

К. С. Артемьев

ВЛИЯНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ШАГАЮЩИХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА СИЛУ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Волгоградский государственный технический университет

ksartemeyv@gmail.com

Исследуется влияние мест установки шагающих движителей на силу сопротивления движению мобильного робота. Рассматриваются основные параметры размещения движителей, такие как расстояние между опорными точками робота относительно корпуса машины. Анализируются способы минимизации сопротивления через оптимальное расположение движителей, что позволяет повысить энергоэффективность системы. Полученные результаты имеют практическое значение для проектирования мобильных роботов с шагающими движителями.

Ключевые слова: мобильный робот, шагающий движитель, сила сопротивления.

K. S. Artemyev

INFLUENCE OF WALKING PROPULSION DEVICE MOUNTING LOCATIONS ON THE MOTION RESISTANCE FORCE OF A MOBILE ROBOT

Volgograd State Technical University

The influence of walking thrusters installation locations on the drag force of a mobile robot is investigated. The basic parameters of propulsor placement, such as the distance between the robot's fulcrums relative to the machine body, are considered. Ways of minimising drag through optimal propulsor placement are analysed, thus improving the energy efficiency of the system. The results obtained are of practical importance for the design of mobile robots with walking thrusters.

Keywords: mobile robot, a walking propulsor, resistance force.

Введение

Мобильные роботы различаются типами движителей и условиями применения. Колесные системы подходят для ровных поверхностей, гусеничные эффективны на мягких грунтах, а шагающие движители обладают уникальными возможностями для передвижения по сложным ландшафтам, включая неровные, вертикальные и деформируемые поверхности [1, 2].

Преимущество шагающих систем – дискретное взаимодействие с поверхностью, обеспечивающее высокую адаптивность и профильную проходимость при преодолении препятствий. Однако эффективность таких роботов во многом зависит от рационального размещения движителей на корпусе. Неадекватная кон-

фигурация может существенно увеличить силу сопротивления движению, что приводит к повышенным энергозатратам и снижению общей производительности системы.

Энергоэффективность шагающих движителей зависит напрямую от множества факторов, включая массу робота, структуру его конструкции, параметры управления и свойства опорной поверхности. Существующие исследования предлагают различные подходы к решению этой проблемы, такие как оптимизация походки, использование внутренних масс для балансировки, разработка новых приводов с минимальными потерями на трение [3–5]. Несмотря на достигнутые результаты, задача повышения энергоэффективности остается актуальной и требует дальнейшего исследования.

При взаимодействии наземных транспортных средств с опорной поверхностью вводится сила сопротивления движению. В случае применения шагающих движителей известно выражение для определения осредненной силы сопротивления движения $Q_{\text{сопр}}$ [6, 7]. Для количественной оценки силы тяги требуется рассматривать стопы, погружающиеся в грунт на величину, пропорциональную максимальной нормальной нагрузке $P_{j \max}$, приходящейся на каждый движитель [7].

$$Q_{\text{сопр}} = \sum_{j=1}^N \frac{P_{j \max}^2}{2c_n l}, \quad (1)$$

где c_n – нормальная жесткость системы (опорная поверхность – стопа движителя); l – длина шага робота.

Таким образом, на силу сопротивления движению влияет распределение нормальных реакций, а изменение их величины, ввиду смещения расположения движителя относительно вертикальной оси, необходимо учитывать при проектировании шагающего мобильного робота.

Постановка задачи

Расчетная схема шагающей машины предполагает изучение ее плоского движения как твердого тела (рис. 1).

