

УДК 629.369

DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-67-70

*С. Д. Оборин, Д. С. Петров, В. В. Чернышев***МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОЗАТРАТ
ПОДВОДНЫХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ТЯЖЕЛОЙ ВЕСОВОЙ КАТЕГОРИИ*****Волгоградский государственный технический университет**

oborin.d.s@mail.ru, dmitry.rogue@yandex.ru, vad.chernyshev@mail.ru

Обсуждаются результаты моделирования динамики шагающих роботов с движителями циклового типа. Исследовалось влияние массы робота на структуру его дополнительных энергозатрат, обусловленных шагающим способом передвижения. Показано, что у тяжелых шагающих роботов наибольшие затраты мощности связаны с вертикальными колебаниями корпуса и неравномерностью передвижения. Предложены технические решения, направленные на их снижение. Результаты исследования могут быть востребованы при разработке тяжелых шагающих робототехнических систем, предназначенных для освоения ресурсов морского дна.

Ключевые слова: мобильные роботы; роботы, передвигающиеся по дну; шагающий движитель; цикловые механизмы шагания; энергозатраты; математическое моделирование.

*S. D. Oborin, D. S. Petrov, V. V. Chernyshev***MODEL ASSESSMENT OF THE ENERGY CONSUMPTION
STRUCTURE OF UNDERWATER WALKING ROBOTIC SYSTEMS
OF THE "HEAVY" WEIGHT CATEGORY****Volgograd State Technical University**

The results of modeling the dynamics of walking robots with cyclic type movers are discussed. The influence of the robot's mass on the structure of its additional energy consumption due to the walking method of movement was studied. It is shown that the "heavy" walking robots have the highest power consumption associated with vertical vibrations of the body and uneven movement. Technical solutions aimed at reducing them are proposed. The results of the study may be in demand in the development of "heavy" walking robotic systems designed for the development of seabed resources.

Keywords: mobile robots, robots moving along the bottom, walking propulsion, cyclic walking mechanisms, energy consumption, mathematical modelling.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к освоению минеральных ресурсов Мирового океана. Особое внимание уделяется добыче твердых полезных ископаемых, таких как железомарганцевые конкреции, кобальт-марганцевые корки и глубоководные полиметаллические сульфиды [1–3]. Подводные месторождения этих минералов, как правило, расположены в районах со сложным рельефом морского дна. Железомарганцевые конкреции образуются на глубоководных абиссальных равнинах. Кобальт-марганцевые корки расположены на вершинах и склонах подводных вулканов (гайотов). Донные отложения полиметаллических сульфидов встречаются в активных гидротермальных источниках вдоль океанических хребтов.

Одним из передовых промышленных методов добычи подводных полезных ископаемых является трубоподъемная система, состоящая

из мобильного добычного робототехнического комплекса, передвигающегося по дну, насосной системы и надводных судов [3; 4]. Добычный робот используется для дробления и сбора донного рудного материала. Полученная руда по гибкой трубе подается в бункер-накопитель, затем мощный всасывающий насос поднимает руду по жесткой трубе на вспомогательное судно. Такие системы на базе гусеничных машин тяжелой весовой категории (их масса составляет десятки и даже сотни тонн) уже используются для экспериментальной добычи полезных ископаемых на шельфе [2–4]. Вместе с тем сложный рельеф дна и низкие несущие свойства водонасыщенных грунтов часто делают гусеничные машины малоэффективными в подводных условиях. Шагающие машины больше подходят для экстремальных условий, благодаря высокой профильной и грунтовой

© Оборин С. Д., Петров Д. С., Чернышев В. В., 2025.

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

проходимости [5; 6]. С другой стороны, шагающий способ передвижения требует дополнительных затрат мощности на преодоление сил инерции в каждом цикле движения. В работе исследуется влияние массы робота на структуру его энергозатрат.

Анализ базируется на результатах теорети-

ческих исследований и подводных испытаний шестиногого аппарата МАК-1 (рис. 1). Робот разработан для изучения особенностей подводной ходьбы [7; 8]. Наличие прототипа с известными кинематическими и инерционными характеристиками движителя существенно облегчило проведение анализа.

