

Е. С. Брискин, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой, dtm@vstu.ru,
Н. Г. Шаронов, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., sharonov@vstu.ru,
В. С. Барсов, студент, barsov-19981703@mail.ru,

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Об энергетически эффективных режимах движения роботов с поворотнo-заклинивающими движителями¹

Рассматриваются поворотнo-заклинивающие движители. Проанализированы особенности работы основного модуля таких движителей, проявляющиеся в экологичности, энергоэффективности, проходимости. Поставлена задача определения параметров и расписания движения элементов движителя, обеспечивающих минимум энергозатрат. Установлено, что эти параметры зависят от геометрических особенностей окружающей среды. Получены уравнения, которые обеспечивают решение поставленной задачи.

Ключевые слова: поворотнo-заклинивающий движитель, тепловые потери, уравнения Эйлера—Пуассона

Введение

Наиболее часто при разработке мобильных роботов применяются колесные и гусеничные движители [1]. Используются и шагающие движители [2], преимущество которых является более высокая грунтовая и профильная проходимость [3], а недостатками — сравнительно малая скорость роботов, усложнение конструкции и системы управления [4]. Еще одно преимущество движителей, дискретно взаимодействующих с грунтом, проявляется в более высокой экологичности, что актуально в сельском, лесном хозяйствах и т.д. (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Однако идеальные экологические движители — это движители, непосредственно не взаимодействующие с почвенным покровом. К таким движителям могут относиться поворотнo-заклинивающие движители [5], взаимодействующие с естественными (например, деревьями) или искусственными (например, столбами) твердыми телами, находящимися на грунте (рис. 2, см. третью сторону обложки).

В статье рассматриваются особенности работы поворотнo-заклинивающих движителей и задача определения параметров и расписания работы приводов движителя, обеспечивающих минимум энергозатрат.

1. Принцип работы поворотнo-заклинивающего движителя

Исследуемый поворотнo-заклинивающий движитель является естественным развитием заклинивающе-скользящего (рис. 3) [6]. Робот с таким движителем может перемещаться по вертикальному или наклонному столбу за счет периодического заклинивания одной из втулок и скольжения другой. Если с одной из втулок связать стержень с управля-

емой длиной и возможностью его поворота вокруг своей оси, то реализуется возможность и вращательного движения в пространстве [7] (рис. 4).

Такой способ перемещения обладает следующими преимуществами:

- отсутствие взаимодействия с опорной поверхностью, а в случае лесозаготовок, где роль вертикальных столбов выполняют деревья, — с экологически ранимым почвенным покровом;
- отсутствие необходимости перемещения достаточно массивного (для обеспечения статической устойчивости всего робототехнического комплекса) шасси;
- возможность перемещения по неровной поверхности, в частности по крутым склонам, что, в частности, может быть использовано при обслуживании технологического оборудования железных дорог на крутых насыпях без опоры на железнодорожное полотно.

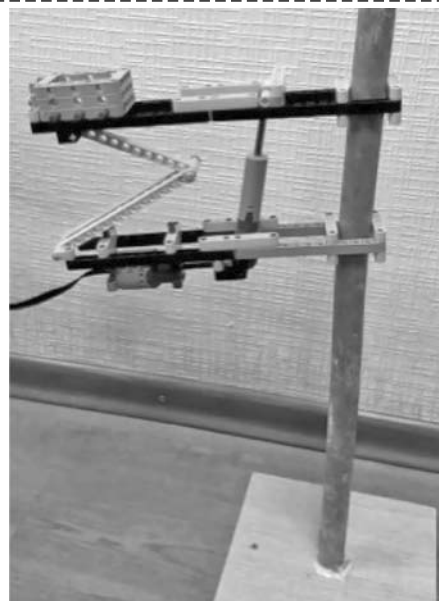


Рис. 3. Заклинивающе-скользящий движитель (ВолгГТУ)

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00675 а.

