

Поведение шестиногого робота в аварийной ситуации

© Ю.Ф. Голубев^{1,2}, В.В. Корянов¹, Е.В. Мелкумова²

¹ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 125047, Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

Предложен метод раскачивания корпуса шестиногого робота, обеспечивающий переворот корпуса и возвращение робота в рабочее положение. Показано, что автономное спасение аппарата из аварийного положения «вверх ногами» возможно с помощью циклического движения ног, если корпус имеет верхнюю оболочку в виде усеченного цилиндра. Ноги на заранее выбранном краю корпуса, через который должен произойти переворот, являются пассивными и выпрямляются вдоль корпуса для того, чтобы не мешать раскачиванию. Ноги на противоположном краю являются активными, они осуществляют синхронное движение в плоскости, перпендикулярной продольной оси корпуса, при фиксированном угле в колене. Выполнены аналитическое исследование и компьютерное моделирование полной динамики робота, подтвердившие эффективность разработанной методики для восстановления функциональной состоятельности робота. Компьютерное моделирование проведено средствами программного комплекса «Универсальный механизм». Приведены результаты численных экспериментов.

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

Введение. При движении робота по бездорожью [1, 2] могут возникать различные аварийные ситуации. Проблематичным является случай, когда робот оказывается в перевернутой позиции с ногами, ориентированными вверх. Для многоногого робота с корпусом в виде выпуклого многоугольника [3] обратный переворот корпуса трудновыполним. Возможен спасительный вариант, когда за счет специальной конструкции ног робот может двигаться как в стандартном, так и в перевернутом положении корпуса [4]. Вместе с тем для облегчения переворота корпуса можно воспользоваться резонансными эффектами, которые возникают при определенной форме корпуса за счет специальных движений ног.

Данная статья продолжает исследование, начатое в работах [2, 5], в части построения алгоритмов управления поведением робота в экстремальных ситуациях с использованием методов компьютерного моделирования. Полная динамическая модель робота формируется автоматически средствами комплекса «Универсальный механизм» [6].

Решаемая задача формулируется следующим образом. В результате непредвиденной случайности шагающий робот оказывается лежащим на спине в положении «вверх ногами». Он должен без посторонней помощи за счет имеющихся у него ресурсов по управлению перевернуться в исходное рабочее положение, когда ноги находятся

в опоре, а корпус — наверху. Подобного рода ситуации нередко встречаются в мире животных, особенно среди насекомых и рептилий, у которых имеется широкий твердый корпус. Например, жуки и черепахи в процессе эволюции научились преодолевать подобные затруднения. Методы, которые они используют, включают приемы подтягивания и отжимания от опорной поверхности [7, 8].

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. В статье представлен конструктивно построенный алгоритм решения сформулированной задачи. Этот алгоритм был отработан на программном комплексе «Универсальный механизм» [6] с учетом полной динамики системы в целом, имеющей 24 степени свободы. Результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о принципиальной реализуемости предложенного алгоритма управления шагающим роботом.

Постановка задачи. Для облегчения процесса переворота корпус шагающего робота в рабочем положении может иметь форму выпуклой вверх части цилиндра, срезанного плоскостью, параллельной оси цилиндра. Рассмотрим следующую модельную задачу. Предположим, что на горизонтальной опорной прямой лежит однородный сегмент круга, имеющий массу M . Сегмент ограничен дугой окружности радиусом R и хордой, отстоящей от центра окружности на расстояние h . Дуга окружности сегмента касается опорной прямой в точке A . Сегмент может перекатываться без проскальзывания по опорной прямой, поворачиваясь вокруг центра упомянутой окружности на угол φ , отсчитываемый от вертикального радиуса, направленного в точку A касания сегмента с прямой. Если $\varphi = 0$, то сегмент лежит так, что его хорда параллельна опорной прямой (рис. 1).

К правому концу B хорды сегмента плоским шарниром прикреплена нога — стержень массой m_1 , который может вращаться относительно сегмента на угол ψ . Угол ψ отсчитывается от внешнего перпендикуляра к хорде сегмента. Когда $\psi = 0$, нога направлена перпендикулярно хорде в сторону от опорной прямой. На левом конце хорды в точке E расположена точечная масса m_2 , уравнивающая ногу. Центр масс D ноги расположен на расстоянии ρ от точки B .

