

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК629.1.03

doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-14-23

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ОПОРНОЙ КОНЕЧНОСТИ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА БИОНИЧЕСКОГО ТИПА

Александр Николаевич Рукавицын<sup>1✉</sup>, Чжо Пью Вей<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

<sup>1</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>2</sup> kyawphyowai@mail.ru

### Аннотация

Цель исследования заключается в разработке подходов к созданию мобильной роботизированной системы шагающего типа, осуществляющей перемещение на основе бионических принципов организации движения. Разрабатываемая система оснащена шестью конечностями и совершает движения, характерные для некоторых насекомых, что повышает ее проходимость в сложных дорожных условиях. Описан алгоритм организации движения и проведен динамический анализ движения звеньев исполнительного механизма. Составлена кинематическая схема и разработан алгоритм планирования траекторий движения опорных точек конечностей робота. Для осуществления моделирования рассматривалась отдельно задача движения конечности шестиногого робота, представленной в виде плоского двухзвенного механизма. На основе заданных функций перемещений звеньев получены графики изменения координат точки опоры и крутящих моментов в шарнирах, обеспечивающих не-

обходимые движения робота по заданной траектории. Решена, на основе уравнения Лагранжа II рода, прямая задача динамики для одной ноги робота, которая рассматривалась как система с двумя степенями свободы. Разработанные уравнения решались численно в среде *Matlab*. Получены значения крутящих моментов приводов робота, необходимые для отработки заданной траектории. Новизна работы состоит в разработке и исследовании механизмов шагающего привода мобильного робота, реализующего алгоритм пошагового перемещения, который обеспечивает меньшие затраты энергии, чем у существующих аналогов. Результаты будут полезны при создании мобильных многофункциональных роботизированных систем, создаваемых на основе инсектоподобного движения, и действующих автономно в большом количестве практических приложений.

**Ключевые слова** робот, движение, механизм, параметры, задача, динамика.

Ссылка для цитирования:

Рукавицын А.Н. Исследование динамики движения опорной конечности шагающего робота бионического типа / А.Н. Рукавицын, Чжо Пью Вей // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 01. – С. 14 – 23. doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-14-23.

Original article

Open Access Article

## STUDY OF THE DYNAMICS OF BIONIC WALKING ROBOT LIMBS

Aleksandr Nikolaevich Rukavitsyn<sup>1✉</sup>, Chzho Pyo Wei<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Southwest State University, Kursk, Russia

<sup>1</sup> alruk75@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2020-0814>

<sup>2</sup> kyawphyowai@mail.ru

### Abstract

The study objective is to develop approaches to making a mobile robotic walking-type system that moves based on bionic principles of movements. The developed system is equipped with six limbs and

moves typically for some insects, which increases its cross-country capacity in difficult road conditions. The algorithm of the movement arrangement is described and the dynamic analysis of the movement of the exec-

utive mechanism links is carried out. A kinematic scheme is made and an algorithm for planning the trajectories of the robot's basis is developed. To implement the modeling, the task of moving the limb of a six-legged robot, presented in the form of a flat two-link mechanism, is considered separately. Based on the given functions, graphs of changes in the basis coordinates and hinge torques, providing the necessary movements of the robot along a given trajectory, are obtained. The direct dynamic problem for one robot leg, which is considered as a system with two degrees of freedom, is solved on the basis of the Lagrange equation. The developed equations are solved in

*Reference for citing:*

*Rukavitsyn AN, Wei CP. Study of the dynamics of bionic walking robot limbs. Transport Engineering. 2023; 1:14-23. doi: 10.30987/2782-5957-2023-1-14-23.*

## **Введение**

На сегодняшний день огромный интерес вызывают автономные мобильные устройства, перемещающиеся на основе бионических принципов организации движения. Такие способы движения не только повышают проходимость при движении по неровной поверхности, с большим количеством препятствий, но и открывают принципиально новые возможности, расширяя потенциальную область применения подобных устройств. Так на пересеченной местности, мобильные роботы, перемещающиеся шагами, имеют большую проходимость, чем колесные системы, что делает возможным использование подобных систем для мониторинга состояния окружающей среды после землетрясений и других чрезвычайных ситуациях. Однако, не смотря на широкое распространение, которое получают подобные системы в последнее время, исследованию их динамического поведения уделяется недостаточно внимания, что значительно снижает эффективность использования подобных мобильных роботизированных систем и комплексов и ограничивает область их применения. Поэтому целью данной работы становится разработка подходов к созданию мобильной робототехнической системы, перемещающейся шагами, что позволяет ей двигаться по неподготовленной заранее местности. Достижение указанной цели возможно путем разработки алгоритмов движения и проведение математического моделирования локомоций исполнительных органов шагающего робота.

