

# Метод небионической стабилизации двуногих шагающих робототехнических систем

И. В. Рядчиков

**Аннотация**— В статье предложен метод небионической стабилизации мехатронными устройствами (маховиками, гироскопами) двуногих шагающих робототехнических систем на основе линеаризованных моделей, обеспечивающий заданные требования к перемещению, маневренности, энергоэффективности и быстродействию. Базовые положения, которые положены в основу метода заключаются в следующем: в качестве объекта управления используются линеаризованные модели; дополнительный контур стабилизации реализуется за счет мехатронных конструкций (маховика и/или гироскопа); реализация систем управления осуществляется на основе линейно-квадратичных регуляторов; полученные решения дают возможность использования ПИД-регуляторов, реализованных в типовых моделях промышленных контроллеров; возможно теоретическое оценивание полученных решений на основе введенного в работе критерия. Для реализации метода разработаны и адаптированы методики синтеза управления применительно к рассматриваемому классу объектов, рассмотрены особенности, приведены теоретические решения задач стабилизации, а также имитационные и натурные эксперименты, подтверждающие эффективность метода. Для экспериментальной проверки метода использован неантропоморфный двуногий робот AnyWalker. Приведены результаты создания шагающих роботов с гироскопами, стабилизирующихся за счет разработанного метода. Эксперименты с осуществлением перемещения роботов шагом по иррегулярной поверхности подтверждают эффективность предложенного метода для осуществления небионической стабилизации шагающих робототехнических систем.

**Ключевые слова**— небионическая стабилизация, двуногий робот, гироскоп, эффективность управления, ПИД-регуляторы

## I. ВВЕДЕНИЕ

Двуногие шагающие роботы — одно из развивающихся направлений разработки и исследований в мировой робототехнике. Особенность двуногой ходьбы заключается в том, что шаг робота сопровождается

Статья получена 19 октября 2019. Работа выполнена в рамках реализации проекта государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 8.2321.2017/ПЧ «Разработка и адаптация систем управления компенсацией динамических отклоняющих воздействий на мобильные объекты, находящиеся в состоянии динамического равновесия».

I. V. Ryadchikov is with Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation (e-mail: igorryadchikov@gmail.com).

переносом центра масс при перемещении свободной ноги, при этом в каждый момент времени движение конструкции в целом должно быть устойчивым. Дополнительным требованием является обеспечение динамической стабилизации робота, позволяющей реализовать непрерывный характер перемещения в режиме управляемого падения, используя силы тяжести. Управление ходьбой робота должно обеспечивать различные режимы движения в широком диапазоне характеристик поверхностей (наклонная плоскость, ступени, препятствия переменной высоты, влажная поверхность, неровности ландшафта, жесткая поверхность). Управление должно быть такого качества, чтобы, сохраняя устойчивость, учитывать износ электромеханических и гидравлических компонентов конструкции.

При разработке антропоморфных роботов проектируются кинематические схемы, берущие за основу скелет людей. Способы передвижения конструируются за счет воссоздания коленного, тазобедренного сустава с помощью сервоприводов. Инструменты управления искусственными суставами, таким образом, являются объектом управления для систем автоматического управления. Тем не менее, физиологически перемещение человека осуществляется не только за счет управления суставами ног, но и с использованием мышечной системы, центральной и вегетативной нервной систем, сердечно-сосудистой системы. Известно, что при поражении шейных артерий возникает неуверенная походка, также известны положения тела, в которых человек может удержать равновесие с закрытыми глазами не более нескольких минут.

Существуют разработки, выделяющие в конструкциях самостабилизирующиеся платформы, например, оснащенной датчиками положения и ускорения [1]. Стабилизация робота осуществляется с помощью инерционного буфера. Использование такого подхода, однако, не позволяет решить задачу обеспечения динамически устойчивого передвижения робота в условиях стохастических импульсных воздействий. Имеются подходы к моделированию, основанные на использовании линеаризации исходной нелинейной динамической модели робота с применением кинематической модели робота [2]. Линеаризация динамической модели шагающего робота не всегда

