

УДК 681.5

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ANYWALKER

## **И.В. Рядчиков**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [igorryadchikov@gmail.com](mailto:igorryadchikov@gmail.com)

## **С.И. Сеченев**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [sechenev.semen@gmail.com](mailto:sechenev.semen@gmail.com)

## **А.А. Свидлов**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [svidlov@mail.ru](mailto:svidlov@mail.ru)

## **А.Э. Бирюк**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [abiryuk@kubsu.ru](mailto:abiryuk@kubsu.ru)

## **А.С. Прутский**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [prutskiyalex@yandex.ru](mailto:prutskiyalex@yandex.ru)

## **А.А. Гусев**

*Кубанский государственный университет*  
Россия, 350040, Краснодар, Ставропольская ул., 149  
E-mail: [alexandrsv@gmail.com](mailto:alexandrsv@gmail.com)

## **Е.В. Никульчев**

*МИРЭА – Российский технологический университет*  
Россия, 119454, Москва, Вернадского просп., 78  
E-mail: [nikulchev@mail.ru](mailto:nikulchev@mail.ru)

**Ключевые слова:** шагающие роботы, самостабилизация платформы, устойчивость динамических систем, шасси робототехнических комплексов.

**Аннотация:** Шагающие роботы являются быстроразвивающейся областью исследований, направленной на создание роботов, способных преодолевать препятствия и перемещаться по пересеченной местности в условиях, когда применение колесных и гусеничных роботов затруднено. В докладе представлен шагающий робот AnyWalker, конструкция которого решает задачу самостабилизации центра масс. Приведена схема шасси, обеспечивающего передвижение робота с высокой степенью проходимости и математическая модель самостабилизации корпуса робота. Разработанный робот способен решать потенциально широкий класс задач, устойчиво перемещаясь по неизвестной местности.

## 1. Введение

Большое число мобильных робототехнических комплексов используют колесный или гусеничный ход. Применение такого способа перемещения приводит к сложностям на пересеченной местности, при подъеме на ступеньки и при работе в пространстве с большим количеством препятствий [1]. Данное затруднение особенно нежелательно при использовании мобильных роботов в опасных условиях, под землей или в районах, где требуется сохранить первозданный ландшафт. В связи с этим в последние годы множество исследований нацелено на изучение конструктивных особенностей и реализацию шагающих роботов [2], способных демонстрировать устойчивость при преодолении крутых углов [3], что позволяет использовать их при проведении спасательных операций [4]. Современные исследования [5] посвящены решению трудных вопросов проектирования шагающих роботов: высокой сложности систем управления и стабилизации, повышению энергоэффективности и скорости передвижения, снижению стоимости компонентов. Основой перемещения шагающих систем являются принципы, используемые при передвижении человеком и животными: шаг, бег, прыжки [6].

Доклад раскрывает конструктивные особенности разработанного шагающего робота AnyWalker. В представляемой конструкции ставилась задача проектирования робота в легко управляемой самостабилизируемой платформе с большим диапазоном проходимости (преодоления высоких и сложных препятствий). Решение этих задач обеспечено конструкцией корпуса, позволяющей осуществлять быстродействующую стабилизацию, а также оригинальной схемой шасси, направленной на преодоление препятствий.

## 2. Конструкция и кинематическая схема

Корпусом робота является сфера диаметра 0.4 м, являющаяся стабилизирующим центром масс робота (рис. 1).

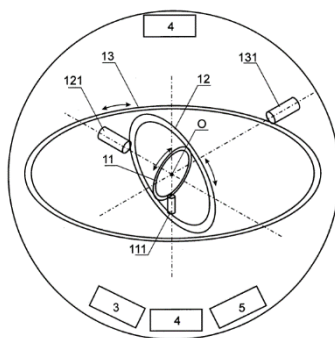
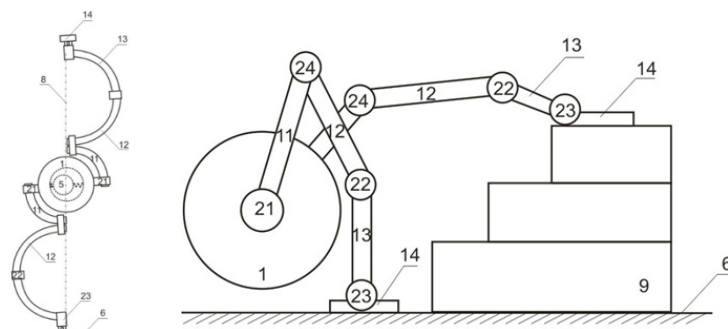


Рис. 1. Схема расположения элементов устройства.

Стабилизирующее устройство включает в себя маховики 11 и 12 с приводами 111 и 121, соединенные с объемным телом, блок управления 3, соединенный с датчиком положения 4, источником электропитания 5 и приводами маховиков 111 и 121. Оси вращения маховиков 11 и 12 пересекаются в точке O. Приводы 111, 121, 131 маховиков могут быть выполнены в виде электродвигателей, в т.ч. иметь свои контроллеры и сервоприводы. Стабилизация положения робота достигается силовой компенсацией от-

клоняющихся воздействий. Датчики положения маховиков регистрируют отклоняющие воздействия и отправляют сигнал на блок управления, передающий управляющий сигнал на приводы маховиков для приведения их в движение. Момент инерции, создаваемый вращением маховиков, и компенсирует отклонение от положения равновесия, вызванное внешними воздействиями, стабилизируя тело робота в пространстве [7].

