

*В. В. Чернышев¹, И. П. Вершинина¹, А. Х. Насари Задеган¹
В. Е. Пряничников², М. Д. Соловьева², Д. К. Степанова²*

**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА НОГ В ДВИЖИТЕЛЕ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ
НАГРУЖЕННОСТЬ ПРИВОДА ШАГАЮЩИХ МАШИН
С МЕХАНИЗМАМИ ШАГАНИЯ ЦИКЛОВОГО ТИПА ***

¹Волгоградский государственный технический университет

²Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН

dtm@vstu.ru

Рассматриваются результаты моделирования динамики шагающих машин «тяжелой» весовой категории с движителями циклового типа. Выясняется влияние числа ног (механизмов шагания) в движителе на структуру затрат мощности, расходуемых на движение. Показано, что увеличение числа ног в движителе, несмотря на очевидный рост его инерционных характеристик, приводит к снижению динамической нагруженности привода шагающих машин.

Ключевые слова: мобильные роботы, шагающий движитель, цикловые механизмы шагания, динамика привода, математическое моделирование.

© Чернышев В. В., Вершинина И. П., Насари Задеган А. Х., Пряничников В. Е., Соловьева М. Д., Степанова Д. К., 2023.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

V. V. Chernyshev¹, I. P. Vershinina¹, A. H. Nasari Zadegan¹
V. E. Pryanichnikov², M. D. Soloveva², D. K. Stepanova²

INFLUENCE OF THE NUMBER OF LEGS IN THE MOVER
ON THE DYNAMIC LOADING OF THE DRIVE OF WALKING
MACHINES WITH CYCLIC TYPE WALKING MECHANISMS

¹Volgograd State Technical University

²Keldysh Institute of Applied Mathematics

The results of modeling the dynamics of walking machines of the "heavy" weight category with cyclic type propellers are considered. The influence of the number of legs (walking mechanisms) in the mover on the structure of power costs spent on movement is revealed. It is shown that an increase in the number of legs in the propulsion system, despite the obvious increase in its inertial characteristics, leads to a decrease in the dynamic load of the drive of walking machines.

Keywords: mobile robots, walking mover, cyclic walking mechanisms, drive dynamics, mathematical modeling.

Шагающие машины и роботы, в сравнении с традиционными колесными и гусеничными машинами, обладают лучшей грунтовой и профильной проходимостью [1–3]. С другой стороны, шагающий способ передвижения требует дополнительных энергозатрат на преодоление цикловых сил инерции в системе и на вертикальные колебания корпуса при каждом шаге. Указанный недостаток особенно характерен для шагающих машин с движителями, построенными на базе простейших цикловых механизмов шагания, так как они, как правило, не могут обеспечить горизонтальный опорный участок траектории с равномерным движением опорной точки. В работе исследовано влияние числа ног (механизмов шагания) в движителе на динамическую нагруженность привода шагающих машин «тяжелой» весовой категории. Под шагающими движителями понимается группа (не менее двух) кинематически связанных механизмов шагания (ног), которые периодически взаимодействуют с грунтом, обеспечивая чередование опорной фазы и фазы переноса. Увеличение числа ног в движителе приводит к снижению неравномерности курсового движения машины и уменьшению колебаний ее корпуса. С другой стороны, имеет место рост энергозатрат на преодоление сил инерции в движителе при каждом шаге из-за увеличения его массы.

Анализ базируется на результатах теоретических исследований и полевых испытаний 5-тонных шагающих робототехнических комплексов «Восьминог» и «Восьминог-М» [4], предназначенных для работы на слабонесущих грунтах, а также опытных образцов шагающих

опор дождевальная машины «Кубань» [5]. Существование реальных образцов шагающих машин с известными кинематическими и инерционными характеристиками движителя существенно облегчило проведение анализа.

В шагающих машинах использовались 4-звенные одностепенные цикловые механизмы шагания «λ-образного» типа [6]. Механизм предложен Н. В. Умновым (ИМАШ РАН им. А. А. Благодного). Движитель состоит из двух механизмов шагания, кинематически жестко связанных и работающих в противофазе. В каждый момент времени хотя бы один из механизмов находится в контакте с грунтом, что позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся существенно проще аналогов с адаптивным управлением.

Схема механизма шагания и траектория его опорной точки C в относительном движении представлена на рис. 1. Точки на траектории расположены через равные промежутки времени – через $1/24$ периода цикла. Точки с заливкой соответствуют опорной фазе. Нулевая точка траектории соответствует нулевому углу поворота ведущего кривошипа механизма шагания ($\varphi_1 = 0$).

