

# СПАСЕНИЕ ШЕСТИНОГОГО ШАГАЮЩЕГО РОБОТА ИЗ ПОЛОЖЕНИЯ НАВЗНИЧЬ

**Ю.Ф. Голубев**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

E-mail: golubev@keldysh.ru

**В.В. Корянов**

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН*

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., 4

E-mail: korianov@keldysh.ru

**Е.В. Мелкумова**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: elena\_v\_m@mail.ru

**Ключевые слова:** шестиногий робот, аварийная ситуация, переворот корпуса, раскачивание.

**Аннотация:** Предложен метод раскачивания шестиногого робота с целью обеспечить его переворот из положения «навзничь» («вверх ногами»). В качестве опоры рассмотрена плоскость, последовательно повернутая вокруг трех координатных осей. Плоскость имеет небольшой уклон в сторону переворота. Дополнительные повороты могут соответствовать помехам при раскачивании. В области контакта возможно наличие ямки, рядом с ней возможно наличие бугорка. Показано, что переворот возможен при помощи циклического движения группы ног, если корпус имеет верхнюю оболочку в виде усеченного цилиндра. Выполнено аналитическое исследование, а также компьютерное моделирование полной динамики робота, контактирующего с опорой, средствами программного комплекса «Универсальный механизм».

## 1. Введение

Данная работа развивает результаты, представленные в [1], в части построения алгоритмов управления поведением робота в экстремальных ситуациях с использованием методов компьютерного моделирования. Ситуации, когда требуется переворот из положения «вверх ногами» нередко встречаются в мире животных и особенно среди насекомых и рептилий, у которых имеется широкий твердый корпус. Например, жуки или черепахи, все они в процессе эволюции научились преодолевать подобные затруднения. Методы, которые они используют, включают в себя приемы

подтягивания и отжимания от опорной поверхности [2–4]. В [5] аналогичные методы используются для переворота робота с корпусом в виде полусферы. В [6] пара ног шестиного робота используется в качестве упора, облегчающего переворот. В [7] для переворота используется вспомогательный стержень. В [8] возможности переворота обеспечивает модульная конфигурация корпуса робота, при которой отдельные части могут вращаться друг относительно друга. Возможен вариант, когда за счет специальной конструкции ног робот может двигаться как в стандартном, так и в перевернутом положении корпуса [9].

В данной работе предлагается другой метод переворота робота из аварийного в рабочее положение с использованием динамических эффектов, которые возникают, когда робот, оказавшись в перевернутом положении, начинает без опоры ногами о грунт раскачивать корпус за счет специально сформированного движения ног, обеспечивающего увеличение амплитуды качаний. В результате амплитуда достигает такого значения, что робот обязательно переворачивается. Очевидно, что в рассматриваемом случае простой периодический закон движения ног не приведет к успеху, так как период качаний корпуса будет зависеть от амплитуды.

По сравнению с работами [10–13] в данной работе усложнена опорная поверхность.

## 2. Раскачивание робота

Для облегчения переворота корпус имеет форму выпуклой вверх части цилиндра, срезанного плоскостью, параллельной оси цилиндра. В модельной задаче рассматривается раскачивание однородного сегмента круга без проскальзывания на опорной прямой (рис. 1). К правому концу  $B$  хорды сегмента плоским шарниром прикреплен стержень (нога) массы  $m_1$ , который может вращаться относительно сегмента на угол  $\psi$ . На другом конце хорды в точке  $E$  расположена точечная масса  $m_2$ , уравнивающая ногу.

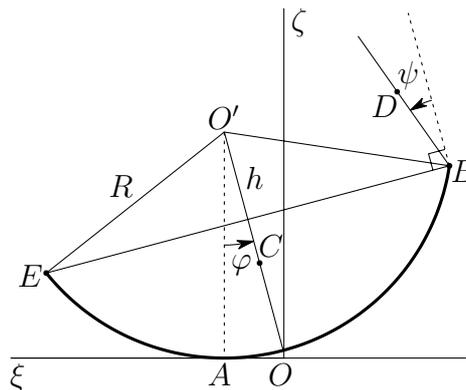


Рис. 1. Перевернутое положение робота

Аналитически раскачивание в этом случае описывается при помощи теоремы об изменении кинетического момента системы относительно подвижной точки  $A$  касания дуги окружности сегмента с опорной прямой [10, 11, 14]. Из анализа модельной задачи следует, что управляющий угол отклонения активных ног следует задавать в виде кусочно-постоянной функции. Переключение должно происходить

между двумя значениями, соответствующими предельным положениям ног при махах в сторону пассивных ног и обратно, в моменты времени, когда угловая скорость корпуса обращается в ноль.

