

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.942

doi:10.30987/2658-6436-2022-3-57-67

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУНОГИХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Евгений Владимирович Страшнов<sup>1</sup>, Леонид Алексеевич Финагин<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>1</sup> strashnov\_evg@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>

<sup>2</sup> antifin@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0420-2323>

**Аннотация.** Рассматриваются методы и подходы для полуавтоматического управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения включают генерацию шаблона ходьбы, расчет инверсной кинематики и синтез ПД-регуляторов с обратной связью по показаниям датчиков углов. Для того чтобы обеспечить статическую и динамическую устойчивость шагающего робота, генерация траекторий его движения реализуется с применением критерия точки нулевого момента (ТНМ) и модели обратного маятника с виртуальной высотой. При этом генерация шаблона ходьбы осуществляется путем решения задачи инверсной кинематики методом Левенберга-Марквардта для вычисления углов поворота в сочленениях робота. Для реализации полуавтоматического управления движением шагающего робота в виртуальном окружении задействован подход, основанный на технологии функциональных схем и виртуальных пультов управления. Апробация предложенных методов и подходов проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim и показала их адекватность и эффективность для моделирования движения шагающего робота с сохранением его равновесия.

**Ключевые слова:** двуногий шагающий робот, моделирование, шаблон ходьбы, устойчивость, точка нулевого момента, инверсная кинематика, виртуальный пульт, ПД-регулятор, система виртуального окружения

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-07-00371.

**Для цитирования:** Страшнов Е.В., Финагин Л.А. Моделирование полуавтоматического режима управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №3 (17). С. 57-67. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-57-67.

Original article

Open Access Article

## SIMULATING A SEMI-AUTOMATIC MOTION CONTROL MODE OF BIPEDAL WALKING ROBOTS IN VIRTUAL ENVIRONMENT SYSTEMS

Evgeny V. Strashnov<sup>1</sup>, Leonid A. Finagin<sup>2</sup>

<sup>1, 2</sup> Federal State Institution "Federal Scientific Centre "Research Institute for System Research of the Russian Academy of Science"

<sup>1</sup> strashnov\_evg@mail.ru

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

**Abstract.** The paper considers methods and approaches for semi-automatic motion control of bipedal walking robots in virtual environment systems. The proposed solutions include generating a walking pattern, calculating inverse kinematics, and synthesis of PD-controllers with feedback based on the angle sensor readings. To ensure the static and dynamic stability of the walking robot, generating its movement trajectories is implemented using the criterion of zero moment point (ZMP) and the inverse pendulum model with virtual height. In this case, the walking pattern is generated by solving the problem of inverse kinematics using the Leven-berg-Marquardt method to calculate the rotation angles in the robot joints. To implement semi-automatic motion control of a walking robot in a virtual environment, an approach based on the technology of functional diagrams and virtual control panels is used. Testing the proposed methods and approaches is carried out in the VirSim virtual environment software package and shows their adequacy and efficiency for modelling a walking robot movement while maintaining its balance.

**Keywords:** bipedal walking robot, simulation, walking pattern, stability, zero moment point, inverse kinematics, virtual console, PD controller, virtual environment system

**Financing:** the study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-07-00371.

**For citation:** Strashnov E. V., Finagin L. A. Simulating a semi-automatic motion control mode of bipedal walking robots in virtual environment systems. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 3 (17). pp. 57-67. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-57-67

## Введение

Двухногий шагающий робот (ДШР) представляет собой механическое устройство, которое по своему строению подобно человеку. В настоящее время ведутся активные исследования применения таких роботов в различных областях деятельности человека, куда входит медицина, промышленность, образование и т.д. Кроме того, экстремальная робототехника [1] рассматривает ряд задач, где непосредственное участие человека опасно для его жизни и здоровья. К таким задачам относится ликвидация последствий техногенных аварий и катастроф, тушение пожаров, освоение космоса и других планет, где антропоморфные роботы могут заменить человека. Сложность управления ДШР связана с требованием обеспечения устойчивости робота в процессе ходьбы, т.е. необходимо реализовать движение робота без падения. В связи с этим разработка эффективных методов и подходов управления движением ДШР с сохранением равновесия является важной и актуальной задачей.

В последние годы широкое распространение получили системы виртуального окружения, в которых вместо реальных объектов рассматриваются их виртуальные аналоги, а моделирование осуществляется в виртуальной среде, согласно законам физики. Примером служат имитационно-тренажерные комплексы, предназначенные для обучения навыкам дистанционного управления мобильными роботами. Преимущество таких систем заключается в том, что они снижают риск поломки реальных устройств и предоставляют удобное средство для разработки и тестирования систем управления роботами.

