

УДК 621.865.8

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-4-12

Система управления статически неустойчивым шагающим аппаратом**А. П. Борина**, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследование посвящено разработке методики формирования алгоритмов управления двуногим статически неустойчивым шагающим аппаратом. Составлена математическая модель шагающего аппарата. Определены аналитические зависимости между шестью координатами корпуса аппарата, принятого как абсолютно твердое тело, обобщенными координатами левой и правой ног и абсолютными координатами точек постановки ног в опоре. Приведена структурная схема системы управления. Составлены дифференциальные уравнения движения. Устойчивое движение аппарата около требуемой траектории обеспечивается дискретным управлением параметрами: «когда и куда ставить ногу». Для расчета этих параметров предлагается использовать перевернутый математический маятник как идеальный механизм. При малых отклонениях от вертикального положения его линеаризованные дифференциальные уравнения движения легко интегрируются и заменяются на общее решение в виде элементарных алгебраических функций, допускающих явное представление координат точки постановки ноги по измеренным начальным и задаваемым конечным условиям. В работе выполнена проверка такого метода управления при различных алгоритмах движения. Исследованы изменения координат центра тяжести аппарата, его скоростей и ускорений, углов конечных поворотов корпуса и их производных для некоторых характерных режимов движения. Численные результаты исследования подтвердили малость отклонений фактического движения аппарата от желаемого. Разработанная методика расчета двуногих статически неустойчивых шагающих аппаратов позволяет улучшать конструкцию и систему управления на стадии проектирования и может быть использована при проектировании управляемых машин, имитирующих ходьбу человека, характеризующихся высокой скоростью и маневренностью, отсутствием развитых стоп и синхронизированных с естественными неуправляемыми движениями.

Ключевые слова: шагающие аппараты, уравнения движения, перевернутый маятник, динамическая устойчивость, система управления.

Введение

Задачи разработки новых методов кинематического и динамического анализа [1] двуногих статически неустойчивых шагающих машин, методов управления на различных режимах движения и экспериментального исследования [2] являются актуальными и перспективными в робототехнике.

Машины с шагающим движителем характеризуются высокой проходимостью, маневренностью, высокой адаптацией к неровностям опорной поверхности [3, 4], а также возможностью комфортабельного движения при транспортировке человека или чувствительной аппаратуры [5].

Эти свойства шагающих машин определяют их практическое применение: для транспортировки грузов [6], в поисково-спасательных операциях в условиях химического или радиоак-

тивного загрязнения, в военных целях, для различного рода исследований или наблюдений [7].

Большинство шагающих аппаратов недостаточно маневренные, представляют собой статически устойчивые системы [8] с низкой скоростью. Необходимо снижать степень статической устойчивости [9], отказавшись от развитых ступней [10, 11] и ограничившись парой ног. Для обеспечения динамической устойчивости аппарат должен постоянно переступать с ноги на ногу. Ответ на вопрос, куда и когда ставить ногу при ходьбе, обеспечит устойчивое движение аппарата около требуемой траектории.

Цель работы – синтез законов управления статически неустойчивым двуногим шагающим аппаратом и формирование методов оценивания динамических процессов при его ходьбе, позволяющих улучшать конструкцию и систему управления на стадии проектирования.

Объект исследования

Рассмотрим кинематическую схему двуного шагающего аппарата, представленную на рисунке 1.

Корпус шагающего аппарата соединен с ногами с помощью сдвоенных шарниров O_{R1}, O_{L1} и O_{R2}, O_{L2} , которые обеспечивают отведение ног в сторону и их перемещение вперед или назад. С шарнирами и точками опоры связаны системы координат $O_{Ri}x_{Ri}y_{Ri}z_{Ri}$ и $O_{Li}x_{Li}y_{Li}z_{Li}$, где $i = 1, 2, 3$. На рисунке 1 системы координат показаны в положении, когда углы поворота левого и правого тазобедренных шарниров $\theta_L, \theta_R, \phi_L, \phi_R$ равны нулю, длины левой и правой ног k_L, k_R одинаковы.

Длины звеньев $O_{L1}O_{L2}$ и $O_{R1}O_{R2}$ равны e . Центры шарниров O_{L1} и O_{R1} относительно системы $O_{K3}x_{K3}y_{K3}z_{K3}$, связанной с корпусом аппарата, имеют координаты $(\pm b_x, b_y, b_z)$. Центр тяжести корпуса O_{K3} в неподвижной системе $OXYZ$ имеет координаты (x, y, z) , ориентация корпуса в пространстве задается углами конечного поворота (α, β, γ) . Опорные точки стоп O_{R3} и O_{L3} имеют координаты (x_R, y_R, z_R) и (x_L, y_L, z_L) соответственно.

Описание системы управления

На рисунке 2 показана структурная схема системы управления двуногим шагающим аппаратом.