*Matlab* environment. The torque values of the robot drives necessary for working out a given trajectory are obtained. The novelty of the work is in the development and research of the mechanisms of the walking drive of a mobile robot implementing an algorithm of step-by-step movement, which provides lower energy costs than existing analogues. The results will be useful in making mobile multifunctional robotic systems created on the basis of the insect-type movement, and operating independently in a large number of practical applications.

**Keywords:** robot, movement, mechanism, parameters, problem, dynamics.

Удобство применения автономных мобильных роботов порождает большой интерес к созданию новых конструкций, использующих нетрадиционные способы организации движения. Среди шагающих роботов наиболее распространение получили двух-, четырех-, шести- и восьминогие конструкции, которые обладают высокой проходимостью и способны перемещаться в сложных дорожных условиях. Причем именно шестиногие роботы обладают наибольшей функциональностью, устойчивостью и имеют относительно простую систему управления. Указанные достоинства позволяют использовать их для мониторинговых операций, например, при осмотре завалов после различных стихийных бедствий и техногенных катастроф, т.е. для работы в местах труднодоступных и малопригодных для человека.

Системы передвижения мобильного робота относятся к исполнительным системам. Специфической конструктивной особенностью таких систем является наличие специальных механизмов, которые преобразуют усилия, создаваемые двигателями, в усилия, которые приводят в движение исполнительные звенья системы передвижения и, в конечном итоге, заставляют двигаться всего робота. Создание подобных транспортных систем (подбор двигателя, разработка конструкции передаточных механизмов и исполнительного звена, проектирование системы управления) является достаточно сложной задачей. Поэтому при создании шагающих роботов

разработчики все больше уделяют внимание изучению движения их биологических прототипов [3, 4]. При создании мобильных роботов, движение которых осуществляется на основе шагания, образцом для подражания становятся оригинальные биологические принципы организации

движения различных животных, которые в процессе эволюционного развития биологических организмов, были доведены практически до совершенства. Для перемещения таких роботов характерны высокая проходимость и отсутствие пробуксовки в условиях пересеченной местности.

### Материалы, модели, эксперименты и методы

Во время движения шагающие роботы для опоры используют малую площадь в дискретных точках местности, что делает их эффективными в условиях отсутствия

непрерывной колеи, а также наличия на дороге препятствий различного типа. Схема бионического шестиногого шагающего робота показана на рис. 1.

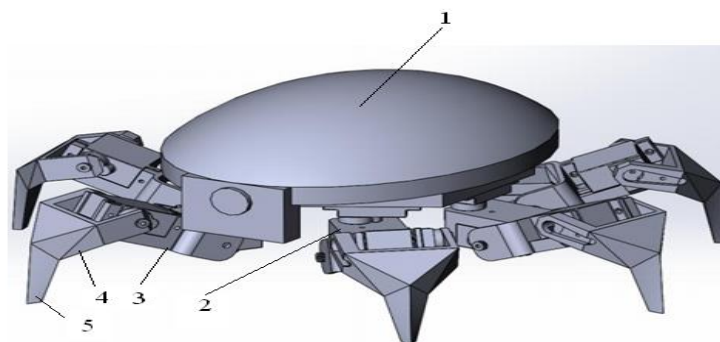


Рис. 1. Схема конструкции шестиногого робота  
*Fig. 1. Design diagram of a six-legged robot*

Как видно на схеме, робот состоит из корпуса 1, представляющего собой круглое основание, на котором размещено основное и вспомогательное оборудование, и из шести одинаковых конечностей (ног). Каждая конечность представлена двухзвенным шарнирным механизмом. К основанию конечности крепятся посредством приводов вращательного движения 2. Звенья конечности 3 и 4, приводятся в движение собственными электрическими сервоприводами. На конце каждой конечности имеется опорная стопа 5, которой робот опирается на поверхность (грунт) при ходьбе по твердому основанию.

При разработке шагающих роботов рассмотреть вопросы реализации заданного движения и провести динамический расчет исполнительных механизмов. Данный процесс требует разработки законов желаемого движения шагающего робота и определения, необходимых для его осуществления, сил и моментов, что в конечном итоге позволяет вывести уравнения динамики [5]. Законы движения исполнительных органов шагающего робота, кото-

рые обеспечивают перемещение по заданной траектории, следует называть программными движениями.

