = -45^\circ \sin(90t); \tag{1}$$

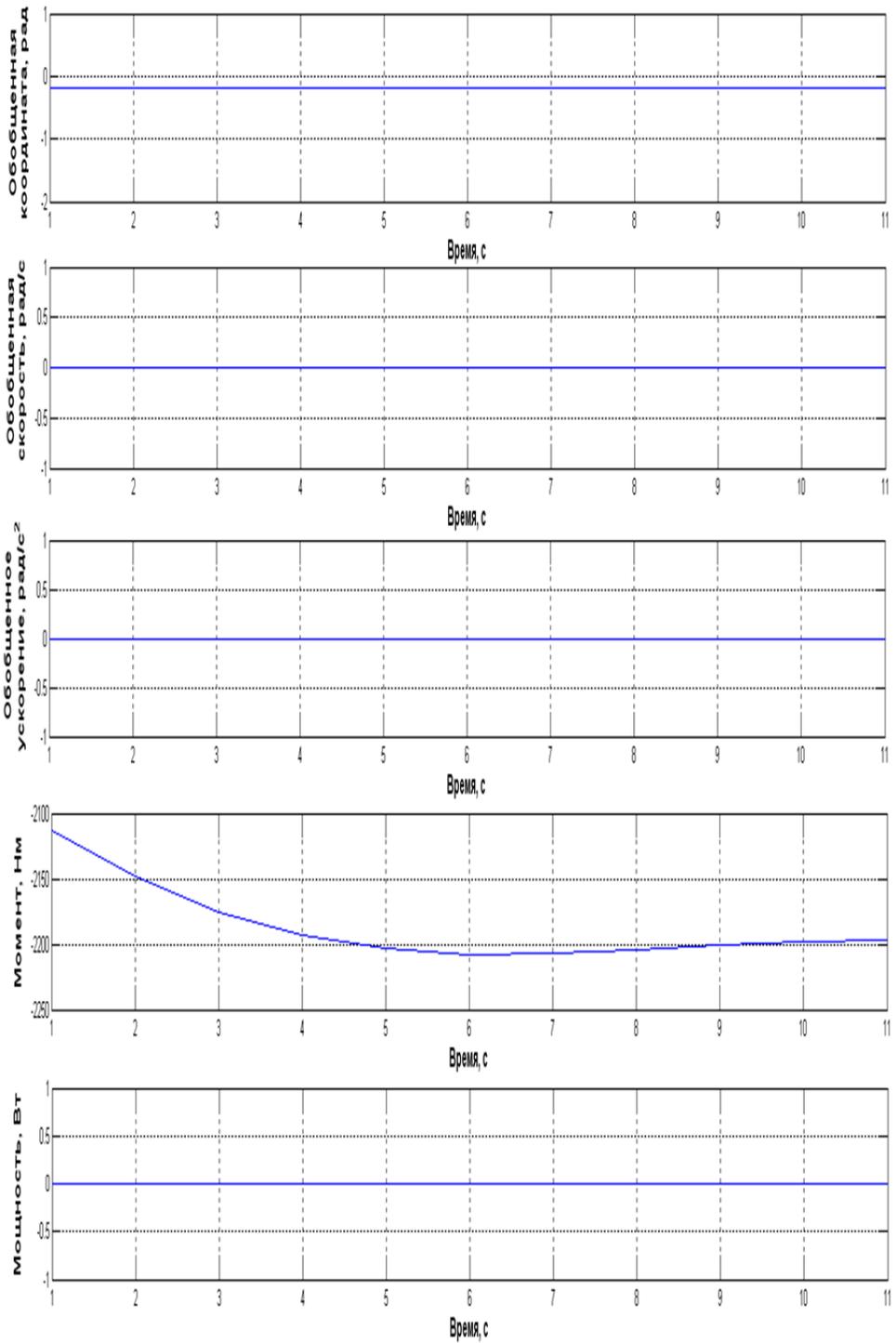
$$q_{10}(t) = q_{14}(t) = 45^\circ \sin(90t). \tag{2}$$

**Результаты исследований.** С помощью комплекса MATLAB полученные законы движения были встроены в пусковой файл программы исследования кинематики и динамики ИМ. На рис. 8–13 представлены реализованные зависимости изменения обобщенных координат от времени, полученные ранее.