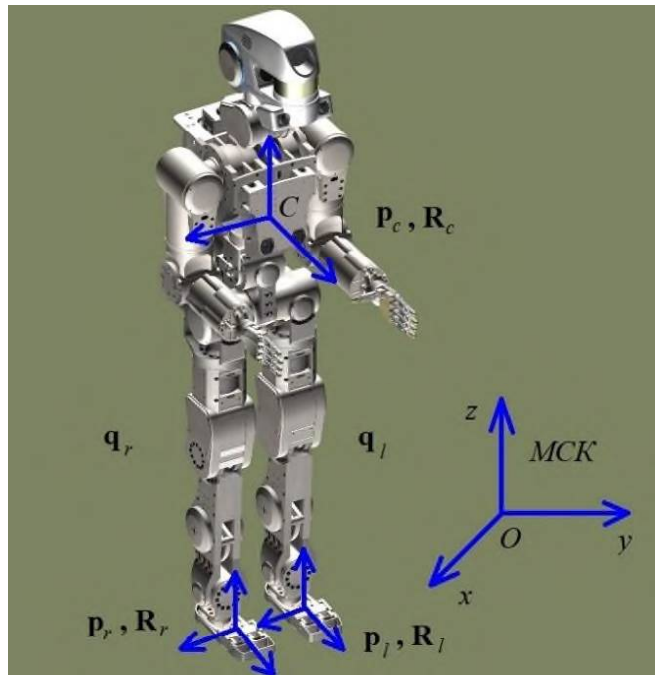
Задаче моделирования управления движением ДШР посвящено множество работ. Один из подходов основан на синтезе управления с помощью модели мышц [2] и генерации правдоподобных человеку движений. Однако такой подход применим только для анимации антропоморфных персонажей, но не для управления роботами. Существует ряд решений [3 – 5], которые базируются на концепции точки нулевого момента (ТНМ) [6] для обеспечения равновесия ДШР. Непосредственное применение этого критерия к математической модели робота является затруднительным, поэтому широкое распространение получили упрощенные модели движения ДШР. Примером служит модель обратного маятника с виртуальной высотой [7], которая позволяет повысить точность вычисления ТНМ для расчета траектории движения робота в режиме офлайн.

В работе предлагаются методы и подходы для моделирования полуавтоматического управления ДШР в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения основаны на генерации шаблона ходьбы с вычислением траекторий движения центра масс и стоп робота для реализации его основных движений. Для обеспечения статической и динамической устойчивости робота применяется модель обратного маятника с виртуальной высотой, метод Левенберга-Маркварда для расчета инверсной кинематики и ПД-регуляторы. Апробация предлагаемых методов и подходов для моделирования движения ДШР проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim [8] с применением оригинальной технологии функциональных схем и виртуальных пультов управления.

## Задача управления движением виртуального шагающего робота

Рассмотрим ДШР, который представляет собой систему шарнирно связанных звеньев, где манипуляторы (руки) служат для захвата объектов, а педипуляторы (ноги) для его перемещения. На рис. 1 показана созданная в системе компьютерного моделирования 3ds Max виртуальная модель ДШР [9], движение которого осуществляется под действием электроприводов, установленных в сочленениях робота.

Движение педипуляторов описывается с помощью обобщенных координат  $q_l$  и  $q_r$  размерности  $N$ . Педипуляторы в модели на рис. 1 имеют по семь степеней свободы ( $N = 7$ ): три степени свободы для бедра, одна степень для колена и три степени свободы для ступни. Управляющими параметрами являются векторы напряжений  $u_l$  и  $u_r$ , которые подаются на электроприводы педипуляторов робота.



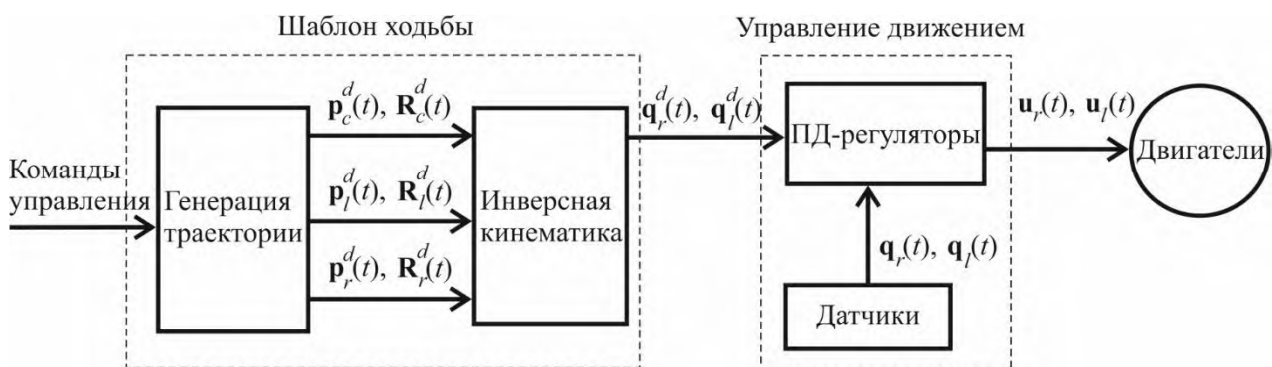
**Рис. 1. Виртуальная модель двуногого шагающего робота**  
**Fig. 1. Virtual model of bipedal walking robot**

Для описания движения (ходьбы) робота рассматриваются следующие системы координат: мировая система координат (MCK)  $Oxyz$ , система координат торса робота, начало которой совпадает с центром масс робота, и системы координат ступней робота. Тогда положение и ориентация торса робота задается вектором  $p_c$  и матрицей  $R_c$ , а для ступней – векторами  $p_l, p_r$  и матрицами  $R_l, R_r$ .

Задача управления движением ДШР заключается в обеспечении перемещения робота с сохранением равновесия (без его падения). При синтезе управления роботом предполагается, что верны следующие допущения:

- 1) перемещение робота выполняется без участия рук;
- 2) в процессе движения торс робота сохраняет вертикальное положение;
- 3) движение торса робота происходит на постоянной высоте;
- 4) стопы всегда параллельны плоскости поверхности и их движение выполняется только в саггитальной плоскости.

Структура предлагаемой системы управления движением робота показана на рис. 2.