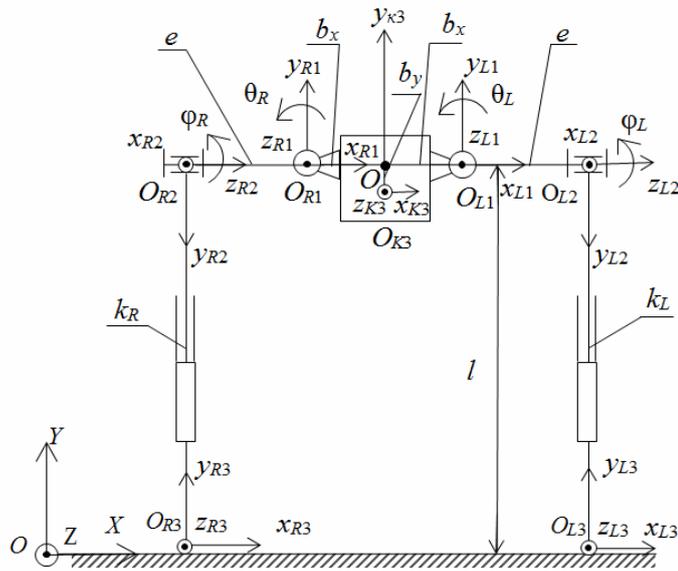


Рис. 1. Схема двуногого шагающего аппарата

Fig. 1. Scheme of biped walking robot

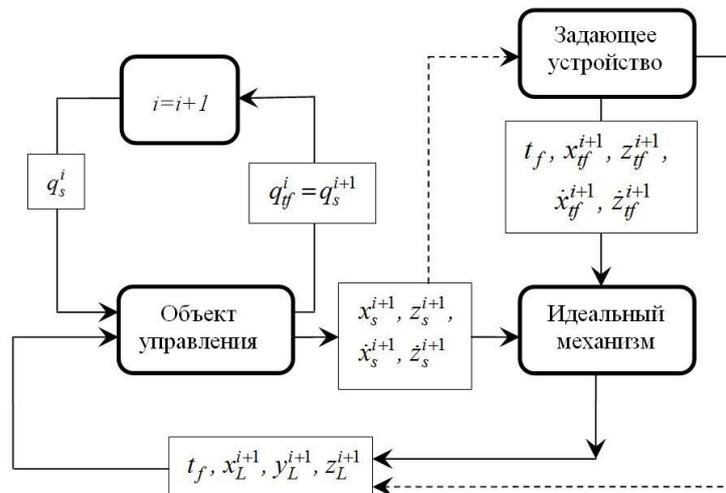


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Fig. 2. Structural scheme of control system

На основе выбранного режима движения блок задающего устройства обеспечивает блок идеального механизма кинематическими условиями в конце последующего шага $i + 1$. В заданное время t_f окончания текущего i -го шага по измерениям x_s^{i+1} , z_s^{i+1} , \dot{x}_s^{i+1} , \dot{z}_s^{i+1} объекта управления и требуемым конечным условиям для шага $i + 1$ в блоке идеального механизма [12] определяются координаты точки постановки ноги x_L^{i+1} , z_L^{i+1} на шаге $i + 1$ в фазе опоры на левую ногу. Движение на правой ноге описывается аналогично.

На рисунке 2 показана цепь обратной связи q^i по всем обобщенным координатам объекта [13], указывающая на присвоение начальным условиям шага $i + 1$ значений конечных условий шага i .

Идеальный механизм

Вышеупомянутые координаты точки постановки ноги x_L^{i+1} , z_L^{i+1} в конце шага определим с помощью уравнений перевернутого маятника как идеального механизма [14, 15] по известным условиям для центра тяжести аппарата в начале шага x_s , \dot{x}_s , z_s , \dot{z}_s и требуемым условиям x_{yf} , \dot{x}_{yf} , z_{yf} , \dot{z}_{yf} в его конце:

$$\begin{cases} x_{yf} - x_L = \frac{1}{2} \left((x_s - x_L) + \frac{\dot{x}_s}{k} \right) \psi + \frac{1}{2} \left((x_s - x_L) - \frac{\dot{x}_s}{k} \right) \psi^{-1}, \\ z_{yf} - z_L = \frac{1}{2} \left((z_s - z_L) + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi + \frac{1}{2} \left((z_s - z_L) - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi^{-1}, \\ \dot{x}_{yf} = \frac{k}{2} \left(x_s - x_L + \frac{\dot{x}_s}{k} \right) \psi - \frac{k}{2} \left(x_s - x_L - \frac{\dot{x}_s}{k} \right) \psi^{-1}, \\ \dot{z}_{yf} = \frac{k}{2} \left(z_s - z_L + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi - \frac{k}{2} \left(z_s - z_L - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi^{-1}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\psi = e^{k t_f}$, $k = (g/l)^{0,5}$ – частота свободных колебаний математического маятника; l – постоянная длина маятника; g – ускорение свободного падения; t_f – длительность шага; индекс L указывает на левую ногу. Для правой ноги уравнения будут иметь аналогичный вид, переменные, обозначающие параметры левой ноги, будут иметь индекс R .

Уравнения движения

Для определения шести обобщенных координат и трех движущих сил объекта управления (рис. 2) как функций времени на каждом шаге воспользуемся системой (2) шести нелинейных дифференциальных уравнений [16]:

$$\begin{cases} -m\ddot{x} + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial x} + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial x} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial x} = 0, \\ -m(\ddot{y} + g) + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial y} + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial y} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial y} = 0, \\ -m\ddot{z} + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial z} + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial z} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial z} = 0, \\ M_{zK1}^\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\gamma}) + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial \alpha} + \\ + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial \alpha} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial \alpha} = 0, \\ M_{zK2}^\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\gamma}) + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial \beta} + \\ + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial \beta} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial \beta} = 0, \\ M_{zK3}^\Phi(\alpha, \beta, \gamma, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}, \ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\gamma}) + M_{\theta L} \frac{\partial \theta_L(q)}{\partial \gamma} + \\ + M_{\phi L} \frac{\partial \phi_L(q)}{\partial \gamma} + R_L \frac{\partial k_L(q)}{\partial \gamma} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) описывает движение шагающего аппарата с шестью степенями свободы, представленного на рисунке 1, в фазе опоры на одну ногу. В качестве независимых обобщенных координат выберем α , β , γ , x , y , z , x_L , y_L , z_L , совокупность этих обобщенных координат обозначим q . В системе (2) M_{zK1}^Φ , M_{zK2}^Φ , M_{zK3}^Φ – проекции вектора главного момента сил инерции на оси системы координат, связанной с корпусом; R_L и $M_{\theta L}$, $M_{\phi L}$ – движущая сила, действующая вдоль ноги, и движущие моменты в приводах.

Проверка работоспособности системы управления

Промоделируем горизонтальное прямолинейное равномерное движение аппарата. Примем высоту мест постановки ног постоянными $y_L = y_R = 0$. Зададим геометрические и инерционные параметры аппарата (см. рис. 1) приблизительно соответствующими возможному шагающему креслу с сидящим на нем человеком: $b_x = 0,15$ м, $b_y = -0,3$ м, $b_z = 0$ м, $L = 0,95$ м, $m = 200$ кг, $t_f = 0,5$ с. Для определения места постановки ноги с помощью уравнений (1) на первом шаге зададимся нулевыми начальными условиями: $\dot{x}_s = 0$ м/с, $\dot{z}_s = 0$ м/с, $x_s = 0$ м, $z_s = 0$ м и требуемыми конечными условиями: $\dot{x}_{yf} = -0,4$ м/с и $\dot{z}_{yf} = 1$ м/с. Для последующих шагов начальными условиями будут являться конечные условия предыдущего шага, определяемые из дифференциальных уравнений дви-

жения (2) объекта управления. Требуемые конечные условия сохраняются, однако знак при \dot{x}_{cf} должен изменяться на каждом шаге [17, 18]. После определения координат места постановки ноги рассчитаем движение модели аппарата, используя уравнения (2). Подставим в эти уравнения только что полученные из (1) координаты x_L и z_L , дополним начальными условиями $\alpha(0) = 0$ рад, $\beta(0) = 0$ рад, $\gamma(0) = 0$ рад, $x(0) = 0$ м, $y(0) = 1,25$ м, $z(0) = 0$ м, $\dot{\alpha}(0) = 0$ с⁻¹, $\dot{\beta}(0) = 0$ с⁻¹, $\dot{\gamma}(0) = 0$ с⁻¹, $\dot{x}(0) = 0$ м/с, $\dot{y}(0) = 0$ м/с, $\dot{z}(0) = 0$ м/с. Для последующих шагов начальными

условиями, как и ранее, будут являться конечные условия из предыдущего шага.

Траектория движения центра тяжести при прямолинейной равномерной ходьбе будет иметь вид, показанный на рисунке 3, кружками отмечены места постановки ног, ходьба начинается с левой ноги. Заметим, что места постановки ног модели аппарата приблизительно находятся в точках пересечения асимптот траекторий.

Аналогичным образом можно моделировать ходьбу с поворотом и режим стояния. Траектории центра тяжести аппарата при этих режимах представлены на рисунке 4.

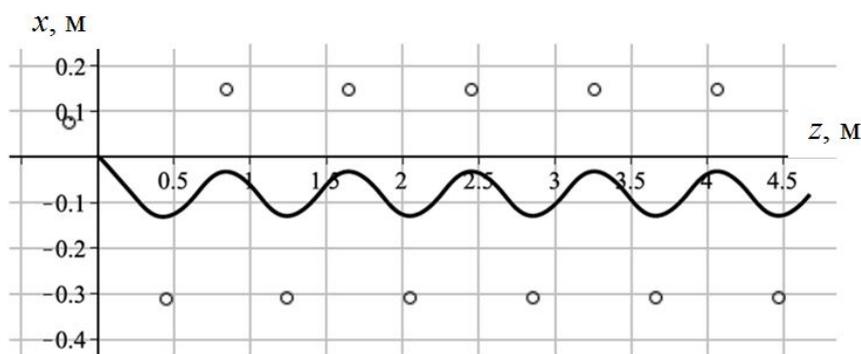


Рис. 3. Траектория движения центра тяжести аппарата при прямолинейной ходьбе с постоянной скоростью

Fig. 3. Trajectory of the center of gravity during straight-line walking with the constant velocity