Центр масс C сегмента расположен на срединном перпендикуляре к хорде на расстоянии r от центра окружности сегмента. Сегмент имеет момент инерции J относительно прямой, проходящей через центр масс сегмента перпендикулярно плоскости сегмента.

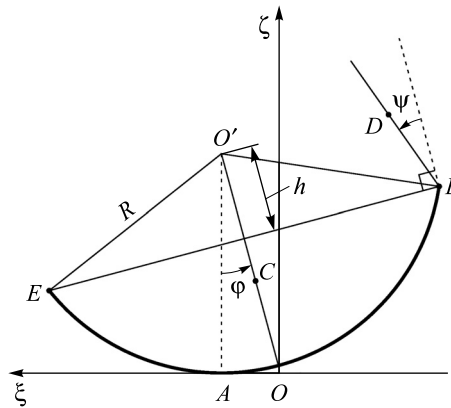


Рис. 1. Аварийное положение робота

Момент инерции ноги относительно ее центра масс обозначим через J_r . Для описания движения воспользуемся системой координат $O\xi\zeta$. Начало O поместим в точку касания сегмента с опорной прямой при $\varphi = 0$. Ось $O\xi$ пустим вдоль опорной прямой справа налево. Ось $O\zeta$ направим вертикально вверх.

Отметим, что в соответствии с постановкой задачи допустимое значение $\operatorname{tg} \varphi$ ограничено пределами

$$-\frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{h} \leq \operatorname{tg} \varphi \leq \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{h}. \quad (1)$$

Для значений $\operatorname{tg} \varphi$, выходящих за пределы диапазона (1), следует полагать

$$\xi_A = R \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{h} \operatorname{sign} \varphi; \quad \dot{\xi}_A = 0. \quad (2)$$

Если точка A достигает границы допустимого диапазона, то ее скорость должна стать равной нулю, при этом станет равной нулю скорость точки E либо B и система может испытывать удар.

Для простоты исследования при изучении возможности переворота робота из неудобного положения «вверх ногами» условие (1) принимать во внимание не будем, считая, что вся окружность, частью которой является дуга рассматриваемого сегмента, — это абсолютно твердое тело, но не имеющее массы.

Найдем координаты указанных точек системы:

$$\begin{aligned}
 \xi_A &= R\varphi; & \zeta_A &= 0; \\
 \xi_C &= R\varphi - r \sin \varphi; & \zeta_C &= R - r \cos \varphi; \\
 \xi_B &= R\varphi - h \sin \varphi - \sqrt{R^2 - h^2} \cos \varphi = R[\varphi - \sin(\varphi + \alpha)]; \\
 \zeta_B &= R - h \cos \varphi + \sqrt{R^2 - h^2} \sin \varphi = R[1 - \cos(\varphi + \alpha)]; & (3) \\
 \xi_D &= \xi_B + \rho \sin(\varphi + \psi); & \zeta_D &= \zeta_B + \rho \cos(\varphi + \psi); \\
 \xi_E &= R\varphi - h \sin \varphi + \sqrt{R^2 - h^2} \cos \varphi = R[\varphi - \sin(\varphi - \alpha)]; \\
 \zeta_E &= R - h \cos \varphi - \sqrt{R^2 - h^2} \sin \varphi = R[1 - \cos(\varphi - \alpha)],
 \end{aligned}$$

где $\alpha = \angle EO'O$, так что

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{R}; \quad \cos \alpha = \frac{h}{R}.$$

Центр масс всей механической системы имеет координаты:

$$\begin{aligned}
 \xi_{cm} &= R\varphi + \frac{m_1 \rho \sin(\varphi + \psi) - S_1 \sin \varphi - S_2 \cos \varphi}{M + m_1 + m_2}, \\
 \zeta_{cm} &= R + \frac{m_1 \rho \cos(\varphi + \psi) - S_1 \cos \varphi + S_2 \sin \varphi}{M + m_1 + m_2},
 \end{aligned}$$