**Рис. 2. Структура системы управления роботом**  
**Fig. 2. Structure of robot control scheme**

В этой схеме входами являются команды, которые задают основные движения робота (вперед, остановка и повороты). Для этих команд в режиме офлайн выполняется генерация шаблона ходьбы, который заключается в вычислении траекторий движения центра масс робота и его ступней. Далее решается задача инверсной кинематики для нахождения углов поворотов в педипуляторах робота. Затем с применением датчиков углов и ПД-регуляторов

выполняется расчет напряжений, подаваемых на электроприводы педипуляторов, обеспечивая тем самым заданное движение. Опишем предлагаемые методы управления движением ДШР более подробно.

### Генерация шаблона ходьбы робота

Задача генерации шаблона ходьбы робота заключается в вычислении траекторий движения ДШР, при которых он сохраняет свое равновесие в процессе движения. Предлагаемое решение этой задачи включает построение траекторий движения робота с сохранением динамической и статической устойчивости, а также расчет углов педипуляторов робота путем решения задачи инверсной кинематики.

**Генерация траектории движения робота.** Движение ДШР по ровной поверхности можно рассматривать как комбинацию его прямолинейного движения с постоянной скоростью и поворотов. Прямолинейное движение ДШР выполняется из положения стоя и включает первый шаг, цикличное повторение шагов правой и левой ноги и последний шаг для его останова. Повороты осуществляются из положения стоя на заданный угол по часовой стрелки и против часовой стрелки. При движении робота предполагается, что его центр масс движется на постоянной высоте  $z_0$ . В связи с этим движение робота выполняется с полусогнутыми коленями.

Рассмотрим первый шаг робота, который выполняется левой ногой. Пусть для удобства МСК расположена посередине между ступнями робота в его изначальном положении. Тогда зададим траекторию  $p_i^d = (x_i^d, y_i^d, z_i^d)^T$  движения стопы левой ноги на отрезке  $t \in [0, T_f]$  следующим образом:

$$x_i^d(t) = -x_0 = const; \quad y_i^d(t) = \frac{L}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{T_f} \right); \quad z_i^d(t) = \frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi t}{T_f} \right), \quad (1)$$

где  $x_0$  – расстояние от МСК до стопы робота;  $L$  – длина шага;  $T_f$  – время выполнения первого шага;  $H$  – максимальная высота подъема стопы ноги.

Первый шаг выполняется с обеспечением статической устойчивости робота и включает следующую последовательность действий (рис. 3, а): перенос центра масс робота на правую ногу, перемещение левой ноги на шаг вперед по траектории (1) и перенос центра масс в середину между стопами с разгоном до заданной скорости  $v_c^d = (v_{cx}^d, v_{cy}^d, 0)^T$ .

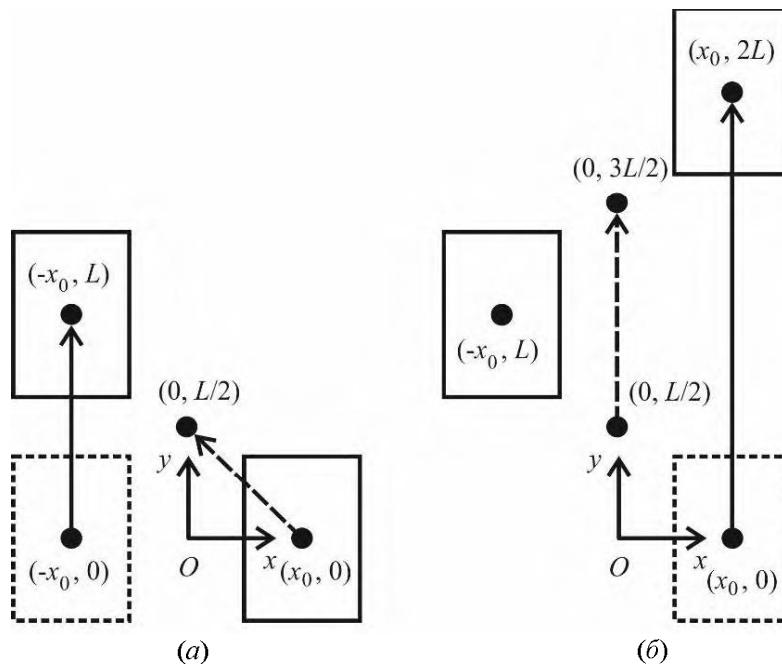


Рис. 3. Первый шаг робота (а) и движение с фазой опоры на левую ногу (б)  
 Fig. 3. Robot first step (a) and single support phase on the left foot (b)

Воспользуемся кубическим многочленом для задания траектории движения центра масс робота на третьем этапе выполнения первого шага робота. Пусть  $T_a$  – время движения робота на этом этапе. Тогда, используя граничные условия  $x_c^d(0) = x_0$ ;  $x_c^d(T_a) = 0$ ;  $\dot{x}_c^d(0) = 0$ ;  $\dot{x}_c^d(T_a) = v_{cx}^d$ ;  $y_c^d(0) = 0$ ;  $y_c^d(T_a) = L/2$ ;  $\dot{y}_c^d(0) = 0$  и  $\dot{y}_c^d(T_a) = v_{cy}^d$ , получим траекторию движения центра масс робота на отрезке  $t \in [0, T_a]$ :

$$\begin{aligned} x_c^d(t) &= \left( \frac{v_{cx}^d}{T_a^2} + \frac{2x_0}{T_a^3} \right) t^3 - \left( \frac{v_{cx}^d}{T_a} + \frac{3x_0}{T_a^2} \right) t^2 + x_0; \\ y_c^d(t) &= \left( \frac{v_{cy}^d}{T_a^2} - \frac{L}{T_a^3} \right) t^3 + \left( \frac{3L}{2T_a^2} - \frac{v_{cy}^d}{T_a} \right) t^2; \quad z_c^d(t) = z_0 = const. \end{aligned} \quad (2)$$

