

УДК (UDC) 621.865.8

УПРАВЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫМ ШАГАЮЩИМ АППАРАТОМ
ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ТРЕНИИ В ОПОРЕCONTROL OF DYNAMIC BIPED WALKING MACHINE WITH LIMITED FRICTION
IN FOOTБорина А.П.
Vorina A.P.Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия)
St. Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

Аннотация. Нетривиальная проблема в двуногой ходьбе шагающего робота - это сохранение устойчивости при внешних воздействиях без потери скорости движения. В работе предложен динамический алгоритм управления двуногим роботом с иерархической структурой. Нижний уровень управления организован по принципу следящих приводов и обеспечивает желаемое положение корпуса по всем возможным координатам. Решение задачи стабилизации движения осуществляется на верхнем уровне. В цепи обратной связи рассматривается идеальный механизм, описываемый уравнениями плоского перевернутого математического маятника, синхронизированными между собой по моменту времени окончания шага. Особое внимание уделено исследованию взаимодействия стопы статически неустойчивого шагающего аппарата с опорной поверхностью для определения условий отсутствия проскальзывания. Предложенный подход управления позволяет контролировать значения углов поворота ног относительно корпуса, углов ориентации корпуса в пространстве, длин ног, движущих моментов, сил и мгновенных мощностей в приводах, их максимальные значения при различных режимах ходьбы без потери в скорости. Критически оценивая результаты и перспективы проведенных исследований, можно сделать вывод об их полезности в развитии сотрудничества искусственного интеллекта с человеком, о возможных применениях в повседневной жизни, сложной среде и промышленности.

Ключевые слова: шагающие аппараты, уравнения движения, перевернутый маятник, динамическая устойчивость, контактное взаимодействие, отсутствие проскальзывания.

Дата получения статьи: 23.09.2023
Дата принятия к публикации: 23.10.2023
Дата публикации: 25.12.2023

Сведения об авторе:

Борина Анастасия Петровна – инженер центра «Стратегии и инвестиции» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», e-mail: apborina@gmail.com
ORCID: 0009-0002-2453-8115

Abstract. A non-trivial problem in the biped walking is the preservation of stability under external influences without slowing down velocity. A dynamic walking control algorithm with a hierarchical structure is proposed in the article. The lower control level is organized according to the principle of tracking drives and ensures the position of the robot's body using all given possible coordinates. The problem of traffic stabilization is solved at the upper level. An ideal mechanism - a flat inverted mathematical pendulum is considered in the feedback circuit. Its equations are synchronized by the moment of the step ending. Particular attention is paid to the interaction of the robot foot with the support surface to determine the conditions for the absence of slippage. Proposed control approach makes it possible to control the current position of the robot's structure in the space in different walking modes without slowing down velocity. Critically assessing the results and prospects of the research, we can conclude about their usefulness in the development of artificial intelligence cooperation with humans, about possible applications in everyday life, a specific environment and industry. The proposed approach may be applicable to the control of the walking mechanisms of similar mobile robots.

Keywords: walking machine, equations of motion, inverted pendulum, dynamic stability, contact, slippage.

Date of manuscript reception: 23.09.2023
Date of acceptance for publication: 23.10.2023
Date of publication: 25.12.2023

Author's information:

Anastasiya P. Borina – Engineer of the «Center of Strategy and Investments» at St. Petersburg State Marine Technical University, e-mail: apborina@gmail.com
ORCID: 0009-0002-2453-8115

1. Введение

Шагающие роботы предназначены для функционирования в сложной среде [1], что требует от них наличия определенных способностей, таких как подъем по лестнице, обход препятствий, передвижение по неровной местности. Эти способности обуславливают применение таких машин: для транспортировки грузов в условиях бездорожья, в поисково-спасательных операциях, для ликвидации последствий техногенных и природных катастроф, под водой, в военных целях, для охраны и уборки помещений, для различного рода исследований или наблюдений [2]. Экзоскелеты, как шагающие аппараты, успешно применяются для возвращения людям двигательной активности [3].

Важной проблемой управления шагающими роботами является сохранение устойчивости [4, 5]. Оправиться от падения самостоятельно машине нелегко, поэтому необходимо принять меры, чтобы его избежать. Устойчивость можно разделить на два вида: динамическую и статическую. Статическая устойчивость означает, что робот может остановиться в любой момент цикла ходьбы и остаться в равновесии, не внося постоянной корректировки в свое управление. При этом проекция центра тяжести лежит в опорном многоугольнике, определяемом его ногами.

Для поддержания динамической устойчивости робот должен активно балансировать свое тело. Это требует гораздо более сложных алгоритмов управления, шагающий аппарат имеет большее количество степеней свободы [6]. Силы и моменты в приводах ног робота являются важным фактором при исследовании динамической устойчивости.