Используя шестиногую схему, можно получить оригинальную походку, известную как «треножник» (рис. 2), и которая характерна для некоторых насекомых, например, пауков. Такая походка характеризуется одновременной опорой сразу на три конечности. На рис. 2 заштрихованный круг обозначает, что конечность установлена полностью на опору и удерживает вес робота. Незаштрихованный круг обозначает, что данная конечность приподнята и совершает движение.

Для того чтобы выполнить шаг, оставаясь при этом в устойчивом положении, робот, опираясь своим весом на три свои конечности из шести, приподнимает три оставшиеся и переносит их в новое положение. При этом точки опоры, которые удерживают вес всего робота, будут находиться углах сформированного, так называемого, опорного треугольника. Затем три оставшиеся свободные конечности перемещаются вперед и опускаются на опор-

ную поверхность, создавая новый опорный треугольник. После чего вес робота, перемещается уже на эти конечности, а три оставшиеся приподнимаются и цикл повторяется.

В реальном устройстве, робот будет стабилизироваться возле планируемой траектории, что требует дополнительной корректировки путем использования уравнений движения и обеспечения требуемого распределения сил и моментов [6].

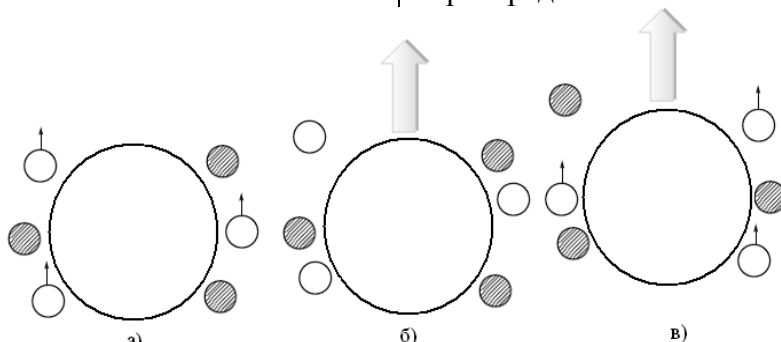


Рис. 2. Походка «треножником»: а – первый шаг, б – перенос центра тяжести, в – второй шаг

Fig. 2. The "three-legged" gait: a – the first step, б – the transfer of the center of gravity, в – the second step

Проведение динамического анализа требует составления кинематической схемы и разработки алгоритма планирования траекторий движения для отдельной ноги такого робота-паука. Для проведения анализа введем две плоских системы координат:

- система координат корпуса робота, центр которой расположен в центре корпуса;
- система координат конечности, центр которой расположен в точке ее крепления к корпусу робота.

Для удобства моделирования рассмотрим отдельно плоскую задачу двухзвенного механизма - конечности шестиногого робота. При этом поворот данного плоского механизма относительно вертикальной оси будет осуществлять первый привод, расположенный в горизонтальной плоскости.

Для математического описания представленной конструкции рассмотрим расчетную схему 1-ой конечности (рис. 3).

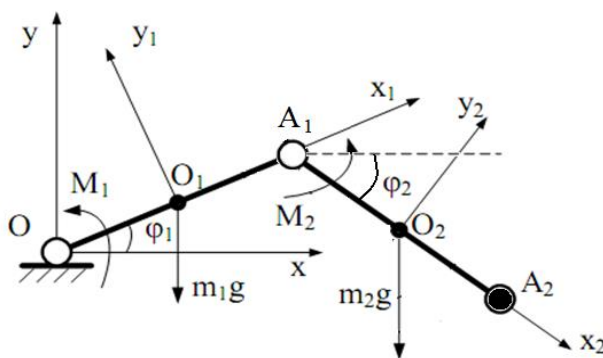


Рис. 3. Расчетная схема конечности шагающего робота

Fig. 3. Calculation scheme of the limb of a walking robot

Согласно приведенной схемы, звенья  $OA_1$  и  $A_1A_2$ , под действием крутящих моментов  $M_1$  и  $M_2$ , осуществляют перемещение корпуса робота. Считая, что центры масс звеньев  $OA_1$  и  $A_1A_2$  расположены посередине (точки  $O_1$  и  $O_2$  соответственно),

введем подвижные системы координат  $X_1Y_1O_1$  и  $X_2Y_2O_2$ . Для получения графиков изменения крутящего момента в шарнирах, зададимся перемещением звеньев ноги робота в виде полиномиальных функций.