Прямолинейное движение ДШР является циклическим повторением движений правой и левой ноги. Рассмотрим очередной шаг робота, где левая нога является опорной, а правая нога находится изначально позади (см. рис. 3, б). Пусть траектория  $p_r^d = (x_r^d, y_r^d, z_r^d)^T$  движения стопы правой ноги на отрезке  $t \in [0, T_s]$  задается как:

$$x_r^d(t) = x_0 = const; \quad y_r^d(t) = L \left( 1 - \cos \frac{\pi t}{T_s} \right); \quad z_r^d(t) = \frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi t}{T_s} \right), \quad (3)$$

где  $T_s$  – время выполнения шага.

Для вычисления траектории движения центра масс робота воспользуемся критерием ТНМ динамической устойчивости робота [6] и моделью обратного маятника с виртуальной высотой [7]. Тогда координаты ТНМ  $(p_x, p_y)$  связаны с координатами центра масс  $(x_c, y_c)$  робота посредством уравнений:

$$p_x = x_c - \frac{\alpha z_0}{g} \ddot{x}_c; \quad p_y = y_c - \frac{\beta z_0}{g} \ddot{y}_c, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $z_0$  – высота маятника;  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные.

В модели (4) величины  $\alpha z_0$  и  $\beta z_0$  задают виртуальную высоту маятника для двух разных плоскостей. В системе координат стопы левой ноги робота будет  $p_x = 0$  и  $p_y = 0$ , а соотношения (4) сводятся к дифференциальным уравнениям:

$$\ddot{x}_c - \frac{g}{\alpha z_0} x_c = 0; \quad \ddot{y}_c - \frac{g}{\beta z_0} y_c = 0.$$

Решая эти уравнения, после обратного преобразований в МСК получим траекторию движения центра масс робота на отрезке  $t \in [0, T_s]$ :

$$x_c^d(t) = -x_0 + C_1 \exp(k_x t) + C_2 \exp(-k_x t); \quad y_c^d(t) = L + C_3 \exp(k_y t) + C_4 \exp(-k_y t); \quad (5)$$

$$z_c^d(t) = z_0 = const,$$

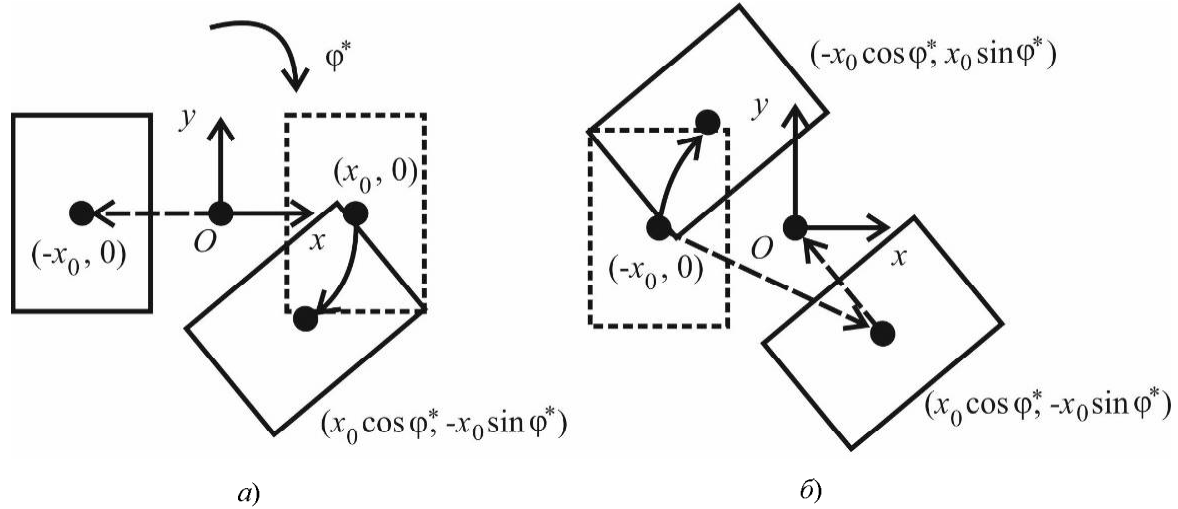
где  $k_x = \sqrt{g/\alpha z_0}$ ;  $k_y = \sqrt{g/\beta z_0}$ ; константы  $C_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$  вычисляются из граничных условий  $x_c(0) = 0$ ,  $x_c(T_s) = 0$ ,  $y_c(0) = L/2$ ,  $y_c(T_s) = 3L/2$  путем решения системы линейных уравнений. При этом для (5) должно быть выполнено  $v_{cx}^d = \dot{x}_c^d(0)$  и  $v_{cy}^d = \dot{y}_c^d(0)$ .

Траектории движения стоп левой ноги и центра масс робота в фазе движения с опорой на правую ногу задаются аналогично выражениям (3) и (5).