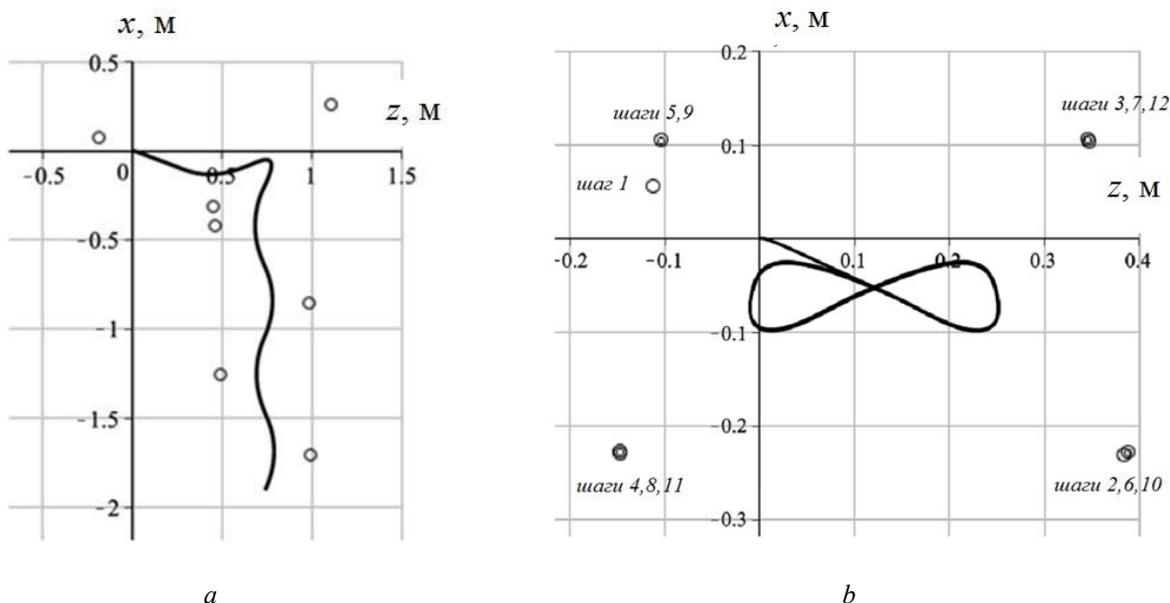


Рис. 4. Траектория центра тяжести корпуса аппарата при ходьбе с поворотом на угол 90° на третьем шаге (а), при динамическом стоянии (б)

Fig. 4. Trajectory of the center of gravity during rotation 90° at the third step (a), dynamic standing (b)

Система уравнения движения (2) позволяет найти законы изменения координат центра тяжести, их скоростей и ускорений, графики кото-

рых при равномерном движении по наклонной плоскости вверх представлены на рисунке 5. Угол наклона опорной плоскости равен 18°.

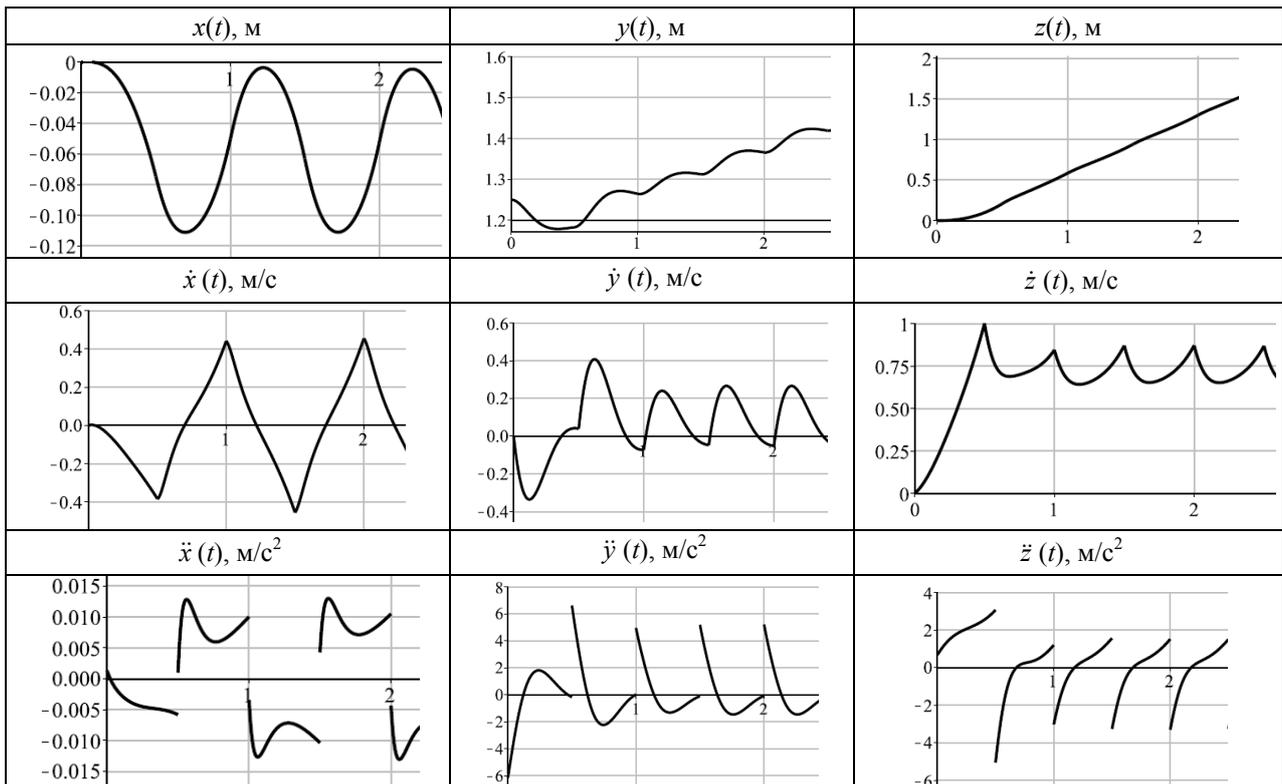


Рис. 5. Графики изменений координат центра тяжести, их скоростей и ускорений при движении по наклонной плоскости вверх

Fig. 5. Trajectories of the center of gravity, velocities, accelerations during moving upward on the inclined plane

Система уравнений (2) также позволяет определить углы конечных поворотов корпуса аппарата α , β и γ , графики которых при движении аппарата по наклонной плоскости вверх представлены на рисунке 6.