позволяет достичь практически эффективной стабилизации, необходимой для осуществления динамически устойчивой ходьбы робота. Известно использование набора искусственных мускулов на ногах шагающей конструкции. Например, робот Athlete [3] имеет семь наборов искусственных мускулов, приводимых в действие шестью пневматическими цилиндрами. Получение информации о положении и состоянии робота осуществляется с помощью контактных датчиков и тензорезисторов на ногах изделия. Существуют конструкции, включающие датчики положения конечностей: робот BigDog [4] с системой стабилизации, включающей гироскоп, акселерометры; также известны разработки, например, М. Н. Магомедова [5], где предлагается использовать тактильные датчики. Отдельным направлением исследований является разработка телеоператорных роботов, управляемых человеком удаленно посредством воссоздания роботом движений оператора. К системам такого типа можно отнести SAR-400 [6].

Предоставляемые бионические инструменты и механизмы стабилизации на основе суставов не обеспечивают требуемого качества движения – маневренности, преодоления препятствий. Также имеют место значительные затраты, сильно превышающие допустимые для области практического применения и приемлемую стоимость изготовления. Неколесные конструкции в случае «двуногой» реализации также имеют указанные выше проблемы. Таким образом, для бионических конструкций требуется повторение многих, в том числе и полностью физиологически неисследованных психомоторных функций, стабилизирующих тело в пространстве при осуществлении шага. Однако возможно использование небионической стабилизации на основе вспомогательных стабилизирующих механизмов, хорошо зарекомендовавших себя в промышленной мехатронике с кибернетически решаемыми задачами оперативного управления. Работа посвящена созданию метода стабилизации двуногих шагающих роботов за счет разработки небионических мехатронных стабилизирующих модулей, обеспечивающих заданные требования к перемещению и маневренности.

Идея использования небионической стабилизации базируется на успешном опыте применения мехатронных устройств для стабилизации в различных технических приложениях, таких, как предотвращение переворачивания тяжелых транспортных с помощью маховика [7]; ориентирование космических аппаратов; система гироскопической стабилизации для судна [8, 9]. Применение маховиков в качестве основы системы стабилизации роботов реализовано также в робототехнической системе Cubli [10]. Однако в системах, развивающих идеи Cubli, не проработаны вопросы моделирования и использования иных небионических принципов стабилизации роботов, как и не проработаны вопросы применения стабилизации маховиками именно шагающих роботов.

Таким образом, разработка методик моделирования и

повышения эффективности управления двуногих шагающих робототехнических систем на основе небионической стабилизации является задачей, имеющей важное прикладное и теоретическое значение.

## II. РАЗРАБОТКА МЕТОДА

Разработан метод небионической стабилизации. Базовые положения, которые положены в основу метода, заключаются в следующем:

- а) в качестве объекта управления используются линеаризованные модели;
- б) дополнительный контур стабилизации реализуется за счет мехатронных конструкций (маховика и/или гиродина);
- в) реализация систем управления осуществляется на основе линейно-квадратичных регуляторов;
- г) полученные решения дают возможность использования ПИД-регуляторов, реализованных в типовых моделях промышленных контроллеров;
- д) возможно теоретическое оценивание полученных решений на основе критерия [Рядчиков, Свидлов].

Для реализации метода необходимо разработать и адаптировать методики синтеза управления применительно к рассматриваемому классу объектов, рассмотреть особенности, провести теоретические решения задач стабилизации, а также имитационные и натурные эксперименты, подтверждающие эффективность метода.

Для экспериментальной проверки метода использован неантропоморфный двуногий робот AnyWalker (рис. 1).

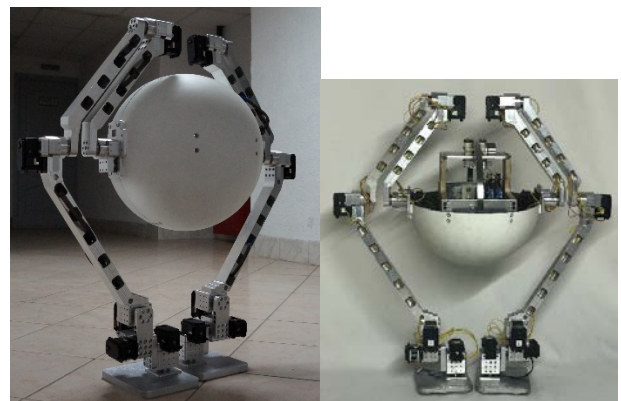


Рисунок 1. Неантропоморфный двуногий робот AnyWalker

Будем искать максимальный угол, на который можно отклонить робота от вертикали, при котором он стабилизирует свое состояние с использованием маховика. При этом роботу запрещается менять положение своих звеньев друг относительно друга.

