

*Польский Вячеслав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

*Лукин Александр Алексеевич, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

*Шевченко Максим Юрьевич, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕРВЕОБРАЗНОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА- ЗМЕИ С УЧЁТОМ ДИНАМИКИ

Аннотация: В данной статье изучается червеобразное движение робота-змеи. Основная цель данной работы заключается в разработке математической модели, которая позволит выполнять передвижение в условиях неизменяющейся внешней среды. В работе получены уравнения динамики волнообразного движения робота-змеи. Получены выражения для определения углов сочленений в зависимости от формы тела робота. В разделе, посвященном динамике, использован метод Лагранжа для записи выражения динамики многозвенного робота змеи. В итоге, с целью подтверждения анализа, проведено моделирование обратной задачи динамики червеобразного движения в пакете Matlab Simulink. В модели учтены характеристики конструкции. Подтверждены условия необходимого минимума количества контактных точек и рост окружного момента в сочленениях, расположенных вблизи точек контакта с поверхностью и центром масс робота.

Ключевые слова: змея, робот, динамика, модель, червеобразное движение.

Abstract: In this article the wormlike movement of the robot snake is studied. The main objective of this work is to develop a mathematical model that will allow to carry out movement in the conditions of constant external environment.

In the paper, the equations of the dynamics of the wavelike motion of the robot snake are obtained. Expressions for determining the angles of joints depending on the shape of the body of the robot are obtained. In the section devoted to the dynamics, the Lagrange method was used to record the expression of the dynamics of the multi-link snake robot.

As a result, in order to confirm the analysis, the simulation of the inverse task of the dynamics of worm-like movement in the Matlab Simulink package was carried out. The model takes into consideration the characteristics of the construction. Conditions of a necessary minimum number of contact points and the growth of torque in the joints located near the points of contact with the surface and center of mass of the robot are confirmed.

Keywords: snake, robot, dynamics, model, worm-like movement.

Постановка проблемы. В современном мире нельзя отрицать большую роль роботов. Одним из важнейших примеров является применение роботов в чрезвычайных ситуациях.

Стихийные бедствия наносят значительный ущерб, зависящий от экономического и политического развития общества. Для своевременного выявления и устранения причин бедствий применяется комплекс мер и специальное оборудование.

В связи с значительным развитием мобильной робототехники за последние десятилетия появились множество роботов, для решения упомянутой проблемы. В статье «Перспективы разработки мобильных роботов для поиска людей в завалах» [1] представлены некоторые мобильные роботы для поиска людей в завалах. Основными чертами этих аппаратов являются гусеничный движитель, наличие комплекса датчиков и камер. Недостатками

данных устройств являются зачастую большие габариты и малое время работы без подзарядки, также они часто застревают среди обломков.

Использование малогабаритных устройств, например змееподобных роботов, может исправить многие недостатки существующих решений. Физиология, разнообразие способов передвижения позволяют биологическим змеям перемещаться по плохо структурированным поверхностям в ограниченном пространстве. Для выполнения змеиной походки механическая система должна обладать числом степеней свободы, большим, чем число степеней свободы традиционных манипуляторов.

Трудностью организации целенаправленного перемещения робота змеи является отсутствие приближенной к реальности модели перемещения змеевидного тела.

Математическое описание формы тела робота. Существуют две формы движений, подобных движениям биологических змей: прямолинейное движение с использованием вертикальных волн и прямолинейное движение, использующее расширяющиеся, сужающиеся сегменты. Первый тип в литературе ассоциируют с червями [2, 3], поэтому далее ссылаемся на данный вид движения как на червеобразное передвижение. Данный тип движения имеет большую проходимость.

Для создания движения робота необходимо изменять углы сочленений определенным образом. В своей работе Хироши (Hirose) [4] показал, что с помощью изменения углов сочленений синусоидально с определенной частотой и фазовым запаздыванием между соседними сочленениями, генерируется змееподобное движение.

В большинстве разработанных змееподобных роботов форма тела задается серпенойдной кривой (см. рисунок 1), введенной Хироши. Функция серпенойдной кривой задается следующим образом:

$$\rho(s) = \frac{-2K_n\pi\alpha}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi s}{L}\right), \quad (1)$$

где L – полная длина тела робота, K_n - число волн, образуемых роботом, α – начальный угол извивания кривой и s – длина тела вдоль серпеной кривой.