Последний шаг робота выполняется в фазе опоры на левую ногу. Для обеспечения статической устойчивости рассматривается последовательность действий, которая является

обратной выполнению первого шага. Сначала осуществляется торможение робота с переносом центра масс на левую ногу, затем перенос правой ноги по траектории (1) и в конце робот возвращается в исходное состояние.

Рассмотрим поворот ДШР направо по часовой стрелке на угол  $\varphi^*$ , который выполняется с обеспечением статической устойчивости робота. Последовательность действий показана на рис. 4.



**Рис. 4. Поворот робота вправо с фазой опоры на левую (а) и правую (б) ногу**  
**Fig. 4. Robot rotation to the right with support on the left foot (a) and the right foot (b)**

На первом этапе центр масс робота смещается на левую ногу и выполняется движение стопы правой ноги (см. рис. 4, а) по траектории, задаваемой вектором  $p_r^d = (x_r^d, y_r^d, z_r^d)^T$  и матрицей  $R_r^d = R(\varphi_r^d(t), z)$  поворота на угол  $\varphi_r^d(t)$  вокруг оси  $z$ , которые вычисляются как:

$$\varphi_r^d(t) = -\varphi^* \frac{t}{T_r}; \quad x_r^d(t) = x_0 \cos(\varphi_r^d(t)); \quad y_r^d(t) = x_0 \sin(\varphi_r^d(t)); \quad z_r^d(t) = \frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi t}{T_r} \right), \quad (6)$$

где  $T_r$  – время переноса стопы правой ноги.

На втором этапе центр масс ДШР переносится на правую ногу с поворотом корпуса на угол  $\varphi^*$  и выполняется движение стопы левой ноги (см. рис. 4, б) по траектории, задаваемой вектором  $p_l^d = (x_l^d, y_l^d, z_l^d)^T$  и матрицей  $R_l^d = R(\varphi_l^d(t), z)$ :

$$\varphi_l^d(t) = -\varphi^* \frac{t}{T_l}; \quad x_l^d(t) = -x_0 \cos(\varphi_l^d(t)); \quad y_l^d(t) = -x_0 \sin(\varphi_l^d(t)); \quad z_l^d(t) = \frac{H}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi t}{T_l} \right), \quad (7)$$

где  $T_l$  – время переноса стопы левой ноги.

На последнем этапе центр масс ДШР переводится в середину опоры двух ног. Поворот ДШР влево против часовой стрелки осуществляется аналогично траекториям (6) и (7) с фазами опоры сначала на левую ногу робота, а затем на правую.

**Инверсная кинематика.** Задача инверсной кинематики для педипуляторов ДШР формулируется следующим образом: зная координаты стоп и торса робота (положения и ориентации) требуется найти углы в суставах педипуляторов робота. Другим словами, для заданных  $p_r^d, R_r^d, p_l^d, R_l^d, p_c^d, R_c^d$  необходимо найти  $q_r^d$  и  $q_l^d$ .

Для решения этой задачи воспользуемся итерационным методом Левенберга-Марквардта [10]. Опишем применение этого метода на примере вычисления углов  $q_r$  правого педипулятора робота. Пусть  $p_r(q_r)$  и  $R_r(q_r)$  – положение и ориентация стопы, которые вычисляются путем решения задачи прямой кинематики для заданных  $p_c^d$  и  $R_c^d$ . В этом случае вектор невязки определяется как:  $e(q_r) = (e_1(q_r), e_2(q_r))^T$ , где  $e_1(q_r) = p_r^d - p_r(q_r) -$

– невязка по положению стопы;  $e_2(q_r) = a((R_c^d)^T R_r(q_r))$  – невязка по ориентации стопы;  $a(R)$  – эквивалентное представление ориентации в виде вектора оси мгновенного вращения.

Идея метода Левенберга-Марквардта заключается в том, что на каждом шаге итерации задача формулируется в виде минимизации функции:

$$\frac{1}{2} d_k^T W_B d_k + \frac{1}{2} \Delta q_{r,k}^T W_n \Delta q_{r,k} \rightarrow \min, \Delta q_{r,k} = q_{r,k+1} - q_{r,k}, d_k = e_k - J_k \Delta q_{r,k}, \quad (8)$$

где  $k$  – номер итерации;  $q_{r,k}$  – углы поворотов правого педипулятора робота на  $k$ -ой итерации;  $W_B$  – диагональная весовая матрица (размерностью 6 на 6);  $W_n$  – диагональная матрица демпфирования (размерностью  $N$  на  $N$ );  $J_k$  – матрица Якоби (размерностью 6 на  $N$ ).

На каждом шаге итерации минимизация (8) выполняется по следующему правилу:

$$q_{r,k+1} = q_{r,k} + H_k^{-1} g_k, H_k = J_k^T W_B J_k + W_n, g_k = J_k^T W_B e_k, \quad (9)$$

где  $H_k$  – матрица Гессе (размерностью  $N$  на  $N$ ).

С использованием (9) и заданием начального значения  $q_{r,k} = 0$  итерации продолжаются до тех пор, пока не будет выполнено  $|\Delta q_{r,k}^i| \leq \varepsilon, i = \overline{1, N}$ , где  $\varepsilon$  – заданное число.

Аналогичным образом реализуется решение задачи инверсной кинематики для левого педипулятора робота.