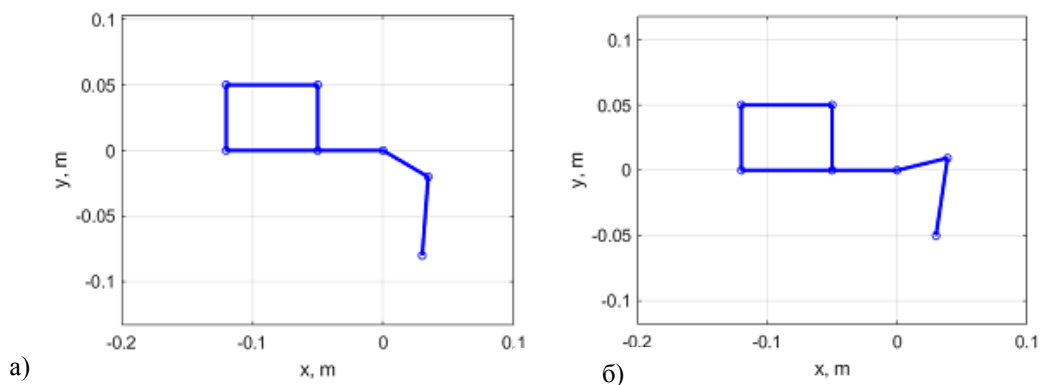


Рис. 4. Положения одной конечности робота при ходьбе треножником:  
 а – исходное (опора на земле), б – верхнее (опора в воздухе)

Fig. 4. The positions of one limb of the robot when walking with a tripod:  
 a – initial (support on the ground), б – upper (support in the air)

В данном примере для опоры изменяется только ее вертикальная координата  $y$ , а координата  $x$  остается постоянной.

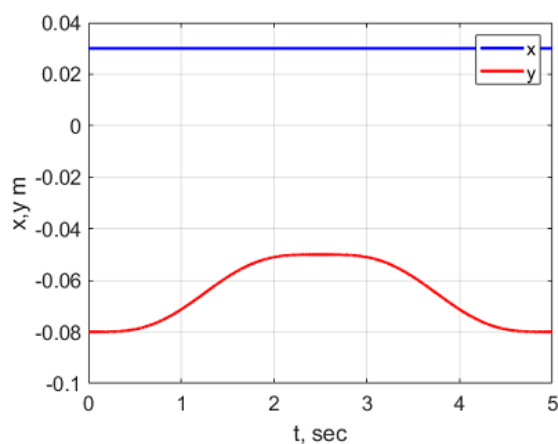


Рис. 5. Изменение координат точки опоры  
 Fig. 5. Changing the coordinates of the fulcrum

Используя формулы [7], позволяющие решить обратную задачу кинематики - найти углы поворота в шарнирах при известных координатах конца конечности,

получим графики изменения кинематических характеристик движения одной конечности шагающего робота (рис. 6).

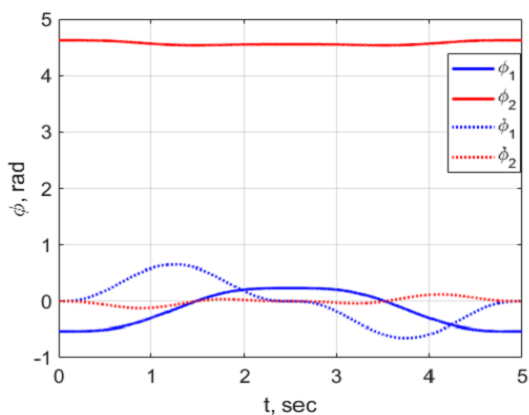


Рис. 6. Углы и угловые скорости перемещения звеньев конечности шагающего робота

Fig. 6. Angles and angular velocities of movement of the limbs of a walking robot

Определение, на основе известных значений углов поворота звеньев конечностей шагающего робота, крутящих моментов в шарнирах, которые обеспечивают необходимые движения робота по заданной траектории, требует решения прямой

задачи динамики, которую проведем на основе уравнения Лагранжа II рода [7].