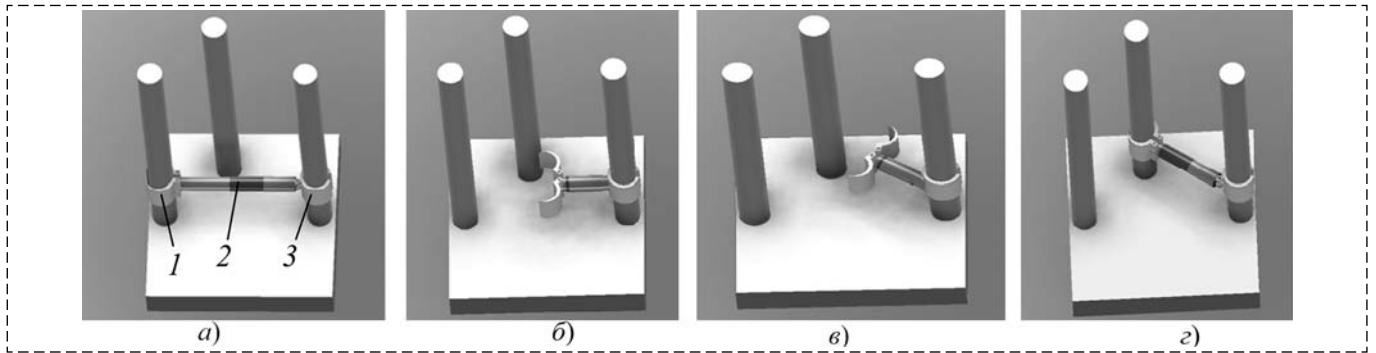


Рис. 4. Поворотно-заклинивающий движитель:

a — начальное положение; *б* — расклинивание втулки-схвата 1 и укорочение стрелы движителя за счет работы привода поступательного движения 2; *в* — поворот стрелы движителя за счет работы привода поворота 3; *з* — удлинение стрелы движителя за счет работы привода поступательного движения 2 до заклинивания втулки-схвата 1

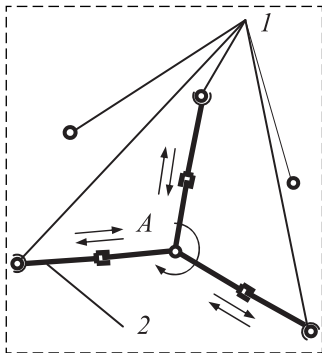


Рис. 5. Пример соединения модулей в звездообразную сеть:

1 — неподвижные опоры (деревья), 2 — модуль движителя

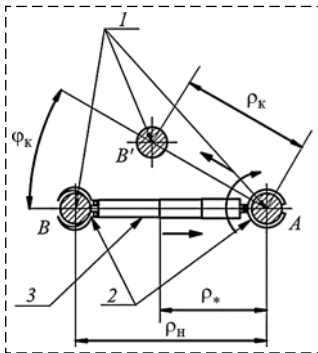


Рис. 6. Расчетная схема поворотно-заклинивающего движителя:

1 — вертикальные опоры, 2 — поворотно-заклинивающие втулки, 3 — стрела с изменяемой длиной

К недостаткам относится тот факт, что требуется удаленный источник энергии, связь с которым осуществляется по кабелю переменной длины.

Кинематическая схема робота может содержать и промежуточную опору *A* (рис. 5), обеспечивающую большую жесткость всей конструкции. Однако при всем разнообразии возможных кинематических схем основным модулем робототехнического комплекса является стрела 3 переменной длины, способная поворачиваться вокруг осей, проходящих через ее концы (рис. 6).

2. Постановка задачи о минимуме энергозатрат

Рассматривается механическая система, состоящая из стержня переменной длины, в начальный момент занимающая положение *AB* (рис. 6).

Перемещение стержня в положение *AB'* осуществляется за счет последовательного изменения длины стержня *AB* от первоначальной ρ_n до ρ_* за время τ_1 , поворота вокруг оси *A* на угол φ_k за время τ_2 и увеличения длины стержня от ρ_* до конечного значения ρ_k за время τ_3 .

Масса робота *m* сосредоточена на перемещаемом конце стрелы в точке *B*. Задается общее вре-

мя перемещения τ и расписание работы приводов τ_1, τ_2, τ_3 , причем

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (2.1)$$

Ставится задача определения $\rho_*, \tau_1, \tau_2, \tau_3$, обеспечивающих минимум тепловых потерь *W* в приводе поворота стержня и приводе изменения его длины [8]:

$$W = \sum_{j=1}^3 W_j = \alpha \int_0^{\tau_1} F^2 dt + \alpha \int_0^{\tau_3} F^2 dt + \beta \int_0^{\tau_2} M^2 dt, \quad (2.2)$$

где *F* — усилие, развиваемое приводом изменения длины; *M* — момент, развиваемый приводом поворота; α, β — известные характеристики двигателей [9]; W_j — тепловые потери на каждом из этапов.