Увеличение числа ног в движителе приводит к уменьшению длины опорной части траектории и позволяет использовать в качестве опорного участка практически горизонтальную нижнюю часть траектории с равномерным движением опорной точки (рис. 1, в).

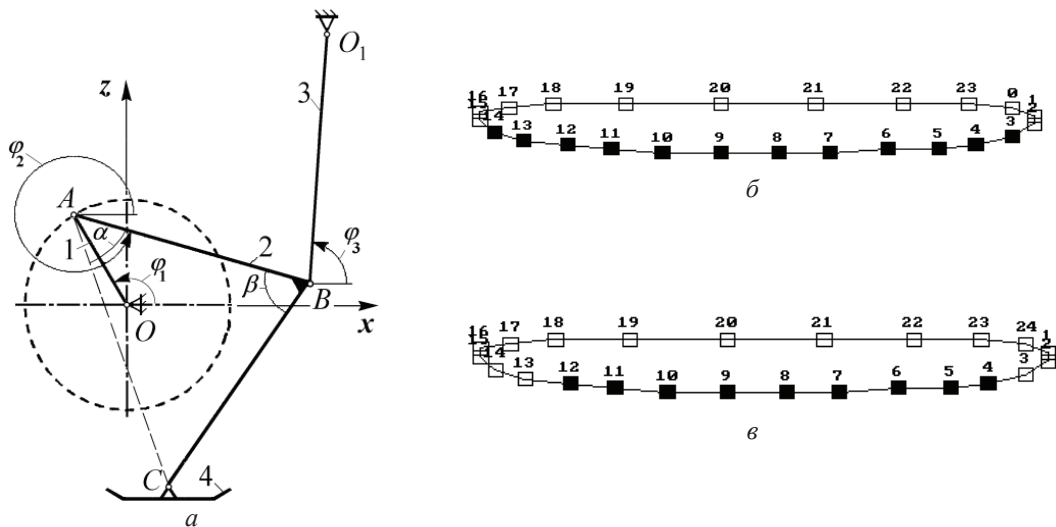


Рис. 1. Схема механизма шагания (а) и закон движения его опорной точки по траектории в относительном движении при двух (б) и трех (в) механизмах шагания в движителе:
1 – ведущий кривошип; 2 – Г-образное опорное звено (шатун); 3 – коромысло; 4 – стопа

Несовершенство траектории опорной точки механизмов шагания приводит к неравномерности курсового движения и вертикальным колебаниям корпуса в каждом цикле (шаге). Это требует дополнительных затрат мощности привода. Они складываются из мощности W_0^G , затрачиваемой на преодоление силы тяжести при вертикальных колебаниях ее корпуса; мощности W_0^Φ , идущей на преодоление цикловых сил инерции корпуса, а также суммарных затрат мощности $W_{дв}^\Phi$ на преодоление сил инерции в звеньях движителя, которые также носят периодический характер.

Мощность, необходимая на преодоление силы тяжести при колебаниях корпуса шагающей машины, равна

$$W_0^G = Gv_z, \quad (1)$$

где G – вес машины; v_z – вертикальная составляющая скорости корпуса.

Мощность, идущая на преодоление сил инерции корпуса, равна

$$W_{0x}^\Phi = \Phi_{0x} v_x + \Phi_{0z} v_z, \quad (2)$$

где $\Phi_{0x} = -m_0 a_x$, $\Phi_{0z} = -m_0 a_z$ – курсовая и вертикальная составляющие главного вектора сил инерции шагающей машины (без учета движителей); a_x , a_z – курсовая и вертикальная составляющие ускорения шагающей опоры, соответственно.

Мощность, расходуемая на преодоление цикловых сил инерции в движителе, складывается из затрат мощности на преодоление сил инерции в звеньях 4-звенных механизмов шагания:

$$W_{дв}^\Phi = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^2 (\Phi_{ijkx} \dot{x}_{Cijk} + \Phi_{ijkz} \dot{z}_{Cijk} + M_{ijy}^\Phi \omega_{ijy}), \quad (3)$$

где Φ_{ijkx} , Φ_{ijkz} – курсовая и вертикальная составляющие силы инерции i -го звена ($i = 1, 2, 3, 4$) j -го механизма шагания ($j = 1, 2, \dots, n$) k -го борта ($k = 1, 2$); $\dot{x}_{Cijk}$, $\dot{z}_{Cijk}$ – курсовая и вертикальная составляющие скорости центра масс звеньев; M_{ijy}^Φ и ω_{ijy} – момент сил инерции звена и его угловая скорость в плоскости шагания.