Для двухзвенного механизма, представленного на рис. 3, который представляет собой систему с двумя степенями свободы, можем записать

$$x_1 = l_1 \sin \alpha_1, \quad x_2 = l_1 \sin \alpha_1 + l_2 \sin \alpha_2, \quad y_1 = -l_1 \cos \alpha_1, \quad y_2 = -l_1 \cos \alpha_1 - l_2 \cos \alpha_2.$$

Кинетическую  $T$  и потенциальную  $V$  энергии звеньев запишем как

$$T = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)}{2} + \frac{m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)}{2}, \quad V = m_1 g y_1 + m_2 g y_2.$$

Функция Лагранжа имеет вид:

$$L = T - V = T_1 + T_2 - (V_1 + V_2) = \frac{m_1}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{m_2}{2} (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) - m_1 g y_1 - m_2 g y_2.$$

Учитывая, что  $\dot{x}_1 = l_1 \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1$ ,  $\dot{x}_2 = l_1 \cos \alpha_1 \dot{\alpha}_1 + l_2 \cos \alpha_2 \dot{\alpha}_2$ ,  $\dot{y}_1 = l_1 \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1$ ,  $\dot{y}_2 = l_1 \sin \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 + l_2 \sin \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2$ , получим

$$T_1 = \frac{m_1}{2} (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) = \frac{m_1}{2} (l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \alpha_1 + l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \sin^2 \alpha_1) = \frac{m_1}{2} l_1^2 \dot{\alpha}_1^2,$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{m_2}{2} (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) = \frac{m_2}{2} \left[ (l_1 \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 + l_1 \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_2)^2 + (l_1 \dot{\alpha}_1 \sin \alpha_1 + l_2 \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_2)^2 \right] = \\ &= \frac{m_2}{2} (l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \alpha_1 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 \cos^2 \alpha_2 + 2l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \sin^2 \alpha_1 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 \sin^2 \alpha_2 + \\ &+ 2l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_1 \sin \alpha_2) = \frac{m_2}{2} (l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + 2l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)). \end{aligned}$$

$$V_2 = m_1 g y_1 = -m_1 g l_1 \cos \alpha_1,$$

$$V_2 = m_2 g y_2 = -m_2 g (l_1 \cos \alpha_1 + l_2 \cos \alpha_2).$$

Тогда функция Лагранжа принимает вид:

$$\begin{aligned} L = T - V = T_1 + T_2 - (V_1 + V_2) &= \left( \frac{m_1}{2} + \frac{m_2}{2} \right) l_1^2 \dot{\alpha}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_2^2 \dot{\alpha}_2^2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\ &+ (m_1 + m_2) g l_1 \cos \alpha_1 + m_2 g l_2 \cos \alpha_2. \end{aligned}$$

Уравнения Лагранжа II рода:  $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0, \quad i = 1, 2.$

Входящие в уравнения частные производные определяем следующим образом

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\alpha}_1 + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = -m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + (m_1 + m_2) g l_1 \sin \alpha_1,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_2} = m_2 l_2^2 \dot{\alpha}_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_2} = m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) - m_2 g l_2 \sin \alpha_2.$$

Следовательно, первое уравнение принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[ (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\alpha}_1 + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \right] + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + (m_1 + m_2) g l_1 \sin \alpha_1 &= 0, \text{ или} \\ (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\alpha}_1 + m_2 l_1 l_2 \left[ \ddot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_2) \right] + m_2 l_1 l_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + \\ + (m_1 + m_2) g l_1 \sin \alpha_1 &= 0. \end{aligned}$$

После всех сокращений и преобразований

$$(m_1+m_2)l_1^2\ddot{\alpha}_1 + m_2l_1l_2\ddot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + m_2l_1l_2\dot{\alpha}_2^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + (m_1 + m_2)gl_1 \sin \alpha_1 = 0.$$

Второе дифференциальное уравнение выводим аналогично первому

$$\frac{d}{dt} [m_2l_2^2\dot{\alpha}_2 + m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)] - m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1\dot{\alpha}_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + m_2gl_2 \sin \alpha_2 = 0, \text{ или}$$

$$m_2l_2^2\ddot{\alpha}_2 + m_2l_1l_2\ddot{\alpha}_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_2) - m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + m_2gl_2 \sin \alpha_2 = 0.$$

С учетом всех преобразований

$$m_2l_2^2\ddot{\alpha}_2 + m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + m_2l_1l_2\dot{\alpha}_1^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) + m_2gl_2 \sin \alpha_2 = 0.$$

Данные уравнения будем численно решать в среде *Matlab*, для чего будем считать, что на конечность, не действуют никакие внешние силы, кроме сил тяжести и моментов в шарнирах [8]. Подставляя в

уравнения значения углов, скоростей и ускорений, получим значения моментов, необходимых для осуществления программного движения и обработки заданной траектории.