Разработка специализированной методики моделирования требуется ввиду особенности задачи, определяемой наличием в конструкции вращающегося маховика внутри тела робота, отвечающей за динамическую стабилизацию и не меняющую ориентацию узлов конструкции.

Для исследования использованы следующие параметры конструкции:  $h$  – расстояние от оси

вращения маховика до плоскости опоры [м];  $x$  – расстояние от плоскости симметрии до внешнего края многоугольника опоры робота [м];  $b$  – расстояние центра масс до плоскости опоры [м];  $J_m$  – момент инерции робота без маховика относительно центра многоугольника опоры [кг·м<sup>2</sup>];  $J_M$  – момент инерции маховика относительно его оси вращения [кг·м<sup>2</sup>];  $m$  – масса робота без маховика [кг];  $M$  – масса маховика [кг];  $g$  – ускорение свободного падения [м·с<sup>-2</sup>];  $c_u$  – электрическая постоянная привода маховика [Н·м·А<sup>-1</sup>];  $c_v$  – механическая постоянная привода маховика [Н·м·с];  $J = J_m + M(x^2 + h^2) + J_M + mx^2$ .

Будем исследовать стабилизируемость робота относительно опрокидывающего воздействия, направленного вправо. Иллюстрация данного случая на рис. 2. Здесь управляющий сигнал  $u$  – ток, подаваемый на двигатель [А]; выходные контролируемые параметры  $\beta(t)$  – угол между осью AnyWalker и направлением «вверх» против часовой стрелки и  $\omega(t)$  – угловая скорость вращения маховика.

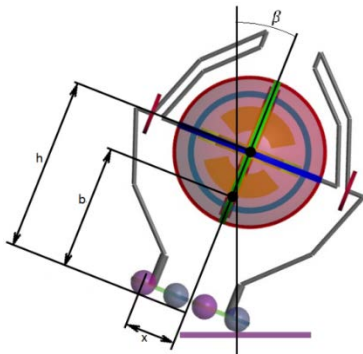


Рисунок 2. Наклонное положение робота

Линеаризованное уравнение имеет вид

$$\dot{x} = Ax + Bu.$$

Здесь  $x = (\alpha, \dot{\alpha}, \omega)^T$  и

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} & 0 & \frac{c_v}{J-J_M} \\ -\frac{(m+M)\sqrt{x^2+b^2}g}{J-J_M} & 0 & -\frac{c_v}{J_M-J_M^2/J} \end{pmatrix}, B = \left(0, -\frac{c_u}{J-J_M}, c_u\right)^T;$$

Сделаем замену переменных  $x = \Phi y$ , где

$$\Phi = \begin{pmatrix} c_v & c_v & c_v \\ c_v \lambda_1 & c_v \lambda_2 & c_v \lambda_3 \\ \Gamma_1 & \Gamma_2 & \Gamma_3 \end{pmatrix},$$

$$\Gamma_1 = (J - J_M)\lambda_1^2 - (m + M)\sqrt{x^2 + b^2}g,$$

$$\Gamma_2 = (J - J_M)\lambda_2^2 - (m + M)\sqrt{x^2 + b^2}g,$$

$$\Gamma_3 = (J - J_M)\lambda_3^2 - (m + M)\sqrt{x^2 + b^2}g,$$

получим

$$\Phi \dot{y} = A\Phi y + bu.$$

Домножим слева уравнение на  $\Phi^{-1}$ :

$$\dot{y} = \Phi^{-1}A\Phi y + \Phi^{-1}bu = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + \Phi^{-1}bu.$$

Исследуем область, определяющую стабилизируемость объекта. Без ограничения общности будем считать, что  $\lambda_1 > 0 > \lambda_2 > \lambda_3$ . Пусть  $u = u(y, t)$  такова, что  $|u| \leq u_{max}$ .

В этих условиях справедливы следующие результаты.