где

$$S_1 = Mr + (m_1 + m_2)h; \quad S_2 = (m_1 - m_2)\sqrt{R^2 - h^2}.$$

Пусть правая декартова система координат $O'\xi'\eta'\zeta'$ жестко связана с сегментом. Ее начало O' совпадает с центром окружности сегмента, ось $O'\xi'$ сонаправлена вектору \mathbf{BE} , ось $O'\zeta'$ перпендикулярна оси $O'\xi'$ и ориентирована вверх. Абсолютные координаты центра масс рассматриваемой механической системы можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 \xi_{cm} &= R\varphi + \xi'_{cm} \cos \varphi + \zeta'_{cm} \sin \varphi; & \eta_{cm} &= 0; \\
 \zeta_{cm} &= R - \xi'_{cm} \sin \varphi + \zeta'_{cm} \cos \varphi, & (4)
 \end{aligned}$$

где ξ'_{cm} , ζ'_{cm} — координаты центра масс механической системы в осях $O'\xi'\eta'\zeta'$:

$$\xi'_{cm} = \frac{m_1 \rho \sin \psi - S_2}{M + m_1 + m_2}; \quad \eta'_{cm} = 0; \quad \zeta'_{cm} = \frac{m_1 \rho \cos \psi - S_1}{M + m_1 + m_2}. \quad (5)$$

Аналитическое описание процесса раскачивания выполняется с помощью теоремы об изменении кинетического момента системы относительно подвижной точки A [9].

Механическая модель шагающего робота. Твердый корпус робота имеет форму сложенных по общему прямоугольному плоскому пересечению двух усеченных прямых круговых цилиндров, a — длина плоского пересечения, b — его ширина. Радиус основания прямого кругового цилиндра, соответствующего спине робота, равен R , радиус основания цилиндра, соответствующего брюху робота, равен r . Корпус имеет массу m . По бокам плоского пересечения симметрично прикреплены шесть одинаковых двухзвенных ног. Точки прикрепления ног с каждой стороны корпуса расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Каждая нога состоит из двух твердых звеньев: бедра длиной l_1 , массой m_1 и голени длиной l_2 , массой m_2 . В отличие от случаев, рассмотренных в [2, 10], допускается касание поверхности опоры и окружающих предметов любой частью корпуса и стопами ног. Ноги робота не должны иметь взаимных пересечений во все время движения.

Стандартно траектории переноса ног формируются в виде плоских шаговых циклов [2, 3], адаптируемых в зависимости от поверхностей препятствий, скорости движения шагающего робота и предписанных следовых точек. Движения ног, соответствующие шаговому циклам, сглаживаются, чтобы сохранить непрерывность как самого движения, так и его скорости [2]. В аварийных ситуациях допускается формирование движений ног непосредственно с помощью их угловых координат.

Предполагается, что шагающему роботу известны собственное положение относительно препятствий и опорной поверхности, несущая способность участков поверхности, выбираемых для опоры, реализовавшиеся шарнирные углы и скорости перемещения как самого робота, так и объектов, выбираемых для опоры. Программные значения шарнирных углов генерируются алгоритмом управления с учетом информации о текущем положении окружающих объектов и о конфигурации шагающего робота при его движении. Программные значения шарнирных углов реализуются так же, как и в работе [2].

Наличие силового момента в опорных точках не предполагается [3]. Если требуемая реакция выходит за пределы конуса трения, возникает проскальзывание.

Действия шагающего робота в аварийной ситуации. Решаемая задача формулируется следующим образом. Пусть в результате несчастного случая робот перевернулся, оказавшись в позиции, когда он лежит спиной на ровной горизонтальной опорной плоскости ногами вверх. Необходимо выбрать боковой край корпуса, через кото-

рый будет выполняться переворот так, чтобы спина оказалась наверху. Спасательные мероприятия происходят в соответствии с перечисленными ниже этапами.