## Результаты

Графики зависимости от времени крутящих моментов и мощности приводов в шарнирах представлены на рис. 7. Поскольку мобильный шагающий робот должен осуществлять заданные программные движения, которые являются достаточно сложными и нерегулярными, то получение подобных движений

возможно за счет выбора соответствующих законов изменения входных параметров [9, 10]. Вычисления проведены в интервале  $[0; \tau]$  с шагом  $1\tau$  при следующих исходных данных: масса звена 1  $m_1 = 0,05$  кг; масса звена 2  $m_2 = 0,05$  кг; масса стопы  $M = 0,01$  кг; длина звена 1  $l_1 = 0,04$  м; длина звена 2  $l_2 = 0,06$  м.

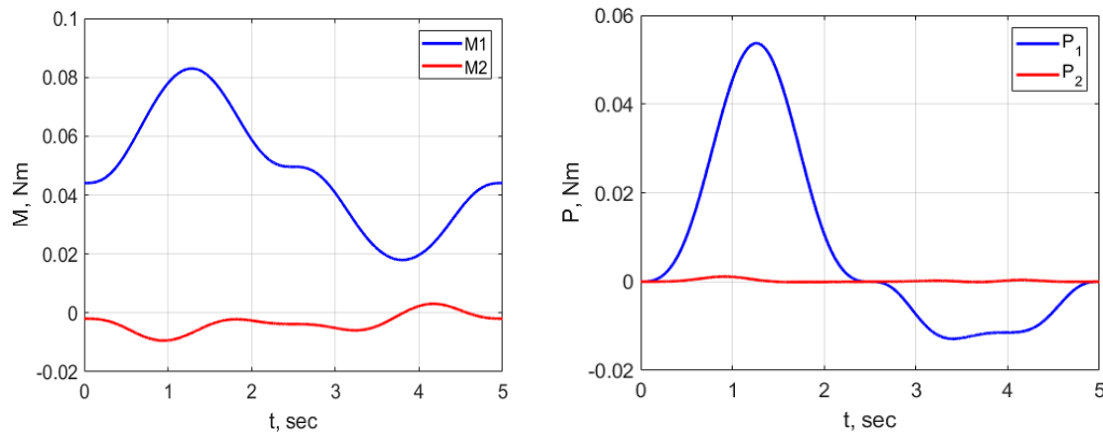


Рис. 7. Крутящие моменты и мощности приводов в шарнирах конечности шагающего робота  
Fig. 7. Torques and drive powers in the joints of a walking robot limb

Проинтегрировав по времени данный график получим значения требуемые моменты  $M$  и мощности  $P$  приводов в шарниров 1 и 2 соответственно:  $M_1 = 0.048$  Н·м,  $M_2 = 0.004$  Н·м и  $P_1 = 0.015$  (Вт),  $P_2 = 0.001$  Вт. При этом важно отметить, что, исходя из полученных результатов математического моделирования, наиболее нагруженным, является привод выходного звена ноги шагающего робота.

Кроме того, порезультатам проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

– во-первых, как уже отмечалось ранее, при шаговом передвижении, когда взаимодействие с грунтом происходит только в местах упора опорной стопы, наблюдаются значительно меньшие затраты энергии, чем в случае постоянного контакта с опорной поверхностью;

– во-вторых, разработанные уравнения, описывающие динамическое поведение двухзвенного механизма, позволяют получить, на основе заданных значений конструктивных параметров шагающего робота и траекторией движения опорных точек его конечностей, законы изменения крутящего момента в шарнирах исполнительных механизмов робота и требуемую мощность привода, что является необходимым условием проектирования всей мобильной робототехнической системы;

### Заключение

В настоящее время мобильная робототехника, которая имеет огромное прикладное значение, активно изучается научным сообществом. Достижения в данной области позволяют создавать многофункциональные системы, позволяющие действовать автономно в большом количестве приложений. Проектирование мобильных шагающих роботов представляется достаточно сложной задачей, принципы и системные подходы к решению которой должны соответствовать требованиям, предъявляемым к самому роботу, как сложному мехатронному устройству [11, 12].

Звенья механизма конечностей шагающего робота являются твердыми телами, которые могут незначительно деформироваться в процессе движения. В любой механической системе на движение звеньев накладываются связи, которые по сути являются кинематическими парами. Разработка математической модели для исследования динамического поведения исполнительной системы шестиного шагающего робота заключается в представлении реальных звеньев и

– в-третьих, для построения математической модели для решения прямой задачи динамики движения опорной конечности шагающего робота, целесообразно использовать уравнения Лагранжа II рода, которые являются эффективным средством исследования и позволяют обеспечить необходимые движения робота по заданной траектории на основе известных значений углов поворота звеньев конечностей шагающего робота, крутящих моментов в приводах шарниров.