Система, описываемая уравнением (1), из состояния с  $y_1 \geq |m_1|u_{max}/\lambda_1$  не может перейти в состояние с меньшим  $y_1$  (из состояния с  $y_1 \leq -|m_1|u_{max}/\lambda_1$  не может перейти в состояние с большим  $y_1$ ).

Существует управление  $u = u(y, t)$  такое, что решение уравнения из состояния с  $|y_1| < |m_1|u_{max}/\lambda_1$  стремится к стационарной точке  $(0, 0, 0)^T$ .

Таким образом, область стабилизации маховиком задается неравенством  $|y_1| < |m_1|u_{max}/\lambda_1$ . Максимальное компенсируемое отклонение по углу  $\beta$ , определяется соотношением

$$\beta_{max} = \frac{|m_1|u_{max}}{(\Phi^{-1})_{11}\lambda_1} + \text{arctg} \frac{x}{b}.$$

Таким образом, если движения шагающего робота состоят из отклонений от оси, на угол, не менее найденного, то система может быть стабилизируема маховиком.

Исходная задача благодаря введению небиионической стабилизации может быть найдено методами аналитического конструирования оптимального регулятора [12], в частности применением линейно-квадратичными регуляторами,

Будем искать управление в виде

$$u = -Kx,$$

где  $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]$  – вектор коэффициентов усиления, минимизирующих функцию  $\int_0^\infty (x^T(\tau)Qx(\tau) + Ru^2(\tau))$  с матрицей  $Q > 0$  и скаляром  $R > 0$ .

Использование данного типа задач управления позволяет удовлетворить требования к стабилизации, быстродействию и сокращению вычислительных затрат при оперативном управлении для широкого спектра робототехнических конструкций.

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведены натурные и численные эксперименты. Для робота AnyWalker параметры имеют следующие значения:  $h = 0,35$  м;  $x$  – от 0 до 0.1 м;  $b = 0.2$  м;  $J_m = 0.01$  кг·м<sup>2</sup>;  $J_M = 0.005$  кг·м<sup>2</sup>;  $m = 15$  кг;  $M = 2$  кг;  $g = 9.8$  м·с<sup>-2</sup>;  $c_u = 0.1107$  Н·м·А<sup>-1</sup>;  $c_v = 0.00015$  Н·м·с;  $u_{max} = 39.5$  А. Полученные практические результаты согласуются с теоретическими, обеспечивая стабилизацию робота при ходьбе.

На рис. 3 показано перемещение робота шагом.

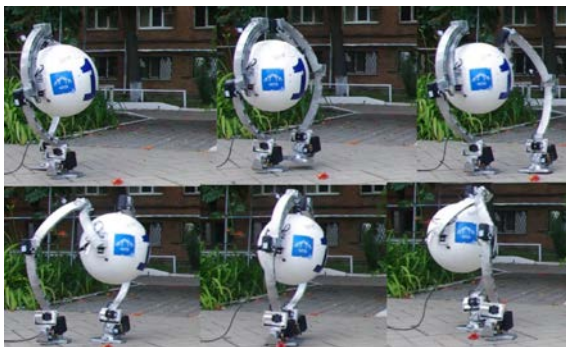


Рисунок 3. Перемещение робота шагом

Также небиионическая стабилизация реализована в других конструкциях

По представленным в работе методикам в Кубанском государственном университете был разработан малый (рис. 4) и большой (рис. 5) двуопорный шагающий робот с небиионической стабилизацией на основе гироцинов.

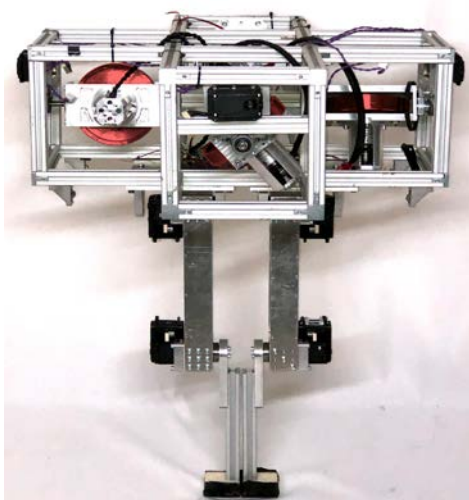


Рисунок 4. Малый двуопорный шагающий робот с небиионической стабилизацией на основе гироцинов



Рисунок 5. Большой двуопорный шагающий робот с небиионической стабилизацией на основе двух пар гироцинов

Экспериментальные испытания робота осуществлялись с использованием конструкции крепления, показанной на рис. 6. Движение робота по нерегулярной поверхности показано на рис. 7.