С помощью компьютерного моделирования выполняется уточнение управления с учетом наличия трения в контакте, а также наклонов опорной поверхности. При задании управляющего угла между постоянными значениями выполняются линейные переходы. Полная динамическая модель робота формируется автоматически средствами комплекса «Универсальный механизм» [15]. Механическая система имеет 24 степени свободы.

При наличии небольшого наклона опорной плоскости в сторону переворота необходимо сокращать мах активных ног в сторону от пассивных ног. При наличии ямки и бугорка необходимо увеличивать массу ног. Структура движения сохраняется, если при этом суммарная масса ног меньше, чем масса корпуса. На рис. 2 приведены фрагменты типичного раскачивания при комбинации помех. Поворот опорной поверхности задается сначала вокруг горизонтальной оси, направленной вправо, на  $15^\circ$ , затем, в повернутой системе координат, вокруг оси, сонаправленной с продольной осью робота, на  $10^\circ$ . Третий поворот выполняется в полученной системе координат вокруг вертикальной оси на  $\gamma_s = 30^\circ$ . В результате ямка оказывается ориентирована так, что мах ног в сторону, противоположную направлению переворота, «усиливается», а обратный мах «ослабляется».

Соотношение размеров корпуса и звеньев ног имеет вид:  $a : b : R : r : l_1 : l_2 = 1 : 0.79 : 0.4 : 1.5 : 0.5 : 0.33$ , где  $a, b$  – размеры прямоугольного плоского сечения двух прямых круговых цилиндров, образующих корпус робота;  $R, r$  – радиусы оснований цилиндров;  $l_1, l_2$  – длины звеньев ног. Масса корпуса робота 25.42 кг.

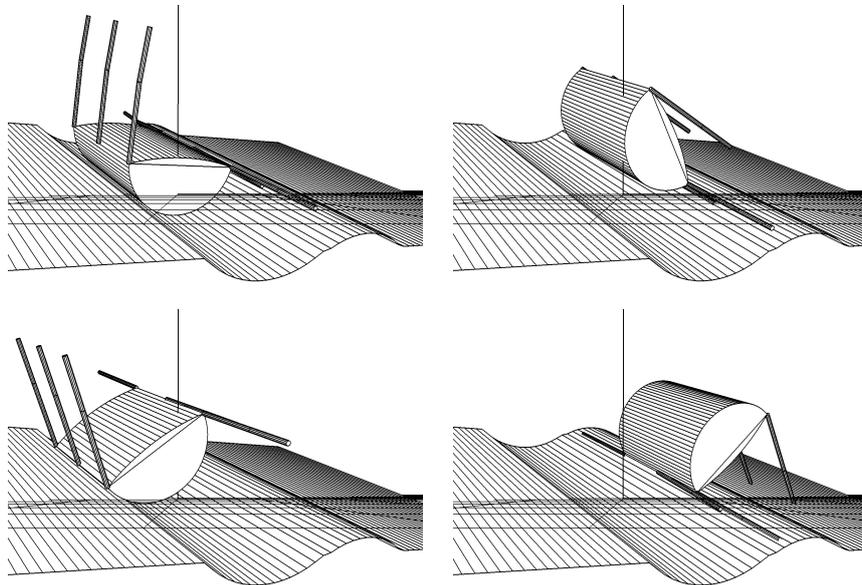


Рис. 2. Фрагменты движения: начальная позиция, типичный мах в сторону пассивных ног, обратный мах, позиция после завершения переворота