кинематических пар некоторыми физическими моделями с идеальными свойствами. Изучение динамики шагающего робота должно начинаться с разработки динамической модели его исполнительных (транспортных) систем, для чего следует абстрагироваться от некоторых частных особенностей разрабатываемой системы, которые могут считаться несущественными, и наибольшее внимание следует уделять тем конструктивным элементам свойства которых представляются наиболее важными для решения поставленной задачи.

В данном случае для обеспечения инсектоподобного движения шагающего робота-паука выбрана походка, определяемая движением ног треножником и была решена обратная задача динамики, которая заключалась в определении значений крутящих моментов и требуемых мощностей, реализуемых приводами исполнительных звеньев, на основе параметрических уравнений, описывающих траекторию движения стопы конечности шагающего робота.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яцун С.Ф., Чжо П.В., Рукавицын А.Н. Перспективы разработки мобильных робототехнических систем с кинематическими связанными движителями. *Тенденции развития науки и образования*. 2018;39-3:33-35.
2. Павловский В.Е., Панченко А.В. Модели и алгоритм управления движением малого шестиногого робота. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;11:23-28.
3. Politov E.N., Rukavitsyn A.N. Study of controlled motion bionic mini robot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;1-8.
4. Lupehina I., Rukavitsyn A. Motion study of bionic mobile robot. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. 2015:1-5.
5. Акылбеков Е.Е. Математическая модель кинематики и динамики древоподобного исполнитель-



ного механизма шестиногого шагающего робота. *Политехнический молодежный журнал*. 2017;4. URL: <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/71.html>

6. Тертычный-Даури В.Ю. Динамика робототехнических систем. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. 128 с.
7. Яцун С. Ф., Мищенко В.Я., Политов Е.Н. Кинематика, динамика и прочность машин, прочность машин, приборов и аппаратуры: учебное пособие. М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2015. 207 с.
8. Рукавицын А.Н., Ефремов Д.И. Моделирование движения механической системы с двумя степенями свободы в пакете "MATLAB/SIMMECHANICS". *Молодежь и наука: Шаг к успеху*: сб. науч. статей 4-й Всеросс. науч. конф. Юго-Западный государственный университет; Московский политехнический университет. Курск, 2020. С. 132-135.
9. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В. и др. Исследование процесса движения трехзвеного робота с двухкоординатными шарнирами по шероховатой поверхности. *Вестник Белго-*

*родского государственного технического университета им. В.Г. Шухова*. 2018;7:86-96.

10. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Вирабян Л.Г. Синтез алгоритма коррекции траектории движения выходного звена робота-гексапода на основе теории искусственных нейронных сетей. *Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова*. 2016;12:142-152.
11. Рукавицын А.Н., Лупехина И.В. Разработка алгоритма компьютерного моделирования движения мобильного миниробота, перемещающегося с отрывом от опорной поверхности. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011;13(4-4):1013-1017.
12. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Малышев Д.И. и др. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D-печати изделий. *Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова*. 2016;8:155-165.

## REFERENCES

1. Yatsun SF, Chzho PW, Rukavitsyn AN. Prospects for the development of mobile robotic systems with kinematic locomotors. *Tendentsii v Razvitii Nauki I Obrazovaniya*. 2018;39-3:33-35.
2. Pavlovsky VE, Panchenko AV. Models and algorithm of motion control of a small six-legged robot. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2012;11:23-28.
3. Politov EN, Rukavitsyn AN. Study of controlled motion bionic mini robot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017;1-8.
4. Lupehina I, Rukavitsyn A. Motion study of bionic mobile robot. *Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*. 2015:1-5.
5. Akylbekov EE. Mathematical model of kinematics and dynamics of a tree-like executive mechanism of a six-legged walking robot. *Polytechnical Student Journal*. 2017;4. Available from : <http://ptsj.ru/catalog/menms/robots/71.html>.
6. Tertychny-Dauri VYu. Dynamics of robotic systems. Saint Petersburg: NIU ITMO; 2012.
7. Yatsun SF, Mishchenko VYa, Politov EN. Kinematics, dynamics and strength of machines, instruments and equipment: textbook. Moscow: Alfa-M: INFRA-M; 2015.
8. Rukavitsyn AN, Efremov DI. Simulation of the motion of a mechanical system with two degrees of

freedom in the package *MATLAB/SIMMECHANICS*. *Youth and Science: Step to Success: Collection of Papers of the 4th All-Russian Scientific Conference*. Kursk: Southwest State University. Moscow Polytechnic University; 2020.