Кинематическая схема шасси робота приведена на рис. 2.

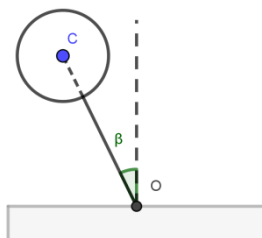


**Рис. 2.** Кинематическая схема:

1 – тело робота, 5 – модуль корректирующего смещения центра масс робота, 6 – поверхность, 8 – ось силы тяжести, проходящая через центр масс, 9 – препятствие, 11 – первая часть верхней ноги робота, 12 – вторая часть верхней ноги робота, 13 – нижняя нога робота, 14 – ступня, 21 – первый шарнир, 22 – второй шарнир, 23 – третий шарнир, 24 – четвертый шарнир.

### 3. Решение задачи поиска условий стабилизация при движении робота

Для построения устойчиво перемещающегося робота, необходимо найти такие параметры отклонения конструкции при каждом шаге, чтобы система способна была стабилизироваться при заданном ограниченном управлении. Для определения максимального угла отклонения решается задача поиска области фазового пространства, в которой, в условиях ограниченного управления, система обладает свойством устойчивости. В качестве базовой системы использована принятая модель [8] обратного маятника с маховиком (см. рис. 3). Рассматриваемая система имеет две степени свободы, для описания ее положения будем пользоваться двумя обобщенными координатами – углом поворота маятника  $\beta$  относительно вертикали и углом поворота маховика  $\alpha$  относительно маятника.



**Рис. 3.** Обратный маятник с маховиком.

Введем обозначения:  $J$  – момент инерции всей конструкции относительно шарнира  $O$  (от положения он не зависит),  $\Pi_0$  – потенциальная энергия конструкции при  $\beta = 0$ ,

$J_M$  и  $J_r$  - моменты инерции маховика и ротора двигателя соответственно относительно их осей вращения,  $\omega$  – угловая скорость маховика относительно маятника,  $\Omega = \frac{\omega}{\chi}$  – угловая скорость ротора электродвигателя относительно его статора,  $\chi$  – коэффициент редукции. Управляющий параметр в системе – напряжение  $u$ , подаваемое на электродвигатель, который вращает маховик.

Кинетическая энергия системы  $T$ , потенциальная  $\Pi$  и элементарная работа  $\delta W$  могут быть найдены при помощи следующих выражений:

$$(1) \quad \begin{aligned} 2T &= J \dot{\beta}^2 + 2J_r \dot{\beta} \Omega + J_r \Omega^2 + 2J_M \dot{\beta} \omega + J_M \omega^2, \\ \Pi &= \Pi_0 \cos \beta, \\ \delta W &= \frac{M \delta \varphi}{\chi} - M_f \delta \beta. \end{aligned}$$

Здесь  $M = c_u u - c_v \Omega$  — момент электромагнитных сил, приложенных к ротору электродвигателя со стороны статора,  $c_u$  и  $c_v$  – параметры двигателя, ограничение на напряжение  $u$ , которое подается на двигатель:  $|u(t)| \leq u_{\max}$ , где  $u_{\max}$  — максимальное напряжение подаваемое на двигатель;  $M_f = -\kappa \dot{\beta}$  — момент сил трения в точке опоры  $O$ .

Используя метод Лагранжа второго рода, составим с помощью выражений (1) уравнения движения системы, вводя вектор состояний  $x = (\beta, \dot{\beta}, \omega)^T$  получим линеаризованную систему

$$\dot{x} = Ax + fu,$$

где

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{\Pi_0(J_r + \chi^2 J_M)}{\Delta} & \frac{-\kappa(J_r + \chi^2 J_M)}{\Delta} & \frac{c_v(J_r + \chi J_M)}{\chi \Delta} \\ \frac{-\Pi_0 \chi(J_r + \chi J_M)}{\Delta} & \frac{\kappa \chi(J_r + \chi J_M)}{\Delta} & \frac{-J c_v}{\Delta} \end{pmatrix}; f = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{c_u(J_r + \chi J_M)}{\Delta} \\ \frac{J \chi c_u}{\Delta} \end{pmatrix};$$

$$\Delta = J_r J + \chi^2 J_M J - J_r^2 - 2J_r \chi J_M - \chi^2 J_M^2.$$

Характеристический полином матрицы  $A$  имеет один положительный корень ( $\lambda_1$ ) и два отрицательных ( $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ ). Собственный вектор соответствующий собственному значению  $\lambda$  имеет следующий вид:

$$\left( c_v(J_r + \chi J_M), \lambda c_v(J_r + \chi J_M), \chi(\Delta \lambda^2 + (\kappa \lambda - \Pi_0)(J_r + \chi^2 J_M)) \right)^T.$$

Наличие положительного собственного значения говорит о неустойчивости стационарной точки  $(0,0,0)^T$  при отсутствии управления.