Обобщенные координаты корпуса позволяют определять углы поворота θ и φ левого

и правого тазобедренных шарниров, длины ног k , движущие моменты M_θ и M_φ и силу R , а также построить графики их изменения во времени, представленные на рисунке 7. Ходьба начинается с левой ноги, сплошные линии соответствуют левой ноге, а штриховые – правой.

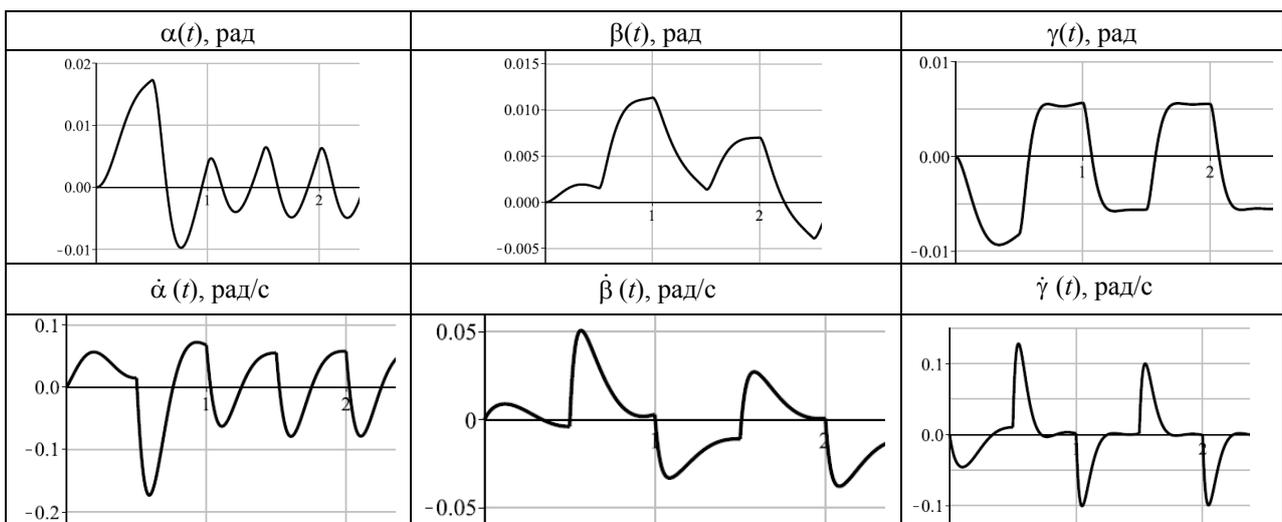


Рис. 6. Графики изменений углов конечных поворотов корпуса аппарата при движении по наклонной плоскости вверх

Fig. 6. Diagrams of final turns angles of the robot body during moving upward on the inclined plane