9. Yatsun SF, Vorochaeva LYu, Malchikov AV. The study of the motion of three-axis robot with two-axis joints on a rough surface. *Bulletin of BSTU named after VG Shukhov*. 2018;7:86-96.
10. Rybak LA, Mamaev YuA, Virabyan LG. Correction algorithms synthesis for the motion path of the hexapod robot output link based on the theory of artificial neural networks. *Bulletin of BSTU named after VG Shukhov*. 2016;12:142-152.
11. Rukavitsyn AN, Lupekhina IV. Development of an algorithm for computer simulation of the motion of a mobile mini-robot moving with the separation from the support surface. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4-4):1013-1017.
12. Rybak LA, Mamaev YuA, Malyshev DI. Software module of hexapod robot specified movement trajectory of output unit for 3D printing of products. *Bulletin of BSTU named after VG Shukhov*. 2016;8:155-165.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Желонкина, О. С. Построение параметризации робота-гексопода / О.С., Желонкина, Д.Ю. Злобин // *Исследования молодых ученых*: I Междунар. науч. конф. (г. Казань, июнь 2019 г.) Изд-

во: Молодой ученый. Казань, 2019. С. 4-7.8. URL: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/339/15162/>

2. Ковальчук, А.К. Выбор кинематической структуры и исследование динамики древовидного исполнительного механизма робота-краба / А.К.

Ковальчук, Д.Б. Кулаков, С.Е. Семенов и др. // *Вестник МГТУ МИРЭА*, 2013. №1(1). С. 72-81.11. URL: <https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/75d/06-kovalchuk.pdf>

3. **Репкин, А. В.** Моделирование контактного взаимодействия прыгающего колесного робота с поверхностью / *Завалишинские чтения*: сб. докл.

СПб.:ГУАП, 2019. С.72-80.23. URL: <https://fs.guap.ru/unids/2019/zav2019.pdf>

4. **Злобин, Д.Ю.** Силы и моменты в кинематических цепях / Д.Ю. Злобин, О.С. Желонкина // *Молодой ученый*, 2019. № 26 (264). С. 7-9. 27. URL:<https://moluch.ru/archive/264/61270/>

## BIBLIOGRAPHIC LIST

5. 1.Zhelonkina OS, Zlobin DYu. Construction of parametrization of a hexapod robot. Research of young scientists: I International Scientific Conference; 2019 June; Kazan: Publishing house Molodoi Ucheny; 2019. Available from: <https://moluch.ru/conf/stud/archive/339/15162/>

6. 2.Kovalchuk AK, Kulakov DB, Semenov SE. The choice of kinematic structure and the study of the dynamics of the tree-like executive mechanism of the crab robot. Moscow: Russian Technological Journal. 2013;1(1):72-81.11. Available from:

<https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/75d/06-kovalchuk.pdf>

7. Repkin AV. Modeling of contact interaction of a jumping wheeled robot with a surface. Zavalishinsky Readings: Collection of reports. Saint Petersburg:GUAP; 2019. Available from: <https://fs.guap.ru/unids/2019/zav2019.pdf>

8. Zlobin DYu, Zhelonkina OS. Forces and moments in kinematic chains. Molodoy Ucheny. 2019;26(264):7-9. Available from:<https://moluch.ru/archive/264/61270/>.

## Информация об авторах:

**Рукавицын Александр Николаевич**- кандидат технических наук, доцент, тел.8(951)316-97-93, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ: Scopus-Author ID 56910069200,

Research- ID-Web of Science L-3380-2013, Author-ID-РИНЦ 423663.

**Чжо Пью Вей**- кандидат технических наук, тел. 8(951)316-97-93, докторант кафедры механики, мехатроники и робототехники ЮЗГУ.

**Rukavitsyn Aleksandr Nikolaevich** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics of Southwestern State University; phone: 8(951)316-97-93; Scopus-Author ID 56910069200, Research-ID-

Web of Science L-3380-2013, Author-ID-RSCI 423663.

**Chzho Pyo Wei** - Candidate of Technical Sciences, doctoral student of the Department of Mechanics, Mechatronics and Robotics of Southwestern State University; phone: 8(951)316-97-93.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 27.07.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 26.12.2022. Рецензент – Анцев В.Ю., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Тульского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 27.07.2022; approved after review on 15.09.2022; accepted for publication on 26.12.2022. The reviewer is Antsev V.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Handling Machinery and Equipment at Tula State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.**