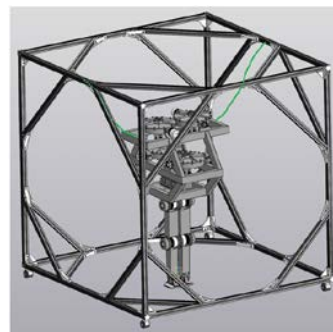


Рисунок 6. Трехмерная модель конструкции крепления робота

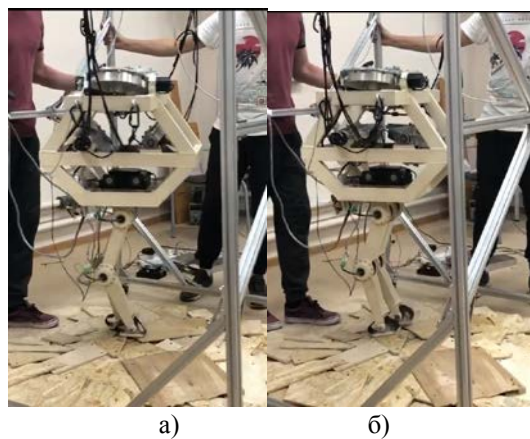


Рисунок 7. Движение робота по нерегулярной поверхности

Экспериментальные испытания подтверждают соответствие разработанного метода требованиям к условиям функционирования робототехнических систем.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод небиионической стабилизации мехатронными устройствами (маховиками, гироцинами) двуногих шагающих робототехнических систем на основе линеаризованных моделей. Использование метода обеспечивает вычислительно-надежное решение задач управляемости, устойчивости, синтеза линейно-квадратичных регуляторов. Экспериментально на ряде конструкций подтверждено, что метод небиионической стабилизации эффективно удовлетворяет заданным требованиям к перемещению, маневренности, энергоэффективности и быстродействию.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

[1] X. Xuan, W. Chen, Q. Ziyu, L. Jingyang, Y. Yang, Z. Huaihang, W. Chunpeng, Q. Yibo and L. Jiamei, "Mobile service system based on self stabilization platform," China Patent 109099898 (A), December 28, 2018.

- [2] D. N. Bazylev, A. A. Pyrkin, A. A. Margun, K. A. Zimenko, A. S. Kremlev, D. D. Ibraev and M. Cech, "Approaches for stabilizing of biped robots in a standing position on movable support," *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 15, no. 3, pp. 418-425, 2015.
- [3] R. Niiyama, S. Nishikava and Y. Kuniyoshi, "Biomechanical Approach to Open-Loop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot," *Advanced Robotics*, vol. 26, issue 3-4, pp. 383-398, 2012.
- [4] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson and R. Playter, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, issue 2, pp. 10822-10825, 2008.
- [5] M. N. Magomedov, "Method of controlling stabilization of walking robot," Russian Federation Patent 2507061 C2, February 20, 2014.
- [6] A. Kabanov and A. Balabanov, "The modelling of an anthropomorphic robot arm," *MATEC Web of Conferences*, 224, 02034, 2018.
- [7] S. Yoshihiro, H. Junhoi, A. Masahiko, S. Lin, R. Takahata and N. Mukaide, "Study on Rollover Prevention of Heavy-Duty Vehicles by Using Flywheel Energy Storage Systems," in *Proc. FISITA 2012 World Automotive Congress*, Beijing, 2012, pp. 693-701.
- [8] J. D. Adams and S. W. McKenney, "Gyroscopic roll stabilizer for boats," U. S. Patent 6973847 B2, December 13, 2005.
- [9] N. C. Townsend and R. A. Shenoi, "Control Strategies for Marine Gyrostabilizers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, issue 2, pp. 243-255, April 2014.
- [10] M. Gajamohan, M. Merz, I. Thommen and R. D'Andrea, "The Cubli: A cube that can jump up and balance," in *Proc. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, 2012, pp. 3722-3727.
- [11] I. Ryadchikov, S. Sechenev, E. Nikulchev et al., "Control and stability evaluation of the bipedal walking robot anywalker," *International Review of Automatic Control*, vol. 11, no. 4, p. 160-165, 2018.
- [12] A. Aleksandrov. *Optimalnyye i adaptivnyye sistemy. (Optimal and adaptive systems)*. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 262 p.