Большинство современных разработок в области создания шагающих машин представляют собой статически устойчивые тяжеловесные системы с недостаточной маневренностью и низкой скоростью.

Для повышения маневренности и быстродействия при сохранении плавности хода шагающих аппаратов необходимо снижать степень их статической устойчивости, отказавшись от развитых ступней и ограничившись парой ног.

Точечная опора приводит к отсутствию устойчивого положения, для обеспечения динамической устойчивости аппарат должен постоянно переступать с ноги на ногу.

Планирование походки двуного шагающего аппарата – еще одна важная задача при проектировании системы [7]. Алгоритм ходьбы должен соответствовать рельефу или местности. Верное задание параметров времени и места постановки стопы на основе получаемой оператором информации может обеспечить устойчивое движение аппарата около требуемой траектории при любом режиме движения.

2. Математическая модель

Для расчета вышеупомянутых параметров постановки ноги в начале каждого шага используется модель перевернутого математического маятника. Его линеаризованные уравнения движения (1) позволяют определить координаты точки постановки ноги x_L и z_L по известным условиям для центра тяжести аппарата в начале шага $x_s, \dot{x}_s, z_s, \dot{z}_s$ и требуемым условиям $x_{tf}, \dot{x}_{tf}, z_{tf}, \dot{z}_{tf}$ в его конце

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

где $\psi = e^{k \cdot t_f}$; $k = \sqrt{g/l}$ - частота свободных колебаний математического маятника; l - постоянная высота массы маятника; g - ускорение свободного падения; t_f - момент окончания шага; индекс «L» указывает на левую ногу (для правой ноги уравнения будут иметь аналогичный вид, переменные, обозначающие параметры левой ноги, будут иметь индекс R).

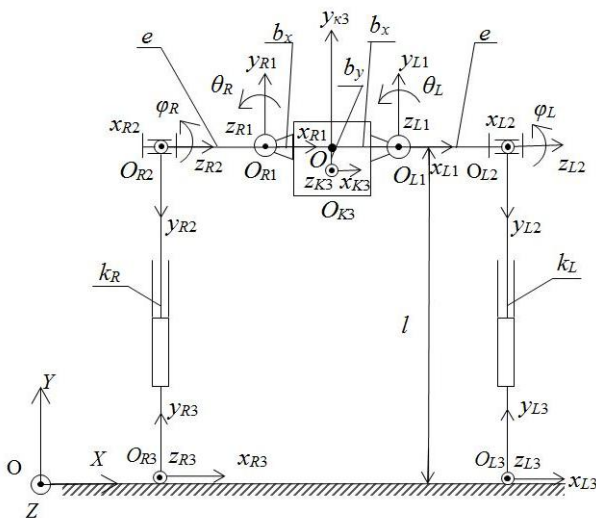


Рис. 1. Схема двуногого шагающего аппарата

Представленный на рис. 1 шагающий аппарат представляет собой корпус, соединенный 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. Конструкция ног не описывается, длинами правой и левой ног (k_R и k_L) можно управлять. Опорные точки, расположенные в стопах, обозначены на рисунке O_{R3} и O_{L3} и имеют координаты (x_R, y_R, z_R) и (x_L, y_L, z_L) соответственно в неподвижной глобальной системе координат $OXYZ$. Длины звеньев $O_{L1}O_{L2}$ и $O_{R1}O_{R2}$ равны e . Точки O_{L1} и O_{R1} в системе $O_{K3}x_{K3}y_{K3}z_{K3}$, связанной с корпусом, имеют координаты $(\pm b_x, b_y, b_z)$. Координаты центра тяжести корпуса O_{K3} в непод-

вижной системе (x, y, z) . На рис. 1 системы координат показаны в положении, когда углы поворота левого и правого тазобедренных шарниров θ_L , θ_R , ϕ_L , ϕ_R равны нулю, длины ног k_L , k_R равны.

Для описания положения корпуса аппарата в пространстве вообразим наличие в корпусе шарнирного механизма с промежуточными системами координат $O_{K2}x_{K2}y_{K2}z_{K2}$ и $O_{K1}x_{K1}y_{K1}z_{K1}$, что позволит проиллюстрировать, как показано на рис. 2, углы конечных поворотов Кардана.

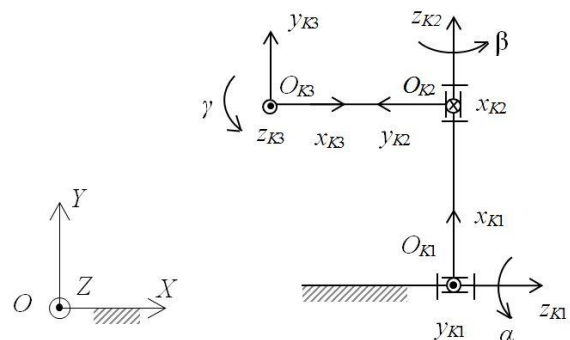


Рис. 2. Три линейные координаты и три угла Кардана для описания положения корпуса в пространстве

На рис. 2 системы координат показаны в положении, когда все углы конечных поворотов α , β , γ равны нулю. Расстояния между их центрами O_{K1} , O_{K2} и O_{K3} при описании ориентации несущественны.