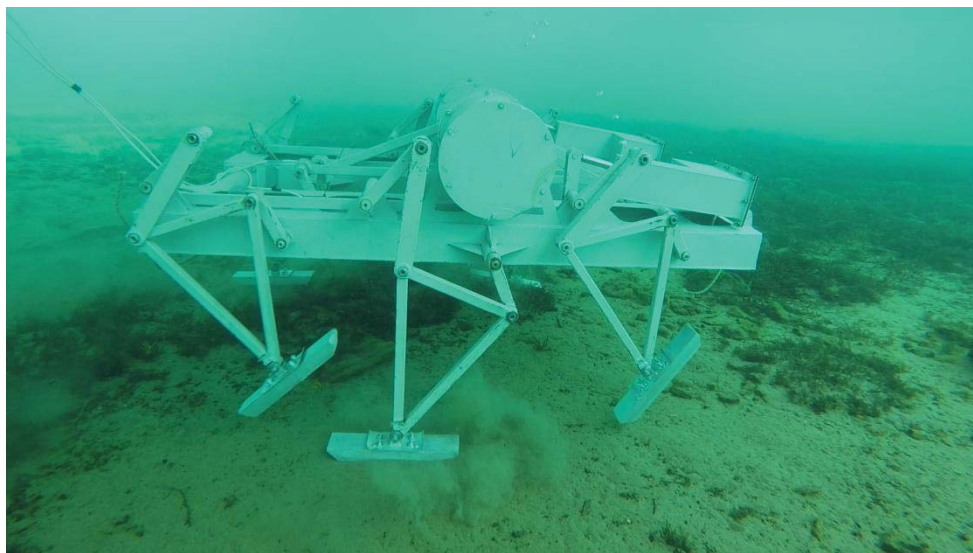


Рис. 1. Подводный шагающий робот МАК-1

Конструктивно шагающий робот МАК-1 содержит две шагающие опоры, соединенные рамой. Механизмы шагания (ноги) расположены вдоль бортов шагающих опор. Механизмы шагания – циклового типа с трансформируемой траекторией опорной точки [9]. На шагающих опорах также установлен бортовой силовой электропривод, размещенный в герметичных прочных корпусах. Электропривод – асинхронный, с частотным регулированием скорости вращения. Привод правого и левого борта независимые, это позволяет осуществлять поворот бортовым способом. Питание и управление осуществляется по кабелю с берега или с судна сопровождения. Масса робота – около 300 кг, габариты – 1,8×1,8×0,9 м. Максимальная скорость под водой составляет 3–5 км/ч, в зависимости от условий движения. В работе реализована система пассивного управления стопой в фазе переноса [9].

Проведено моделирование динамики робота с увеличенными по сравнению с МАК-1 габаритами и массой (до 30 т). Профильная проходимость шагающих машин определяется длиной и высотой шага, а также величиной клиренса. От клиренса также зависит и грунтовая проходимость, ее потеря обычно связана с по-

садкой машины днищем на грунт. Параметры шага и клиренс зависят от размеров ног. В шагающем движителе МАК-1 максимальная длина и высота шага ног составляют 1,2 м и 0,4 м соответственно, а изменяемый клиренс можно варьировать в диапазоне 0,6–0,8 м. В шагающем движителе МАК-1 параметры шага варьируются. Длину и высоту шага можно менять в пределах 0,5–1,2 м и 0,075–0,4 м соответственно. Клиренс можно менять в диапазоне 0,6–0,8 м. Габариты шагающего робота с увеличенной массой до 30 т позволяют увеличить размеры ног до пяти раз по сравнению с МАК-1. В этом случае максимальная длина и высота шага будут соответственно равны 6 м и 2 м, а клиренс будет варьироваться в диапазоне 3–4 м. С такими параметрами шага робот, очевидно, будет отличаться исключительно высокой профильной проходимостью – он сможет перешагивать траншеи шириной до 6 м и преодолевать уступы и выступающие препятствия высотой до 2 м.

При определении энергозатрат шагающий робот рассматривался в виде системы твердых тел – корпуса и механизмов шагания, поборотно объединенных в шагающие движители. Адаптирована к условиям рассматриваемой задачи

обобщенная динамическая модель многоножного робота [10]. Движение шагающих опор задавалось кинематическими уравнениями. Ноги рассматривались как плоские многосвязные механизмы. При составлении дифференциальных уравнений движения звеньев ног их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые накладываются внешние связи. Выражения для скоростей и ускорений узловых точек получались последовательным, от звена к звену, рассмотрением движений твердых тел. Для задания движения корпуса робота добавлялись зависимости для проекций относительных

скоростей опорных точек, являющихся узловыми точками опорного звена, а также выражения для относительных координат опорных точек, необходимые для определения момента смены стоп. При определении сил инерции в движителе находились скорости и ускорения центров масс звеньев механизмов шагания. Учитывалось увеличение масс и моментов инерции звеньев движителя при увеличении его габаритов. Выбор поперечных сечений звеньев ног осуществлялся из условия обеспечения достаточной прочности. Результаты расчета представлены на рис. 2.