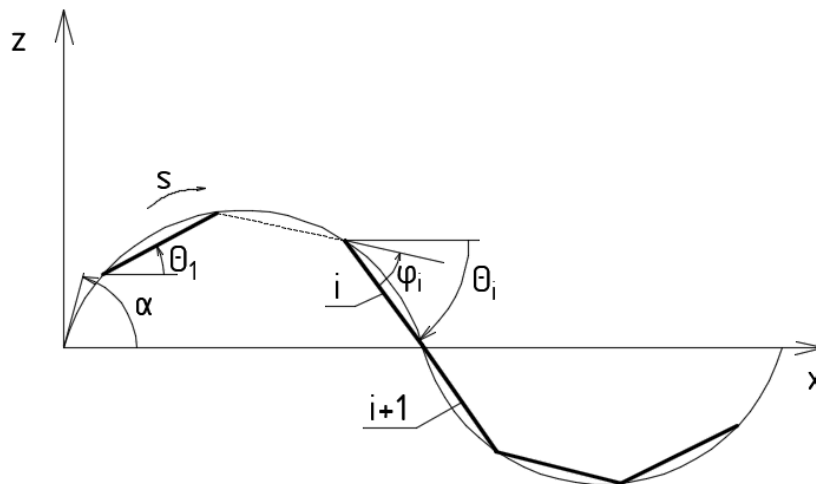


Рис. 1. – Движение звеньев вдоль серпеной кривой

Из (1) путем интегрирования функции кривой вдоль траектории движения получим выражение для относительных углов робота:

$$\varphi_i(s) = -2a \sin\left(\frac{K_n \pi}{L}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi s}{L} + \frac{2K_n \pi i}{n} - \frac{K_n \pi}{n}\right) \quad (2)$$

Относительные угловые скорости и ускорения получим дифференцированием выражения (2) по времени:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_i(s) &= \frac{-4aK_n \pi}{L} \sin\left(\frac{K_n \pi}{L}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi s}{L} + \frac{2K_n \pi i}{n} - \frac{K_n \pi}{n}\right) \dot{s} \\ \ddot{\varphi}_i(s) &= \frac{-4aK_n \pi}{L} \sin\left(\frac{K_n \pi}{L}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi s}{L} + \frac{2K_n \pi i}{n} - \frac{K_n \pi}{n}\right) \ddot{s} \\ &\quad - \frac{8aK_n^2 \pi^2}{L^2} \sin\left(\frac{K_n \pi}{L}\right) \sin\left(\frac{2K_n \pi s}{L} + \frac{2K_n \pi i}{n} - \frac{K_n \pi}{n}\right) \dot{s}^2 \end{aligned}$$

Соотношение между абсолютными и относительными значениями углов:

$$\theta_i = \theta_1 + \sum_{k=1}^{i-1} \varphi_k$$

где θ_1 - абсолютный угол головного звена (первого звена), и θ_i - абсолютные углы последующих звеньев.

Разработка динамической модели. Динамическая модель необходима для того, чтобы определить величину крутящего момента, приводящую в

движение робота. Кроме того, динамическую модель можно использовать при моделировании движения для оптимизации параметров робота.

Применим метод Лагранжа для записи уравнений динамики.

Обобщенные координаты, полностью определяющие конфигурацию системы:

$$q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n, x_b, z_b]$$

где x_b, z_b – координаты звена-головы робота соответственно вдоль осей Ox и Oz .

Запишем уравнения движения:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = \theta_i^{nc} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n + 2), \quad (3)$$

где K – кинетическая энергия и V – потенциальная энергия, θ_i^{nc} – неконсервативные силы, T – крутящий момент.

Расписав кинетическую, потенциальную энергии, неконсервативные силы, уравнение (3) можно представить в виде:

$$BT = M(\theta)\ddot{q} + H(\theta, \dot{\theta}) + F(\theta) + G(\theta) + S(\theta),$$

где M – матрица сил инерции, H – матрица, представляющая центробежные силы и условия Кориолиса, F – матрица, представляющая силы трения, B – матрица констант, G – матрица, представляющая потенциальную энергию, S – матрица, представляющая силы реакции опоры, T – матрица, представляющая крутящий момент и q, \dot{q}, \ddot{q} – матрицы обобщенных координат и их производные. $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – матрицы абсолютных углов звеньев и их производные. Детальная форма и размерность матриц M, H, B, G, F и S представлена в работах [5],[6].