Движение такого аппарата можно описать системой шести дифференциальных уравнений второго порядка, записанных с точностью до величин второго порядка малости. В качестве независимых обобщенных координат выбраны α , β , γ , x , y , z , x_L , y_L , z_L , для краткости совокупность обобщенных координат обозначим q . Система уравнений движения (2) описывает движение управляемого шагающего аппарата с шестью степенями свободы в фазе опоры на одну ногу:

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

где M_{zK1}^{Φ} , M_{zK2}^{Φ} , M_{zK3}^{Φ} - проекции вектора главного момента сил инерции на оси промежуточных систем координат корпуса (рис. 2); R_L и $M_{\theta L}$, $M_{\phi L}$, - движущая сила, действующая вдоль ноги, и движущие моменты в приводах.

Эта система (2) шести нелинейных дифференциальных уравнений позволяет найти изменения шести обобщенных координат и трех движущих сил как функций времени. Уравнения (2) должны быть дополнены начальными условиями $\alpha(0) = \alpha_s$, $\beta(0) = \beta_s$, $\gamma(0) = \gamma_s$, $x(0) = x_s$, $y(0) = y_s$, $z(0) = z_s$, $\dot{\alpha}(0) = \dot{\alpha}_s$, $\dot{\beta}(0) = \dot{\beta}_s$, $\dot{\gamma}(0) = \dot{\gamma}_s$, $\dot{x}(0) = \dot{x}_s$, $\dot{y}(0) = \dot{y}_s$, $\dot{z}(0) = \dot{z}_s$, определяемыми значениями обобщенных координат и их скоростей в конце предыдущего шага, и $x_L = const$, $y_L = const$, $z_L = const$, полученными при решении системы (1).

Устойчивость системы будет обеспечиваться не превышением допустимой длины и ширины шага и критической скорости центра тяжести аппарата в момент окончания шага. Длительность шага и скорость в конце текущего шага будем определять из требования снижения резкости движений корпуса аппарата. Длина и ширина шага определяются конструктивными особенностями аппарата.

На рис. 3 показана структурная схема системы управления. Блок задающего устройства на основе информации о требуемом движении должен обеспечивать блок идеального механизма (перевернутого маятни-

ка) [8] алгоритмом управления и кинематическими условиями в конце шага $i+1$. В заданное время t_f окончания i -го шага по изменениям x_0^{i+1} , z_0^{i+1} , \dot{x}_0^{i+1} , \dot{z}_0^{i+1} объекта управления и требуемым конечным условиям для шага $i+1$ в блоке идеального механизма [9] практически мгновенно 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.

Промоделируем движение аппарата по произвольным траекториям. Длительность шага назначим равной половине периода свободных колебаний ноги. Результаты математического моделирования некоторых режимов ходьбы [10] представлены на рис. 4. Точками отмечены места постановки ног.

3. Определение условий отсутствия проскальзывания

Опишем взаимодействие ноги аппарата с опорной поверхностью для определения условий отсутствия проскальзывания [11]. Общее представление о положении ноги аппарата дает угол ϕ_K между нормалью и радиус-вектором OK , показанный на рис. 5.

Графики изменения угла ϕ_K

$$\phi_K = \arctg \left(\frac{\sqrt{(x - x_L)^2 + (z - z_L)^2}}{y - y_L} \right) \quad (3)$$

при различных режимах движения представлены на рис. 6.