Если используются одинаковые двигатели в приводе изменения длины и приводе поворота, и генерируемая сила $F = M_1/R$, где M_1 — момент, развиваемый двигателем привода удлинения стрелы, *R* — приведенный радиус механизма преобразования вращательного движения ротора двигателя в поступательное движение стрелы, то $\alpha = \beta/R^2$.

3. Метод решения задачи о минимуме энергозатрат

Метод решения основан на требовании минимума функционала (2.2) на основе составления уравнений движения на каждом этапе с последующим определением параметров $\rho_*, \tau_1, \tau_2, \tau_3$.

Первый этап $0 < t < \tau_1$ изменения длины стержня описывается дифференциальным уравнением

$$m\ddot{x} = F, \quad (3.1)$$

причем при $t = 0$: $\rho = \rho_n, \dot{\rho} = 0$; при $t = \tau_1$: $\rho = \rho_*, \dot{\rho} = 0$.

Из уравнения Эйлера—Пуассона минимум первого интеграла в (2.2) достигается на программном движении в соответствии с дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\partial(m\ddot{x})^2}{\partial \ddot{x}} \right] = m^2 \ddot{x} = 0. \quad (3.2)$$

При заданных граничных условиях из соотношения (3.2) следуют уравнения движения

$$x = \frac{2(\rho_H - \rho_*)}{\tau_1^3} t^3 - \frac{3(\rho_H - \rho_*)}{\tau_1^2} t^2 + \rho_H, \quad (3.3)$$

откуда для тепловых потерь W_1 на первом этапе

$$W_1 = \alpha \int_0^{\tau_1} F^2 dt = \alpha \int_0^{\tau_1} m^2 \ddot{x}^2 dt = \alpha m^2 \frac{12(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^3}. \quad (3.4)$$

На втором этапе $0 < t < \tau_2$ при повороте стрелы на угол φ_k дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$m\rho_*^2 \ddot{\varphi} = M, \quad (3.5)$$

причем при $t = 0$: $\varphi = 0$, $\dot{\varphi} = 0$; при $t = \tau_2$: $\varphi = \varphi_k$, $\dot{\varphi} = 0$.

Уравнение Эйлера—Пуассона имеет форму

$$\frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\partial(m\rho_*^2 \ddot{\varphi})^2}{\partial \ddot{\varphi}} \right] = m^2 \rho_*^4 \ddot{\varphi} = 0. \quad (3.6)$$

Решением является

$$\varphi = \frac{2\varphi_k t^3}{\tau_1^3} + \frac{3\varphi_k}{\tau_1^2} t^2, \quad (3.7)$$

а тепловые потери W_2 на втором этапе

$$W_2 = \beta \int_0^{\tau_2} M^2 dt = \beta \int_0^{\tau_2} m^2 \rho_*^4 \ddot{\varphi}^2 dt = \beta m^2 \rho_*^4 \frac{12\varphi_k^2}{\tau_2^3}. \quad (3.8)$$

Аналогично на третьем этапе $0 < t < \tau_3$ тепловые потери W_3 определяются выражением, подобным (3.4):

$$W_3 = \alpha m^2 \frac{12(\rho_* - \rho_k)^2}{\tau_3^3}. \quad (3.9)$$

Таким образом, суммарные тепловые потери W , с учетом (2.1), являются функцией семи задаваемых переменных: m , ρ_H , ρ_k , α , β , φ_k , τ и трех

определяемых оператором или формируемых системой управления переменных ρ_* , τ_1 , τ_3 :

$$W = 12m^2 \left\{ \alpha \left[\frac{(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^3} + \frac{(\rho_* - \rho_k)^2}{\tau_3^3} \right] + \beta \rho_*^4 \frac{\varphi_k^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^3} \right\}. \quad (3.10)$$

На рис. 7 представлены некоторые примеры зависимостей приведенных тепловых потерь $W/12m^2\alpha$ от переменных ρ_* , τ_1 , τ_3 при $\beta = 5\alpha$.