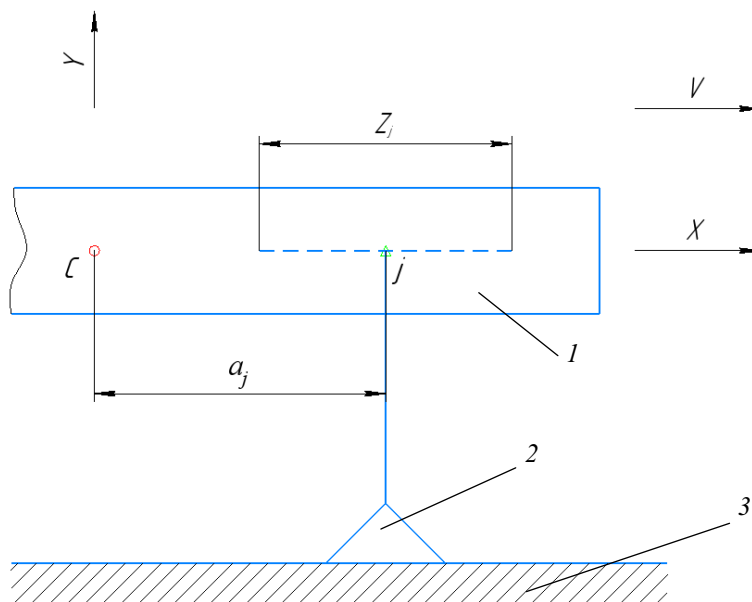


Рис. 1. Расчетная схема шагающей машины:
1 – корпус робота; 2 – шагающий движитель; 3 – опорная поверхность

При моделировании прямолинейного движения шагающего робота, имеющего N движителей, весом G и со скоростью V положение j движителя относительно центра масс C характеризуется координатой a_j .

Взаимодействие движителя с опорной поверхностью во время цикла движения T происходит с учетом коэффициента режима γ .

Задавшись параметрами, описывающими движение шагающего робота, становится возможным определить нормальные реакции P_j как функцию времени $P_j = P_j(t)$ и их максимальные значения.

Метод решения

Рассматривается движение шагающего робота с постоянной горизонтальной скоростью его центра масс. При рассмотрении движения робота как квазистатического становится возможным составить уравнения его движения, дополненные уравнениями совместимости деформаций λ_j системы «опорная поверхность – стопа движителя».

Тогда, усилия взаимодействия P_j :

$$P_j = c\lambda_j, \quad (2)$$

$$\lambda_j = -y_c - \varphi a_j + (L_0 + \Delta_j).$$

В течение фазы переноса движителя считается, что $\lambda_j = 0$.

Уравнения движения шагающего робота с постоянной скоростью центра масс имеют вид:

$$\begin{cases} M\ddot{x}_c = \sum F_x = 0, \\ M\ddot{y}_c = \sum_{j=1}^N P_j - G = 0, \\ J\ddot{\varphi}_c = \sum_{j=1}^N P_j a_j = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где M – масса робота; F_x – проекция внешних сил на ось x ; J – момент инерции тела.

При квазистатическом режиме движения $\ddot{y}_c = 0$, $\ddot{\varphi}_c = 0$, уравнения (3) принимают форму:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = V = \text{const}, \\ \sum_{j=1}^N P_j = G, \\ \sum_{j=1}^N P_j a_j = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Систему уравнений (4) возможно представить в виде двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} y_c^* (N - k) + \varphi \sum_{j=1}^N a_j = \frac{G}{c} - \sum_{j=1}^N \Delta_j, \\ y_c^* \sum_{j=1}^N a_j + \varphi \sum_{j=1}^N a_j^2 = - \sum_{j=1}^N a_j \Delta_j, \end{cases} \quad (5)$$

где $y_c^* = y_c - L$.

Имитационное моделирование

Рассматривается мобильный шагающий робот с четырьмя движителями $N = 4$, установленными на каждом из бортов. Движители на бортах установлены симметрично и имеют одинаковое расписание движения. Рассматривается возможность изменения точки закрепления движителей относительно корпуса мобильного робота S_{nj} в некотором диапазоне относительно изначального положения Z_j (рис. 2). Изначальные, принимаемые за базовые, положения движителей приведены в таблице.