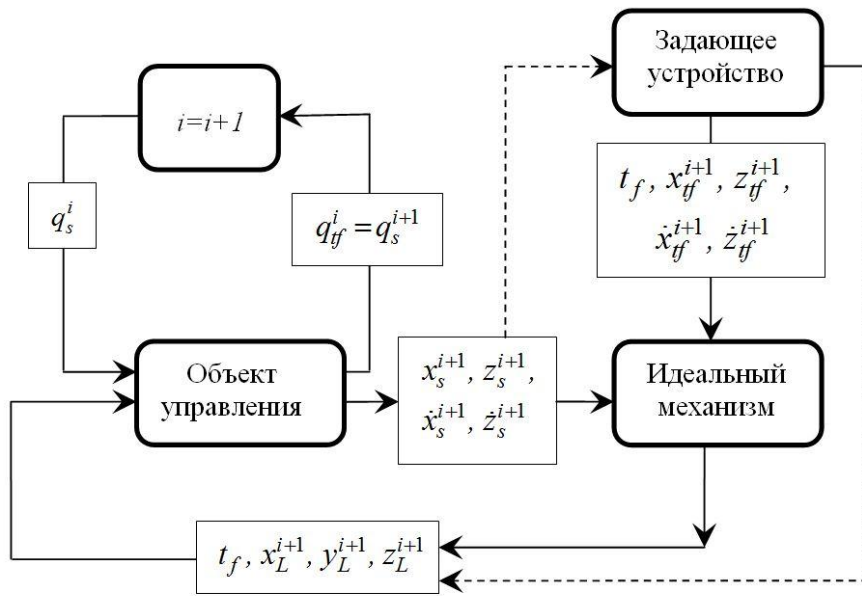


Рис.3. Структурная схема системы управления

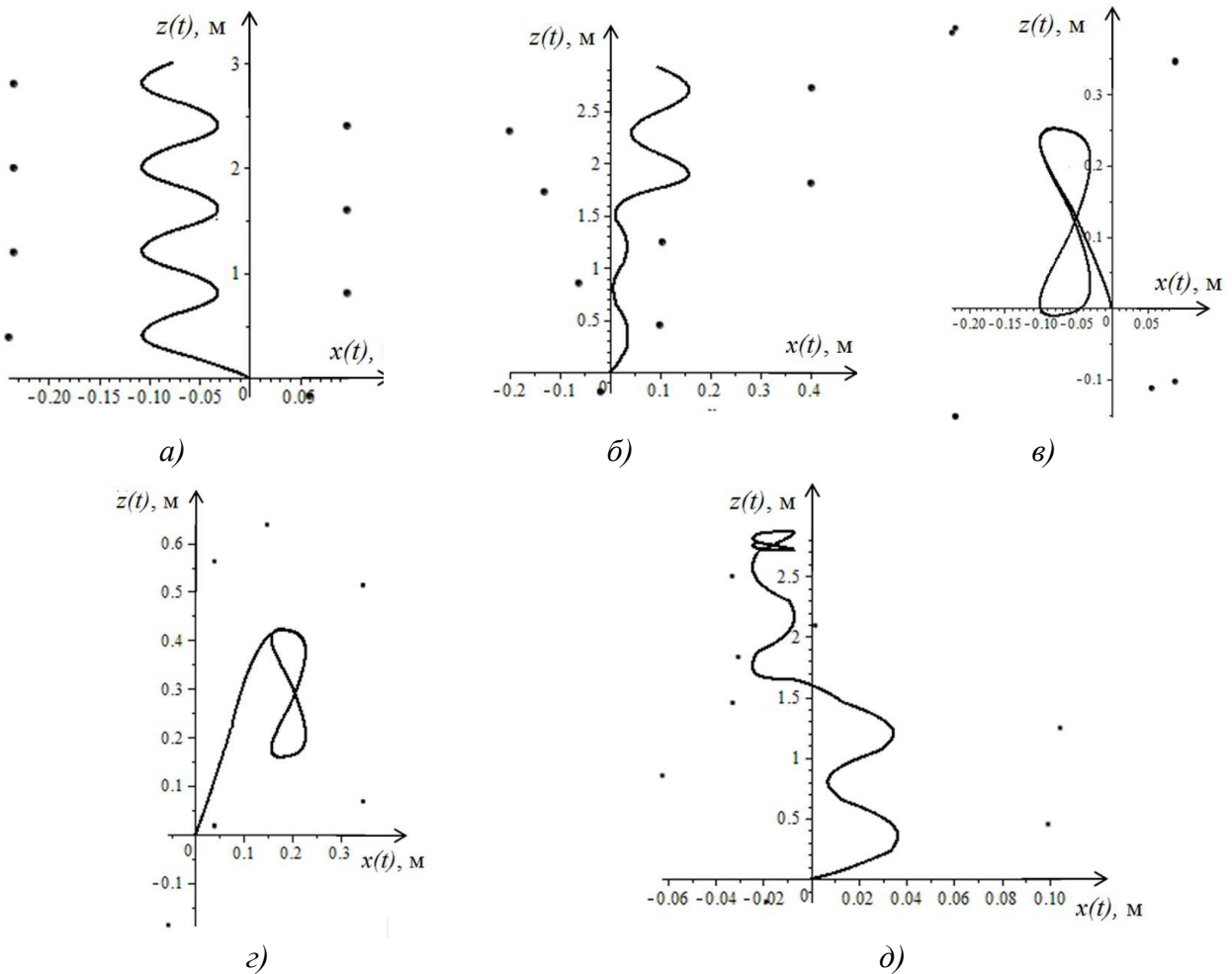


Рис. 4. Траектория центра тяжести корпуса аппарата: а - при прямолинейной горизонтальной ходьбе с постоянной скоростью; б - при ходьбе с поворотом на угол 45° на третьем шаге; в - при динамическом стоянии; г - при резкой остановке и стоянии на месте; д - при прямолинейном движении с промежуточным поворотом на угол 30° на пятом шаге и остановкой