Сделав замену переменных  $x = Qu$ , где

$$Q = \begin{pmatrix} c_v(J_r + \chi J_M) & \lambda_1 c_v(J_r + \chi J_M) & \chi(\Delta \lambda_1^2 + (\kappa \lambda_1 - \Pi_0)(J_r + \chi^2 J_M)) \\ c_v(J_r + \chi J_M) & \lambda_2 c_v(J_r + \chi J_M) & \chi(\Delta \lambda_2^2 + (\kappa \lambda_2 - \Pi_0)(J_r + \chi^2 J_M)) \\ c_v(J_r + \chi J_M) & \lambda_3 c_v(J_r + \chi J_M) & \chi(\Delta \lambda_3^2 + (\kappa \lambda_3 - \Pi_0)(J_r + \chi^2 J_M)) \end{pmatrix}^T$$

и учитывая, что  $Q^{-1}AQ = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  получим

$$(2) \quad \dot{y} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)y + pu,$$

где  $p = Q^{-1}f = (p_1, p_2, p_3)$ . Пусть  $u = u(y, t)$  такова, что  $|u| \leq u_{\max}$ .

Система, описываемая уравнением (2) из состояния с  $|y_1| \geq \frac{|p_1| u_{\max}}{\lambda_1}$  не может перейти в состояние с меньшим  $|y_1|$  ни при каком управлении  $|u| \leq u_{\max}$ . В тоже время, существует такое управление, заданное условиями, определенными в [9]  $u = u(y)$ ,  $|u| \leq u_{\max}$ , что состояние  $(0,0,0)^T$  системы (2), с контуром обратной связи по управлению, становится точкой равновесия с областью  $|y_1| < \frac{|p_1| u_{\max}}{\lambda_1}$ , определяющей асим-

птотическую устойчивость. В исходных переменных эта область определяется неравенством:

$$|(Q^{-1})_{11}\beta + (Q^{-1})_{12}\dot{\beta} + (Q^{-1})_{13}\omega| < \frac{|p_1|u_{max}}{\lambda_1}.$$

Неравенство использовано для оценки области стабилизируемости исходной нелинейной системы (1) в окрестности положения равновесия в реализованной конструкции робота.

Таким образом, найдено условие стабилизации робота при его перемещении, представляющее собой ограничение на значение угла отклонения конструкции от вертикали в заданных конструктивных условиях управления. Исходя из найденной области сформированы алгоритмы перемещения.

Программно-аппаратная архитектура системы управления робота на основе микроконтроллера STM32F407 и микрокомпьютера Raspberry Pi 3 [10].

## 4. Заключение

Проектирование устойчивых и энергоэффективных шагающих роботов, способных передвигаться по неизвестной местности уже многие годы является сложной задачей робототехники. Разработанная роботизированная платформа обладает сравнительно высокой энергоэффективностью. Шагающий робот AnyWalker способен справиться с задачей пересечения неизвестной местности, сохраняя устойчивость и маневренность.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 8.2321.2017/ПЧ «Разработка и адаптация систем управления компенсацией динамических отклоняющих воздействий на мобильные объекты, находящиеся в состоянии динамического равновесия»).

## Список литературы

1. Kar D. C. Design of a statically stable walking robot: A review // *Journal of Robotic Systems*. Vol. 20. No. 11. P. 671-686.
2. Goswami A. Walking Robots // *Encyclopedia of Systems and Control*. 2015. P. 1537-1548.
3. Booyesen T., Marais S. The development of a remote controlled, omnidirectional six legged walker with feedback. // In: *AFRICON 2013*. 2013. P. 1-6.
4. Tedeschi F., Carbone G. Design issues for hexapod walking robots // *Robotics*. 2014. Vol. 3. No. 2. P. 181-206.
5. Xiong X., Wörgötter F., Manoonpong P. Adaptive and energy efficient walking in a hexapod robot under neuromechanical control and sensorimotor learning // *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2016. Vol. 46, No. 11. P. 2521-2534.
6. Szczecinski N. S., Hunt A. J., Quinn, R. D. Design process and tools for dynamic neuromechanical models and robot controllers // *Biological cybernetics*. 2017. Vol. 111, No. 1. P. 105-127.
7. Рядчиков И.В., Бубнов Г.Г., Плужник Е.В., Сеченев С.И. Устройство для стабилизации положения объемного тела в пространстве с силовой компенсацией отклоняющих воздействий // Патент RU160949U1. Дата публикации 2016/04/10
8. Решмин С.А., Черноусько Ф.Л. Оптимальное по быстродействию управление перевернутым маятником в форме синтеза // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2006. № 3. С. 51-62.
9. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.
10. Рядчиков И.В., Сеченев С.И., Русаков А.М., Никульчев Е.В. Модельное исследование и реализация стабилизирующего комплекса шагающего робота AnyWalker // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 3. С. 498-515.