Проекции сил инерции и момент сил инерции звеньев механизмов шагания равны, соответственно: $\Phi_{ijkx} = -m_i \ddot{x}_{Cijk}$, $\Phi_{ijkz} = -m_i \ddot{z}_{Cijk}$, $M_{ijk}^\Phi = -J_{Ci} \ddot{\phi}_{ijk}$, где m_i и J_{Ci} – масса и момент инерции звена; $\ddot{x}_{Cijk}$, $\ddot{z}_{Cijk}$ – курсовая и вертикальная составляющие ускорения центра масс звена в плоскости шагания; $\ddot{\phi}_{ijk}$ – угловое ускорение звена.

Для определения составляющих дополнительной мощности (1)–(3) был проведен полный кинематический анализ движения механизмов шагания движителя. При определении скоростей и ускорений узловых точек механизмов шагания они рассматривались как плоские многозвенные механизмы. При составлении дифференциальных уравнений движения звеньев их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые накладываются внешние связи [7]. Выражения для скоростей узловых точек получались последовательным рас-

смотрением движений звеньев механизма. Угловые ускорения звеньев движителя определялись дифференцированием их угловых скоростей. Для задания движения корпуса шагающей машины к уравнениям движения также добавлялись формулы для проекций относительных скоростей опорных точек, являющихся узловыми точками опорного звена, а также формулы для относительных координат опорных точек, необходимых для определения момента смены стоп.

В процессе анализа были рассмотрены слу-

чай движения машины с двумя, тремя и четырьмя механизмами шагания в движителе, расположенными, соответственно, со сдвигом по фазе на $1/2$, $1/3$ и $1/4$ оборота ведущего кривошипа. Структура дополнительных энергозатрат робота «Восьминог» с базовыми движителями и лыжеобразными стопами при равномерном вращении ведущего кривошипа при средней скорости передвижения 5 км/ч представлена на рис. 2. Указанная скорость близка к предельной реально реализуемой скорости для рассматри-ваемого мобильного робота.

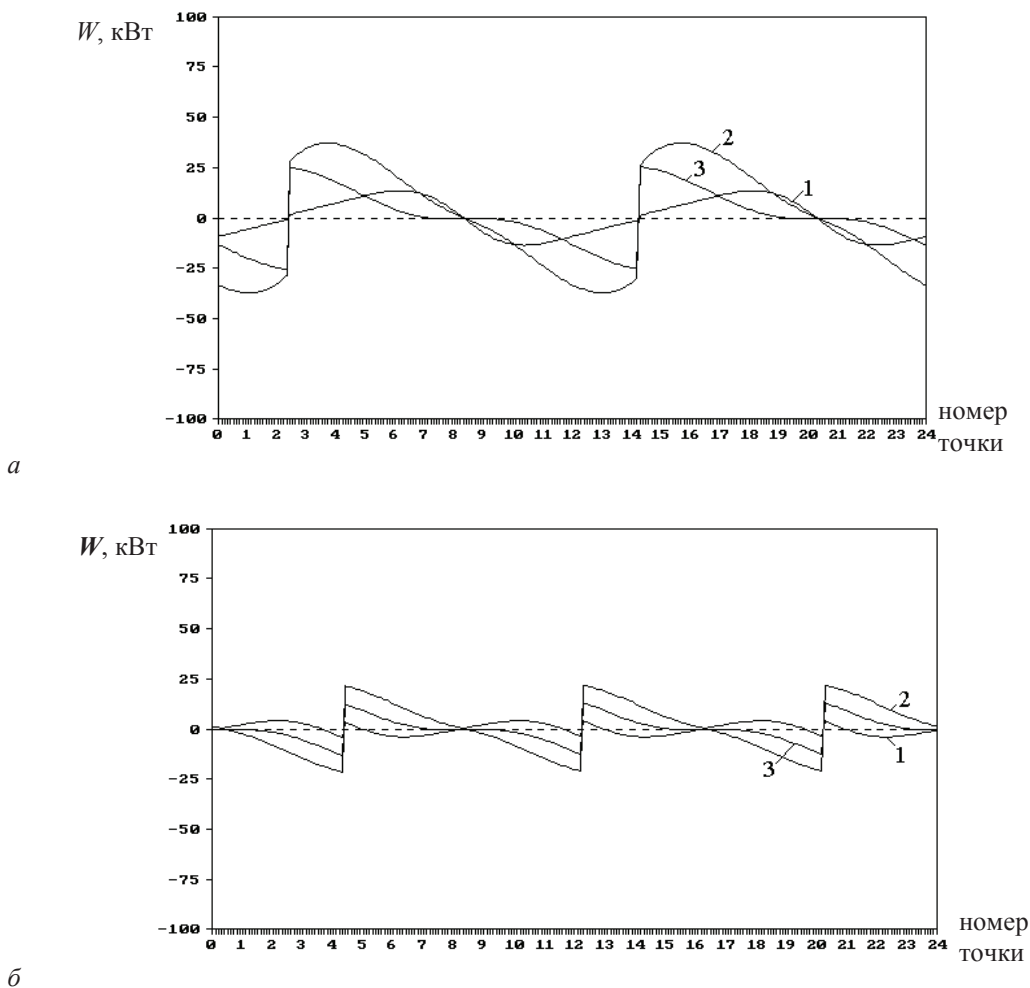


Рис. 2. Структура дополнительных затрат мощности шагающей машины с базовыми движителями (а) и с трехногими движителями (б) при средней курсовой скорости 5 км/ч:

$W_{ос}^{\Phi}$ (кривая 1); W_0^{Φ} (кривая 2); W_0^G (кривая 3)

Основной вклад в дополнительные затраты мощности на движение в случае двухногого движителя при рассматриваемой скорости передвижения вносит мощность W_0^{Φ} , затрачиваемая на преодоление сил инерции корпуса (рис. 2, а). Несколько ей уступает мощность W_0^G , расходуемая на преодоление силы тяже-

сти при вертикальных колебаниях корпуса машины. Затраты на преодоление сил инерции в движителе $W_{ос}^{\Phi}$ в рассматриваемом случае вносят наименьший вклад в суммарную мощность. Положения максимальных значений основных составляющих затрат мощности W_0^{Φ} и W_0^G совпадают. В результате зависимость суммар-

ных затрат мощности носит скачкообразный характер. Такое изменение энергозатрат требует необоснованного увеличения мощности силовой установки. Причем в системе возможна лишь частичная рекуперация энергии – она теряется при ударном взаимодействии стоп с грунтом при их смене и по другим причинам. В шагающей машине «Восьминог», в частности, рекуперации энергии в системе при бортовой скорости $v_{kz} < 0$ не происходит из-за включенной в состав бортового редуктора самотормозящейся передачи, обеспечивающей статическую устойчивость машины при неработающем силовом приводе.

Увеличение числа ног в движителе приводит к снижению неравномерности курсового движения машины и уменьшению колебаний ее корпуса. При трехногом движителе наибольший вклад в дополнительные энергозатраты вносит мощность W_0^{Φ} , идущая на преодоление сил инерции корпуса (рис. 2, б). Мощность W_0^G , расходуемая на преодоление силы тяжести при колебаниях корпуса, существенно ей уступает. Максимальные значения W_0^{Φ} и W_0^G , в сравнении с базовой машиной, уменьшаются практически вдвое. Затраты $W_{0\phi}^{\Phi}$ на силы инерции в движителе наименее значимы. За счет этого суммарные энергозатраты на колебания в системе снижаются почти в 2 раза. Максимальные значения мощностей W_0^{Φ} и W_0^G , как видно из рис. 2, б, совпадают. Максимум $W_{0\phi}^{\Phi}$ смещен по времени и расположен в противофазе по отношению к W_0^{Φ} и W_0^G . В результате имеет место их взаимная частичная компенсация почти в течение всего цикла. Правда, из-за малости $W_{0\phi}^{\Phi}$ она незначительна и временная зависимость мощности, требуемой на движение, продолжает носить нежелательный скачкообразный характер. В случае четырехногих движителей суммарные затраты мощности носят более сглаженный характер.

Таким образом, увеличение числа ног в движителе существенно уменьшает инерционную нагруженность привода шагающей машины. В случае трехногого движителя дополнительная мощность на передвижение снижается почти в 2 раза по сравнению с базовым движителем. Это позволяет повысить скорость движения машины до 5 км/ч и выше. Еще большего положительного эффекта можно добиться, используя движители с четырьмя механизмами шагания. Основным очевидным недостатком увеличения числа ног в движителе – усложнение конструкции движителя, существенное увеличение его массы и громоздкость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Артоболевский, И. И. Особенности и возможности шагающих машин / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Вопросы сельскохозяйственной механики. – М.: Изд-во ВИМ, 1978. – 44 с.
2. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1(1). – С. 6–14.
3. Briskin, E. S. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov et al. // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe – Germany, 2001. – Pp. 1005–1012.
4. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога [и др.] // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 33–38.
5. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.
6. Пат. № 2108708 С1 Российская Федерация, МПК A01G 25/09, B62D 57/02. Самоходная тележка многоопорной дождевальной машины / Е. С. Брискин, А. Е. Русаковский, В. В. Чернышев [и др.] ; Волгоградский государственный технический университет. – № 95109634/13 ; заявл. 07.06.1995 ; опубл. 20.04.1998.
7. Чернышев, В. В. Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твердых тел с упругодиссипативными связями / В. В. Чернышев // Известия ВолгГТУ № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 32–35.