Этап 1. Ноги, точки крепления которых расположены на выбранном для переворота крае, будут пассивны. Их необходимо выпрямить и сложить так, чтобы они по возможности не мешали перевороту. Например, переднюю ногу можно направить вперед вдоль корпуса, заднюю — назад вдоль корпуса, а среднюю ногу пустить вперед вдоль корпуса так, чтобы она была прижата к корпусу и примыкала к точке крепления передней ноги.

Этап 2. Ноги, которые остались выпрямленными, будут активны. Они начинают раскачивание корпуса путем непосредственного управления их шарнирными углами. При этом все три ноги синхронно движутся в плоскости, перпендикулярной продольной оси корпуса, при фиксированном угле в колене. Изменяются для них только углы $\beta_i \equiv \psi$ между бедром ноги и корпусом. Для более интенсивного раскачивания целесообразно коленный угол всех активных ног максимально развернуть, по возможности приблизив его значение к π .

Угол отклонения активных ног от корпуса робота не должен превышать значений $\pi/2$. Если это ограничение нарушается, то при больших амплитудах качания корпуса активные ноги, ударяясь об опорную плоскость, могут мешать увеличению амплитуды раскачивания корпуса.

Для достижения неограниченного раскачивания корпуса принять периодическую функцию $\psi(t)$ невозможно, так как период колебаний корпуса будет зависеть от амплитуды.

Обозначим через $\{t_j^+, j = 1, 2, \dots\}$ последовательность моментов времени, для которых высота точек подвеса пассивных ног над опорной плоскостью минимальна. Пусть также $\{t_j^-, j = 1, 2, \dots\}$ есть последовательность моментов времени, для которых минимальна высота точек подвеса активных ног при раскачивании. Примем, что индекс j соответствует одному полуциклу колебаний и $t_j^- < t_j^+ < t_{j+1}^-$. Пусть ψ_M — значение угла ψ , при котором активные ноги окажутся наиболее близкими к точкам подвеса пассивных ног, а ψ_m — значение ψ , соответствующее наибольшему допустимому удалению активных ног от точек подвеса пассивных ног при формируемом движении активных ног.

Программная зависимость $\psi(t)$ для полного цикла колебаний имеет вид

$$\psi(t) = \begin{cases} \frac{\psi_M - \psi_j}{\Delta t} (t - t_j^-) + \psi_m, & t_j^- \leq t < t_j^- + \Delta t, \\ \psi_M, & t_j^- + \Delta t \leq t < t_j^+, \\ \frac{\psi_m - \psi_M}{\Delta t} (t - t_j^+) + \psi_M, & t_j^+ \leq t < t_j^+ + \Delta t, \\ \psi_m, & t_j^+ + \Delta t \leq t < t_{j+1}^-, \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Здесь ψ_j — значение угла ψ , которое реализовалось к моменту времени t_j^- . Раскачивание начинается с перевода активных ног в ближайшее положение к точкам подвеса пассивных ног. При этом корпус наклоняется в сторону пассивных ног. Далее угол ψ достигает значения $\psi = \psi_m$, а корпус отклоняется в сторону точек подвеса активных ног (отмашка) и т. д. Величина Δt задает интервал времени переходного процесса от одного постоянного значения ψ до другого. Эта величина должна быть меньше времени одного полуцикла. Раскачивание происходит до того момента, когда корпус перевернется вокруг бокового ребра корпуса, соответствующего точкам крепления пассивных ног. Перевернуться вокруг ребра, содержащего точки подвеса активных ног, корпус не может, так как увеличение амплитуды происходит в основном на полуцикле ($\psi = \psi_M$).

Этап 3. После переворота корпуса робот упрется активными ногами в опорную плоскость, и ему необходимо будет встать на ноги. В этой позиции он может переставить тройку ног, в которой передняя и задняя ноги берутся с активной стороны, а средняя нога — с пассивной. С помощью указанной тройки ног происходит выравнивание корпуса в правильную позицию, и одновременно стопы другой тройки ног переносятся в предписанные точки опоры. После этого происходит окончательное выравнивание корпуса и ног в стандартную позицию.

