

**В.В. Чернышев, И.П. Вершинина, В.В. Арыканцев**  
**УСТОЙЧИВОСТЬ ШАГАЮЩИХ МАШИН И РОБОТОВ**  
**В ПОДВОДНЫХ УСЛОВИЯХ\***

*При проведении подводно-технических работ шагающие машины и роботы, передвигающиеся по дну существенно превосходят по тяговым свойствам и проходимости традиционные транспортные средства. Условия эксплуатации подводных шагающих робототехнических систем – сложный рельеф морского дна, уклоны, слабонесущий грунт и др., обуславливают актуальность проблемы их устойчивости. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение динамической устойчивости шагающих машин и роботов в подводных условиях. Новизна исследования обусловлена учетом специфических особенностей их условий эксплуатации. Исследования базируются на результатах испытаний опытного образца 6-ти ногого подводного шагающего аппарата МАК-1. Неустойчивость шагающего аппарата может быть обусловлена особенностью походки. Также потеря устойчивости шагающего аппарата может наступить при встрече с нераспознанным препятствием и при преодолении уклонов. Проведено математическое моделирование динамики статически неустойчивых походок. Проанализированы основные этапы фазы движения аппарата в неустойчивом положении. Показано, что в подводных условиях динамически устойчивая ходьба 6-ти ногого шагающего аппарата с цикловыми движителями возможна и в случае независимого привода ног правого и левого борта. Рассмотрены методы автономного реагирования на встречу с нераспознанным препятствием. Проанализированы различные типовые ситуации, возникающие при движении по неорганизованной поверхности. Предложены методы самоадаптации и самоуправления ног на базе нечетких алгоритмов, исключающие возникновение аварийных ситуаций, включая опрокидывание. Рассмотрены особенности преодоления уклонов шагающими аппаратами в подводных условиях. При движении традиционных транспортных средств возможно их опрокидывание или сползание под уклон. Показано, что на слабых грунтах сползание шагающих машин под уклон маловероятно. Это обусловлено значительными деформациями грунта под опорными элементами (стопами) шагающих машин. Рассмотрен способ повышения устойчивости к опрокидыванию при движении шагающего аппарата вдоль уклона за счет раздельного регулирования условного клиренса механизмов шагания. Определенное внимание уделено устойчивости буровых шагающих платформ, передвигающихся по дну. Их специфика – высокое расположение центра масс. Рассмотрены возможные этапы опрокидывания шагающих платформ. Показан стабилизирующий эффект завышенного расположения центра плавучести. Результаты работы могут быть востребованы при разработке шагающих машин и роботов, предназначенных для подводно-технических работ, для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна, для обеспечения антитеррористической и техногенной безопасности объектов подводной инфраструктуры и др. работ.*

*Подводные роботы; машины передвигающиеся по дну; шагающий движитель; динамическая устойчивость; взаимодействие с грунтом; динамика управляемого движения; подводные испытания.*

**V.V. Chernyshev, I.P. Vershinina, V.V. Arykantsev**  
**STABILITY OF WALKING MACHINES AND ROBOTS**  
**IN UNDERWATER CONDITIONS**

*When carrying out underwater technical works, walking machines and robots moving along the bottom significantly surpass traditional vehicles in terms of traction and cross-country ability. The exploitation conditions of underwater walking robotic systems - a rough terrain of the seabed, slopes, weakly bearing soil, etc., determine the urgency of the problem of their stability. The paper*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской обл. в рамках научных проектов № 19-08-01180, № 19-48-340007.

*discusses the results of theoretical and experimental studies aimed at ensuring the dynamic stability of walking machines and robots in underwater conditions. The novelty of the study is provided by the specific features of their operating conditions. The studies are based on the test results of the 6-legged underwater walking device MAK-1. The instability of the walking device may be caused by the gait features. Also, the loss of stability of the walking device can occur when meeting with an unrecognized obstacle and when overcoming slopes. Mathematical modeling of the dynamics of statically unstable gait is carried out. The main stages of the phase of movement of the device in an unstable position are analyzed. It is shown that underwater conditions, dynamically stable walking of a 6-legged walking device with cyclic movers is also possible in the case of independent legs drives of the right and left side. The methods of autonomous response to a meeting with an unrecognized obstacle are considered. Various typical situations that arise when moving along an unorganized surface are analyzed. The methods of self-adaptation and self-management of legs based on fuzzy algorithms, that exclude the occurrence of emergency situations, including rollover, are proposed. The features of overcoming slopes by walking vehicles in underwater conditions are considered. In traditional vehicles movement, rollover or slide downhill is possible. It is shown that on weak soils downhill slide of walking machine is unlikely. This is due to significant deformations of the soil under the supporting elements (feet) of walking machines. A method of increasing the resistance to tipping over when moving a walking device along a slope due to the separate tuning of the conditional clearance of the walking mechanisms is considered. Particular attention is paid to the stability of drilling walking platforms moving along the bottom. Their specificity is the high location of the center of mass. Possible stages of walking platforms rollover are considered. The stabilizing effect of an increased location of the center of floatation is shown. The results of the work can be demanded in the development of walking machines and robots designed for underwater technical works, for new industrial technologies for the development of the seabed resources, to ensure the antiterrorist and technological safety of underwater infrastructure objects and other works.*

*Underwater robots; seabed moving machines; walking mover; dynamic stability; interaction with soil; controlled movement dynamics; underwater tests.*

**Введение.** При проведении подводно-технических работ находят применение необитаемые робототехнические системы передвигающихся по дну [1–6]. Существующие машины и роботы, передвигающиеся по дну (подводные бульдозеры, самоходные донные добычные агрегаты, глубоководные экскаваторы, кабелеукладчики и др.) имеют, как правило, гусеничный или колесный движитель. Однако низкая несущая способность подводных грунтов, уклоны и сложный рельеф морского дна существенно ограничивают возможности традиционных движителей в подводных условиях [7–8]. Шагающие движители более подходят для подводных работ, так как они обладают более высокими тяговыми свойствами и лучшей грунтовой и профильной проходимостью [9–11]. Условия эксплуатации подводных шагающих робототехнических систем обуславливают актуальность проблемы их устойчивости к опрокидыванию. Вопросы, связанные с обеспечением статической и динамической устойчивости шагающих аппаратов уже рассматривались неоднократно [12–14]. В работе обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обеспечение статической и динамической устойчивости донных шагающих машин и роботов. Новизна исследования обусловлена учетом специфических особенностей подводных условий.

**Материалы и методы.** Исследования базируются на результатах подводных испытаний опытного образца 6-ти ногого шагающего аппарата (модульно-аппаратного комплекса) МАК-1 (рис. 1). Аппарат специально разработан на факультете автоматизированных систем, транспорта и вооружений Волгоградского государственного технического университета для исследования шагающего способа передвижения в подводных условиях [9–13, 15].



Рис. 1. Подводный шагающий робот МАК-1 (ВолгГТУ, Россия)

Конструктивно аппарат МАК–1 (рис. 2) включает в себя 2 шагающих модуля соединенных сменной рамой. Шагающие модули выполнены в виде несущих балок, на которых установлены механизмы шагания и бортовой силовой привод. Бортовой привод – электрический, на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием скорости вращения. Электропитание и управление аппарата осуществляется по кабелю. Питание привода осуществляется по кабелю с берега или судна. Управление также осуществляется по кабелю по видеоинформации, поступающей с бортовых цветных видеокамер с инфракрасной подсветкой. Поворот аппарата осуществляется либо за счет разных скоростей бортов либо за счет разной длины шага движителей правого и левого борта.

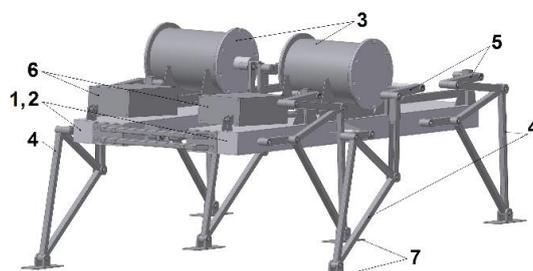


Рис. 2. Конструктивная схема шагающего робота МАК-1: 1 – шагающие модули; 2 – несущие балки; 3 – электропривод в водозащищенных боксах; 4 – механизмы шагания; 5, 6 – механизм корректировки параметров шага и его линейный электропривод, соответственно; 7 – стопы

Двигатель каждого борта аппарата состоит из 3-х механизмов шагания. Схема механизма шагания приведена на рис. 3,а. Механизмы шагания – цикловые, на базе 4-х звенных плоских механизмов, с шарнирно прикрепленными сменными стопами. Входящие в состав двигателя механизмы шагания кинематически взаимосвязаны и работают в противофазе (первый и последний механизм работают синфазно, а средний в противофазе). В результате в каждый момент времени хотя бы одна из ног шагающего движителя находится в опорной фазе.

В аппарате реализована система пассивной адаптации стопы к опорной поверхности – разработана методика синтеза траектории опорной точки механизма шагания, обеспечивающая за счет его кинематики и трения в шарнире стопы, подъем носка стопы в фазе переноса [16, 17]. Причем система работает как при прямом, так и при реверсивным (задним ходом) движении (рис. 3,б,в). Здесь точки на траекториях распо-

ложены через  $1/24$  периода цикла, точки с заливкой соответствуют опорной фазе. В последнем случае носок и пятка стопы меняются местами. Самоадаптация стопы повышает возможности подводного аппарата по приспособляемости к неровностям дна. Также, для более полной реализации возможностей движителя по профильной проходимости и маневренности в механизмах шагания аппарата реализована возможность корректировки программных движений ног [18–20]. Она позволяет в достаточно широких пределах менять длину и высоту шага.

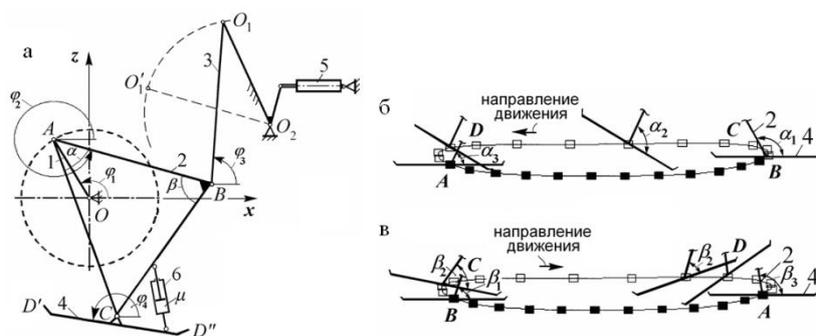


Рис. 3. Механизм шагания робота МАК-1 (а) и траектория его опорной точки с характерными положениями стопы при прямом (б) и реверсивном (в) движении: 1 – кривошип; 2 – опорное звено; 3 – коромысло; 4 – стопа; 5 – линейный электропривод механизма корректировки параметров шага; 6 – демпфер

Цикловой движитель позволяет не заботиться о сохранении походки шагающего аппарата и облегчает решение задачи обеспечения его устойчивости при движении. Так же исключается необходимость адаптивного управления ногами шагающего аппарата. В результате аппарат имеет всего лишь 2 управляемые степени свободы и становится существенно проще аналогов с адаптивным управлением ног. Например, у корейского подводного робота Crabster CR200 шагающие движители адаптивного типа насчитывают 32 управляемых приводов, что существенно усложняет задачу согласованного управления ногами [21].

Шагающий аппарат МАК-1 превосходит лучшие зарубежные аналоги, например подводный шагающий робот Crabster CR200 (Корея), по скорости и маневренности. Рекорд скорости подводной ходьбы робота Crabster CR200 – 0,5 узлов (около 0,9 км/ч) [22]. Максимальная скорость передвижения робота МАК-1 [23] под водой уже сейчас составляет 3–5 км/ч и может быть увеличена, при необходимости, до 7–10 км/ч. Аппарат не требует энергозатрат на удержание веса машины, его грузоподъемность, в отличие от Crabster CR200, не зависит от мощности привода и ограничена лишь прочностью ног. Также аппарат проще в управлении и превосходит аналоги по длине и высоте шага и по тяговым возможностям. По приспособляемости к рельефу дна он несколько уступает роботам адаптивного типа, так как адаптация к неорганизованной опорной поверхности у него происходит только за счет изменения длины и высоты шага и хорошей поворотливости. Также МАК-1 пока уступает роботу Crabster по сенсорным и навигационным возможностям.

**Неустойчивость шагающего аппарата обусловленная особенностью походки.** В роботе МАК-1, с целью повышения маневренности и снижения момента сопротивления повороту, использована 6-и ногая схема движителя с независимыми приводами ног правого и левого борта. Такая схема позволяет реализовать поворот с малыми радиусами на любых грунтах [9, 12, 15]. Поэтому при движении возможны ситуации, когда аппарат будет находится в опоре только на две точки –

на средние ноги. Такой режим движения не обеспечивает статической устойчивости. Вместе с тем, как показали подводные испытания, и в этом случае возможна динамически устойчивая ходьба. Математическое моделирование позволило изучить особенности динамики статически неустойчивых режимов движения. На рис. 4 показаны основные этапы фазы движения аппарата в неустойчивом положении.

Первую часть цикла шагающий аппарат движется в статически устойчивом положении – 1-я и 3-я ноги находятся в опоре на грунт, а средняя переносится вперед к точке смены стоп (рис. 4,а). После смены стоп 2-я нога находится в опоре на грунт, а 1-я и 3-я в переносе – аппарат находится в опоре только на средние ноги. Под действием силы тяжести и гидравлического сопротивления воды корпус аппарата поворачивается по часам до контакта 3-й стопы с грунтом (рис. 4,б). Центр масс подводного аппарата МАК-1 находится приблизительно в центре корпуса, а центр плавучести несколько смещен вперед. В следующую часть цикла 3-я стопа отрывается от грунта (рис. 4,в). Корпус под действием средних ног движется вперед и вверх, а под действием сил тяжести и гидравлического сопротивления воды продолжает поворачиваться по часовой стрелке. Моделирование показывает, что в маршевых режимах движения (при скоростях 3–5 км/ч) движение корпуса под действием ног более «быстрое» в сравнении с «медленным» поворотом корпуса. Поэтому возможны ситуации, когда 3-я стопа не успевает коснуться грунта. После того как опорная точка 2-й ноги окажется правее центра масс аппарата (рис. 4,г), момент сил тяжести относительно опорной точки меняет знак и корпус в заключительной части фазы начинает поворачиваться против часов (рис. 4,д, рис. 5) до контакта 1-й стопы с грунтом. Причем вода существенно сглаживает ударное взаимодействие стопы с грунтом в этой части фазы. После контакта 1-й ноги с грунтом снова начинается статически устойчивая часть цикла (рис. 4,е).

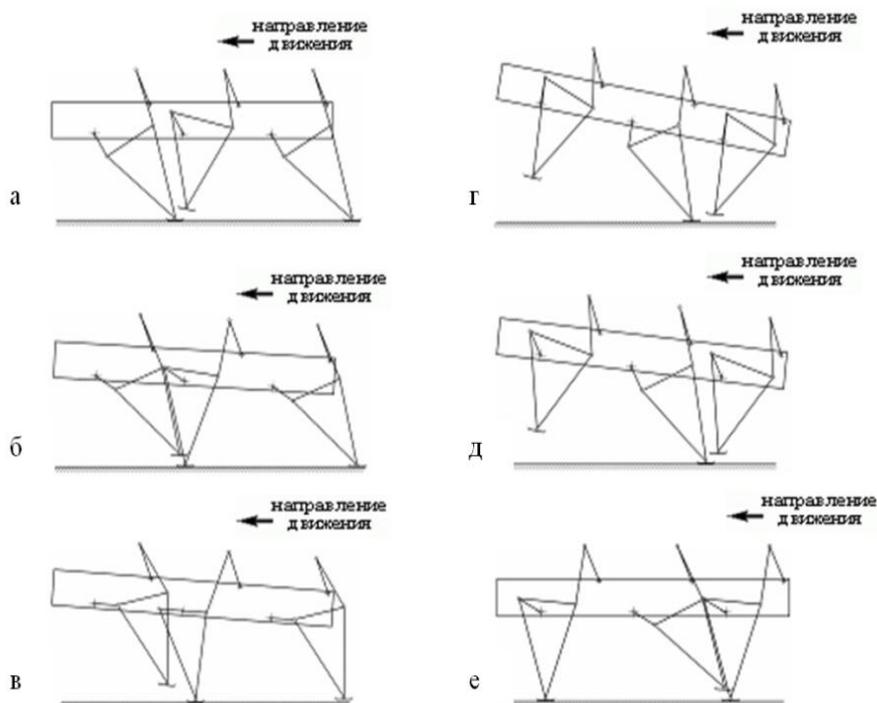


Рис. 4. Фазы статически неустойчивых режимов движения

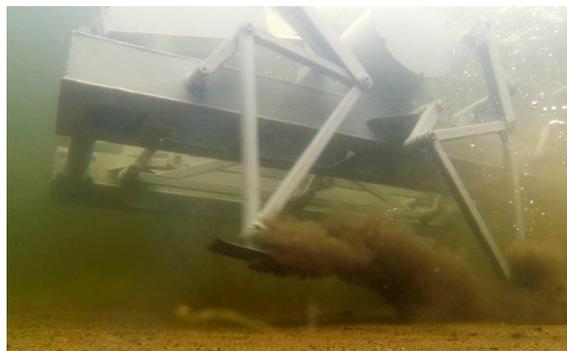


Рис. 5. Заключительная часть фазы неустойчивого движения робота

Таким образом, динамически устойчивая ходьба 6-ти ногого шагающего аппарата с независимым приводом цикловых механизмов шагания правого и левого борта возможна и в статически неустойчивых режимах движения, когда аппарат находится в опоре только на 2 средние ноги.

**Потеря устойчивости шагающего аппарата при движении по неорганизованной поверхности.** Подводные испытания выявили ряд проблем связанных с управлением аппарата. При управлении движением использовался следующий подход. Оператор находился вне рабочего пространства (на берегу или судне сопровождения) и контролировал работу автономно работающего аппарата по визуальной информации поступающей по кабелю с бортовых видеосенсоров. Оператор может менять скорость и направление движения, а также имеет определенные возможности по корректировке параметров шага. Задача согласованного управления ногами в маршевых режимах движения решалась без участия оператора. Оператор вмешивался в управление движением ног лишь при необходимости, например, при преодолении локальных препятствий. Однако, как показали испытания, из-за плохой видимости под водой (как правило, не более 1–3 м) в маршевых режимах движения (при скоростях порядка 1,5–2 м/с) оператор не успевал принимать адекватных решений в случае появления препятствия по ходу движения (время принятия решения составляло от 0,5 до 2 с). В результате имели место случаи потери устойчивости и опрокидывание аппарата. В подобных условиях особую значимость приобретают информационно-измерительные и управляющие системы ближнего действия. В подводном шагающем роботе Crabster CR200 стопы выполняют функции тактильных датчиков. При разработке системы управления робота МАК-1 также прорабатывалась возможность использовать информацию о положении шарнирно закрепленной стопы при встрече с неизвестным препятствием для принятия правильных решений по управлению.

Датчики внутренней информации аппарата МАК-1 позволяют однозначно определять «программные» угловые скорости стоп и звеньев механизмов шагания, а также положение и скорости узловых точек механизмов в системе отсчета жестко связанной с корпусом аппарата. Шарнирно закрепленная стопа при этом совершает в фазе переноса строго определенное «программное» движение. В конце опорной фазы – участок  $BC$  траектории (рис. 3,б), стопа 4 расположена под углом  $\alpha_1$  к опорному звену 2. В фазе переноса – участок  $CD$  траектории, стопа движется вместе с опорным звеном и угол  $\alpha_1$  не изменяется. Если стопа лыжеобразной формы, то в начале фазы переноса – в точке  $C$  траектории, пятка стопы  $D''$  контактирует с грунтом. В этом случае угол  $\alpha_1$  уменьшится до  $\alpha_2$ , но и при этом носок стопы  $D'$  в фазе переноса остается приподнятым. После переноса – на участке  $DA$ , стопа при-

нимает горизонтальное положение. Угол  $\alpha_2$  при этом уменьшается до  $\alpha_3$ . В опорной фазе – на участке  $AB$  траектории, угол наклона стопы не изменяется, а угол между стопой и опорным звеном постепенно увеличивается до  $\alpha_1$ . Затем цикл повторяется. Похожая ситуация имеет место и при реверсивном движении. Здесь носок и пятка стопы меняются местами. Любое отклонение поведения стопы от «программного» при движении шагающего аппарата позволяет определить некоторую информацию о рабочем пространстве и текущей ситуации.

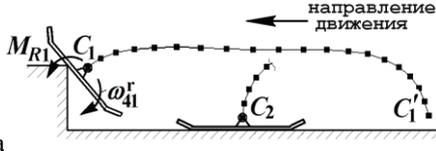
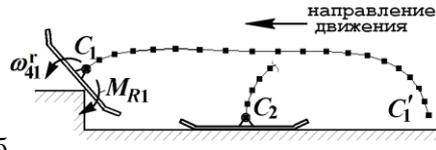
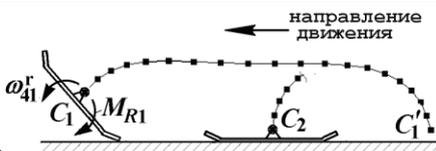
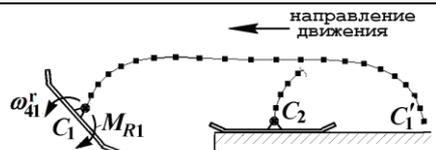
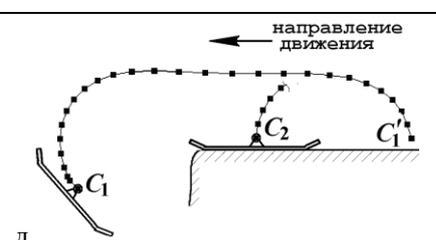
Рассмотрим, например, ситуации представленные в табл. 1, где  $U_k$  – единичная функция, описывающая состояние  $k$ -го механизма шагания ( $k = 1, 2$ ), равная 1 в опорной фазе и 0 при переносе;  $\omega'_{4k}$  – относительная угловая скорость  $k$ -ой стопы по отношению к опорному звену;  $z_{Ck}$ , – вертикальные координаты опорных точек (шарниров стопы) в системе отсчета связанной с корпусом;  $z_{Dk}$  и  $z_{D''k}$  – координаты носка и пятки стопы, соответственно. Путем комбинирования перечисленных условий и введя ряд лингвистических переменных (препятствие высокое, невысокое, глубокое, неглубокое, широкое, неширокое и др.), на базе информации о движении стопы можно сформулировать правила поведения робота в форме нечетких условных суждений типа «Если  $A$  ..., то  $B$ ...». Например, для ситуации табл. 1,а, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок и пятка 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы, по отношению к опорному звену той же ноги, то препятствие «высокое»», его нельзя преодолеть в маршевом режиме движения. Возможные решения по управлению в этом случае – экстренная остановка, шаг назад, переход на режим с повышенной высотой шага, повторная попытка преодоления препятствия на малой скорости в автономном режиме или передача управления оператору. Если, при тех же условиях, относительная угловая скорость 1-ой стопы по отношению к опорному звену отрицательная табл. 1,б, то препятствие «невысокое» и движение может быть продолжено в маршевом режиме. Для ситуации табл. 1,в, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы, пятка 1-ой стопы на уровне опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы по отношению к опорному звену, то препятствия нет», имеет место «программное» движение стопы. Для ситуации табл. 1,г, «если 1-я стопа в переносе, 2-я в фазе опоры и носок 1-ой стопы выше опорной точки 2-ой стопы, пятка 1-ой стопы ниже уровня опорной точки 2-ой стопы и имеется положительная относительная угловая скорость 1-ой стопы, то препятствие «неглубокое»» и можно продолжать движение в маршевом режиме.

Если при тех же условиях 1-ая стопа не вращается по отношению к опорному звену, табл. 1,д, то препятствие «глубокое» и необходима экстренная остановка аппарата и передача управления оператору. Дальнейшие возможные решения по управлению – шаг назад, переход на режим с повышенной длиной шага, повторная попытка преодоления препятствия на малой скорости в автономном режиме или передача управления оператору.

Таким образом, по относительному движению шарнирно закрепленных стоп шагающего аппарата с движителями циклового типа, характер которого полностью определяется датчиками внутренней информации, можно получить некоторую информацию о внешнем рабочем пространстве и текущей ситуации. Несмотря на то, что информация, как правило, носит неполный и неоднозначный характер, она может быть использована при принятии правильных решений по управлению. В частности, на базе нечетких алгоритмов управления, возможна реализация типовых рефлексивных движений, автономно выполняемых подводным шагающим роботом для исключения аварийных ситуаций.

Таблица 1

Примеры ситуаций, возникающих при встрече с препятствием

Возможные ситуации	Характеристика ситуации
 <p>а</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$ ; $z_{D'1} > z_{C2}$ , $z_{D''1} > z_{C2}$ ; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>б</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$ ; $z_{D'1} > z_{C2}$ , $z_{D''1} > z_{C2}$ ; $\omega_{41}^r < 0$
 <p>в</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$ ; $z_{D'1} > z_{C2}$ , $z_{D''1} = z_{C2}$ ; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>г</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$ ; $z_{D'1} > z_{C2}$ , $z_{D''1} < z_{C2}$ ; $\omega_{41}^r > 0$
 <p>д</p>	$U_1 = 0$ и $U_2 = 1$ ; $z_{D'1} > z_{C2}$ , $z_{D''1} < z_{C2}$ ; $\omega_{41}^r = 0$

**Устойчивость шагающих машин при преодолении уклонов.** При движении традиционных колесных и гусеничных транспортных средств вдоль уклонов возможно их опрокидывание или сползание под уклон [24–25]. Опрокидывание и сползание под уклон возможно и при шагающем способе передвижения.

В общем случае устойчивость аппарата зависит от отношения высоты его центра масс  $h_C$  к ширине колеи  $B$ . Для уточнения критериев оптимизации механизмов шагания, отвечающих за устойчивость к опрокидыванию, были проведены испытания шагающего робота МАК-1 на слабонесущих грунтах. В ходе испытаний преодолевались уклоны и осуществлялось движение вдоль уклонов (рис. 6).

Было выяснено, что на слабых грунтах сползание шагающих машин под уклон маловероятно. Как правило силы сцепления  $F_k$  стопы с грунтом были существенно больше нормальных реакций  $N_k$  (рис. 7). Это обусловлено значительными деформациями грунта под опорными элементами (стопами) шагающих машин.



Рис. 6. Исследования устойчивости шагающего аппарата к опрокидыванию при преодолении уклонов

Рассмотрен способ повышения устойчивости к опрокидыванию при движении шагающего аппарата вдоль уклона за счет отдельного регулирования условного клиренса механизмов шагания правого и левого бортов. Механизмы шагания аппарата МАК-1 позволяют изменять условный клиренс в пределах  $\Delta h = 0-0,2$  м. Такой диапазон изменения клиренса позволяет изменять угол наклона корпуса по отношению к опорной поверхности до  $\beta = 10^\circ$  (рис. 7,а). В результате угол наклона опорной поверхности  $\alpha$  как бы уменьшается на угол  $\beta$ .

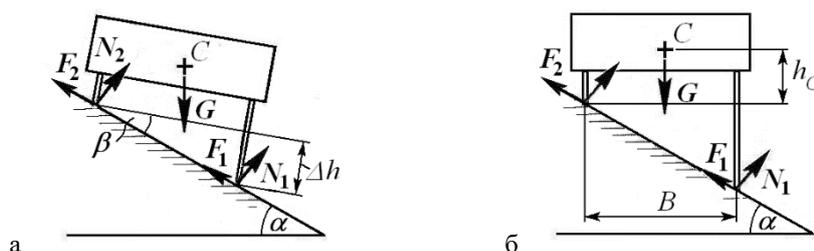


Рис. 7. Схема сил при движении вдоль уклона

Наибольший запас устойчивости при движении вдоль уклонов будет иметь место, если диапазон возможного изменения клиренса  $\Delta h$  механизмов шагания позволяет обеспечивать горизонтальное положение корпуса (рис. 7,б). В этом случае устойчивость аппарата уже не зависит от отношения  $h_c/B$ . Для обычных шагающих аппаратов в этом, во-первых, нет особой потребности, а во-вторых, это трудно достичь из-за используемых механизмов шагания. Это актуально для буровых и добычных шагающих платформ, передвигающихся по дну. Уже есть примеры выполнения шагающих платформ передвигающихся по дну. Известна, например, 8-ми ногая шагающая платформа компании «Namibia De Beers» (рис. 1,а), предназначенной для прибрежной добычи алмазов [26]. В России также ведутся разработки подобных систем. В частности, на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»» прорабатывается конструкция роботизированной подводной буровой установки на базе двух шагающих платформ, предназначенной для освоения подводных месторождений нефти и природного газа на Арктическом шельфе [14]. Специфика шагающих платформ – высокое расположение центра масс. Рассмотрим случай преодоления уклонов платформами с ортогональным типом шагающего движителя. При ее решении задачи определения запаса устойчивости шагающих машин свойства грунта, как правило, не учитываются. В подводных условиях необходимо

учитывать специфические особенностей подводных грунтов (пльвунных свойств, «компрессионного эффекта» препятствующего отрыву стопы от грунта и др.). Пльвунные свойства донных грунтов (пльвун – насыщенный водой грунт, разжижающийся при механическом воздействии на него) обуславливают необходимость ограничения максимальных опорных реакций с целью недопущения опрокидывания платформы вследствие потери несущей способности грунта под стопами шагающего движителя. Максимальные опорные реакции имеют место в момент смены стоп (при переступании). На их величину существенное влияние оказывает «компрессионная» сила – при отрыве ноги от грунта, из-за разрежения, возникающего под стопой, появляется сила, препятствующая ее отрыву. Штамповые испытания в условиях реальных водных объектов, показывают, что компрессионная сила на вязких донных грунтах может достигать значительной величины [11, 27]. Величина компрессионной силы существенно зависит от скорости отрыва стопы от грунта. Для «быстрых» движений стопы требуется большая сила. При «малой» силе отрыв стопы от грунта происходит с некоторой задержкой (после фильтрации воды в зону разрежения под стопой).

Если шагающая машина не имеет управляемой стопы, то для статически устойчивой ходьбы минимальное число ног, одновременно находящихся в фазе опоры, равно трем. Минимальное число ног статически устойчивой машины равно четырем. Четырехногая машина использует только один тип статически устойчивых походок, при этом ноги перемещаются по очереди одна за другой. На рис. 8 также приведено наихудшее с точки зрения устойчивости к опрокидыванию расположение стоп 6-ти ногой (при движении «тройками») и 8-ногой (при движении «четверками») шагающей машины. На рис. 8,б – 2, 4 и 6 стопа в опорной фазе, а 1, 3 и 5 отрываются от грунта, на (рис. 8,в) – 1, 3, 5 и 7 стопа в опорной фазе, а 2, 4 и 6 отрываются от грунта.

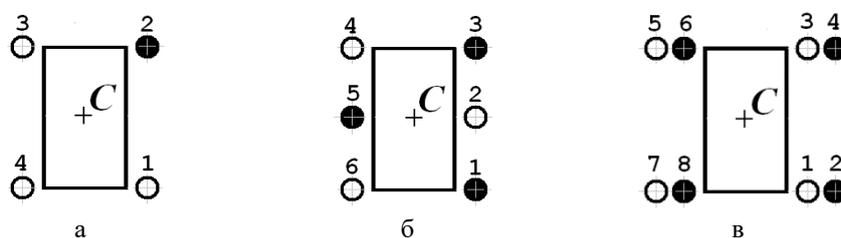


Рис. 8. Наихудшее с точки зрения устойчивости к опрокидыванию расположение стоп 4-х ногой (а), 6-ти ногой (б) и 8-ногой (в) шагающей платформы

При разрушении грунта под 1-й стопой (рис. 9,б), будет иметь место опрокидывание шагающей платформы вокруг точки  $O$  – грани опорного многоугольника проходящей через 3 и 4 стопы (рис. 9,а). При этом величина опорной реакции  $N_1$  будет определяться пределом текучести грунта.

Процесс опрокидывания включает в себя несколько этапов. На начальном этапе вследствие потери несущей способности грунта под 1-й стопой она вместе с корпусом платформы поворачивается вокруг точки  $O$  и погружается в грунт. При этом 2-я стопа еще находится на опорной плоскости и пытается оторваться от грунта. Ее скорость в относительном движении по отношению к корпусу определяет угловую скорость платформы на этом этапе  $\omega_0 = v_{1r}/B$ , где  $v_{1r}$  – относительная скорость 1-й стопы;  $B$  – ширина колеи. В момент отрыва 2-й стопы от грунта платформа будет иметь угловую скорость  $\omega_0$  и уже отклонится от вертикали на угол  $\varphi_0 = \omega_0 t$  (при  $v_{1r} = const$ ). После отрыва 2-й стопы от грунта платформа будет продолжать вращаться вокруг точки  $O_1$

под действием силы  $G$ . Очевидно, что для обеспечения динамической устойчивости угол поворота платформы  $\varphi = \varphi_0 + \varphi_1$  должен быть меньше критического угла  $\varphi_{кр}$ , при котором платформа будет опрокидываться вокруг стоп правого борта (рис. 9,б). Угол  $\varphi_1$  можно уменьшить, обеспечив плавучесть верхней части вышки (рис. 9). В этом случае выталкивающая сила  $F_A$  будет оказывать стабилизирующее действие на устойчивость платформы. Таким образом, потеря статической устойчивости шагающей платформы из-за потери несущей способности грунта под опорами одного из бортов не обязательно приведет к ее опрокидыванию.

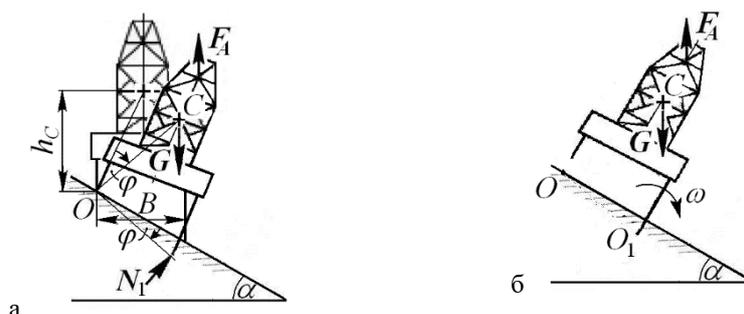


Рис. 9. Опрокидывание 4-х ногой шагающей платформы из-за потери несущей способности грунта под опорами правого борта

**Заключение.** Таким образом, исследования показали, что проблемы связанные с неустойчивостью шагающего аппарата обусловленная особенностью походки, потеря устойчивости шагающего аппарата при движении по неорганизованной поверхности и потеря устойчивости шагающих машин при преодолении уклонов может быть решена.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке как простейших шагающих машин, например шагающих тракторов сельскохозяйственного назначения, так и для сложных шагающих робототехнических систем предназначенных для проведения грунтовых работ при дефиците сцепного веса, например, в подводных условиях либо в условиях ослабленной гравитации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляхов Д.Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 1. – С. 15-23.
2. Илларионов Г.Ю. Некоторые аспекты военного применения подводных роботов за рубежом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3 (128). – С. 65-75.
3. Илларионов Г.Ю., Сидоренко В.В., Смирнов С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 31-39.
4. Сиденко К.С., Лаптев К.З., Илларионов Г.Ю. Управляемые по кабелю необитаемые подводные аппараты для поиска и уничтожения мин // Двойные технологии. – 2009. – № 3. – С. 28-31.
5. Сиденко К.С., Илларионов Г.Ю. Новые подходы к проблеме защиты объектов морской инфраструктуры от подводных диверсантов и террористов // Морская радиоэлектроника. – 2008. – № 4. – С. 2-9.
6. 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.
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. – St. Petersburg, 2014. – P. 126-138.

8. Подводно-технические работы. – Режим доступа: [ptr.akva-eko.pf/content/podvodnyu-transheekoratel](http://ptr.akva-eko.pf/content/podvodnyu-transheekoratel). – Загл. с экрана.
9. Арыканцев В.В., Чернышев В.В. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 10. – С. 169-178.
10. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater Tests of The Walking Robot МАК-1 // Human-Centric Robotics: Proc. of the 20th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR 2017 (Portugal). – 2017. – P. 571-578.
11. Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В. Исследования динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с донным грунтом // Исследования наукограда. – 2015. – № 1. – С. 32-36.
12. Chernyshev V.V., Pryanichnikov V.E., Arykantsev V.V., Verzhinina I.P., Kalinin Ya.V. Research of the walking type of movement in underwater conditions // OCEANS 2019 – Marseille (Marseille, France, 17-20 June, 2019): Conference proceedings / Marine Technology Society, IEEE Oceanic Engineering Society. – 2019. – 6 p. – DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867233. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867233>.
13. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Испытания подводного шагающего аппарата в условиях водных объектов Волго-Ахтубинской поймы // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – № 8 (28). – С. 24-29.
14. Чернышев В.В., Вершинина И.П., Арыканцев В.В. Динамическая устойчивость шагающих платформ передвигающихся по дну // Робототехника и искусственный интеллект: материалы XI всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием; Сибирский федеральный ун-т, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». – Красноярск, 2019. – С. 108-113.
15. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1 (203). – С. 6-18.
16. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Passive foot control in cyclic walking mechanism // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference: Proceedings. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). – Publisher: IEEE, 2017. – 5 p. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
17. Арыканцев В.В., Пряничников В.Е., Чернышев В.В. Алгоритм адаптации подводного шагающего аппарата по информации о встрече стоп с препятствиями // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – № 12. – С. 24-32.
18. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Цикловой механизм шага с трансформируемой траекторией опорной точки // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15, № 2 (34). – С. 71-79. – Режим доступа: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
19. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.
20. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Verzhinina I.P. Minimization of Energy Costs for Movement Resistance of Ground for Walking Device by the Control of Support Points Motion // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2, Springer Nature Switzerland AG, 2020. – P. 839-848. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
21. Yoo S.Y., Jun B.H., Shim H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A. – September 2014. – Vol. 38, Issue 9. – P. 989-997.
22. Bong Huan Jun. Crabster CR200: New Record of Underwater Walking Speed – 0.5 knots. – <https://youtu.be/O8361Uq97DQ>.
23. Underwater walking machine МАК-1 movement in underwater conditions with velocity about 2.5 knots. – <https://youtu.be/FrynJTHeuIE>.
24. 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.

25. 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.
26. Nautilus Minerals. – Режим доступа: [www.nautilusminerals.com](http://www.nautilusminerals.com). – Загл. с экрана.
27. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds // Procedia Engineering. – Vol. 176, June 29 – July 01, 2016. Samara, Russia / ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. – Elsevier publishing, 2017. – P. 387-393.

## REFERENCES

1. Lyakhov D.G. Sovremennye zadachi podvodnoy robototekhniki [Modern problems of underwater robotics], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2012, No. 1, pp. 15-23.
2. Illarionov G.Yu. Nekotorye aspekty voennogo primeneniya podvodnykh robotov za rubezhom [Some aspects of the military use of underwater robots abroad], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 3 (128), pp. 65-75.
3. Illarionov G.Yu., Sidorenko V.V., Smirnov S.V. Avtonomnye neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Autonomous uninhabited underwater vehicles for searching and destroying mines], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2006, No. 1, pp. 31-39.
4. Sidenko K.S., Laptev K.Z., Illarionov G.Yu. Upravlyaemye po kabelyu neobitaemye podvodnye apparaty dlya poiska i unichtozheniya min [Cable-operated uninhabited underwater vehicles for searching and destroying mines], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2009, No. 3, pp. 28-31.
5. Sidenko K.S., Illarionov G.Yu. Novye podkhody k probleme zashchity ob"ektov morskoy infrastruktury ot podvodnykh diversantov i terroristov [New approaches to the problem of protection of marine infrastructure objects from underwater saboteurs and terrorists], *Morskaya radioelektronika* [Marine radio electronics], 2008, No. 4, pp. 2-9.
6. Andreev S.I., Kazakova V.E., Babaeva S.F., Cherkashev G.A. Tverdye poleznye iskopaemye mirovogo okeana: istoriya otkrytiy, geologicheskoe izuchenie, perspektivy osvoeniya [Solid minerals of the world ocean: the history of discoveries, geological study, prospects for development], *Gornyy zhurnal* [Mining journal], 2013, No. 11, pp. 65-72.
7. Verichev S., Laurens de Jonge, Wiebe B., Rodney N. Deep mining: from exploration to exploitation, *Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference*, VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 2014, pp. 126-138.
8. Podvodno-tekhnicheskie raboty [Underwater technical work]. Available at: [ptr.akvateko.ru/content/podvodnyy-transheekopatel](http://ptr.akvateko.ru/content/podvodnyy-transheekopatel).
9. Arykantsev V.V., Chernyshev V.V. Podvodnye issledovaniya tyagovo-stsepnnykh svoystv i prokhodimosti shagayushchego apparata MAK-1 [Underwater research of traction-coupling properties and cross-country walking device MAK-1], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10, pp. 169-178.
10. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Underwater Tests of The Walking Robot MAK-1, *Human-Centric Robotics: Proc. of the 20th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines CLAWAR 2017 (Portugal)*, 2017, pp. 571-578.
11. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrillov A.E., Kalinin Ya.V. Issledovaniya dinamiki vzaimodeystviya dvizhitelya podvodnogo shagayushchego apparata s donnym gruntom [Research on the dynamics of interaction between the propulsion system of an underwater walking vehicle and the bottom soil], *Issledovaniya naukoigrada* [Research of the science city], 2015, No. 1, pp. 32-36.
12. Chernyshev V.V., Pryanichnikov V.E., Arykantsev V.V., Verzhinina I.P., Kalinin Ya.V. Research of the walking type of movement in underwater conditions, *OCEANS 2019 – Marseille (Marseille, France, 17-20 June, 2019): Conference proceedings*, Marine Technology Society, IEEE Oceanic Engineering Society, 2019, 6 p. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867233. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867233>.
13. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. Ispytaniya podvodnogo shagayushchego apparata v usloviyakh vodnykh ob"ektov Volgo-Akhtubinskoy poymy [Tests of underwater walking apparatus in the conditions of water bodies of the Volga-Akhtuba floodplain], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental monitoring systems], 2017, No. 8 (28), pp. 24-29.

14. Chernyshev V.V., Vershinina I.P., Arykantsev V.V. Dinamicheskaya ustoychivost' shagayushchikh platform peredvigayushchikhsya po dnu [Dynamic stability of walking platforms moving on the bottom], *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt: materialy XI vseros. nauch.-tekh. konf. s mezhdunar. Uchastiem* [Robotics and artificial intelligence: proceedings of the XI all-Russian scientific and technical conference with international participation]; Sibirskiy federal'nyy un-t, Mezhhinstitutskaya bazovaya kafedra «Prikladnaya fizika i kosmicheskie tekhnologii». Krasnoyarsk, 2019, pp. 108-113.
15. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. Struktura energozatrat shagayushchikh mashin i robotov pri realizatsii bol'shikh tyagovykh usiliiy [Structure of energy consumption of walking machines and robots when implementing large traction forces], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 1 (203), pp. 6-18.
16. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Passive foot control in cyclic walking mechanism, *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference: Proceedings. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*. Publisher: IEEE, 2017, 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
17. Arykantsev V.V., Pryanichnikov V.E., Chernyshev V.V. Algoritm adaptatsii podvodnogo shagayushchego apparata po informatsii o vstreche stop s prepyatstviyami [Algorithm of adaptation of underwater walking apparatus based on information about the meeting of stops with obstacles], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems], 2018, No. 12, pp. 24-32.
18. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. TSiklovoy mekhanizm shaganiya s transformiruemoy traektoriey opomoy tochki [Cyclical mechanism of walking with a transformable trajectory of the reference point], *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines], 2017, Vol. 15, No. 2 (34), pp. 71-79. Available at: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. MAK-1 – podvodnyy shagayushchiy robot [MAK-1-underwater walking robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics], 2015, No. 2, pp. 45-50.
20. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Vershinina I.P. Minimization of Energy Costs for Movement Resistance of Ground for Walking Device by the Control of Support Points Motion, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019)*. Vol. II, part 2, Springer Nature Switzerland AG, 2020, pp. 839-848. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).
21. Yoo S.Y., Jun B.H., Shim H. Design of static gait algorithm for hexapod subsea walking robot: Crabster, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, A*, September 2014, Vol. 38, Issue 9, pp. 989-997.
22. Bong Huan Jun. Crabster CR200: New Record of Underwater Walking Speed – 0.5 knots. Available at: <https://youtu.be/O8361Uq97DQ>
23. Underwater walking machine MAK-1 movement in underwater conditions with velocity about 2.5 knots. Available at: <https://youtu.be/FrynJTHeuE>
24. 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.
25. 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.
26. Nautilus Minerals. Available at: [www.nautilusminerals.com](http://www.nautilusminerals.com).
27. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds, *Procedia Engineering*, Vol. 176, June 29 – July 01, 2016. Samara, Russia, ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. Elsevier publishing, 2017, pp. 387-393.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.А. Несмиянов.

**Чернышев Вадим Викторович** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»); e-mail: vad.chernyshev@mail.ru; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28; тел.: +78442248099; д.т.н.; доцент; профессор.

**Вершинина Ирина Петровна** – e-mail: i\_vershinina@vstu.ru; к.т.н.; доцент.

**Арыканцев Владимир Владимирович** – e-mail: arvstu@mail.ru; м.н.с.

**Chernyshev Vadim Viktorovich** – Volgograd State Technical University (VSTU); e-mail: vad.chernyshev@mail.ru; 28, Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russia; phone: +78442248099; dr. of eng. sc.; associate professor; professor.

**Vershinina Irina Petrovna** – e-mail: i\_vershinina@vstu.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Arykantsev Vladimir Vladimirovich** – e-mail: arvstu@mail.ru; junior researcher.

УДК 004.021: 004.512.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-66-78

**Я.А. Туровский, С.С. Харченко, Р.В. Мещеряков, А.Ю. Исхаков,  
А.О. Исхакова**

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЕНИЯ  
РОБОТ-ЧЕЛОВЕК ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ВЫЗВАННЫХ  
ПОТЕНЦИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ИНДЕКСА  
СИНХРОНИЗАЦИИ\***

*Целью исследования является построения систем человеко-машинного управления. Основные способы построения таких систем, способы выделения вызванных потенциалов в электроэнцефалограммах. В статье приведены исследования сигналов электроэнцефалограмм с устоявшимися зрительными вызванными потенциалами для разных частот фотостимуляции, на основе метода многомерного индекса синхронизации. Рассматривается влияние длины обрабатываемого окна на точность распознавания частоты исследуемого сигнала. Так же в ходе исследований авторы проверяют необходимость предобработки исходных сигналов посредством полосовой фильтрации сигнала. Кроме того, рассматривается возможность использования многомерного индекса синхронизации в многоканальном режиме. Результатом исследования авторов является рекомендации по используемым параметрам для выделения устоявшихся зрительных вызванных потенциалов в методе многомерного индекса синхронизации. Показана возможность использования алгоритмов на основе многомерного индекса синхронизации в режиме реального времени. Полученные результаты имеют практическую значимость, так как могут применяться для построения нейрокомпьютерных интерфейсов на основе зрительных вызванных потенциалов и могут быть в дальнейшем использованы в формировании теории управления робототехнических систем различного назначения и в реализации решений по организации взаимодействия человека и машины в узких практических задачах.*

*Зрительные вызванные потенциалы; ЭЭГ; интерфейс мозг-компьютер; многомерный индекс синхронизации; человеко-машинное взаимодействие.*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00331, № 19-29-01156.