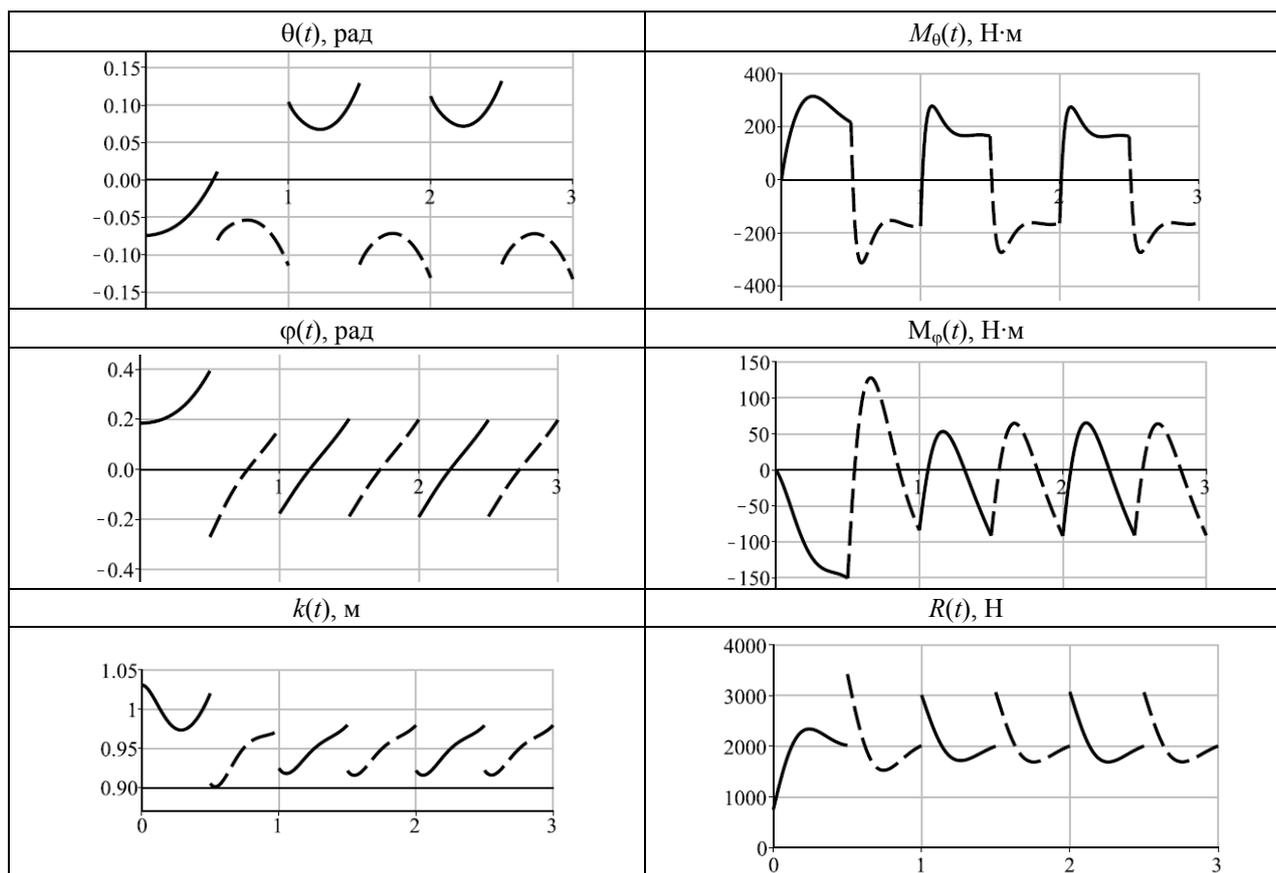


Рис. 7. Графики изменений углов поворота левого и правого шарниров, длин ног, движущих моментов и силы при движении шагающего аппарата по наклонной плоскости вверх

Fig. 7. Diagrams of rotation angles of left and right hinges, leg lengths, driving moments and forces during moving upward on the inclined plane

Экспериментальные результаты исследования

Для подтверждения адекватности [19] выбранной математической модели было проведено экспериментальное моделирование равномерной прямолинейной ходьбы. Объектом испытаний был здоровый человек. Испытания проводились на движущейся беговой дорожке, показания ре-

гистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры. По координатам наклеенных на человека марок [20] определялось положение центров тазобедренного и опорного голеностопного суставов. Фазовая траектория горизонтального перемещения на правой ноге представлена на рисунке 8.

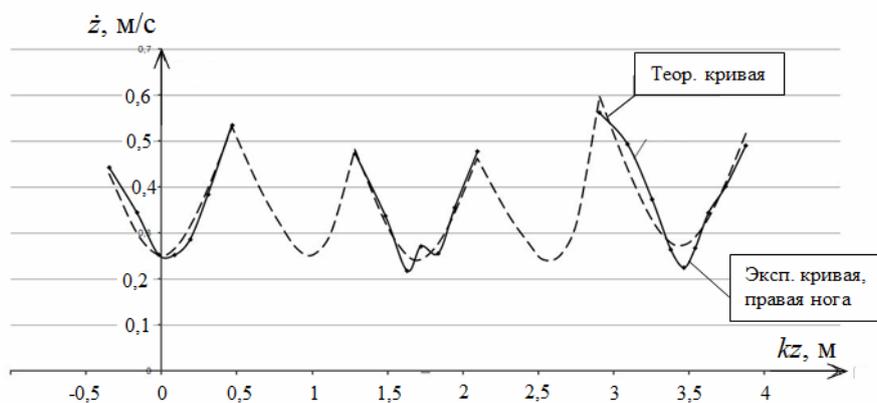


Рис. 8. Фазовые траектории пяти шагов

Fig. 8. Phase trajectories for five steps

На рисунке 9 представлены фазовые портреты [21] движения в исследуемом режиме в продольном направлении, сплошные линии соответствую-

ют движению шагающего аппарата, схема которого представлена на рисунке 1, а пунктирные – идеального механизма.

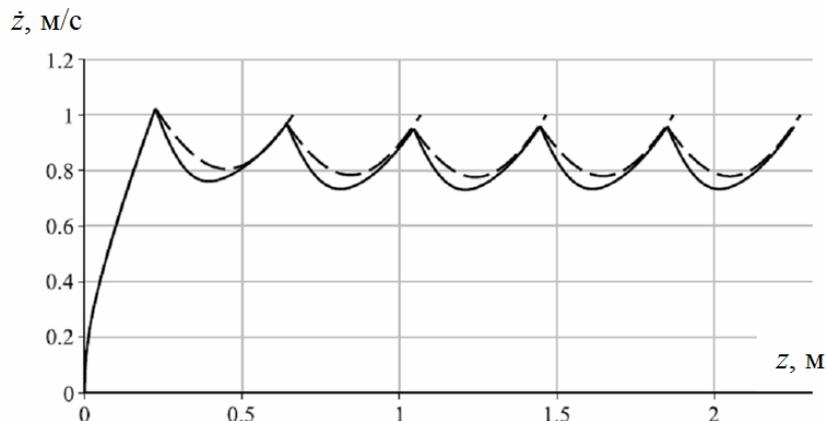


Рис. 9. Фазовые траектории движения двуногого аппарата и его модели

Fig. 9. Phase trajectories of biped robot and its model

Фазовые портреты на рисунке 9 схожи с фазовыми портретами движения перевернутого математического маятника [22] и ходьбой человека, представленными на рисунке 8. Следовательно, выбранная расчетная модель механизма близка к идеальной, которая, в свою очередь, в целом соответствует результатам эксперимента.

Заключение

Результаты моделирования показывают, что предложенный алгоритм управления позволяет обеспечивать абсолютную степень устойчивости, при которой отклонение от требуемого движения может быть сведено к нулю уже в конце первого шага при любых начальных условиях из конструктивно допустимого диапазона.