Анализ модели. Рассмотрим обратную задачу динамики робота змеи: дана временная история относительных углов соседних звеньев, необходимо найти окружные моменты на моторах.

Моделирование обратной задачи динамики производилось в пакете Matlab Simulink.

Параметры робота и окружающей среды приведены в таблице 1. Время моделирования – 20 с, задаваемое ускорение – $0,0625 \text{ м/с}^2$.

Таблица №1. Параметры робота и окружающей среды

Начальный угол волны, °	30
Число звеньев	8
Число волн серпенойд	2
Длина звена, м	0.11
Масса звена, кг	0.1
Коэффициент трения	0.3
Расположение центра масс, м	0.055
Полная длина змеи, м	0.88

Первым этапом расчета является формирование желаемой формы серпенойды на основе задающего желаемого закона движения вдоль серпенойдной кривой. Из уравнения серпенойдной кривой получены законы изменения относительных углов в сочленениях робота (см. рисунок 2).

Изменение величины углов происходит по синусоидальному закону с равным запаздыванием по фазе.

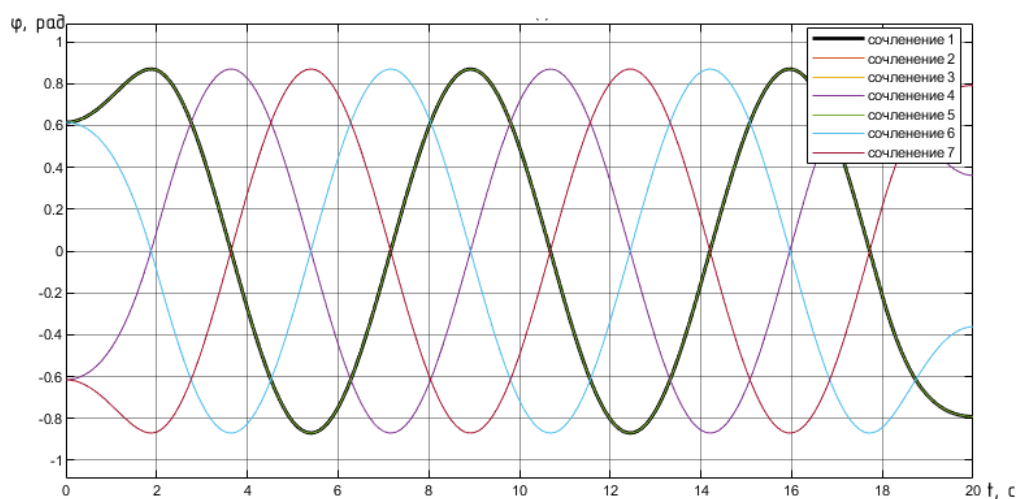


Рис. 2. – Относительные углы в сочленениях

Второй этап – расчет числа точек касаний сочленений робота змеи с землей, определение номеров касающихся сочленений с опорной поверхностью

(см. рисунок 3). В каждый момент времени в контакте участвует не менее двух точек.

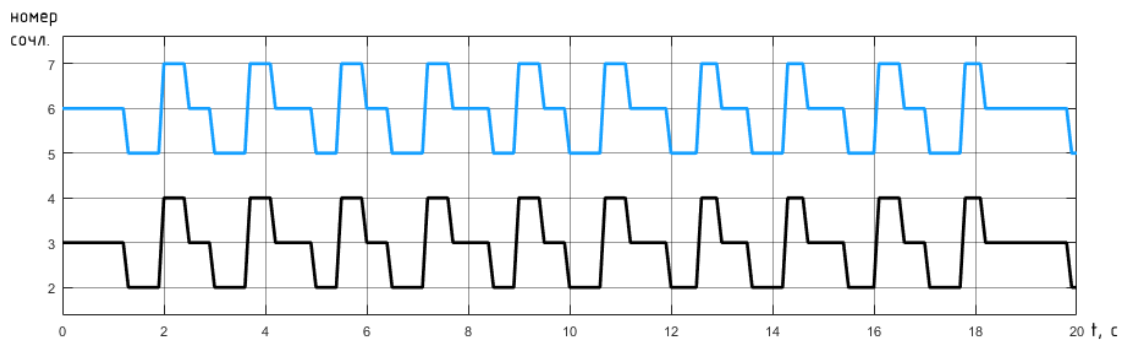


Рис. 3. – Номера сочленений в контакте с поверхностью

Третий этап моделирования обратной задачи динамики – вычисление необходимых окружных моментов на моторах в сочленениях (см. рисунок 4).

