

Раздел V. Подводная робототехника

УДК 627.02:007.52

В.В. Арыканцев, В.В. Чернышев

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ И ПРОХОДИМОСТИ ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА МАК-1*

Обсуждаются результаты испытаний подводного шагающего аппарата МАК-1. Аппарат разработан для оптимизации параметров механизмов шагания и отработки методов управления движением шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну. При проведении испытаний проверялась работоспособность систем шагающего аппарата и исследовалось влияние конструктивных особенностей шагающего движителя на его тягово-сцепные свойства и грунтовую проходимость. Также определенное внимание было уделено отработке методов управления автономным движением подводного аппарата в условиях неполного и неоднозначного представления о текущей ситуации. Испытания проводились на небольших глубинах (до 20 м). При определении тягово-сцепных свойств определялись условия, когда будет иметь место буксование стоп и срыв грунта при курсовом движении шагающего аппарата с варьируемой нагрузкой на крюке. При этом использовался метод, основанный на непосредственной видеосъемке процесса движения ног шагающего аппарата с последующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ. При исследовании предельной грунтовой проходимости находились условия, при которых наблюдалась полная потеря проходимости, обусловленная слабыми несущими свойствами грунта. Для этого осуществлялось движение в наиболее тяжелых, с точки зрения грунтовой проходимости, заиленных участках дна. Испытания показали, что шагающие движители в подводных условиях могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства в сравнении с колесными и гусеничными. Аналог коэффициента сцепления для шагающих машин на слабонесущих грунтах может быть больше 1. В результате, даже на грунтах с низкой несущей способностью можно реализовать по сцеплению силу тяги большую веса (отрицательной плавучести) машины. У колесных и гусеничных машин максимально возможная по сцеплению сила тяги на слабых грунтах, как правило, не превосходит 10–20 % от их веса. Проведенные эксперименты также подтвердили существенное превосходство шагающих машин по грунтовой и профильной проходимости перед традиционными транспортными средствами. Результаты работы могут быть востребованы при разработке инженерных методов расчета и проектирования шагающих движителей подводных робототехнических систем, предназначенных для подводно-технических работ и для новых технологий освоения ресурсов морского дна.

Подводные аппараты; мобильные роботы; машины передвигающиеся по дну; шагающий движитель; взаимодействие с грунтом; тягово-сцепные свойства; проходимость; подводные испытания.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-01144-а, 15-08-10166-к, 15-41-02451 р_поволжье-а.

V.V. Arykantsev, V.V. Chernyshev

SUBSEA INVESTIGATIONS OF TRACTION PROPERTIES AND PASSABILITY OF WALKING UNIT MAK-1

Results of tests of subsea walking unit MAK-1 are discussed. Unit developed for optimization of walking mechanisms settings and adjustment of movement control methods of walking robotic systems, which moves on sea bottom. During tests performance of walking unit have been checked and influence of design features of walking mover on his traction characteristics and ground passability have been investigated. Also, certain attention was given to testing of methods of standalone movement control of subsea unit in conditions of incomplete and ambiguous vision of current situation. Tests was held at small deeps (up to 20 m). In determining of traction characteristics were observed conditions when foot slipping and slice of ground occurred during straight movement of walking unit with variable hook force. During the subsea tests was used the method, based on video recording of legs of the walking unit movement with frame by frame processing of video on PC. In limited ground passability investigation were discovering conditions, when full loss of passability was observed, which connected with low bearing properties of the ground. For this purpose was realized movement on the most severe, from ground passability point of view, silty bottom areas. Tests have shown that walking movers in subsea conditions can provide more high traction properties, in compare with wheeled and tracked. The analogue of the coefficient of friction for walking machines on low-bearing ground can be more than 1. In result, even on low bearing ground, can be realized traction force on friction, which exceeds weight (of negative buoyancy) of the machine. Best possible traction force on low bearing ground for wheeled and tracked machines usually does not exceed 10–20 % of their weight. Held experiments also confirmed significant advantage of ground and shape passability comparing with traditional vehicles. Results of the work can be demand in development of engineering calculating methods and design of subsea robotic systems walking movers, designed for underwater operations and for new technologies development of seabed resources.

Underwater units; mobile robots; bottom-moved machines; walking mover; interaction with ground; traction characteristics; passableness; subsea tests.

Введение. В условиях возрастающего дефицита минерального сырья наблюдается повышенный интерес к разработке подводных месторождений полезных ископаемых [1]. Важная роль среди машин для освоения морского дна отводится самоходным донным агрегатам, несущим на себе рабочие органы в виде рыхлителей, ковшей, подборщиков, отвалов, грунтовых насосов и т.п. Практика подводно-технических работ также ставит целый ряд задач связанных с проведением грунтовых работ. Все эти работы требуют значительных тяговых усилий. В качестве средств передвижения по дну уже используются гусеничные машины [2, 3]. Однако условия морского дна, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и сложным рельефом, зачастую делают непригодными традиционные типы движителей. Гусеничные машины в подводных условиях могут эффективно работать только на достаточно ровных и плотных грунтах с небольшими уклонами местности [4–6]. Причем и в этих условиях возможности гусеничных машин по грунтовой проходимости и маневрированию сильно ограничены. Опыт подводно-технических работ показывает, что на слабых грунтах возможна посадка машины днищем на грунт с потерей сцепного веса, а при поворотах в гусеничный движитель под опорные катки попадают камни или грунт и его либо заклинивает, либо слетает гусеница. Более подходящим для машин передвигающихся по дну, для которых скорость передвижения не является главной целью, представляется шагающий движитель. Шагающие машины, в сравнении с колесными и гусеничными, обладают более высокими возможностями по грунтовой и профильной прохо-

димости [7–10]. Также имеет место снижение затрат тягового усилия на сопротивление движению – для шагающих движителей, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [11].

В работе обсуждаются некоторые результаты испытаний подводного шагающего аппарата МАК-1 (рис. 1). Аппарат разработан в Волгоградском государственном техническом университете (совместно с ОАО «ЦКБ «Титан»») для оптимизации (на стадии проектирования) параметров механизмов шагания и отработки методов управления движением шагающих робототехнических систем передвигающихся по дну. При проведении подводных испытаний проверялась работоспособность основных систем шагающего аппарата и исследовалось влияние конструктивных особенностей шагающего движителя на его тягово-сцепные свойства и проходимость.



Рис. 1. Подводный шагающий аппарат МАК-1

Конструктивные особенности шагающего аппарата МАК-1. Конструктивно шагающий аппарат включает в себя шагающие опоры (шагающие модули) правого и левого борта, жестко соединенные между собой посредством трубчатой рамы (рис. 2). Рама аппарата сменная, ее конструкция может меняться в зависимости от требуемого навесного оборудования. Шагающие опоры выполнены в виде несущих балок, на которых установлены шагающие движители и бортовой силовой электропривод. Бортовые электропривода, на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием скорости вращения, выполнены в виде отдельных силовых блоков (силовых модулей), расположенных в водозащищенных боксах. Суммарная мощность бортовых приводов – около 2 кВт. Максимальная скорость аппарата, в зависимости от условий движения, составляет 3–5 км/ч. Длина шага 0,8–1,2 м. Питание привода осуществляется по кабелю от внешнего автономного источника электропитания (от малогабаритного бензогенератора) или от бытовой электросети. Управление также осуществляется по кабелю. Для этого аппарат снабжен видеосенсорами. Поворот осуществляется за счет разности курсовых скоростей шагающих опор правого и левого борта либо за счет разной длины шага движителей правого и левого борта. Масса аппарата около 170 кг.

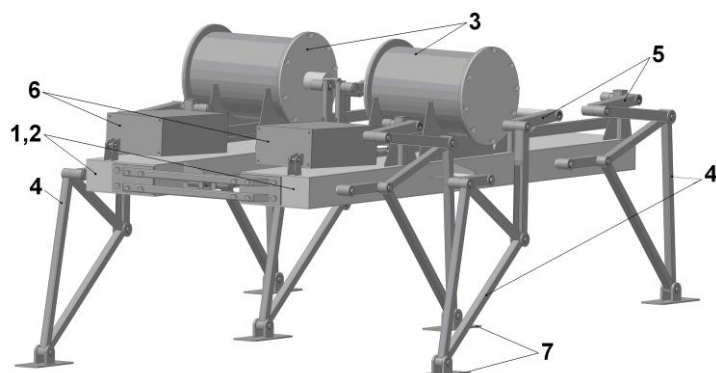


Рис. 2. Конструктивная схема шагающего аппарата МАК-1: 1 – шагающие опоры; 2 – несущие балки; 3 – бортовой электропривод в водозащищенных боксах; 4 – механизмы шагания; 5, 6 – механизм смещения точек подвеса механизмов шагания и его линейный электропривод соответственно; 7 – стопы

Шагающие движители состоят из 3-х механизмов шагания. Механизмы шагания – цикловые, на базе 4-звенных плоских механизмов, с шарнирно прикрепленными сменными стопами (рис. 3). Входящие в состав движителя механизмы шагания кинематически взаимосвязаны и работают в противофазе (2 механизма шагания работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы один из механизмов шагания находится в контакте с грунтом. Коэффициент режима такого движителя равен 1.

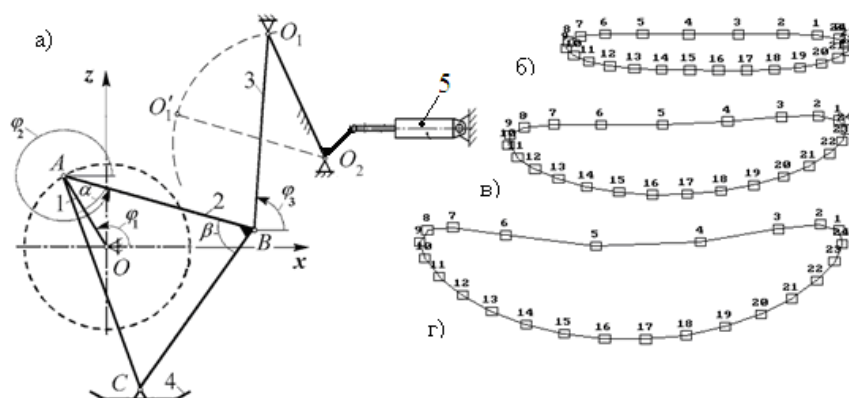


Рис. 3. Схема механизма шагания аппарата МАК-1 (а) и трансформация траектории его опорной точки при смещении точки подвеса коромысла (б, в, г): 1 – ведущий кривошип; 2 – опорное звено; 3 – коромысло; 4 – стопа; 5 – линейный электропривод; O_1O_2 – управляемое поворотное звено смещения точки подвеса коромысла

Цикловые движители позволяют не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключают необходимость управляемой системы адаптации. В результате машины имеют минимальное число управляемых степеней свободы и становятся проще и дешевле аналогов с адаптивным управлением [12–14]. Вместе с тем моделирование типовых случаев движения показывает, что для полной реализации возможностей циклового шагающего движителя по профильной прохо-

димости и маневренности необходима возможность корректировки программных движений ног. Например, увеличение высоты или длины шага при прохождении локального препятствия, комбинирование ног при повороте для снижения момента сопротивления повороту и др. Возможность корректировки движений ног была достигнута в аппарате путем введения в механизм шагания управляемого поворотного звена – дополнительного кривошипа с линейным электроприводом (рис. 3,а) [15, 16]. Управление при движении сводится к дискретному изменению углового положения кривошипа (аналогично переключению передач в традиционных транспортных средствах). Это приводит к смещению точки подвеса коромысла и трансформированию базовой траектории маршевого движения (рис. 3,б) в траекторию режима преодоления препятствий с увеличенной высотой и длиной шага (рис. 3,в,г). Механизм шагания при этом остается одностепенным. Тем самым достигается управление (в довольно широких пределах) относительной траекторией опорных точек. Точки на траекториях (рис. 3) расположены через равные промежутки времени – через $\frac{1}{24}$ периода цикла. Нижние ветви траекторий (точки 11–22) соответствуют опорной фазе. У траектории опорной точки маршевого режима движения (рис. 3,б) опорная ветвь практически не отличается от прямой и движение аппарата в этом режиме происходит с минимальными вертикальными колебаниями корпуса. В режимах специального маневрирования (рис. 3,в,г), в отличие от маршевого, имеют место вертикальные колебания корпуса в каждом цикле движения, что требует дополнительных энергозатрат. Поэтому эти режимы целесообразно использовать лишь при минимальных скоростях передвижения.

Методика испытаний. Подводные испытания проводились на небольших глубинах (до 20 м) в Кандалакшском заливе Белого моря. Выбирались участки с различными типами донного грунта (песок, илистый грунт, валуны и др.). При испытаниях использовались несколько типов стоп. Исследовались типовые режимы движения с учетом динамики всей шагающей машины, совершающей в общем случае сложные пространственные колебания, вызванные самим шагающим способом передвижения [17, 18].

При определении тягово-сцепных свойств использовался адаптированный к подводным условиям метод, основанный на видеосъемке процесса движения шагающего аппарата при постепенно увеличивающейся крюковой нагрузке с последующей покадровой обработкой видеозаписи на ЭВМ [19]. При проведении экспериментов видеокамеры располагались перпендикулярно движению шагающего аппарата таким образом, что в поле их видимости попадали корпус робота, механизмы шагания одного борта и стопы находящиеся в опорной фазе. Это позволяло в течение 2–3-х шагов фиксировать перемещение корпуса, а также положение звеньев 2-х соседних механизмов шагания. Покадровая обработка видеозаписи осуществлялась с помощью программы «Microsoft Paint» и заключалась в определении положения, относительно естественного ориентира попавшего в кадр, например камня, меток расположенных на ногах и корпусе аппарата (рис. 4). В качестве меток, как правило, использовались узловые точки механизмов шагания. Измерения производились в условных единицах (в пикселях монитора ЭВМ) посредством указателя координат курсора. Перемещение корпуса фиксировалось по положению меток на несущих балках шагающих опор. По положению звеньев механизма шагания определялся угол поворота ведущих кривошипов φ_1 (рис. 3,а). Он определялся либо непосредственно по положению кривошипов, либо по углу φ_3 коромысла механизма шагания, если кривошипы не попадали в кадр. Угол φ_1 позволял определить положение опорных точек механизмов шагания даже в случае их заглубления в грунт.

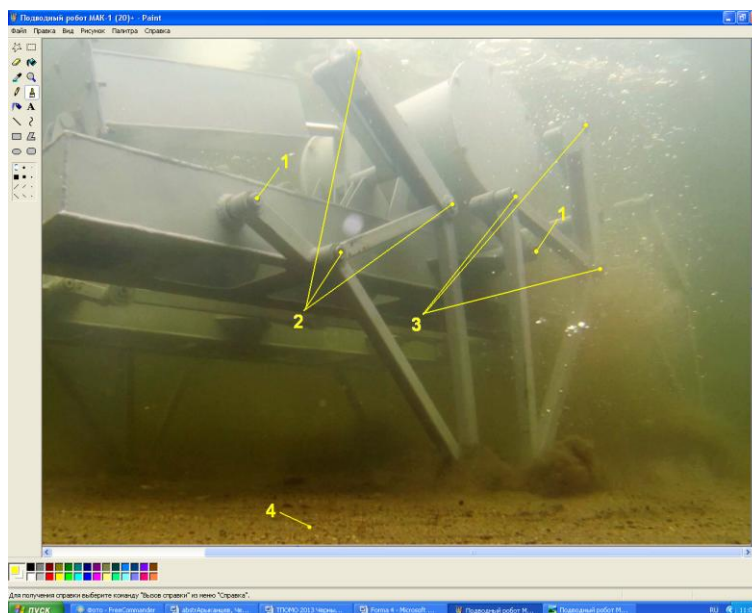


Рис. 4. Покадровая обработка на ЭВМ видеозаписи процесса движения:
1 – метки корпуса; 2, 3 – метки ног; 4 – естественный ориентир

По перемещениям несущих балок и опорных точек ног определить законы движения корпуса и стоп в курсовом и вертикальном направлении. Необходимость определения закона движения корпуса обусловлена неравномерностью курсового движения шагающей машины, вызванной самим шагающим способом передвижения [17, 18]. Численно дифференцируя полученные зависимости, находились курсовые и вертикальные составляющие скорости корпуса машины и стоп. По их значениям вычислялся коэффициент буксования: $\delta = (v_T - v)/v_T$, где v и v_T – реальная и теоретическая (без буксования стоп) курсовая скорость машины. Полученные характеристики привязывались к показаниям динамометра и углу поворота кривошипов. Это позволяло построить зависимости силы сцепления $F_{\text{сцепл.}}$ и коэффициента сцепления k_ϕ от коэффициента сцепления и фазы шага (угла ϕ_1), а также определить максимальные значения коэффициента δ для исследуемого грунта.

При исследовании предельной грунтовой проходимости находились условия, при которых наступала потеря проходимости, обусловленная слабыми несущими свойствами грунта. Для этого осуществлялось движение на наиболее тяжелых, с точки зрения грунтовой проходимости, заиленных участках дна.

При исследовании профильной проходимости преодолевались локальные препятствия различных типов. Препятствия преодолевались как в маршевом режиме, так и в режиме специального маневрирования. В последнем случае параметры шага менялись оператором за счет смещения точки подвеса коромысла механизма шагания. Под водой видеосенсоры аппарата, как правило, не позволяли достоверно определять тип и размеры препятствия. Поэтому определенное внимание было уделено отработке методов управления движением в условиях неполного представления о текущей ситуации.

Результаты испытаний. Испытания показали, что на сравнительно плотных грунтах тягово-сцепные свойства шагающих машин хотя и превосходят тягово-сцепные свойства колесных машин, но мало отличаются от аналогичных свойств

гусеничного движителя. Существенное превосходство шагающих машин по тяговым свойствам и проходимости проявлялось лишь при движении в особо сложных условиях, в частности, в условиях слабонесущего подводного грунта. Здесь аналог коэффициента сцепления у шагающих машин изменялся, в зависимости от свойств грунта, от 0,2 до значений соизмеримых с грунтами с хорошими сцепными свойствами ($k_\phi = 0,8-1,0$), а в ряде случаев значения k_ϕ были существенно больше 1. Наилучшее сцепление, как и предполагалось, имело место при значительном заглублении ноги в грунт.

В процессе экспериментов использовалось несколько типоразмеров стоп (лыжеобразные, короткие лыжи, скругленные в вертикальной плоскости и др.), которые позволяли при экспериментах варьировать среднее давление на грунт в пределах 0,01–0,05 МПа. При движении без стоп (конструкция опорных точек механизмов шагания адаптирована к взаимодействию с грунтом) давление на грунт составляло около 0,5 МПа. Предполагалось, что увеличение давления на грунт будет способствовать росту тягово-сцепных свойств, за счет большей глубины следовой дорожки, а при снижении давления на грунт будет повышаться грунтовой проходимости. Испытания показали, что и при незначительном давлении на слабонесущий грунт, например при использовании лыжеобразной стопы, имеет место достаточно большое заглубление стопы в грунт. При больших значениях крюковой нагрузки стопа, при входе в опорную фазу, скользила и заглублялась в грунт. С другой стороны, рост давления на грунт, в исследованном диапазоне, не приводил к потере проходимости даже в самых тяжелых условиях движения – большой условный клиренс аппарата не позволял ему сесть днищем на грунт. Однако было замечено, что при использовании стоп с неразвитой опорной поверхностью несколько увеличивалась потребляемая при движении мощность (на 10–30 %). Уровень энергозатрат оценивался по току питающего бензогенератора.

В сравнении с колесными и гусеничными движителями шагающие движители в подводных условиях могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства. Для колесных и гусеничных транспортных средств максимальная сила тяги равна $F_{тяги} = F_{сцепл.} - F_{сопр.}$, где силы сцепления $F_{сцепл.} = k_\phi N$ и сопротивления движению $F_{сопр.} = k_f N$ пропорциональны нормальной реакции грунта N . Для слабонесущих грунтов соотношение коэффициентов сцепления k_ϕ и сопротивления движению k_f таково, что даже гусеничный движитель на таких грунтах не позволяет реализовать значительных тяговых усилий. На слабых грунтах у гусеничных машин коэффициент сцепления лежит, как правило, в пределах $k_\phi = 0,2-0,3$, а коэффициент $k_f = 0,1-0,2$ [20, 21]. В подводных условиях сила тяги уменьшается на силу сопротивления воды R_w . Так как колесные и гусеничные машины имеют плохо обтекаемые корпуса, то сила сопротивления воды соизмерима с $F_{сопр.}$ даже при небольших скоростях движения. Придонное течение может привести к возрастанию силы R_w во много раз. Также нужен определенный запас тяги для преодоления уклонов. Таким образом, традиционные транспортные средства могут двигаться под водой лишь на пределе сцепления и их максимально возможная по сцеплению сила тяги на слабых грунтах, как правило, не превосходит 10–20 % от их сцепного веса (отрицательной плавучести). Для шагающих движителей грунт не является препятствием для движения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование. Поэтому полезная сила тяги (без учета сопротивления воды) равна силе сцепления $F_{тяги} = F_{сцепл.}$. Аналог коэффициента сцепления для шагающих машин на подводных слабонесущих грунтах, как показали испытания, может быть больше 1. Поэтому максимально возможная по сцеплению сила тяги подводных шагающих аппаратов может превосходить их сцепной вес.

Заключение. Подводные испытания показали, что шагающие движители на слабонесущих грунтах могут обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства в сравнении с колесными и гусеничными машинами. Проведенные эксперименты также подтвердили существенное превосходство шагающих машин по грунтовой и профильной проходимости перед традиционными транспортными средствами. По этой причине шагающие роботы могут быть востребованы при проведении подводно-технических работ и внедрении новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Андреев С.И., Казакова В.Е., Бабаева С.Ф., Черкашён Г.А.* Твердые полезные ископаемые мирового океана: история открытий, геологическое изучение, перспективы освоения // Горный журнал. – 2013. – № 11. – С. 65-72.
2. *Verichev S., Jonge L., Wiebe B., Rodney N.* Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. – St. Petersburg, 2014. – P. 126-138.
3. <http://www.nautilusminerals.com>.
4. *Hong S., Kim H.W., Choi J.S.* Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. – 2002. – P. 100-107.
5. *Kim H.W., Hong S., Choi J.S.* Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 2003. – P. 132-138.
6. *Chernyshev V.V., Gavrilov A.E.* Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. / VNIIOkeangeologia. – St. Petersburg, 2014. – P. 21-24.
7. *Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V and others.* On ground and profile practicability of multi-legged walking machines // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. – P. 1005-1012.
8. *Чернышев В.В.* Полевые исследования шагающих машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – № 4. – С. 20-22.
9. *Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V.* The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, August 9-12, 2009): conf. proceedings. – China, 2009. – P. 3631-3636.
10. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г.* Сравнительный анализ колёсных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1. – С. 6-14.
11. Планетоходы / под ред. Кемурджиана А.Л. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
12. *Чернышев В.В.* Опыт использования шагающей машины для ликвидации аварийного разлива нефти // Безопасность жизнедеятельности. – 2003. – № 5. – С. 28-30.
13. *Silva M.F., Machado J.A.T.* A literature review on the optimization of legged robots // Journal of Vibration and Control. – 2012. – No. 18. – P. 1753-1767.
14. *Briskin E.S., Kalinin J.V., Maloletov A.V., Chernyshev V.V.* On the energy efficiency of cyclic mechanisms // Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 49, No. 1. – P. 11-17.
15. Пат. 2207583 РФ, МПК 7 В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Савин А.Ю.; ВолГТУ. 2003.
16. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
17. *Чернышев В.В.* Моделирование динамики шагающей машины с цикловыми движителями как системы твёрдых тел с упругодиссипативными связями // Известия ВолГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". – 2010. – № 11. – С. 32-35.

18. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Zhoga V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations // The 3rd Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan (Korea), 2014. – 9 p. (pdf). Режим доступа: <http://imsd-acmd2014.ksme.or.kr/>.
19. Брискин Е.С., Чернышев В.В., Фролова Н.Е. О позиционной зависимости тягово-цепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 6. – С. 21-25.
20. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: Теория. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
21. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.

REFERENCES

1. Andreev S.I., Kazakova V.E., Babaeva S.F., Cherkashev G.A. Tverdye poleznye iskopaemye mirovogo okeana: istoriya otkrytiy, geologicheskoe izuchenie, perspektivy osvoiniya [Solid minerals in the world ocean: history of discoveries, geological research, prospects of development], *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2013, No. 11, pp. 65-72.
2. Verichev S., Jonge L., Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. VNIIOkeangeologia*. St. Petersburg, 2014, pp. 126-138.
3. <http://www.nautilusminerals.com>.
4. Hong S., Kim H.W., Choi J.S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil, *The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, 2002, pp. 100-107.
5. Kim H.W., Hong S., Choi J.S. Comparative Study on Tracked Vehicle Dynamics on Soft Soil: Single-Body Dynamics vs. Multi-body Dynamics, ISOPE, OMS-2003, Tsukuba, Japan, 2003, pp. 132-138.
6. Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of Int. Conf. VNIIOkeangeologia*, St. Petersburg, 2014, pp. 21-24.
7. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. and others. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, *Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001*, pp. 1005-1012.
8. Chernyshev V.V. Polevye issledovaniya shagayushchikh mashin [Field studies of walking machines], *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2004, No. 4, pp. 20-22.
9. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking, *The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, August 9-12, 2009): conf. proceedings*. China, 2009, pp. 3631-3636.
10. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Sravnitel'nyy analiz kolesnykh, gusenichnykh i shagayushchikh mashin [Comparative analysis of wheeled, tracked and walking machines], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2013, No. 1, pp. 6-14.
11. Planetokhody [Rovers], Ed. by Kemurdzhiana A.L. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 319 p.
12. Chernyshev V.V. Opyt ispol'zovaniya shagayushchey mashiny dlya likvidatsii avariynogo razliva nefi [Experience in the use of walking machine for emergency oil spill], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bezopasnost'Zhiznedeatel'nosti], 2003, No. 5, pp. 28-30.
13. Silva M.F., Machado J.A.T. A literature review on the optimization of legged robots, *Journal of Vibration and Control*, 2012, No. 18, pp. 1753-1767.
14. Briskin E.S., Kalinin J.V., Maloletov A.V., Chernyshev V.V. On the energy efficiency of cyclic mechanisms, *Mechanics of Solids*, 2014, Vol. 49, No. 1, pp. 11-17.
15. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Savin A.Yu. Shagayushchaya opora dlya transportnykh sredstv povyshennoy prokhodimosti [Walking bearing for vehicles terrain]. Patent RF No. 2207583, 2003.

16. Chernyshev V.V. Arykantsev V.V. МАК-1 – podvodnyy shagayushchiy robot [МАС-1 – underwater walking robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2015, No. 2, pp. 45-50.
17. Chernyshev V.V. Modelirovanie dinamiki shagayushchey mashiny s tsiklovymi dvizhitelyami kak sistemy tverdykh tel s uprugodissipativnymi svyazyami [Modeling the dynamics of a walking machine with cyclic walking propellers as a system of rigid bodies with links provocatively], *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh"* [Izvestiya of the Volgograd state technical University. Series: Actual problems of control, computer science and Informatics in technical systems], 2010, No. 11, pp. 32-35.
18. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Zhoga V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations, *The 3rd Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan (Korea), 2014*, 9 p. (pdf). Available at: <http://imsd-acmd2014.ksme.or.kr/>.
19. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Frolova N.E. О pozitsionnoy zavisimosti tyagovo-stsepnnykh svoystv shagayushchikh mashin s tsiklovymi dvizhitelyami [About positional dependence of traction properties of walking machines with cyclic walking propellers], *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2009, No. 6, pp. 21-25.
20. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. *i dr.* Traktory: Teoriya [Tractors: Theory]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 376 p.
21. Zabavnikov N.A. *Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin* [Fundamentals of the theory of tracked vehicle]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 448 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Пындак.

Чернышев Вадим Викторович – Волгоградский государственный технический университет; e-mail: dtm@vstu.ru; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28; д.т.н.

Арыканцев Владимир Владимирович – аспирант.

Chernyshev Vadim Viktorovich – Volgograd State Technical University; e-mail: dtm@vstu.ru; 28, Lenin ave., Volgograd, 400005, Russia; dr. of eng. sc.

Arykantsev Vladimir Vladimirovich – postgraduate student.

УДК 629.58:629.5.05

Л.А. Мартынова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНПА*

Целью работы явилось создание системы, представляющей собой программно-аппаратный комплекс (ПАК), предназначенной для решения следующих задач: разработки программного обеспечения СУ АНПА; отработки взаимодействия составных частей СУ АНПА (агентов); моделирования функционирования СУ АНПА; оценки эффективности функционирования СУ АНПА на каждой стадии выполнения миссии. Разработанный ПАК является рабочим местом для формирования и отработки алгоритмов системы управления АНПА, построенной на основе мультиагентного подхода. Согласно мультиагентному подходу СУ АНПА представляет собой совокупность интеллектуальных агентов, объединенных в целевые группы, связанные с подсистемами СУ АНПА: социальной, совещательной, восприятия, поведения, приводов и вспомогательной. Управление АНПА осуществляется путем взаимодействия агентов как внутри групп, так и между группами. Основными агентами, обеспечивающими функционирование АНПА, являются: в социальной подсистеме

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-02928-а).