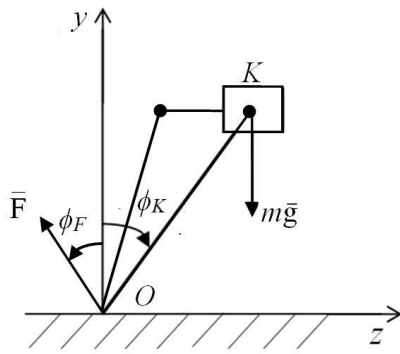


Рис. 5. Модель взаимодействия шагающего аппарата с опорной поверхностью

Для определения реакции опоры \bar{F} следует воспользоваться теоремой о движении центра масс системы

$$m\bar{w}_K = \bar{F} + m\bar{g}, \quad (4)$$

где \bar{w}_K – вектор абсолютного ускорения центра масс аппарата.

Следовательно

$$\bar{F} = m(\bar{w}_K - \bar{g}) \quad (5)$$

В проекциях на оси координат (5) примет вид

$$F_x = m\ddot{x}, \quad F_y = m(\ddot{y} - g), \quad F_z = m\ddot{z} \quad (6)$$

Тогда угол ϕ_F (рис. 5) между вектором реакции опоры \bar{F} и нормалью к опорной поверхности может быть определен из выражения

$$\phi_F = \arctg \frac{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}}{F_y} \quad (7)$$

Подставим результаты расчета (2) в (7). Графики изменения угла ϕ_F при различных режимах движения представлены на рис. 7.

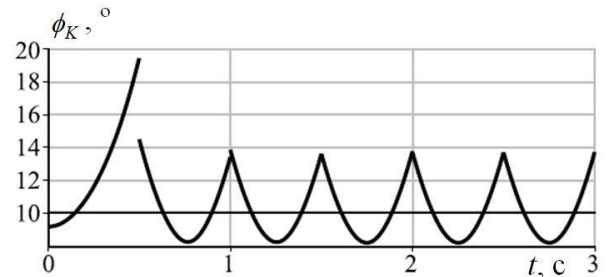
Знание этого угла необходимо для предотвращения скольжения по опорной поверхности, характеризуемого неравенством

$$\phi_F < [\phi_F] \quad (8)$$

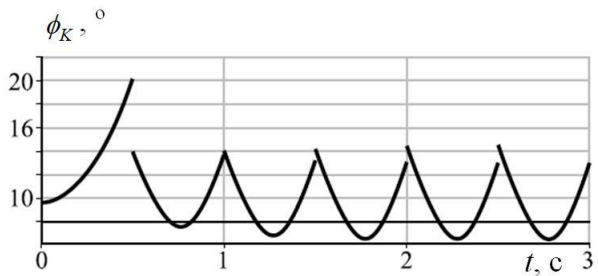
где $[\phi_F]$ – угол трения.

Условие отсутствия проскальзывания (8) накладывает дополнительное ограничение на выбор координат места постановки ноги. Расчеты показывают, что при равномерной прямолинейной ходьбе ускорения \ddot{x} и \ddot{y} существенно меньше, чем \ddot{z} [12]. Кроме того $\ddot{z} \ll g$, следовательно угол отклонения реакции ϕ_F с достаточной точностью можно оценить как отношение ускорения \ddot{z} к ускоре-

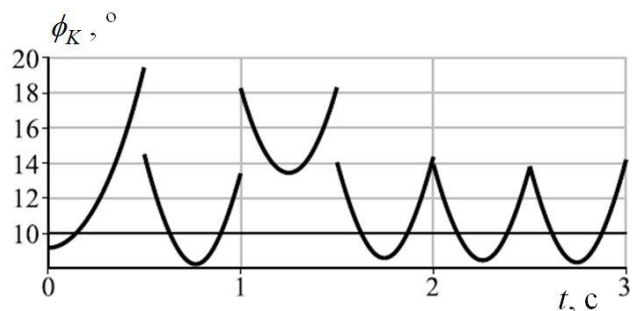
нию свободного падения (рис. 5). Продифференцируем по времени второе уравнение системы (1) и запишем выражения для определения угла ϕ_F в начале шага в момент времени t_s :