Характерной особенностью зависимости (3.10) является наличие минимума. Параметры, при которых он достигается, должны определяться системой управления в соответствии с решением системы нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial \rho_*} = -\frac{\alpha}{\tau_1^3}(\rho_H - \rho_*) + \frac{\alpha}{\tau_3^3}(\rho_* - \rho_k) + \\ + 2\beta \rho_*^3 \frac{\varphi_k^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^3} = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial \tau_1} = -\frac{\alpha(\rho_H - \rho_*)^2}{\tau_1^4} + \beta \rho_*^4 \frac{4\varphi_k^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^4} = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial \tau_3} = -\frac{\alpha(\rho_* - \rho_k)^2}{\tau_3^4} + \beta \rho_*^4 \frac{4\varphi_k^2}{(\tau - \tau_1 - \tau_3)^4} = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Однако, не решая полученную систему алгебраических уравнений, можно, проанализировав ее, получить закономерность

$$\left(\frac{\tau_3}{\tau_1} \right)^2 = \frac{\rho_k - \rho_*}{\rho_H - \rho_*}. \quad (3.12)$$

Установленная закономерность (3.12) позволяет упростить определение оптимальных параметров программного движения.

Заключение

1. Проанализированы достоинства и недостатки поворотнo-заклинивающих движителей и даны рекомендации по их использованию.

2. Выделен базовый модуль поворотнo-заклинивающего движителя. Совокупность таких модулей, объединенных соответствующим образом, позволяет формировать кинематическую схему робота для определенной эксплуатационной ситуации.

3. Установлены геометрические параметры ρ_* , ρ_H , ρ_k , φ_k и расписание работы приводов τ_1 , τ_2 , τ_3 , влияющие на энергоэффективные законы движения поворотнo-заклинивающих движителей.

4. Полученные результаты, основанные на выбранной расчетной схеме, носят качественный характер. Для их использования при разработке конкретных робототехнических систем следует учитывать как внешние силы сопротивления движению, так и силы трения в приводах. Кроме

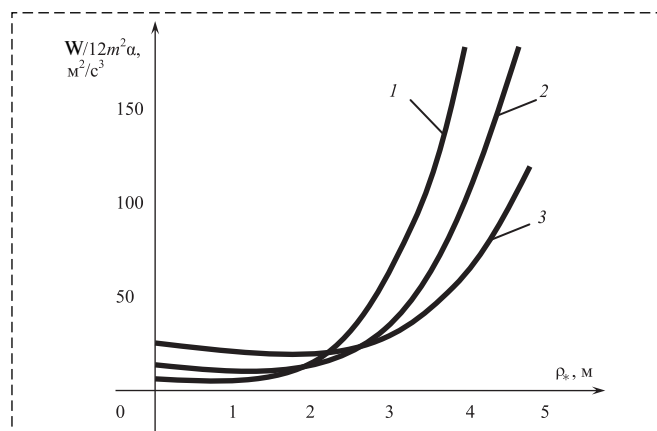


Рис. 7. Зависимость приведенных тепловых потерь при различных расписаниях движения τ_1 , τ_2 , τ_3 :

1 — $\tau_1 = \tau_3 = 4$ с, $\tau_2 = 2$ с; 2 — $\tau_1 = \tau_3 = 3$ с, $\tau_2 = 4$ с; 3 — $\tau_1 = \tau_3 = 2,5$ с, $\tau_2 = 5$ с

того, в инженерных расчетах следует использовать реальный момент инерции стрелы робота относительно оси вращения.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 416 с.
2. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2013. № 101. 32 с.
3. Брискин Е. С., Чернышев В. В. Экспериментальные исследования динамики многоопорной шагающей машины с движителями лямбдаобразного вида // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1999. № 4. С. 32–37.
4. Briskin E., Zhoga V., Chernishev V., Maloletov A., Kalinin Y., Sharonov N. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Nagoya Inst. of Technology, Japan. 2010. P. 769–776.

5. Meaclem C. V., Gutschmidt S., Chen X. & Parker R. Kinematic and dynamic analysis of a brachiating tree-to-tree machine, 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. P. 1311.
6. Азарян Д. К., Малолетов А. В. Исследование условий равновесия робота с заклинивающим движителем при движении по стержню // Нелинейная динамика машин — School-NDM 2017 сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых. 2017. С. 107–112.
7. Брискин Е. С., Шаронов Н. Г., Кваша Ю. С., Скобелев М. О. О выборе геометрических параметров заклинивающе-поворотных движителей мобильных роботов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 8 (203). С. 108–112.
8. Брискин Е. С., Калинин Я. В., Малолетов А. В. Об оценке эффективности цикловых механизмов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2017. № 2. С. 13–19.
9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. В 2-х частях. Л.: Энергия, 1972. ч. 1. 543 с., ч. 2. 648 с.