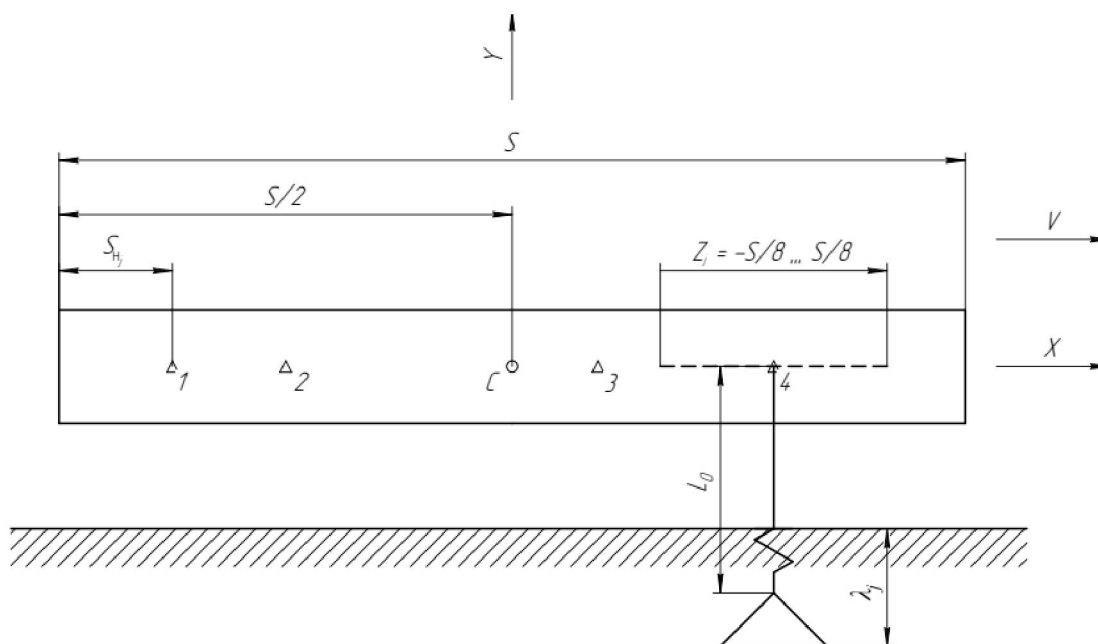


Рис. 2. Расположение точек крепления шагающих движителей относительно корпуса мобильного робота

При моделировании задаются:

1) положение стоп движителей при максимальном их выдвигении $S_{nj} = a_{j \max}$ (табл. 1);

2) период $T = 16$ с;

3) вес мобильного робота $G = 10000$ Н;

4) нормальная жесткость системы «опорная поверхность – опора движителя»

$c_n = 25000$ Н/м²;

- 5) количество двигателей $N = 4$;
- 6) коэффициент режима $\gamma = 0,8$;
- 7) длина шага $l = 1$ м;
- 8) длина корпуса робота $S = 8$ м;
- 9) расписание движения двигателей τ_{nj} (см. таблицу).

Расписание движения двигателей

Номер двигателя	$S_{nj}, \text{м}$	$\tau_{nj}, \text{с}$
1	$-\frac{3S}{8}$	-5
2	$-\frac{2S}{8}$	-12
3	$\frac{S}{8}$	-1
4	$\frac{2S}{8}$	3

На рис. 3 приведены графики визуализации походки робота с базовым расположением шагающих двигателей относительно корпуса робота.