# Method of non-bionic stabilization of bipedal walking robotic systems

I. V. Ryadchikov

**Abstract**— The paper proposes a method of non-bionic stabilization of bipedal walking robotic systems with mechatronic devices: flywheels, control moment gyroscopes (CMGs) based on linearized models that provides the specified requirements for movement, maneuverability, energy efficiency and speed. The basic provisions that underlie the method are as follows: linearized models are used as the control object; an additional stabilization loop is implemented due to mechatronic structures (a flywheel and / or a CMG); implementation of control systems is based on linear-quadratic controllers; the obtained solutions make it possible to use PID controllers implemented in standard models of industrial controllers; Theoretical evaluation of the obtained solutions is possible based on the criterion introduced in the paper. To implement the method, control synthesis techniques have been developed and adapted to the class of objects under consideration, their features are considered, theoretical solutions to stabilization problems are given, as well as simulation and laboratory experiments confirming the effectiveness of the method. For experimental verification of the method, the non-anthropomorphic biped robot AnyWalker was used. The results of creating walking robots with CMGs stabilized with the developed method are presented. Experiments with the step movement of robots on an irregular surface confirm the effectiveness of the proposed method for the implementation of non-bionic stabilization of walking robotic systems.

**Keywords**—non-bionic stabilization, bipedal robot, CMG, efficiency of control, PID controllers

## REFERENCES

- [1] X. Xuan, W. Chen, Q. Ziyu, L. Jingyang, Y. Yang, Z. Huaihang, W. Chunpeng, Q. Yibo and L. Jiamei, "Mobile service system based on self stabilization platform," China Patent 109099898 (A), December 28, 2018.
- [2] D. N. Bazylev, A. A. Pyrkina, A. A. Margun, K. A. Zimenko, A. S. Kremlev, D. D. Ibraev and M. Cech, "Approaches for stabilizing of biped robots in a standing position on movable support," *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 15, no. 3, pp. 418-425, 2015.
- [3] R. Niiyama, S. Nishikava and Y. Kuniyoshi, "Biomechanical Approach to Open-Loop Bipedal Running with a Musculoskeletal Athlete Robot," *Advanced Robotics*, vol. 26, issue 3-4, pp. 383-398, 2012.
- [4] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson and R. Playter, "BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, issue 2, pp. 10822-10825, 2008.
- [5] M. N. Magomedov, "Method of controlling stabilization of walking robot," Russian Federation Patent 2507061 C2, February 20, 2014.
- [6] A. Kabanov and A. Balabanov, "The modelling of an anthropomorphic robot arm," *MATEC Web of Conferences*, 224, 02034, 2018.
- [7] S. Yoshihiro, H. Junhoi, A. Masahiko, S. Lin, R. Takahata and N. Mukaide, "Study on Rollover Prevention of Heavy-Duty Vehicles by Using Flywheel Energy Storage Systems," in *Proc. FISITA 2012 World Automotive Congress*, Beijing, 2012, pp. 693-701.
- [8] J. D. Adams and S. W. McKenney, "Gyroscopic roll stabilizer for boats," U. S. Patent 6973847 B2, December 13, 2005.
- [9] N. C. Townsend and R. A. Sheno, "Control Strategies for Marine Gyrostabilizers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, issue 2, pp. 243-255, April 2014.
- [10] M. Gajamohan, M. Merz, I. Thommen and R. D'Andrea, "The Cubli: A cube that can jump up and balance," in *Proc. 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, 2012, pp. 3722-3727.
- [11] I. Ryadchikov, S. Sechenev, E. Nikulchev et al., "Control and stability evaluation of the bipedal walking robot anywalker," *International Review of Automatic Control*, vol. 11, no. 4, p. 160-165, 2018.
- [12] A. Aleksandrov. *Optimalnyye i adaptivnyye sistemy. (Optimal and adaptive systems)*. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 262 p.