Содержание в цепи обратной связи идеального механизма по своим динамическим свойствам достаточно близкого к объекту управления позволяет упростить задание режимов походки.

Теоретическое и экспериментальное моделирование равномерной прямолинейной ходьбы показало схожесть фазовых портретов движения двуногого шагающего аппарата, перевернутого математического маятника и здорового человека. Полученные результаты подтверждают эффективность расчетной модели при использовании для прикладных инженерных расчетов.

Проведенные исследования позволяют улучшать конструкцию двуногих шагающих аппаратов на стадии проектирования без увеличения массы, снижения скоростных характери-

стик и маневренности, что может позволить расширить область применения таких машин.

Библиографические ссылки

1. Russo M., Ceccarelli M., Cafolla D., Matsuura D., Takeda Y. (2019) An Experimental Characterization of a Parallel Mechanism for Robotic Legs. In: Arakelian V., Wenger P. (eds) ROMANSY 22 - Robot Design, Dynamics and Control. CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2019, vol. 584, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-78963-7_4
2. Страшинов Е. В., Мироненко И. Н. Стабилизация движения двуногих шагающих роботов в системах виртуального окружения // Успехи кибернетики. 2022. Т. 3, № 4. С. 75–83. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09
3. Смирная Л. Д., Вершинина И. П. О точности позиционирования шагающих движителей мобильных роботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 9 (256). С. 69–73. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-9-256-69-73
4. Мецераков Р. В., Илюхин Б. В. Обзор современной робототехники. Специальная и спасательная робототехника // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. № 1 (11). С. 5–11. DOI: 10.31776/RTCJ.11101
5. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин. М. : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2013. 32 с.
6. Брискин Е. С., Смирная Л. Д. Об отрыве стопы шагающего движителя мобильного подводного робота от грунта // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Т. 7, № 3. С. 215–223. DOI: 10.31776/RTCJ.7306
7. Голубев Ю. Ф., Корянов В. В. Экстремальные локомоционные возможности инсектоморфных роботов. М. : ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, 2018. 212 с.

8. Белецкий В. В. Двухногая ходьба: модельные задачи динамики и управления. М. : Наука, 1984. 288 с.

9. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 199 с.

10. Meng L., Macleod C.A., Porr B. (2018) Bipedal robotic walking control derived from analysis of human locomotion. *Biol Cybern*, 2018, 112, pp. 277-290. <https://doi.org/10.1007/s00422-018-0750-5>

11. Chen G., Guo S., Hou B., Wang J. (2020) Virtual model control for quadruped robots. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 140736-140751.

12. Цзун С. Исследование стратегий управления для четвероногих шагающих роботов // *Studnet*. 2021. № 7 (4). С. 59.

13. Полянина А. С. Полный цикл походки в динамической модели плоского двуногого робота // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 2. С. 60–63.

14. Gurevich A., Vamani E. & Sintov A. (2023) Learning a data-efficient model for a single agent in homogeneous multi-agent systems. *Neural Comput & Applic* 35, pp. 20069-20085. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08838-w>

15. Sintov A., Macenski S., Borum A. and Bretl T. (2020) Motion planning for dual-arm manipulation of elastic rods. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, vol. 5, no. 4, pp. 6065-6072.

16. Бжихатлов И. А., Громов В. С. Исследование колебаний платформы двуногого шагающего робота // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. № 3 (63). С. 278–285. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-278-285

17. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. (2017) Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 387-393. DOI: 0.1016/j.proeng.2017.02.336

18. Чернышев В. В., Гончаров А. А., Арыканцев В. В. Моделирование механики контактного взаимодействия опорных элементов шагающих роботов при больших тяговых усилиях // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2019. № 1 (22). С. 53–57.

19. Брискин Е. С., Смирная Л. Д., Артемьев К. С. Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2023. № 24 (2). С. 101–106. <https://doi.org/10.17587/mau.24.101-106>

20. Atkeson C.G., Benezon P.B., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. (2018) What happened at the DARPA Robotics Challenge finals. *DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots To The Rescue*: Springer, Cham, 2018, pp. 667-684.

21. Савин С. И., Ворочаева Л. Ю. Метод управления двуногими шагающими роботами с интегрированными упругими элементами // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2020. № 2 (340). С. 95–103. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-340-2-95-103

22. Ванькина И. Н., Фетисов Д. А. Плоское перемещение пятизвенного двуногого робота по поверхности с препятствиями в виде ступеней робота // *Математика и математическое моделирование*. 2021. № 3. С. 1–28.

References

1. Russo M., Ceccarelli M., Cafolla D., Matsuura D., Takeda Y. (2019) An Experimental Characterization of a Parallel Mechanism for Robotic Legs. In: Arakelian, V., Wenger, P. (eds) *ROMANSY 22 - Robot Design, Dynamics and Control*, CISM International Centre for Mechanical Sciences, 2019, vol. 584, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-78963-7_4

2. Strashnov E.V., Mironenko I.N. (2022) [Stabilization of the movement of biped walking robots in virtual environment systems]. *Uspekhi kibernetiki*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 75-83 (in Russ.). DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-4-09

3. Smirnaya, L.D. Vershinina I.P. (2021) [About accuracy of positioning walking movers of mobile robots]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, vol. 256, no. 9, pp. 69-73 (in Russ.) DOI: 10.35211/1990-5297-2021-9-256-69-73

4. Meshcheryakov R.V., Ilyukhin B.V. [Review of robotics competition. Special and rescue underground robotics]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 5-11 (in Russ.). DOI: 10.31776/RTCJ.11101

5. Pavlovskij V.E. (2013) *O razrabotkakh shagayushchih mashin* [On the development of walking machines]. Moscow: IPM im. M. V. Keldysha RAN, 2013, 32 p. (in Russ.).