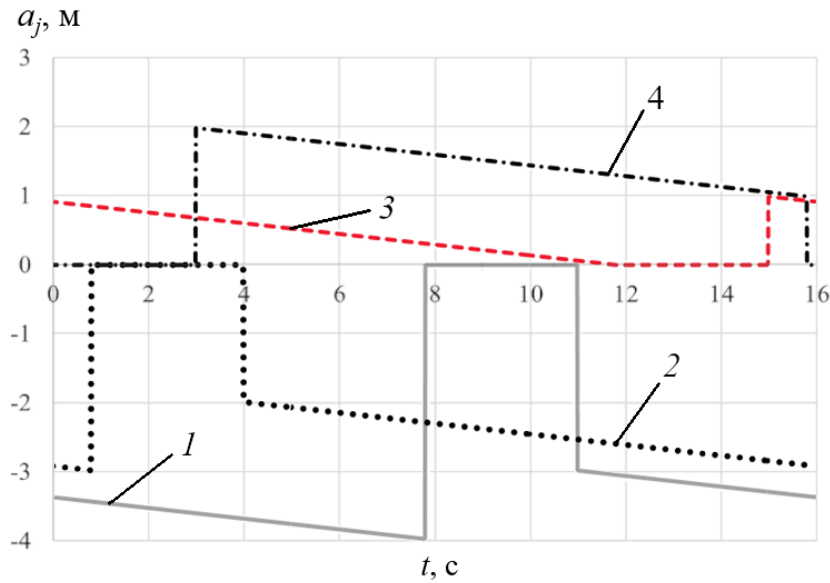


Рис. 3. Расписание движения двигателей:
1–4 – номера двигателей

При моделировании движения робота с заданной походкой, варьируя лишь длину шага l ,

получена зависимость силы сопротивления движению от длины шага, показанная на рис. 4.

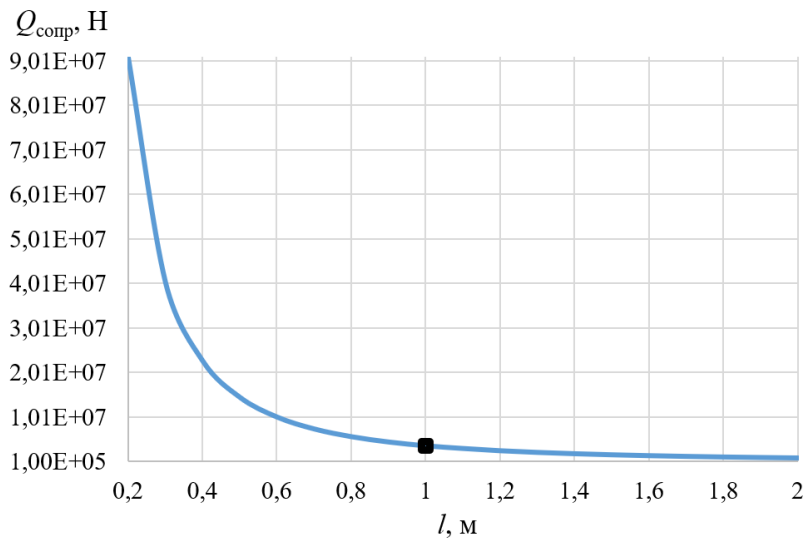


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления от длины шага мобильного робота

Изменение точки крепления движителя с последующим моделированием процесса движения шагающего робота приводит к изменению сил сопротивления движению. Положение движителя на корпусе варьировалось в диапазоне $S_{H_j} - S/8 \leq S_{H_j} \leq S_{H_j} + S/8$, при изменении

места установки одного движителя точки крепления остальных движителей на корпусе не изменялись и сохранялись в базовом положении (см. таблицу).

Возникающая сила сопротивления движению представлена на рис. 5.