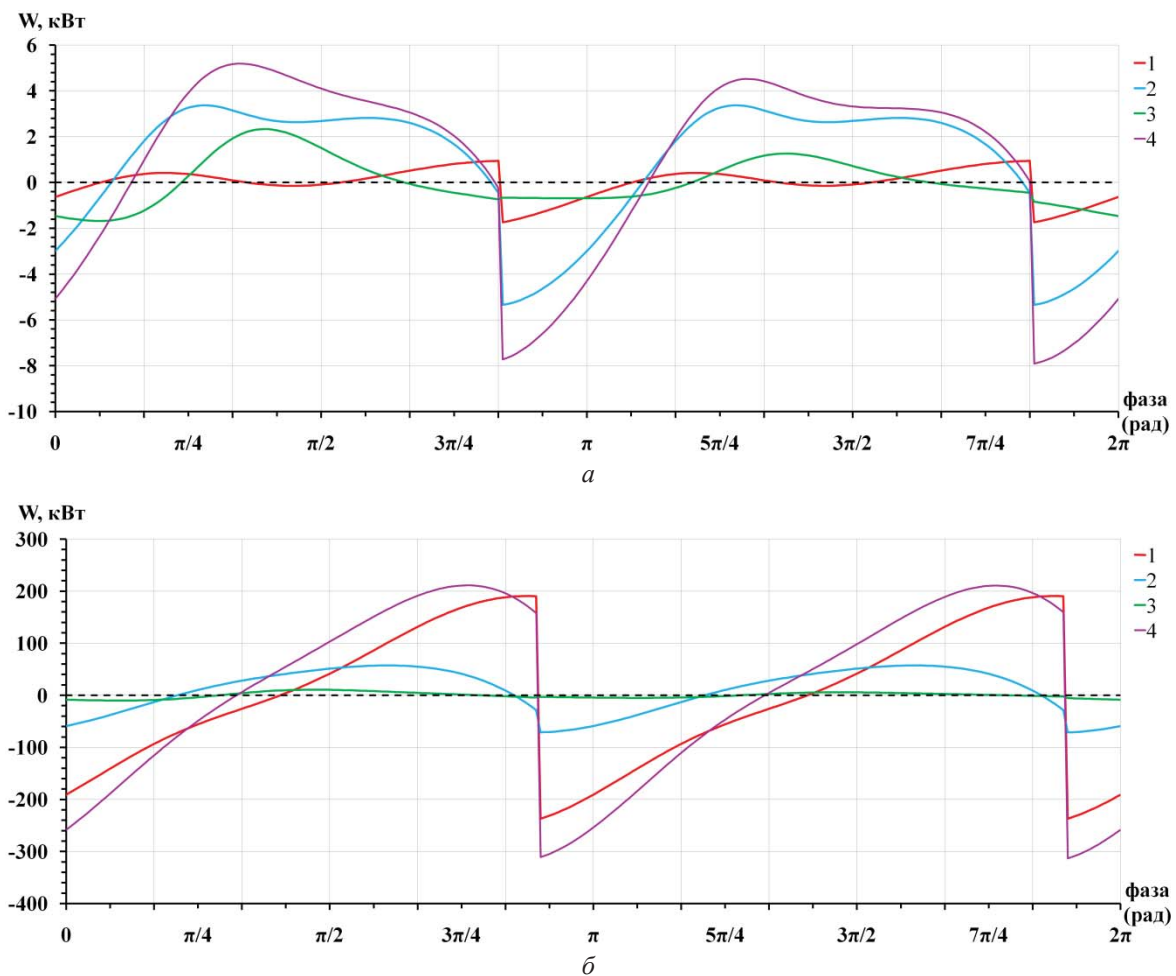


Рис. 2. Структура цикловых затрат мощности шагающего робота МАК-1 массой 300 кг (а) и робота с увеличенными габаритами и массой 30 т (б) при средней курсовой скорости 5 км/ч:
1 – мощность, расходуемая на преодоление сил тяжести; 2 – мощность, расходуемая на преодоление сил инерции корпуса;
3 – мощность, расходуемая на преодоление сил инерции в движителе; 4 – суммарные энергозатраты