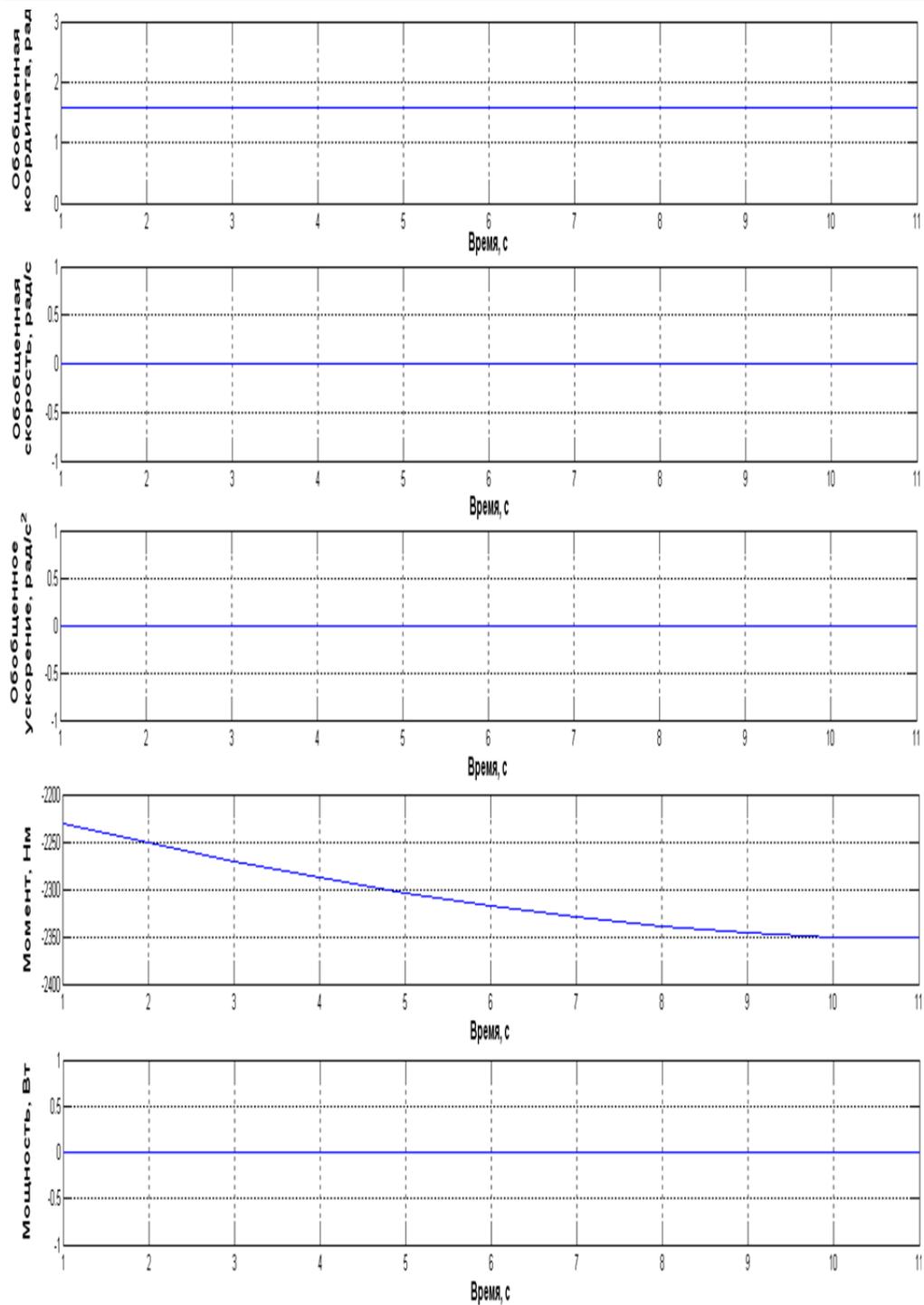
Предложенный в работах [7–10] метод расчета энергетических параметров приводов позволяет получить их значения в зависимости от времени для всех сочленений ИМ шестиногого шагающего робота, которые представлены на рис. 8–13.