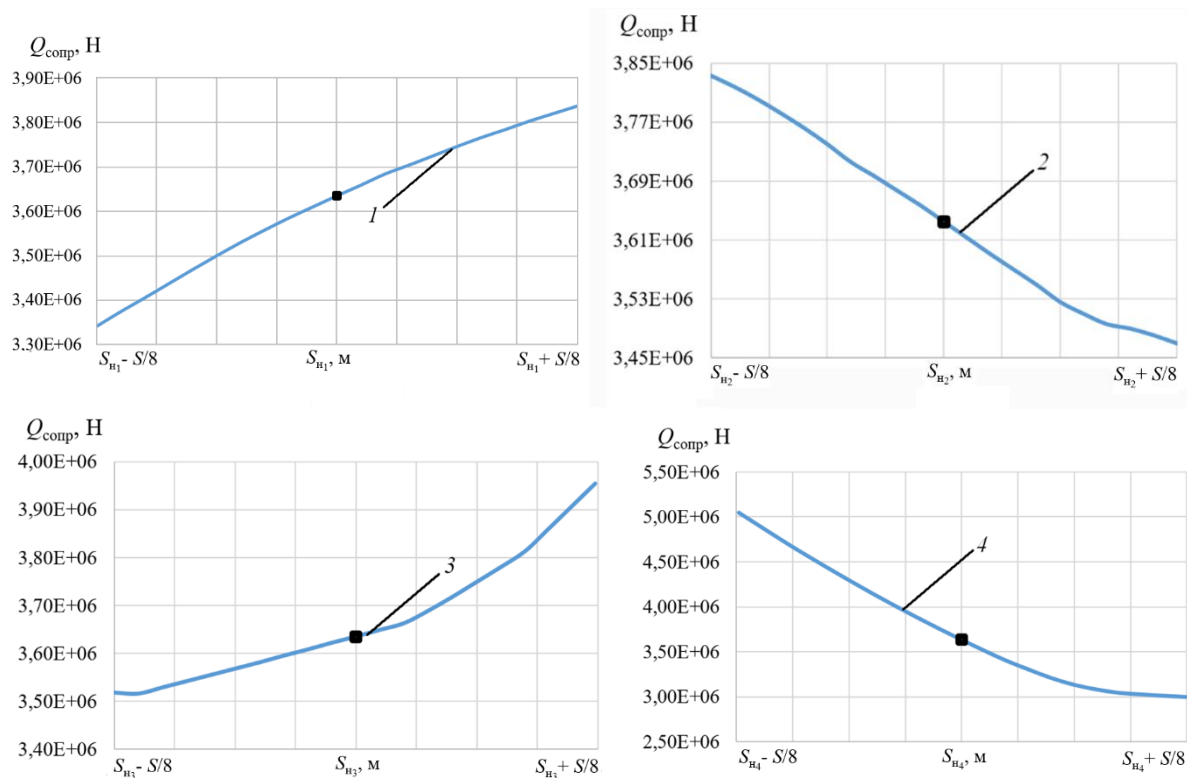


Рис. 5. Изменение силы сопротивления движению при перемещении точки крепления движителя к корпусу:
1–4 – номера движителей

Заключение

Установлено влияние конструктивных и управляющих параметров роботов и их механизмов шагания на величину осредненной силы сопротивления движению по шагу.

Увеличение длины шага без изменения скорости движения шагающей машины и без учета работы привода во время фазы переноса приводит к уменьшению осредненной силы сопротивления движению при любом расположении движителей на корпусе шагающей машины.

Расположение крайних движителей на большем удалении от центра масс робота приводит к уменьшению осредненной силы сопротивления движению, при этом увеличение расстояния между первым по счету движителем от геометрического центра корпуса до центра масс приводит к увеличению осредненной силы сопротивления движению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охоцимский, Д. Е. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата / Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 312 с.
2. Лапшин, В. В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата / В. В. Лапшин // Известия Академии наук. Механика твердого тела. – 1993. – № 1. – С. 65–74.
3. Смирная, Л. Д. О точности позиционирования шагающих движителей мобильных роботов / Л. Д. Смирная, И. П. Вершинина // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (256) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2021. – С. 69–73.
4. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.
5. Брискин, Е. С. Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями / Е. С. Брискин, Л. Д. Смирная, К. С. Артемьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 101–106.

6. *Игнатьев, М. Б.* Алгоритмы управления роботами-манипуляторами / М. Б. Игнатьев, Ф. М. Кулаков, А. М. Покровский. – М.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1972. – 248 с.

7. *Брискин, Е. С.* Об общей динамике и повороте шагающих машин / Е. С. Брискин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 33–39.