6. Briskin E.S., Smirnaya L.D. (2019) [About the separation of the foot of the walking underwater robot from the ground]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 215-223 (in Russ.). DOI: 10.31776/RTCJ.7306

7. Golubev Yu.F., Koryanov V.V. (2018) *Ekstremal'nye lokomocionnye vozmozhnosti insektomorfnyh robotov* [Extreme locomotor capabilities of insectomorphic robots]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2018, 212 p. (in Russ.).

8. Beleckij V.V. (1984) *Dvunogaya hod'ba: model'nye zadachi dinamiki i upravleniya* [Bipedal Walking: Model Dynamics and Control Tasks]. Moscow: Nauka, 1984, 288 p. (in Russ.).

9. Lapshin V.V. (2012) *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayushchih mashin* [Mechanics and motion control of walking machines]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2012, 199 p. (in Russ.).

10. Meng L., Macleod C. A., Porr B. (2018) Bipedal robotic walking control derived from analysis of human locomotion. *Biol Cybern*, 2018, 112, 277-290. <https://doi.org/10.1007/s00422-018-0750-5>

11. Chen G., Guo S., Hou B., Wang J. (2020) Virtual model control for quadruped robots. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 140736-140751.

12. Czun S. (2021) [Control strategies for quadruped walking robots]. *Studnet*, 2021, vol. 4, no 7, p. 59 (in Russ.).
13. Polyanina A.S. (2023) [Full gait cycle in a dynamic model of a flat biped robot]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*, 2023, no. 2, pp. 60-63 (in Russ.).
14. Gurevich A., Bamani E. & Sintov A. (2023) Learning a data-efficient model for a single agent in homogeneous multi-agent systems, *Neural Comput & Applic*, 2023, 35, 20069-20085. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08838-w>
15. Sintov A., Macenski S., Borum A. and Bretl T. (2020) Motion planning for dual-arm manipulation of elastic rods. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 6065-6072.
16. Bzhihatlov I.A., Gromov V.S. (2020) [Researches of Oscillation of Biped Walking Robot Platform]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2020, vol. 63, no. 3, pp. 278-285 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-278-285
17. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. (2017) Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 176, pp. 387-393. DOI: 0.1016/j.proeng.2017.02.336
18. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. (2019) [Modeling of the mechanics of contact interaction of supporting elements of walking robots at high traction forces]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2019, no. 1, vol. 22, pp. 53-57 (in Russ.).
19. Briskin E.S., Smirnaya L.D., Artemyev K.S. (2023) [On the Control of Traction Characteristics and Resistance to Movement of Mobile Robots with Walking Propulsion Devices]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, 24, pp. 101-106 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/mau.24.101-106>
20. Atkeson C.G., Benezon P.B., Banerjee N., Berenson D., Bove C.P., Cui X., Gennert M. (2018) What happened at the DARPA Robotics Challenge finals. *DARPA Robotics Challenge Finals, Humanoid Robots to the Rescue*, Springer, Cham, 2018, pp. 667-684.
21. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. (2020) [Method of control of biped walking robots with integrated elastic elements]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2020, 2, pp. 95-103 (in Russ.). DOI: 10.33979/2073-7408-2020-340-2-95-103
22. Van'kina I.N., Fetisov D.A. (2021) [Flat movement of five-legged biped robot on a surface with steps]. *Matematika i matematicheskoe modelirovanie*, 2021, no. 3, pp. 1-28 (in Russ.).

Control of Dynamic Biped Walking Robot

A.P. Borina, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

The objective of this article is to present control algorithms of biped dynamic walking robot. A mathematical model of the walking robot is compiled. The construction of the robot is based on minimalist design principles - absolutely solid body with two legs. Analytical dependencies between six coordinates of the body, coordinates of the left and right legs and absolute coordinates of the feet are defined. The block diagram of control system is presented. Differential equations of walking are compiled. The dynamic stability of biped walking robot near the required trajectory is provided by discrete control of the parameters: «when and where to put foot». To define these parameters, it is proposed to use an inverted mathematical pendulum as an ideal mechanism. Its linearized differential equations allow present the feet coordinates according to the measured initial and final parameters (at the begging and at the end of the step). The article paid particular attention to results of such control method with various walking modes. The coordinates of the robot body, its velocities and accelerations, angles of rotation were investigated. Calculations confirmed the small deviations of the proposed model of walking from the ideal one. The developed methodology allows improve the construction and control system of biped dynamic walking robots at the design stage. Some of the tasks, it can be used: design machines simulating human walking, with high speed and maneuverability, with point feet and synchronized with natural uncontrolled movements.

Keywords: walking machine, equations of motion, inverted pendulum, dynamic stability, control system.

Получено 16.10.2023

Образец цитирования

Борина А. П. Система управления статически неустойчивым шагающим аппаратом // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 4–12. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-4-12

For Citation

Borina A.P. (2023) [Control of Dynamic Biped Walking Robot]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 4-12 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-4-12