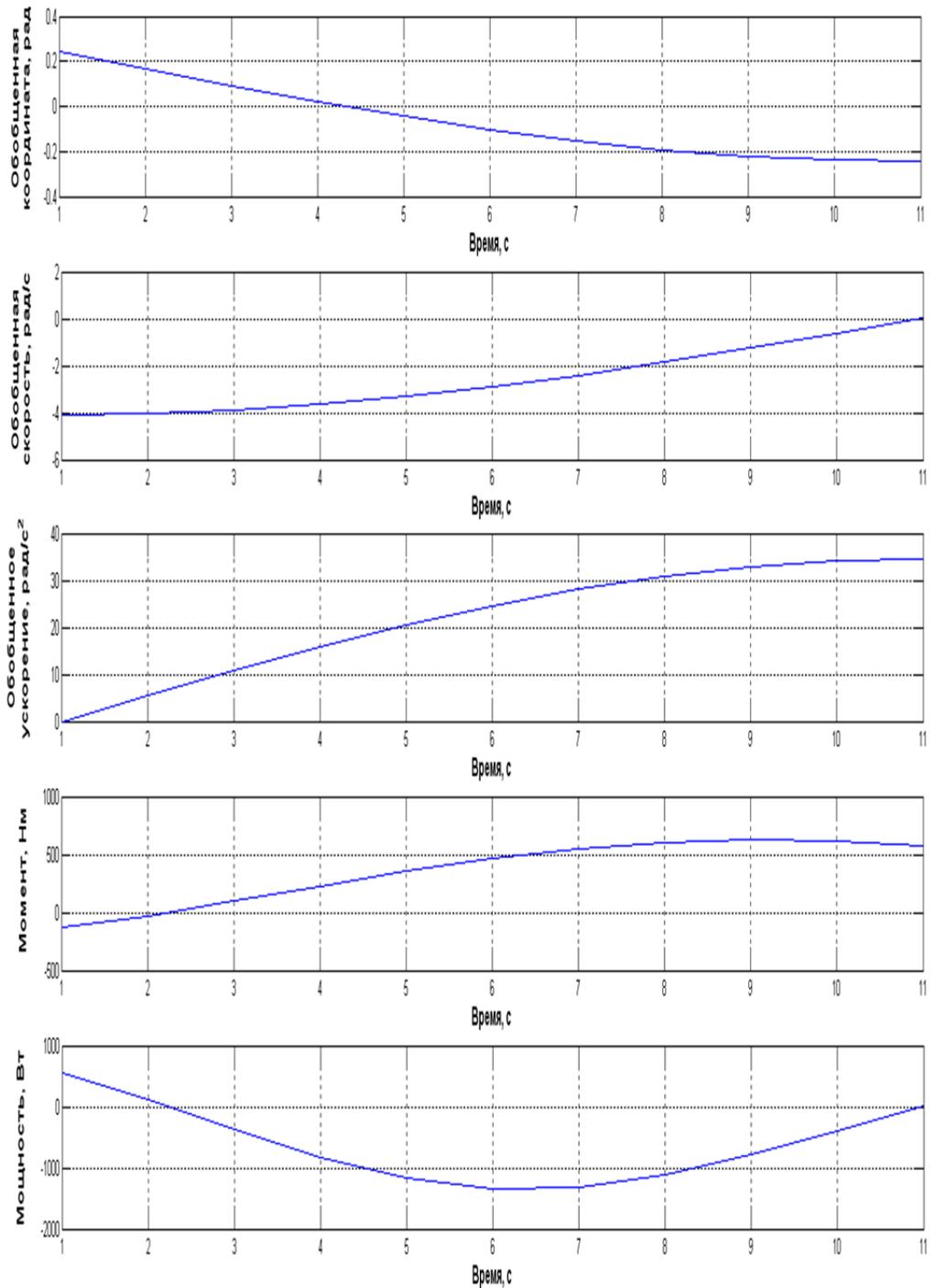
**Рис. 8.** Графики зависимости для 7-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени



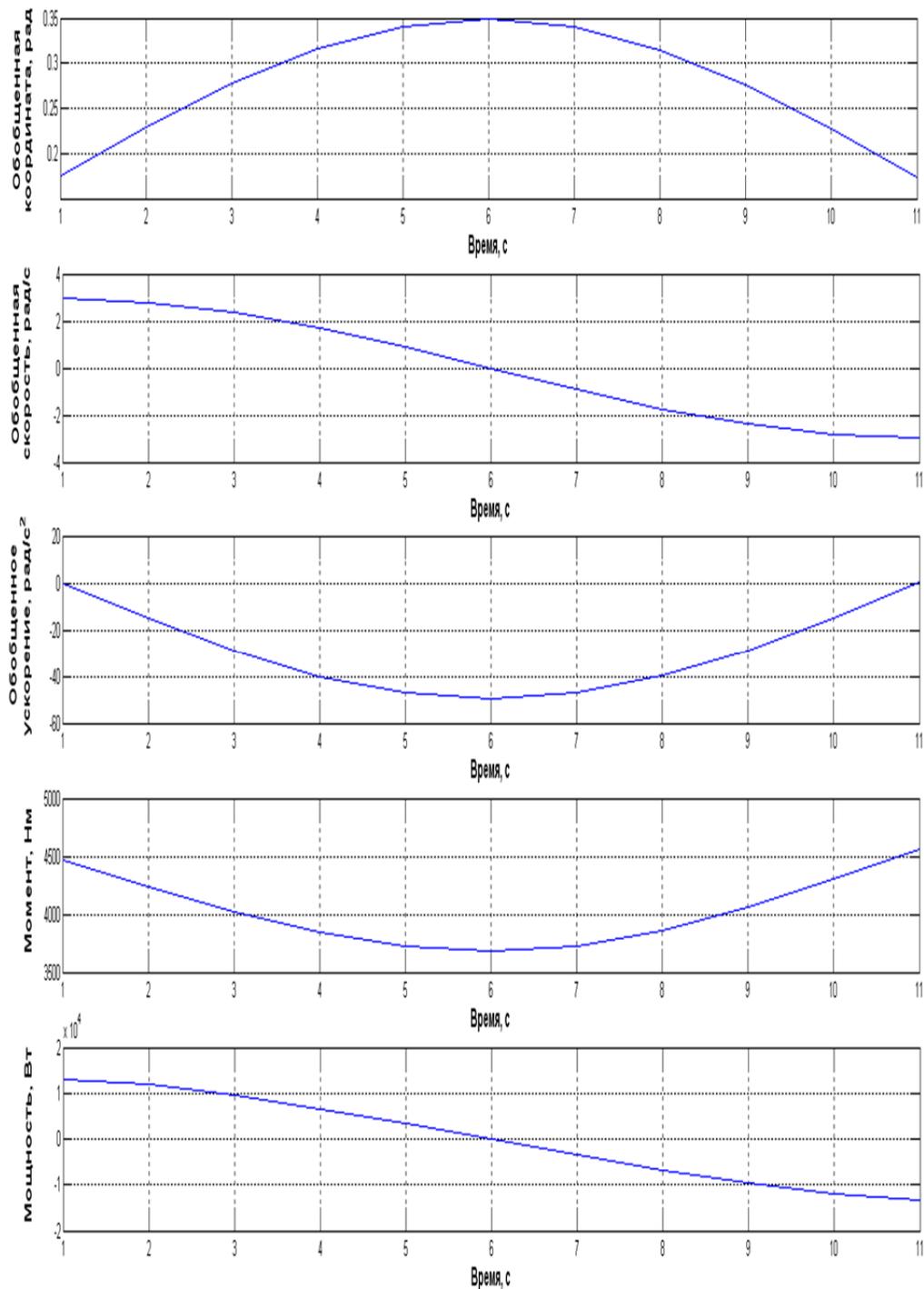
**Рис. 9.** Графики зависимости для 8-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени



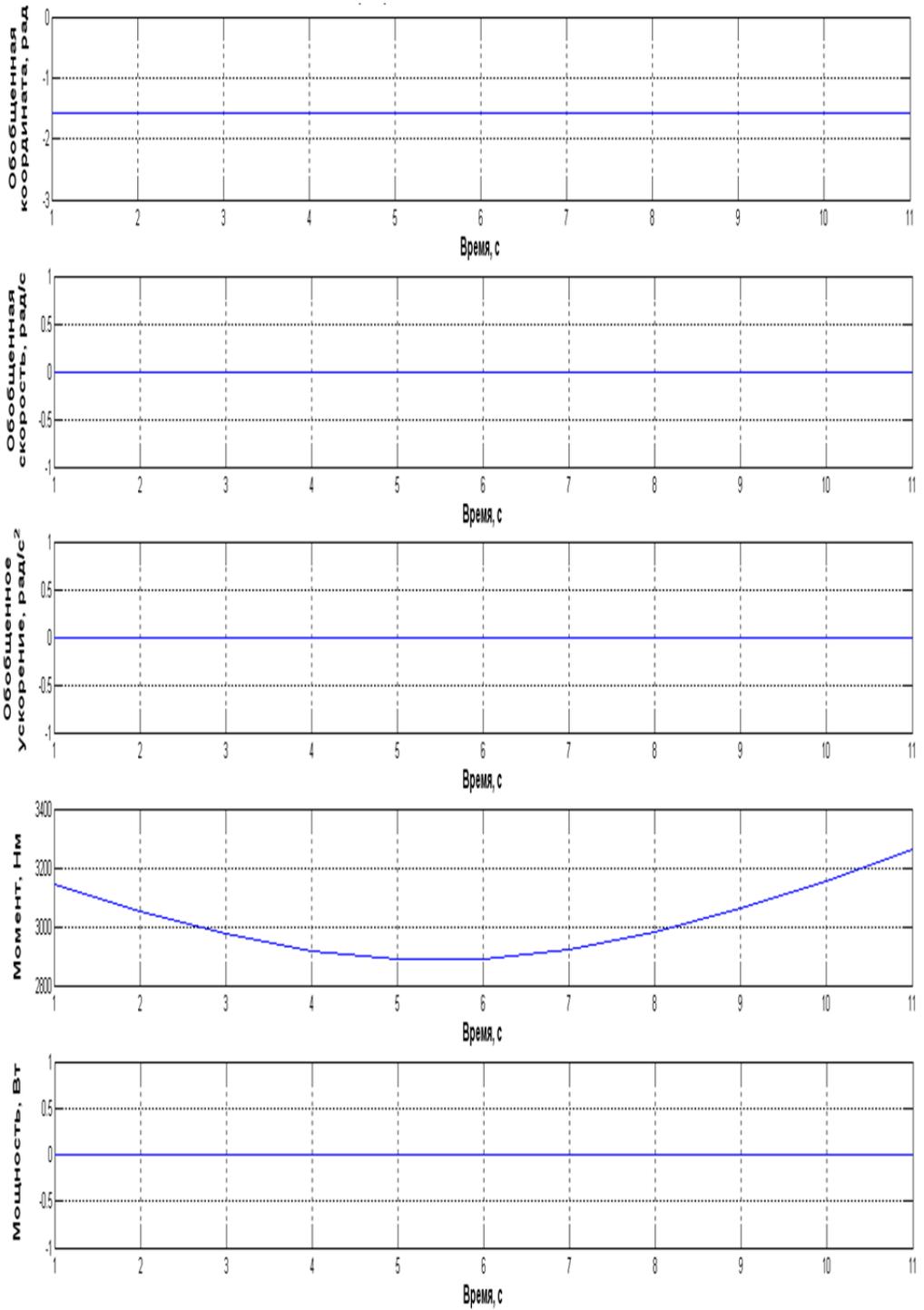
**Рис. 10.** Графики зависимости для 9-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени



**Рис. 11.** Графики зависимости для 10-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени



**Рис. 12.** Графики зависимости для 11-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени



**Рис. 13.** Графики зависимости для 12-го сочленения обобщенной координаты, обобщенной скорости, обобщенного ускорения, момента и мощности от времени

**Выводы.** Для построения математической модели кинематики древовидного ИМ шестиногого шагающего робота, целесообразно использовать модифицированную систему координат Денавита—Хартенберга. Эффективным подходом к построению математической модели динамики ИМ шестиногого шагающего робота является использование модифицированной СК Денавита—Хартенберга и принципа Д'Аламбера, что позволит определить движение с учетом приложенных к роботу внешних сил и моментов, а также сил и моментов от наложенных на него внешних кинематических связей, вычислить возникающие при этом силы и моменты реакций этих связей.

В программном комплексе SolidWorks разработана 3D-модель ИМ шестиногого шагающего робота с ЭГСП. В этой же программе получен расчет значений масс, координат центров масс, тензоров инерции ИМ звеньев шестиногого шагающего робота.

Описана структура программного комплекса MATLAB и разработан для нее пусковой файл. Выбран закон управления в степенях подвижности ИМ шестиногого шагающего робота. В результате теоретических исследований получены: значения элементов матриц, входящих в уравнение динамики и мощности приводов в степенях подвижности.

## Литература

- [1] Акылбеков Е.Е. Математическая модель кинематики и динамики древовидного исполнительного механизма шестиногого шагающего робота. *Политехнический молодежный журнал*, 2017, № 4. URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/71.html>.
- [2] Акылбеков Е.Е. Проектирование кинематической схемы древовидного исполнительного механизма шестиногого шагающего робота. *Политехнический молодежный журнал*, 2016, № 4. URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/33.html>.
- [3] Мохов А.Д. Разработка математического и программного обеспечения систем управления мобильными роботами произвольной структуры с избыточными связями. URL: [http://www-tst.vstu.ru/files/thesis\\_defence/7022/mohov\\_aleksandr\\_dmitrievich.pdf](http://www-tst.vstu.ru/files/thesis_defence/7022/mohov_aleksandr_dmitrievich.pdf).
- [4] Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mech.*, 1955, vol. 22, pp. 215–221.
- [5] Ковальчук А.К. Модифицированная система координат Денавита-Хартенберга для исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 11, с. 12–30. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html>.
- [6] Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Блочно-матричные уравнения движения исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2008, № 12, с. 5–21.
- [7] Каргинов Л.А., Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е., Яроц В.В. *Проектирование систем приводов шагающих роботов с древовидной кинематической структурой*. Москва, Рудомино, 2013, 116 с.
- [8] Ковальчук А.К., ред. *Основы теории исполнительных механизмов шагающих роботов*. Москва, Рудомино, 2010, 170 с.

- [9] Тертычный-Даури В.Ю. *Динамика робототехнических систем*. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2012, 128 с.
- [10] Кутультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.И. *Технология обработки конструкционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 671 с.