### Синтез управления роботом

Управление движением ДШР осуществляется под действием электроприводов, установленных в сочленениях его педипуляторов. Задача заключается в том, чтобы обеспечить углы поворотов  $q_l^d(t)$  и  $q_r^d(t)$ , полученные при генерации шаблона ходьбы. Для решения этой задачи рассмотрим ПД регуляторы с обратной связью по показаниям датчиков углов  $q_l(t)$  и  $q_r(t)$ . Тогда напряжения  $u_l$  и  $u_r$ , подаваемые на электроприводы педипуляторов, формируются в следующем виде:

$$u_{l,i}(t) = -k_p (q_{l,i}(t) - q_{l,i}^d(t)) - k_d (\dot{q}_{l,i}(t) - \dot{q}_{l,i}^d(t)); \quad (10)$$

$$u_{r,i}(t) = -k_p (q_{r,i}(t) - q_{r,i}^d(t)) - k_d (\dot{q}_{r,i}(t) - \dot{q}_{r,i}^d(t)), i = \overline{1, N},$$

где  $k_p > 0$  и  $k_d > 0$  – коэффициенты ПД регулятора.

Напряжения электроприводов ограничены по модулю величиной  $u_{\max}$ . Поэтому на практике значения  $u_{l,i}$  и  $u_{r,i}$ , вычисленные по формуле (10), необходимо скорректировать следующим образом: если  $u_{l,i} > u_{\max}$ , то  $u_{l,i} = u_{\max}$ ; если  $u_{l,i} < -u_{\max}$ , то  $u_{l,i} = -u_{\max}$ . Аналогичным образом корректируются напряжения  $u_{r,i}$ .

### Результаты моделирования

Предложенные методы и подходы управления движением ДШР были реализованы в программном комплексе виртуального окружения VirSim [8], созданном в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. В этом программном комплексе реализация системы управления роботом осуществляется с применением технологии виртуальных пультов и функциональных схем. Идея такого подхода заключается в том, что пользователь взаимодействует с элементами виртуального пульта [9] (например, нажимает на кнопки) и задает команды на выполнение движений манипуляторов и педипуляторов робота. Логика управления роботом подчиняется функциональной схеме, которая создается в специальном редакторе из набора связанных линиями блоков, куда входят блоки элементов виртуального пульта, датчиков, исполнительных устройств и т.д.

На каждом шаге моделирования по командам, поступающим от виртуального пульта управления, выполняется расчет управляющих сигналов, согласно созданной функциональной схеме. Полученные значения управляющих сигналов далее подаются на исполнительные устройства робота. Такой подход был задействован для полуавтоматического управления ДШР. Для генерации шаблона ходьбы робота была использована среда Matlab, в которой в режиме офлайн был выполнен расчет траекторий  $q_l(t)$  и  $q_r(t)$  для основных движений робота с их последующей записью в текстовые файлы. На рис. 5 показан фрагмент упрощенной функциональной схемы для управления одним электроприводом педипулятора ДШР в полуавтоматическом режиме.

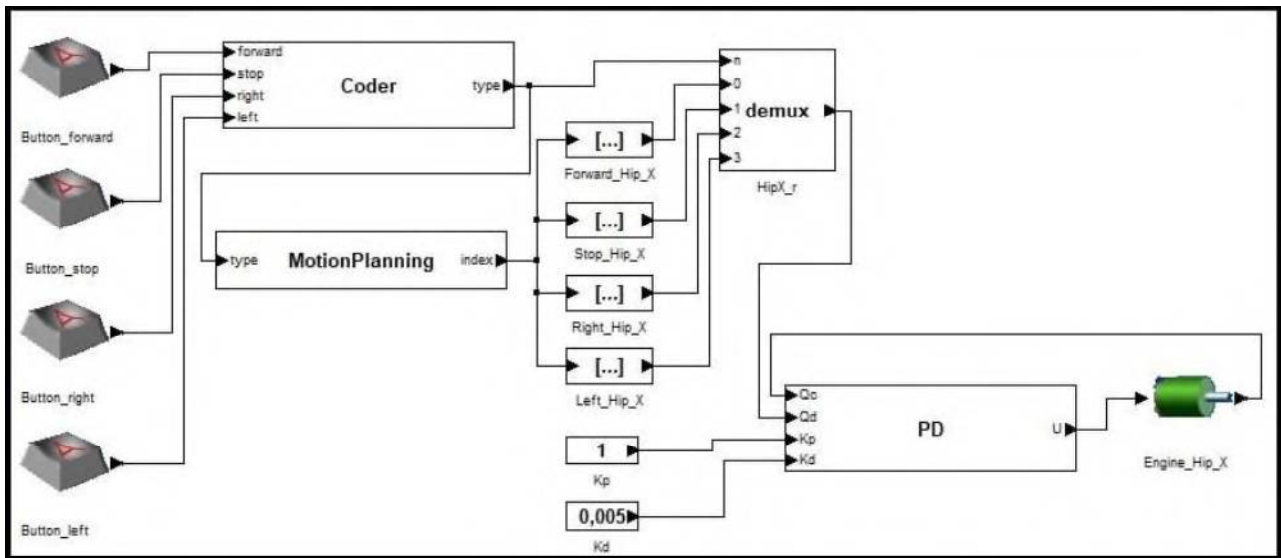


Рис. 5. Функциональная схема управления

Fig. 5. Block diagram scheme

В этой схеме выходы блоков кнопок пульта задают команды для выполнения движений робота, которые обрабатываются для вычисления индекса массива, который соответствует шаблону ходьбы. По этому индексу из массива извлекается требуемый угол поворота в сочленении робота. Затем в схеме применяется ПД регулятор вида (10) для поддержания заданного угла путем вычисления напряжения, подаваемого на электропривод робота.