Компьютерное моделирование. Управление шагающим роботом, закон взаимодействия корпуса и стоп ног с опорной плоскостью реализованы в виде DLL-библиотеки, подключенной к программному комплексу «Универсальный механизм» [6]. Неподвижная опорная плоскость, корпус и ноги робота взаимодействуют согласно модели трения, основанной на вязкоупругом взаимодействии тел в точках контакта. Управление движением реализуется посредством компьютерного моделирования работы электромеханических приводов шарнирных углов. Требуемое движение шагающего робота осуществляется лишь в результате подачи управляющего электрического напряжения на модели электромеханических приводов.

Соотношение размеров корпуса и звеньев ног имеет вид

$$a : b : R : r : l_1 : l_2 = 1 : 0,79 : 0,4 : 1,5 : 0,5 : 0,33.$$

Масса корпуса шагающего робота и массы звеньев ног соотносятся как

$$m : m_1 : m_2 = 25,42 : 0,5 : 0,5.$$

Представление о движении корпуса шагающего робота и его ног возникает в результате численного интегрирования дифференциальных уравнений полной трехмерной динамики робота. В точках контакта объектов предполагается силовое взаимодействие. Уравнения динамики синтезируются автоматически [6]. Результаты компьютерного моделирования отображаются на экране монитора в виде движения геометрических образов исследуемых материальных объектов.

Фрагменты моделирования раскачивания показаны на рис. 2.

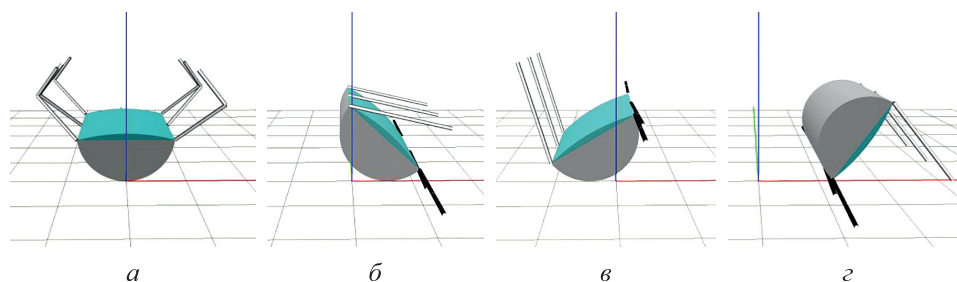


Рис. 2. Раскачивание робота:

a — начальное положение; *б* — один из махов в сторону пассивных ног;
в — обратный мах; *г* — положение после переворота робота

Графики изменения по времени углов ϕ , ψ [9] представлены на рис. 3. Угол ϕ между строительной вертикалью корпуса и вертикальной осью Oz (см. рис. 1) в аварийном положении корпуса робота равен π . Амплитуда колебаний увеличивается монотонно (см. рис. 3). При этом отклонения угла ϕ несимметричны относительно значения π , поскольку равновесное положение корпуса шагающего робота смещено в сторону пассивных ног. В конце раскачивания происходит переворот корпуса робота через боковую сторону с точками подвеса пассивных ног. Пассивные ноги, имея конечные размеры, несколько мешают перевороту. Поэтому в конце процесса переворачивания наблюдается нерегулярность.

До начала раскачивания осуществляется подготовка: активные ноги приводятся в выпрямленное вертикальное положение, а пассивные ноги складываются вдоль корпуса шагающего робота. На рис. 3 представлен угол ψ , отвечающий средней активной ноге робота. После окончания переворота робота происходят события этапа 3 [9].