Параметры ямки и бугорка на рис. 2:  $\zeta_{0pit} = 0.45$  м (вертикальная координата центра ямки в связанной с ней системой координат, то есть, без учета поворота опоры),  $R_{pit} = 0.6$  м (радиус основания цилиндра, образующего ямку);  $\zeta_{0bump} = 0.45$  м,  $R_{bump} = 0.55$  м,  $\xi_{0bump} = 0.75$  м (горизонтальная координата центра бугорка в

упомянутой выше связанной с ямкой системе координат, то есть, без учета поворотов опоры); масса одной ноги  $m_{leg} = 2.4$  кг (масса всех ног равна  $6m_{leg}$ ). В численных экспериментах раскачивание продолжало срабатывать с указанными параметрами при увеличении  $\gamma_s$  примерно до  $38^\circ$ .

Этот вариант раскачивания соответствует наиболее глубокой ямке для выбранных параметров системы и указанных поворотов опоры. Массу ноги  $m_{leg}$  можно увеличивать для сокращения времени всего маневра, при условии, что суммарная масса ног должна быть меньше массы корпуса. Для определенности приведены конкретные значения величин, но, вообще говоря, размеры могут быть заданы относительно размеров корпуса, масса ноги относительно его массы.

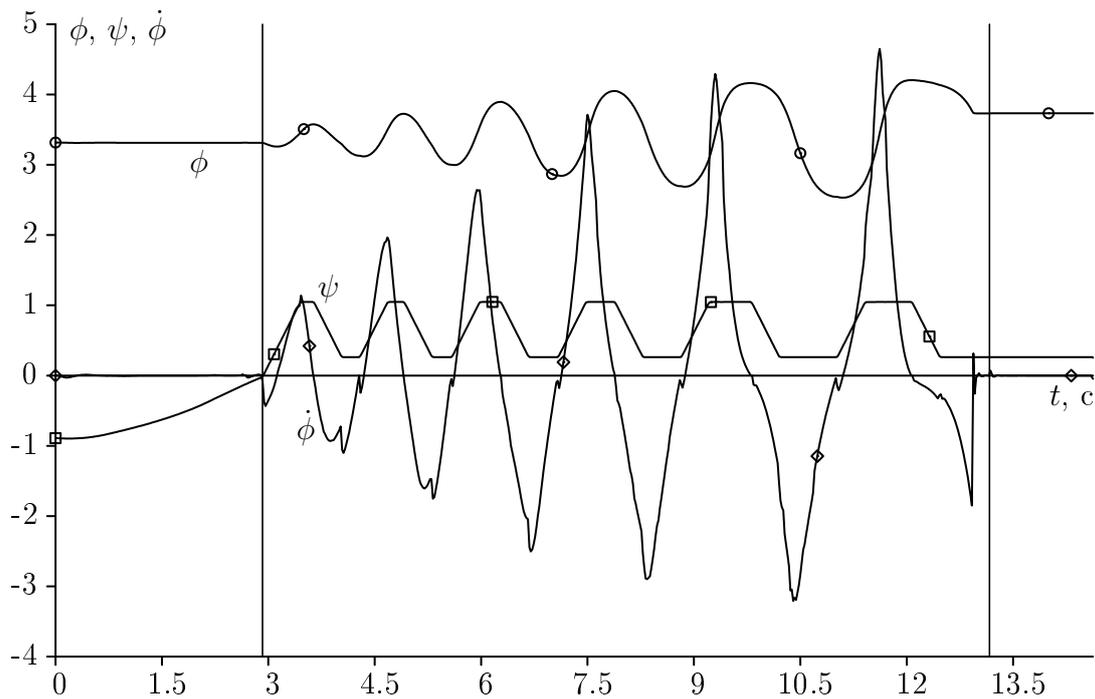


Рис. 3. Зависимость основных параметров движения от времени для варианта раскачивания

На рис. 3 представлены графики изменения по времени углов  $\phi = \pi + \varphi$ ,  $\psi$  (рад) и угловой скорости  $\dot{\psi}$  (рад/с) для варианта раскачивания, фрагменты которого приведены на рис. 2. Опорные значения угла  $\psi$ , соответствующие махам в сторону пассивных ног и обратно, на графике равны  $60^\circ$  и  $15^\circ$ , переведенным в радианы. Приведены данные, соответствующие перестроению позы перед раскачиванием, самому раскачиванию (его начало и конец отмечены вертикальными линиями), и первому этапу перестроения в рабочее положение, из которого робот может продолжить движение по поверхности. Перестроение после переворота происходит с помощью последовательного переноса троек ног, в каждой тройке переносится одна нога с одной стороны корпуса, и две с другой. После этого происходит выравнивание корпуса.