Моделирование полуавтоматического режима управления ДШР проводилось в программном комплексе VirSim на примере решения задачи поиска и дезактивации радиоактивного объекта. Основные параметры моделирования приведены в табл 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

Simulation parameters

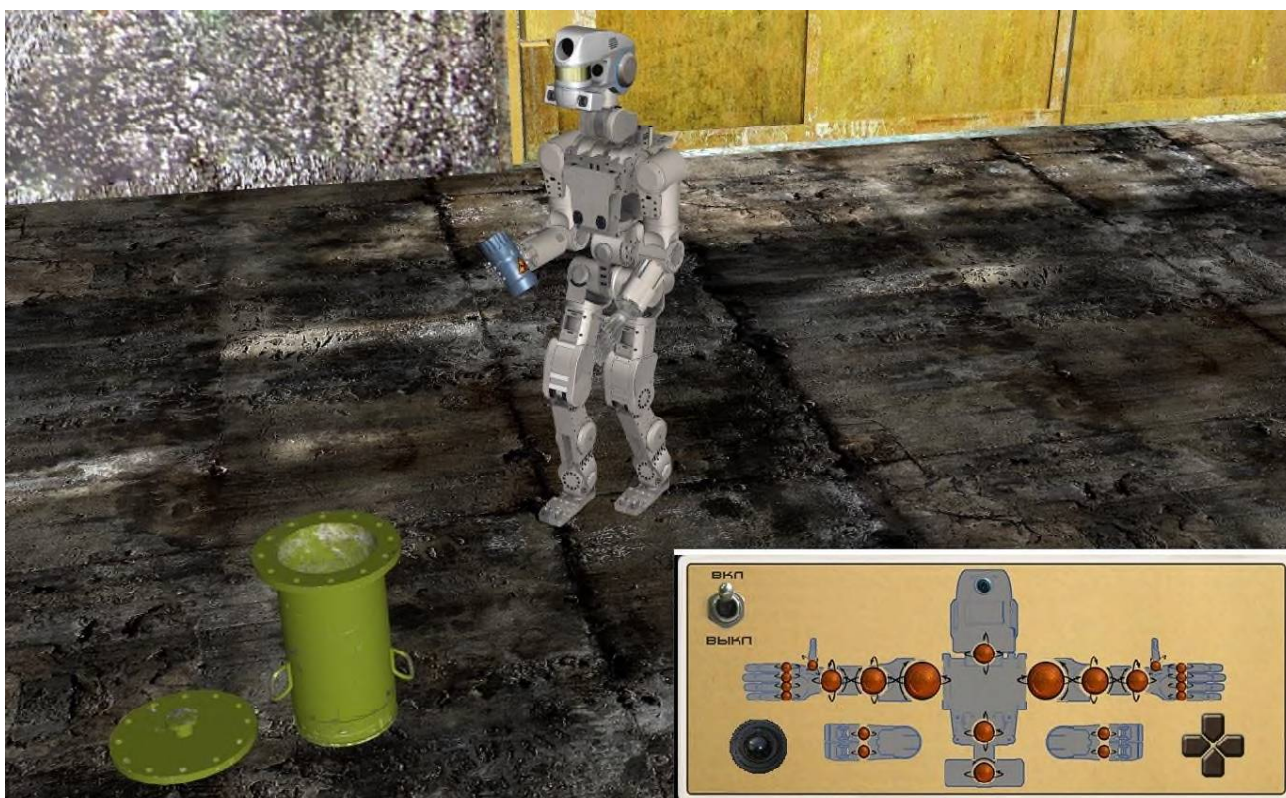
Table 1

| Параметр    | Значение   | Параметр | Значение | Параметр      | Значение   |
|-------------|------------|----------|----------|---------------|------------|
| $L$         | 20 см      | $T_f$    | 1,0 с    | $\alpha$      | 0,1        |
| $H$         | 10 см      | $T_a$    | 0,75 с   | $\beta$       | 1          |
| $x_0$       | 10,09 см   | $T_s$    | 1,5 с    | $\varepsilon$ | $10^{-12}$ |
| $z_0$       | 120 см     | $T_r$    | 1,0 с    | $k_p$         | 1          |
| $\varphi^*$ | $45^\circ$ | $T_l$    | 1,0 с    | $k_d$         | 0,005      |



Для моделирования была создана виртуальная сцена помещения, в которой робот может свободно перемещаться. Рассматриваемая задача состояла в том, чтобы захватить манипулятором робота радиоактивный контейнер и перенести его в специальную урну. Для реализации этой задачи был задействован виртуальный пульт, с помощью которого осуществляется управление двигателями манипуляторов и торсом робота в командном режиме, а также задаются основные команды для выполнения перемещения робота (вперед, остановка, поворот вправо, поворот влево).

На рис. 6 показано положение робота при его движении по направлению к урне, где управление роботом осуществляется с помощью виртуального пульта. Результаты апробации в программном комплексе VirSim показали, что предложенные в статье методы и подходы позволяют эффективно реализовать движение виртуального ДШР по ровной поверхности с сохранением равновесия.