**Акылбеков Ербол Ергалиевич** — магистрант кафедры «Гидромеханика гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — А.К. Ковальчук, канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидромеханика гидромашин и гидропневмоавтоматика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## INVESTIGATING DYNAMICS OF THE DENDRIFORM EXECUTIVE MECHANISM OF A SIX-LEGGED WALKING ROBOT

E.E. Akylbekov

e.akylbekov@bk.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

In this work we offer a kinematic configuration of the dendriform executive mechanism of the six-legged walking robot. We consider the mathematical models of its executive mechanism kinematics and dynamics. The article introduces the values of the modified Denavit—Hartenberg parameters and the reachability matrix of the executive mechanism segments and vector Z characterizing the spatial layout of the kinematic pairs' axes of rotation. The equations of motion are obtained by means of the d'Alembert's principle. We provide the results of investigating the dynamics of the six-legged walking robot executive mechanism. The 3D-model of the six-legged walking robot executive mechanism was developed using the software package SolidWorks, and the dependencies of the moment and capacity concatenations on the time were constructed by means of MATLAB.

### Keywords

Six-legged walking robots, synthesis of the kinematic structure, modified Denavit—Hartenberg coordinates systems, reachability matrix, equation of motion for the six-legged walking robot executive mechanism, mathematical modeling

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

### References

- [1] Akylbekov E.E. Mathematical model for kinematics and dynamics of a tree-like actuator for a hexapod walking robot. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2017, no. 4. Available at: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/71.html>.
- [2] Akylbekov E.E. Kinematic scheme designing of hexapod walking robot tree actuator. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2016, no. 4. Available at: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/33.html>.
- [3] Mokhov A.D. *Razrabotka matematicheskogo i programmnogo obespecheniya sistem upravleniya mobil'nymi robotami proizvol'noy struktury s izbytochnymi svyazyami* [Development of software for control systems of mobile robots with arbitrary structure with redundant connections]. Available at: [http://www-tst.vstu.ru/files/thesis\\_defence/7022/mohov\\_aleksandr\\_dmitrievich.pdf](http://www-tst.vstu.ru/files/thesis_defence/7022/mohov_aleksandr_dmitrievich.pdf).
- [4] Denavit J., Hartenberg R.S. Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mech.*, 1955, vol. 22, pp. 215–221.
- [5] Koval'chuk A.K. Modified Denavit-Hartenberg coordinate system for robot actuating mechanisms with tree-like kinematic structure. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 11, pp. 12–30. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/826673.html>.
- [6] Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E. Block-matrix equations of robot actuating mechanism with tree-like kinematic structure. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2008, no. 12, pp. 5–21.

- [7] Karginov L.A., Koval'chuk A.K., Kulakov D.B., Semenov S.E., Yarots V.V. Proektirovanie sistem privodov shagayushchikh robotov s drevovidnoy kinematicheskoy strukturoy [Engineering of walking robot actuating system with tree-like kinematic structure]. Moscow, Rudomino publ., 2013, 116 p.
- [8] Koval'chuk A.K., ed. Osnovy teorii ispolnitel'nykh mekhanizmov shagayushchikh robotov [Theory fundamentals of walking robot actuating mechanism]. Moscow, Rudomino publ., 2010, 170 p.
- [9] Tertychnyy-Dauri V.Yu. Dinamika robototekhnicheskikh system [Robotic system dynamics]. Sankt-Petersburg, NIU ITMO publ., 2012, 128 p.
- [10] Kugul'tinov S.D., Koval'chuk A.K., Portnov I.I. Tekhnologiya obrabotki konstruktsionnykh materialov [Processing technology of construction materials]. Moscow, Bauman Press, 2008, 671 p.

**Akylbekov E.E.** — Master's Degree student of the Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-Pneumoautomatics Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Kovalchuk A.K., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of the “Hydromechanics, Hydromachines and Hydro-Pneumoautomatics” Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.