### 3. Заключение

Предложен метод решения задачи о спасении автономного шагающего робота, аварийно лежащего на наклонной опорной поверхности на спине в положении «вверх ногами». Наклон опоры небольшой (примерно  $15^\circ$ ), в сторону переворота. Опора может быть дополнительно повернута вокруг других осей (всего поворота три), причем повороты могут как способствовать раскачиванию, так и быть помехами. В области контакта может быть ямка, рядом с ней может быть бугорок. Для спасения робота предложена специальная форма корпуса в виде сложенных по плоскому сечению двух усеченных прямых круговых цилиндров. Разработан и аналитически обоснован [10] метод амплитудного раскачивания системы в окрестности положения аварийного равновесия, позволяющий использовать кинематические и динамические возможности робота для самостоятельного спасения [10–13]. Метод отработан средствами компьютерного моделирования.

Для выбранных параметров робота установлены приблизительные границы размеров неровностей (бугорка и ямки) и наклонов опоры, при которых метод раскачивания продолжает работать.

### Список литературы

1. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Экстремальные локомоторные возможности инсектоморфных роботов. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. 212 с.
2. Как переворачивается жук (бронзовка). <https://www.youtube.com/watch?v=nbExQQ5uqqk>.
3. Frantsevich L. Righting kinematics in beetles (Insecta: Coleoptera) // *Arthropod Struct. Dev.* 2004. Vol. 33, No. 3. P. 221–235.
4. Domokos G., Várkonyi P.L. Geometry and self-righting of turtles // *Proc. R. Soc. B.* 2008. Vol. 275, No. 1630. P. 11–17.
5. Peng S., Ding X., Yang F., Xu K. Motion planning and implementation for the self-recovery of an overturned multi-legged robot // *Robotica.* 2017. Vol. 35, No. 5. P. 1107–1120.
6. Saranlı U., Rizzi A.A., Koditschek D.E. Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot // *Int. J. Robot. Res.* 2004. Vol. 23, No. 9. P. 903–918.
7. Kessens C.C., Smith D.C., Osteen P.R. A Framework for Autonomous Self-Righting of a Generic Robot on Sloped Planar Surfaces // *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, Saint Paul, MN (May 14–18, 2012). P. 4724–4729.
8. Guanghua Z., Zhicheng D., Wei W. Realization of a Modular Reconfigurable Robot for Rough Terrain // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Luoyang, China, June 2006. P. 289–294.
9. Robot Kingdom. [https://www.youtube.com/watch?v=W9D0G47\\_xJk](https://www.youtube.com/watch?v=W9D0G47_xJk).
10. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В., Мелкумова Е.В. Приведение инсектоморфного робота в рабочее состояние из аварийного положения «вверх ногами» // *Известия РАН. Теория и системы управления.* 2019. № 6. С. 163–176.
11. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В., Мелкумова Е.В. Поведение шестиногого робота в аварийной ситуации // *Инженерный журнал: наука и инновации.* 2020. № 3. С. 1–10.
12. Golubev Yu.F., Koryanov V.V., Melkumova E.V. Rescue of the Walking Robot from an Emergency Position on the Back in the Presence of Uneven Support // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie.* 2022. Vol. 23. P. 481–485.
13. Голубев Ю.Ф., Корянов В.В., Мелкумова Е.В. Выход робота из аварийной ситуации на спине // *XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: сборник тезисов докладов в 4 томах. 21–25 августа 2023 г. Т. 1.* СПб.: ПОЛИТЕХ–ПРЕСС, 2023. С. 166–168.
14. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики / 3-е изд., переработанное и дополненное. М.: Издательство Московского университета, 2019. 728 с.
15. Универсальный механизм. <http://www.umlab.ru> (дата обращения: 10.02.2020).