**Рис. 6.** Управление движением ДШР в полуавтоматическом режиме с помощью виртуального пульта

*Fig. 6. Motion control of BWR in semi-automatic mode using virtual panel*

### **Заключение**

В данной работе рассмотрены решения для реализации полуавтоматического управления движением двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения. Предложенные методы и подходы генерации шаблона ходьбы и синтеза управления роботом обеспечивают статическую и динамическую устойчивость при движении виртуального робота по ровной поверхности. Полученные в работе результаты могут быть использованы для решения различных практических задач в системах виртуального окружения, имитационно-тренажерных комплексах, образовательных приложениях, анимации и т.д. В дальнейшем предполагается развитие предложенных методов и подходов для стабилизации движения двуногого шагающего робота при изменении его динамических параметров.

## Список источников:

1. Юревич, Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие, 4-е изд., перераб. и доп. // СПб: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с.
2. Flexible Muscle-Based Locomotion for Bipedal Creatures / T. Geijtenbeek, M. van de Panne, A. Frank van der Stappen // ACM Transactions on Graphics 32. – 2013. – No. 6. doi: 10.1145/2508363.2508399.
3. Modeling, simulation and optimization of bipedal walking // K. Mombauri, K. Berns. – Springer. –2013. – 298 p.
4. Biped walking pattern generation based on spatially quantized dynamics / S. Kajita, M. Benallegue, R. Cisneros, T. Sakaguchi, S. Nakaoka, M. Morisawa, K. Kaneko, F. Kanehiro // IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics, Birmingham, UK. – 2017. – pp. 599-605. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246933.
5. Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion, ser. Control and Automation // E. Westervelt, J. Grizzle, C. Chevallereau, J. Choi, B. Morris. – Boca Raton: CRC Press, June 2007. – 503 p.
6. Zero-moment point – thirty-five years of its life / M. Vukobratovic, B. Borovac //International Journal of Humanoid Robotics. – 2004. –No. 1. – pp. 157-173. doi: 10.1142/S0219843604000083.
7. An effective trajectory generation method for bipedal walking / T. Ha, C.-H. Choi // Robotics and Autonomous Systems. – 2007. – No. 55. – pp. 795-810. doi: 10.1016/j.robot.2007.06.001.
8. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов / М.В. Михайлюк, А.В. Мальцев, П.Ю. Тимохин, Е.В. Страшнов, Б.И. Крючков, В.М. Усов // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – Т. 37. – № 4. – С. 72-95. doi: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
9. Командный режим управления виртуальным двуногим шагающим роботом / Е.В. Страшнов, И.Н. Мироненко, Л.А. Финагин // Труды НИИСИ РАН. – 2020. – Т. 10. – № 4. – С. 33-39.
10. Sugihara T. Solvability-unconcerned inverse kinematics based on Levenberg-Marquardt method with robust damping // 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Paris, France.–2009.– pp. 555-560. doi: 10.1109/ICHR.2009.5379515.

## Информация об авторах

### Евгений Владимирович Страшнов

научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

### Леонид Алексеевич Финагин

научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

## References:

1. Yurevich E.I. Fundamentals of Robotics. St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2017.
2. Geijtenbeek T., Van de Panne M., Frank van der Stappen A. Flexible Muscle-Based Locomotion for Bipedal Creatures. ACM Transactions on Graphics 32. 2013 (6). doi: 10.1145/2508363.2508399.
3. Mombauri K., Berns K. Modelling, Simulation and Optimization of Bipedal Walking. Springer; 2013.
4. Kajita S, Benallegue M, Cisneros R, Sakaguchi T, Nakaoka S, Morisawa M, Kaneko K, Kanehiro F. Biped Walking Pattern Generation Based on Spatially Quantized Dynamics. In: Proceedings of IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics; Birmingham (UK); 2017. p. 599-605. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8246933.
5. Westervelt E., Grizzle J., Chevallereau C., Choi J., Morris B. Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion, ser. Control and Automation. Boca Raton: CRC Press; 2007.
6. Vukobratovic M., Borovac B. Zero-Moment Point –Thirty-Five Years of Its Life. International Journal of Humanoid Robotics. 2004;1:157-173. doi: 10.1142/S0219843604000083.
7. Ha T., Choi C.-H. An Effective Trajectory Generation Method for Bipedal Walking. Robotics and Autonomous Systems. 2007;55:795-810. doi: 10.1016/j.robot.2007.06.001.
8. Mikhailiyuk M.V., Maltsev A.V., Timokhin P.Yu., Strashnov E.V., Kryuchkov B.I., Usov V.M. VirSim Virtual Environment System for Simulation Training Complexes for Cosmonaut Training. Manned Spaceflight Scientific Periodical. 2020;37(4):72-95. doi: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
9. Strashnov EV, Mironenko IN, Finagin LA. Command Mode for Virtual Bipedal Walking Robot Control. In: Proceedings of NIISI RAS: 2020;10(4). p.33-39.
10. Sugihara T. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics Based on Levenberg-Marquardt Method with Robust Damping. In: Proceedings of the 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots; Paris (France):2009. p.555-560. doi: 10.1109/ICHR.2009.5379515.

## Information about authors:

### Evgeny Vladimirovich Strashnov

Researcher of the Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences»

### Leonid Alekseevich Finagin

Researcher of the Federal State Institution «Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences»

**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 поступила в редакцию 22.06.2022; одобрена после рецензирования 02.08.2022;  
принята к публикации 05.08.2022.**

**The article was submitted 22.06.2022; approved after reviewing 02.08.2022; accepted for  
publication 05.08.2022.**

**Рецензент** – Подвесовский А.Г., кандидат технических наук, доцент, Брянский  
государственный технический университет.

**Reviewer** – Podvesovskij A.G., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk  
State Technical University.