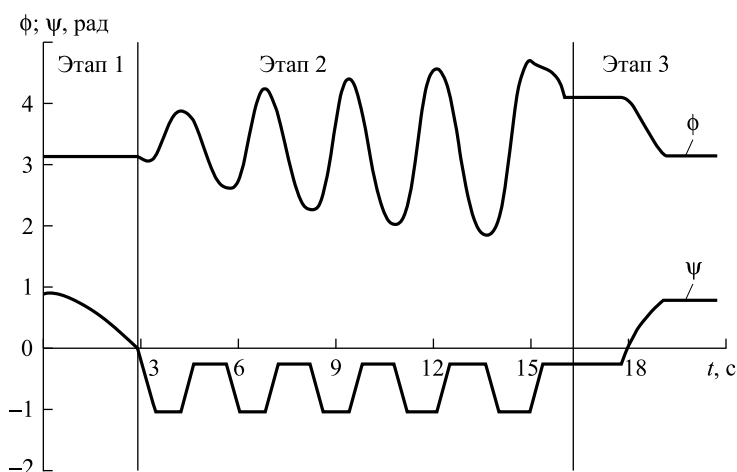


Рис. 3. Зависимость углов ϕ и ψ от времени

Заключение. Представлено решение задачи о спасении автономного шагающего робота, аварийно лежащего на горизонтальной опорной плоскости на спине в положении «вверх ногами». Для спасения робота предложена специальная форма корпуса в виде сложенных по плоскому сечению двух усеченных прямых круговых цилиндров. Разработан и аналитически обоснован [9] метод амплитудного раскачивания системы в окрестности положения аварийного равновесия, позволяющий использовать кинематические и динамические возможности робота для самостоятельного спасения. Синтезировано устойчивое резонансное движение системы, обеспечивающее переворот корпуса шагающего робота и его приведение в нормальное рабочее положение.

Предложенные алгоритмы формирования движения робота при спасении из аварийной ситуации были отработаны средствами компьютерного моделирования в программной среде, реализующей расчет трехмерной полной динамической модели механической системы — робота, взаимодействующего с горизонтальной опорной плоскостью. В результате аналитического исследования упрощенной динамической модели системы установлены ограничения на возможность применения разработанного метода, связанные с геометрическими и массовыми характеристиками конструкции шагающего робота [9].

Стабилизация движения шагающего робота в окрестности программного движения построена по принципу кусочно-формируемой с дискретностью шага интегрирования обратной связи. Обратная связь рассчитывается по рассогласованиям реальных и программных шарнирных углов с требованием минимальных значений угловых скоростей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ
(проект № 19-01-00123 А).*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Труды международных конференций CLAWAR — Climbing and Walking Robots*. URL: <http://www.clawar.org/> (дата обращения 07.02.2018).
- [2] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. *Экстремальные локомоционные возможности инсектоморфных роботов*. Москва, ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. 212 с.
- [3] Охотимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. *Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата*. Москва, Наука, 1984, 312 с.
- [4] *Robot Kingdom*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=W9DOG47_xJk (дата обращения 07.02.2019).
- [5] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Транспортировка груза на плоту инсектоморфным роботом. *Изв. РАН. ТИСУ*, 2018, № 5, с. 136–146.
- [6] *Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем*. URL: <http://www.umlabor.ru/pages/index.php?id=3> (дата обращения 10.02.2020).
- [7] *Как переворачивается жук (бронзовка)*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nbExQQ5uqqk>
- [8] *Черепаха-акробат*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eFDGRrbcSMQ>
- [9] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В., Мелкумова Е.В. Приведение инсектоморфного робота в рабочее состояние из аварийного положения «вверх ногами». *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*, 2019, № 6, с. 163–176. DOI: 10.1134/S0002338819060052
- [10] Голубев Ю.Ф., Корянов В.В. Переправа автономного шестиногого робота на плоту через водную преграду. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1748

Статья поступила в редакцию 28.01.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Голубев Ю.Ф., Корянов В.В., Мелкумова Е.В. Поведение шестиногого робота в аварийной ситуации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 3. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1964>

Голубев Юрий Филиппович — д-р физ.-мат. наук, профессор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов: теоретическая механика; методы математического моделирования, оценивания и управления механическими и биомеханическими системами; контактное взаимодействие; механика машин и роботов; небесная механика, баллистика; искусственный интеллект; нейронные сети. e-mail: golubev@keldysh.ru

Корянов Виктор Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Область научных интересов: теоретическая механика; методы математического моделирования, оценивания и управления механическими и биомеханическими системами; контактное взаимодействие; механика машин и роботов; небесная механика, баллистика; компьютерное моделирование; численные методы; программирование. e-mail: korianov@keldysh.ru