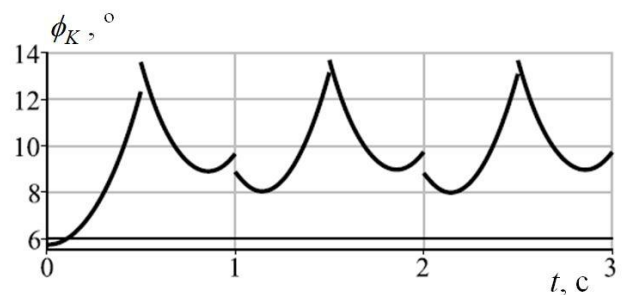
a)



б)



в)



г)

Рис. 6. Изменение угла ϕ_K : а- при прямолинейной горизонтальной ходьбе с постоянной скоростью; б - при ходьбе вниз по наклонной плоскости; в - при ходьбе с поворотом на третьем шаге на 30° направо; г - при динамическом стоянии

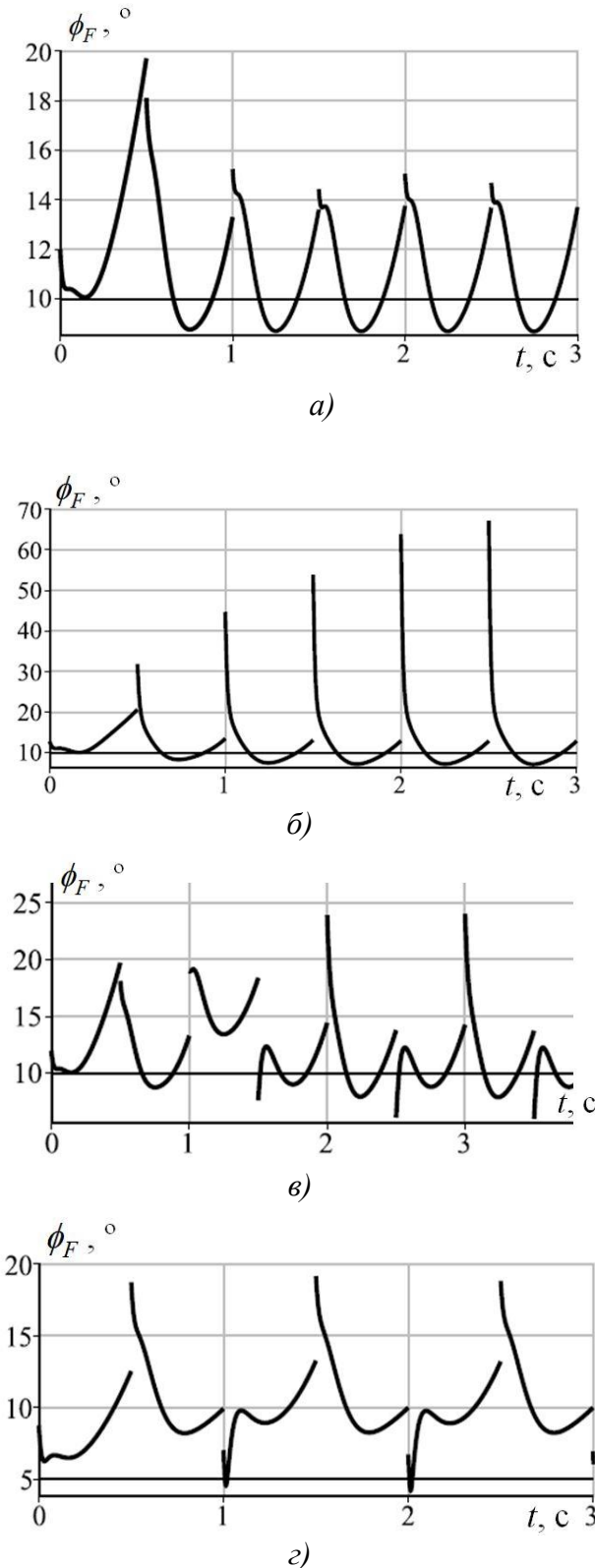


Рис. 7. Угол ϕ_F между вектором \bar{F} и нормалью к опорной поверхности: а - при прямолинейной горизонтальной ходьбе с постоянной скоростью; б - при ходьбе вниз по наклонной плоскости; в - при ходьбе с поворотом на 30° направо; г - при динамическом стоянии (г)

$$|\ddot{z}_s| = \left| \frac{k^2}{2} \left(-z_L + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) + \frac{k^2}{2} \left(-z_L - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \right|,$$

$$|\ddot{z}_s| = k^2 |z_L|,$$

$$\phi_{Fs} = \frac{|\ddot{z}_s|}{g} = \frac{k^2}{g} |z_L| = \frac{|z_L|}{L}. \quad (9)$$

В конце шага в момент времени t_f

$$|\ddot{z}_{tf}| = \left| \frac{k^2}{2} \left(-z_L + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi + \frac{k^2}{2} \left(-z_L - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi^{-1} \right|,$$

$$\phi_{Fts} = \frac{|\ddot{z}_{tf}|}{g},$$

$$\phi_{Fts} = \left| \frac{\left(-z_L + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi + \left(-z_L - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi^{-1}}{2L} \right|. \quad (10)$$