On Energy Efficient Regimes of Robot Motion with Rotary-Wedging Propulsion Devices

E. S. Briskin, dtm@vstu.ru, N. G. Sharonov, sharonov@vstu.ru✉, V. S. Barsov, barsov-19981703@mail.ru, Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: Sharonov Nikolay G., Ph. D., Senior Researcher
Department of Theoretical Mechanics of Volgograd State Technical University,
Volgograd, 400005, Russian Federation, e-mail: sharonov@vstu.ru

Accepted on November 09, 2017

Rotary-wedging propulsion device are considering. The peculiarities of dynamics and control main module such propulsion devices have been analyzed. These peculiarities are manifesting in environmental, energy efficiency, possibility. The problem of determination of parameters and schedule of motion, providing the minimum energy consumption has been set. The authors consider a mechanical system consisting of a rod of variable length, at the initial time occupying a certain position. The movement of the rod to a new position is carried out by successively changing the length of the rod from the initial to the intermediate, turning about the axis by a certain angle, and extending the rod from the intermediate to the final value. The weight of the robot is concentrated on the movable end of the boom at a point. To solve the problem, specify the total movement time and schedule drives. Method of solution based on the requirement of a minimum of functionality based on the equations of motion at each stage, with subsequent determination of the parameters. These parameters are depended on geometric features of environment. The equations, providing the solving the task have been obtained.

Keywords: rotary-wedging propulsion device, heat losses, Euler-Poisson equation.

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-01-00675 a.

For citation:

Briskin E. S., Sharonov N. G., Barsov V. S. On Energy Efficient Regimes of Robot Motion with Rotary-Wedging Propulsion Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 100–103.

DOI: 10.17587/mau.19.100-103

References

1. Yurevich E. I. *Osnovy robototekhniki* (Fundamentals of robotics), BHV Petersburg, 2005, 416 p. (in Russian).
2. Pavlovsky V. E. *O razrabotkakh shagajushhih mashin* (For elaboration of walking machines), *Preprint of Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS*, 2013, no. 101, 32 p. (in Russian).
3. Briskin E. S., Chernyshev V. V. *Jeksperimental'nye issledovaniya dinamiki mnogoopornoj shagajushhej mashiny s dvizhiteljami ljambdaobraznogo vida* (Experimental studies of the dynamics multisupporting walking machines with movers lambda-row view), *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij, Mashinostroenie*, 1999. no. 4. pp. 32–37 (in Russian).

4. Briskin E., Zhoga V., Chernishev V., Maloletov A., Kalinin Y., Sharonov N. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application), *Emerging Trends in Mobile Robotics: proc. of the 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*. Nagoya Inst. of Technology, Japan, 2010, pp. 769–776.
5. Meaclem C. V., Gutschmidt S., Chen X. & Parker R. Kinematic and dynamic analysis of a brachiating tree-to-tree machine, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1311.
6. Azaryan D. K., Maloletov A. V. *Issledovanie uslovij ravnovesija robota s zaklinivajushhim dvizhitelem pri dvizhenii po sterzhnju* (The study of the conditions of equilibrium of the robot wedging the engine at movement on the rod), *Proceedings of School-NDM 2017*, pp. 107–112 (in Russian).
7. Briskin E. S., Sharonov N. G., Kvasha Y. S., Skobelev M. O. *Issledovanie uslovij ravnovesija robota s zaklinivajushhim dvizhitelem pri dvizhenii po sterzhnju* (On choice of the geometric parameters wedging-rotary type of mobile robots), *Izvestia VSTU*, 2017, № 8 (203), pp. 108–112 (in Russian).
8. Briskin E. S., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V. Estimates of Efficiency of Cycle Mechanisms, *Mechanics of Solids*, 2017, 52 (2), pp. 128–133.
9. Kostenko M. P., Piotrovsky L. M. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machine), Leningrad, Energiya, 1972, Part 1, 543 p., Part 2. 648 p. (in Russian).