У шагающего робота МАК-1 в общей структуре затрат мощности (рис. 2, а) наиболее существенными составляющими являются мощность, расходуемая на преодоление сил инерции корпуса (кривая 2), и мощность, расходуемая на преодоление сил инерции в движителе

(кривая 3). Мощность, расходуемая на преодоление силы тяжести (кривая 1), вносит наименьший вклад в общие энергозатраты (кривая 4). При увеличении массы робота до 30 т ситуация меняется (рис. 2, б). Наиболее существенной составляющей становится мощность,

расходуемая на преодоление силы тяжести при вертикальных колебаниях корпуса (кривая 1). Мощность, расходуемая на преодоление сил инерции корпуса (кривая 2), существенно ей уступает (в 3–4 раза). Мощность, расходуемая на преодоление сил инерции в движителе (кривая 3), практически не влияет на общие энергозатраты (кривая 4). Это обусловлено, главным образом, снижением угловых скоростей в механизмах шагания при увеличении длины шага. Указанная тенденция сохраняется и при еще большем увеличении размеров и массы шагающих роботов (при моделировании масса робота увеличивалась до 300 т).

Проведенный динамический анализ показал, что у тяжелых шагающих роботов наибольшие затраты мощности связаны с вертикальными колебаниями корпуса в каждом цикле (шаге) движения. При этом мощность, расходуемая на преодоление цикловых сил инерции в движителе, незначительна. Вместе с тем указанные энергозатраты взаимосвязаны. У шагающих машин с движителями циклового типа уменьшить вертикальные колебания корпуса можно путем ускорения фазы переноса стоп. Однако ускоренный перенос приводит к существенному росту сил инерции в движителе и, соответственно, к росту энергозатрат их преодоления. Поэтому у легких шагающих аппаратов ускоренный перенос, как правило, не целесообразен. У тяжелых роботов, наоборот, за счет ускоренного переноса ног можно снизить максимальное значение потребляемой мощности, так как роль затрат на преодоление сил инерции в движителе в общей структуре энергозатрат незначительна. Ускорить перенос можно как за счет кинематики механизма шагания, так и путем регулирования скорости вращения их ведущих кривошипов.

Таким образом, проведенный анализ показал, что в подводных условиях крупногабаритные шагающие машины имеют преимущества перед аналогами меньшего размера. Увеличение размеров робота приводит к снижению динамической нагруженности движителя. Также

большие роботы, благодаря увеличению длины и высоты шага, могут обеспечить чрезвычайно высокую профильную проходимость.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке тяжелых шагающих робототехнических систем, предназначенных для новых промышленных технологий освоения подводных месторождений полезных ископаемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, С. И. Минеральные ресурсы глубоководных районов Мирового океана: состояние проблемы изучения и освоения / С. И. Андреев, Г. А. Черкашев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2018. – № 1. – С. 10–15.
2. Щербатюк, А. Ф. Об использовании необитаемых подводных аппаратов при освоении месторождений глубоководных минералов / А. Ф. Щербатюк // Подводные исследования и робототехника. – 2023. – № 2(44). – С. 4–19.
3. Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives / Z. Liu, K. Liu, X. Chen [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. – 2023. – Vol. 33, № 9. – P. 1083–1115.
4. Innovative deep ocean mining concept based on flexible riser and selfpropelled mining machines / R. Handschuh, H. Grebe, J. Panthel, E. Schulte, B. Wenzlawski, W. Schwarz // Proceedings of 4th ISOPE ocean mining symposium, Szczecin, The Int. Society of Offshore and Polar Engineers, 2001. – P. 1–9.
5. Кемурджиан, А. Л. Планетоходы / А. Л. Кемурджиан. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
6. Брискин, Е. С. 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.
7. Чернышев, В. В. МАК-1 – подводный шагающий робот / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 45–50.
8. Research of the walking type of movement in underwater conditions / V. V. Chernyshev, V. E. Pyanichnikov, V. V. Arykantsev, I. P. Vershinina, Ya. V. Kalinin // Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2019 – Marseille, 17–20 June 2019, Marseille, France, IEEE. – 6 p.
9. Чернышев, В. В. Цикловой механизм шагания с трансформируемой траекторией опорной точки / В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15, № 2(34). – С. 71–79.
10. Чернышев, В. В. Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твердых тел с упругодиссипативными связями / В. В. Чернышев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – С. 31–35.