Из условия отсутствия проскальзывания (8) следуют два неравенства:

$$\begin{cases} \frac{|z_L|}{L} < [\phi_F] \\ \left| \frac{\left(-z_L + \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi + \left(-z_L - \frac{\dot{z}_s}{k} \right) \psi^{-1}}{2L} \right| < [\phi_F] \end{cases}.$$

В начале шага

$$|z_L| < [\phi_F] \cdot L \quad (9)$$

В конце шага

$$\left| -z_L (\psi + \psi^{-1}) + \frac{\dot{z}_s}{k} (\psi - \psi^{-1}) \right| < [\phi_F] \cdot 2L. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим взаимодействие резиновой стопы с асфальтовым покрытием [13]. Угол трения резины по асфальту составляет:

$$[\phi_F] = \begin{cases} 20^\circ - \text{мокрый асфальт} \\ 40^\circ - \text{сухой асфальт} \end{cases},$$

что составляет $[\phi_F] = 0,34 \dots 0,7$ рад. Дополним (9) и (10) неравенством, определяющим условие продолжения ходьбы [14]:

$$z_L < \frac{\dot{z}_s}{k}. \quad (11)$$

На рис. 8 показана область допустимых значений координаты z_L при различных начальных скоростях, угол трения примем равным $0,4$ рад.

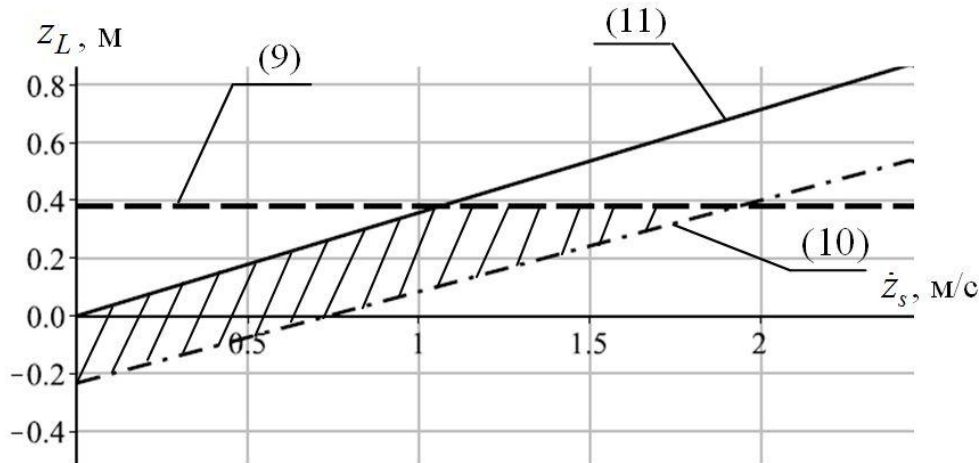


Рис. 8. Область допустимых значений ширины шага

Заштрихованная область на рис. 8 определяет выполнение всех трех условий отсутствия проскальзывания.

4. Заключение

Разработанная методика управления ходьбой двуногого шагающего аппарата позволяет встраивать вместо принятой в работе простейшей модели аппарата математическую модель пространственной многомассовой системы практически любой сложности

и формировать законы управления, анализируя ее динамические свойства.

Такой подход управления позволяет контролировать ударные нагрузки и изменения мгновенных мощностей в приводах, максимизируя скорость движения аппарата.

Условие отсутствия проскальзывания стопы одно из основных условий продолжения динамической ходьбы, которое формирует ограничение на задание координат мест постановки ноги в конце следующего шага при выбранном алгоритме походки, определяя ширину шага.

Список литературы

1. Russo M. An Experimental Characterization of a Parallel Mechanism for Robotic Legs // Arakelian V., Wenger P. (eds) ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), (2019), vol 584. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78963-7_4
2. Li J., Nguyen Q. Force-and-moment-based model predictive control for achieving highly dynamic locomotion on bipedal robots // arXiv preprint arXiv:2104.00065, 2021.
3. Shigemi S., Goswami A., Vadakkepat P. ASIMO and humanoid robot research at honda // Humanoid Robotics: A Reference. New York: Springer, 2019. P. 55–90.
4. Gurevich A., Bamani E. & Sintov A. Learning a data-efficient model for a single agent in homogeneous multi-agent systems

References

1. Russo M. 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 (Courses and Lectures), 2019, Vol. 584. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-78963-7_4
2. Li J., Nguyen Q. Force-and-moment-based model predictive control for achieving highly dynamic locomotion on bipedal robots. arXiv, 2021, preprint arXiv:2104.00065.
3. Shigemi S., Goswami A., Vadakkepat P. ASIMO and humanoid robot research at honda». In: Humanoid Robotics: A Reference, New York, Springer, 2019, pp. 55–90.
4. Gurevich A., Bamani E., Sintov A. Learning a data-efficient model for a single agent in homogeneous multi-agent systems

// *Neural Comput. & Applic.* 2023. T. 35. С. 20069–20085. DOI: 10.1007/s00521-023-08838-w

5. Sintov A, Macenski S., Borum A., Bretl T. Motion planning for dual-arm manipulation of elastic rods // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020. Т. 5. №4. С. 6065–6072.

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

7. 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.

8. Borina A., Tereshin V. Stabilization of Biped Dynamic Robot by Method of Ideal Mechanism // *Mathematics of XXI Century & Natural Science. Book of Abstracts: International Symposium (September 29 – October 3, 2015)*. St. Petersburg. Publishing House of SPbPU, 2015. P.8.

9. Borina A., Tereshin V. Stability of Walking Algorithms // *Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2017. P. 19-25. DOI 10.1007/978-3-319-53363-6_3.

10. Борина А.П., Терешин В.А. Решение задачи о пространственном движении статически неустойчивого шагающего аппарата // *Современное машиностроение. Наука и образование: Мат. 3-й Междунар. научно-практ. конф., 20-21 июня 2013 г., Санкт-Петербург*. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 631-641.

11. Охочимский Д.Е., Платонов А.К., Кугушев Е.И. Управление макетом шагающего аппарата при преодолении препятствий // *Исследование робототехнических систем*. М., 1982. С. 66-72.

12. Чернышев В.В. Полевые исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающих машин на слабых и экологически ранимых грунтах // *Актуальные проблемы лесного комплекса: Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Лес-2001»*. Брянск, 2001. Вып. 4. С. 116–118.

13. Гориневский Д.М., Шнейдер А.Ю. О

tems. *Neural Comput & Applic*, 2023, Vol. 35, pp. 20069–20085. DOI: 10.1007/s00521-023-08838-w

5. Sintov A, Macenski S., Borum A, Bretl T. Motion planning for dual-arm manipulation of elastic rods. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, Vol. 5, No. 4, pp. 6065–6072.

6. Polyamina A.S. Polnyy tsikl pokhodki v dinamicheskoy modeli ploskogo dvunogogo robota. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya*, 2023, No. 2, pp. 60-63 (In Russian)

7. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modelirovanie mekhaniki kontaktного vzaimodeystviya opornykh elementov shagayushchikh robotov pri bolshikh tyagovykh usiliyakh. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2019, No. 1, pp. 53-57 (In Russian)

8. Borina A., Tereshin V. Stabilization of Biped Dynamic Robot by Method of Ideal Mechanism. *Mathematics of XXI Century & Natural Science. Book of Abstracts: International Symposium (September 29 – October 3, 2015)*. St. Petersburg. Publishing House of SPbPU, 2015, p. 8.

9. Borina A., Tereshin V. Stability of Walking Algorithms. *Advances in Mechanical Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2017, pp. 19-25. DOI 10.1007/978-3-319-53363-6_3

10. Borina A.P. Solving the problem of spatial movement of a dynamic walking robot. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauks i obrazovanie: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhnarodnym uchastiem. 20 – 21 iunya 2013 goda, Sankt-Peterburg*. Sankt-Peterburg: Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta, 2013, pp. 631-641. (In Russian)

11. Ohocimskij D.E., Platonov A.K., Kugushev E.I. Upravlenie maketom shagayushchego apparata pri preodolenii prepyatstviy. *Issledovanie robototekhnicheskikh sistem*. Moscow, 1982, pp. 66-72. (In Russian)

12. Chernyshev V.V. Polevye issledovaniya tyagovo-stsepykh svoystv i prokhdimosti shagayushchikh mashin na slabykh i ekologicheski ranimyykh gruntakh. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Les-*

динамике малых движений шагающего аппарата при наличии обратной связи по опорным реакциям // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1987. № 6. С. 397

14. Смирная Л.Д., Вершинина И.П. О точности позиционирования шагающих движителей мобильных роботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 9(256). С. 69-73.

† 2001». Bryansk, 2001, No.4, pp. 116–118. (In Russian)

† 13. Gorinevskij D.M. Shnejder A.Yu. O dinamike malykh dvizheniy shagayushchego apparata pri nalichii obratnoy svyazi po opornym reaktsiyam. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1987, No. 6, pp. 397. (In Russian)

† 14. Smirnaya L.D. Vershinina I.P. O tochnosti pozitsionirovaniya shagayushchikh dvizhiteley mobilnykh robotov. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, No. 9(256), pp. 69-73. (In Russian)