Мелкумова Елена Вадимовна — канд. физ.-мат. наук, доцент МГУ имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов: теоретическая механика; методы математического моделирования, оценивания и управления механическими и биомеханическими системами; контактное взаимодействие; механика машин и роботов; компьютерное моделирование; численные методы. e-mail: elena_v_m@mail.ru

Behavior of the six-legged robot in emergency situation

© Yu.F. Golubev^{1,2}, V.V. Koryanov¹, E.V. Melkumova²

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow, 125047, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

The paper proposes a method of rocking the body of a six-legged robot, which provides a flipping of the body and the return of the robot to the operating position. It is shown that the autonomous rescue of the apparatus from an emergency position “upside down” is possible with the help of cyclic movement of the legs, if the body has an upper shell in the form of a truncated cylinder. The legs on the pre-chosen edge of the body through which the flip should occur, are passive, and straightened along the body so that they do not interfere with the flip. The legs on the opposite edge are active; they perform synchronous movement in a plane perpendicular to the longitudinal axis of the body, with a fixed angle in the knee. An analytical study and computer simulation of the full dynamics of the robot were fulfilled which confirmed the effectiveness of the developed technique for restore the functional capability of the robot. Computer simulation was carried out by means of the Universal Mechanism software package. The results of numerical experiments are presented.

Keywords: six-legged robot, emergency, flipping of the robot's body, rocking

REFERENCES

- [1] Climbing and Walking Robots. *Proceedings of the International Conferences on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)*. Available at: <http://www.clawar.org/> (accessed February 7, 2018).
- [2] Golubev Yu.F., Koryanov V.V. *Ekstremalnye lokomotsionnye vozmozhnosti insektomorfnykh robotov* [Extreme locomotion capabilities of insectomorphic robots]. Moscow, Institute prikladnoy matematiki RAN imeni M.V. Keldysha, 2018, 212 p.
- [3] Okhotsimsky D.E., Golubev Yu.F. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem avtomaticheskogo shagaushchego apparata* [Mechanics and motion control of an automatic walking device]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 312 p.
- [4] *Robot Kingdom*. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=W9DOG47_xJk (accessed February 7, 2019).
- [5] Golubev Yu.F., Koryanov V.V. Shipping Cargo on a Raft by an Insectomorphic Robot. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2018, no. 5, pp. 813–821.
- [6] *Universalny mekhanizm. Modelirovanie dinamiki mekhanicheskikh system* [Universal mechanism. Modeling the dynamics of mechanical systems]. Available at: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=3> (accessed February 10, 2020).
- [7] *Kak perevorachivaetsya zhuk (bronzovka)* [How the beetle (cetonian) turns over]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=nbExQQ5uqqk>
- [8] *Cherepakha-akrobat* [Acrobat turtle]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=eFDGRrbcSMQ>
- [9] Golubev Yu.F., Koryanov V.V., Melkumova E.V. *Izvestiya RAS. Teoriya i sistema upravleniya* — *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, no. 6, pp. 163–176. DOI: 10.1134/S0002338819060052
- [10] Golubev Yu.F., Koryanov V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* — *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1748

Golubev Yu.F., Dr. Sc. (Phys.&Math.), Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Lomonosov Moscow State University. Research interests: theory of mechanics; methods of mathematical modeling, evaluation and control of mechanical and biomechanical systems; contact interaction; mechanics of machines and robots; celestial mechanics; ballistics; artificial intelligence; neural networks. e-mail: golubev@keldysh.ru

Koryanov V.V., Cand. Sc. (Phys.&Math.), Senior Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. Research interests: theory of mechanics; methods of mathematical modeling, evaluation and control of mechanical and biomechanical systems; contact interaction; mechanics of machines and robots; celestial mechanics; ballistics; computer simulation, numerical methods, programming. e-mail: korianov@keldysh.ru

Melkumova E.V., Cand. Sc. (Phys.&Math.), Assoc. Professor, Lomonosov Moscow State University. Research interests: theory of mechanics; methods of mathematical modeling, evaluation and control of mechanical and biomechanical systems; contact interaction; mechanics of machines and robots; computer simulation; numerical methods. e-mail: elena_v_m@mail.ru