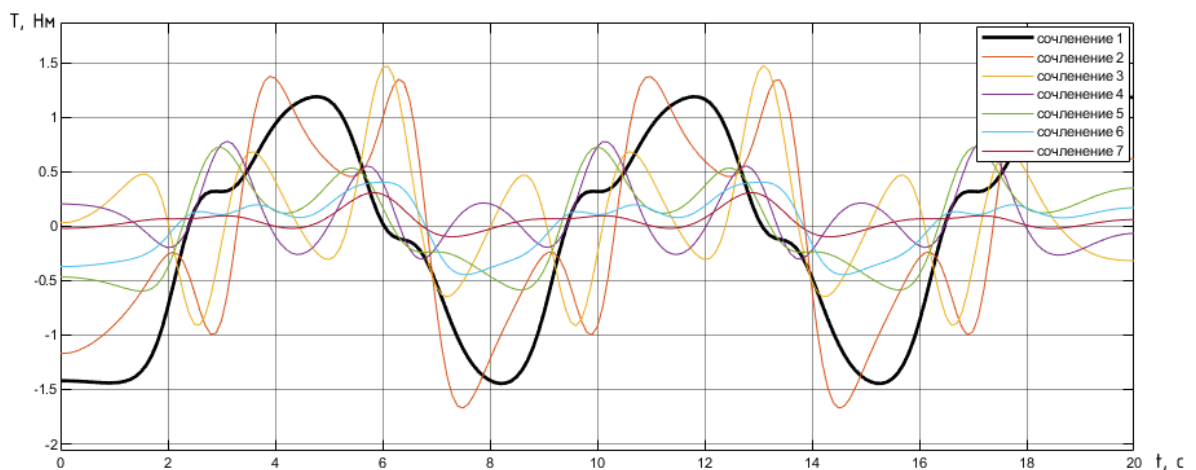


Рис. 4 – Окружные моменты в сочленениях

Наибольших величин достигают окружные моменты в сочленениях между 2 и 3 звеном, и между 3 и 4, и равны соответственно 1,373 Нм и 1,463 Нм. Результаты показывают, что наибольшее значение окружного момента необходимо около точек опор и вблизи центра масс робота.

Выводы. В результате проведенного исследования и моделирования были получены следующие результаты:

- 1) Разработана математическая модель движения робота змеи с учетом динамики.

2) На основе модели движения проведены исследования серпеной кривой при задаваемом движении, получены связи между абсолютными и относительными углами звеньев.

Заключение. Таким образом, с помощью применения приведенного подхода к моделированию перемещения змеевидных роботов, появляется возможность определения основных конструктивных параметров – требуемого окружного момента в сочленениях робота, масс-инерционных характеристик модулей робота.

Также мы можем сделать вывод, что при движении робота наибольший момент (1,463 Нм) развивается вблизи точки контакта с поверхностью и около центра масс робота.

Разработанные роботы змеи могут найти широкое применение в поисково-спасательных операциях, значительно повысить скорость поиска жертв стихийных бедствий.

Библиографический список:

1. Цурикова Т.С. Перспективы разработки мобильных роботов для поиска людей в завалах. Сборник статей победителей II Международной научно-практической конференции. Пенза: Изд-во: "Наука и Просвещение", 2016.
2. Steigenberger J, Behn C. Worm-like locomotion systems: an intermediate theoretical approach. Oldenbourg, München, 2012.
3. . L. Chen, S. Ma, Y. Wang, B. Li and D. Duan. Design and modeling of a snake robot in traveling wave locomotion. J. Mech. Mach. Theory 42, 2007. P. 1632-1642.
4. S. Hirose. Biologically Inspired Robots (Snake-Like Locomotor and Manipulator). Oxford University Press, Oxford, 1993.
5. Koninklijke Brill NV. Design and Modeling of a Snake Robot Based on Worm-Like Locomotion. Leiden and The Robotics Society of Japan, 2012 DOI:10.1163/156855311X617498.

6. Traveling Wave Locomotion of Snake Robot along Symmetrical and Unsymmetrical body shapes. Conference: ISR/ROBOTIK 2010, Proceedings for the joint conference of ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) und ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics).