

Раздел II. Системы управления и моделирование

УДК 007.52:629.022:004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-106-120

А.В. Васильев, И.В. Шардыко, А.Ю. Жуков

ОБЩИЕ ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ КОНСТРУКЦИИ И ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МНОГОСТЕПЕННОГО КОЛЁСНО-ШАГАЮЩЕГО ШАССИ ЛУНОХОДА

Рассматривается задача построения шасси исследовательского лунохода, обладающего сверхвысокой проходимостью в условиях неопределённости подстилающей поверхности и рельефа местности. Прямое дистанционное и супервизорное управление современными сложными робототехническими системами в условиях недетерминированности окружающей среды накладывает повышенную нагрузку на оператора, особенно в случае применения высокопроходимых мобильных платформ, имеющих большое количество степеней подвижности требующих согласованного управления. В этом аспекте актуальной становится задача автоматизации движения такого многостепенного шасси, автоматизации тактики движения, принимаемой в тех или иных ситуациях на основе информации от датчиков. В настоящей статье предлагается концепция многостепенного колёсно-шагающего шасси (КШШ) исследовательского лунохода, включающая конструктивно-компоновочную схему шасси и способ его применения, т.е., алгоритмы движения на пересечённой местности различного типа. Предлагается методика построения алгоритмов управления и даётся краткое описание разработанных алгоритмов и компьютерных имитационных моделей КШШ для их теоретической отработки. Конечным результатом работы предполагается получение в ходе экспериментальных исследований ряда характеристик лабораторного макета шасси, проведение верификации разработанных компьютерных моделей и алгоритмов автоматического управления движением многостепенного КШШ. Выполнение этих задач позволит получить научно-технический задел в области управления движением колёсно-шагающими системами, повысить качество моделирования и проектирования луноходов. Полученные на данном этапе результаты позволяют перейти к этапу изготовления экспериментального макета и постановки физических экспериментов по исследованию КШШ с целью отработки разработанных алгоритмов и имитационных моделей. Экспериментальная проверка алгоритмов управления движением многостепенных шасси и отработка методики их построения позволит повысить уровень автономности будущих мобильных роботов, предназначенных для работы в экстремальных напланетных условиях.

Шасси; луноход; колёсное шагание; колёсно-шагающее шасси; компьютерная модель; имитационное моделирование.

A.V. Vasiliev, I.V. Shardyko, A.Y. Zhukov

DESIGN AND SIMULATING GENERAL APPROACHES OF AN ARTICULATED WHEELED-LEGGED CHASSIS OF THE LUNAR ROVER

The paper considers the problem of constructing a chassis for a research lunar rover with ultra-high traversability over uncertain terrain with soft soil. Direct remote and supervisory control of modern complex robotic systems in non-deterministic environment places an increased workload on the operator, especially in the case of high-traversability mobile platforms with a large number of degrees of freedom (DoF) requiring coordinated control. In this regard, the problem of automating the movement of such a multi-DoF chassis as well as automating the motion planning depending on situation based on sensor feedback becomes relevant. This article proposes a concept for a multi-degree chassis for a research lunar rover, including a design and layout scheme of the chassis and a method for its application, i.e., motion algorithms on various types of rough terrain. A methodology for control algorithms design is proposed, and a brief description of the developed algorithms and the simulation models of the chassis for its preliminary testing is provided. The final outcome of this work is expected to be a number of experimentally ob-

tained characteristics of the laboratory chassis model and the verification of the developed computer models and control algorithms of the multi-DOF chassis. Completing these tasks will provide scientific and technical groundwork for the motion control of wheeled- legged systems and improve the quality of lunar rovers' modeling and design. The results obtained at this stage allow us to move on to the manufacturing an experimental prototype and conducting physical experiments on this prototype to test the developed algorithms and simulation models. Experimental verification of the multi-DoF chassis control algorithms and their design methodology will improve the level of autonomy of future mobile robots designed to operate in extreme off-planet conditions.

Chassis; lunar rover; wheeled walking; wheeled-legged chassis; computer model; simulation modeling.

Введение. Возвращение интереса к исследованию поверхности Луны требует создания новых луноходов, т.е., мобильных робототехнических средств, способных передвигаться в условиях неопределённости лунной поверхности [1]. От системы передвижения исследовательского лунохода требуется обеспечение его подвижности в сложных условиях на сыпучем слабосвязанном грунте типа лунного реголита, движение на уклонах близких к углам естественного откоса грунта, преодоление значительных каменистых препятствий в районах прикратерного выброса обломочных материалов или в местах оголения коренных пород в морских и приматериковых районах Луны. При построении систем передвижения луноходов инженеры традиционно ориентируются на колёсные движители, которые отличает большая надёжность и энергоэффективность по сравнению с гусеничными движителями, что нашло отражение в конструкциях всех действовавших луноходов и многочисленных прототипов [2–4]. В то же время результаты отечественных и зарубежных исследований показывают, что фактическая область применения колёсных полноприводных шасси на лунном реголите (или грунтах-аналогах) ограничивается углами 18-22° [5–7].

Расширить возможности шасси можно за счёт перехода от колёсного способа передвижения к колёсно-шагающему, реализующему различные алгоритмы движения, конечной целью которых является перенос центра масс корпуса машины в направлении движения при использовании заблокированных колёсных движителей в качестве опорных элементов подобно тому, как это делается при ходьбе. Как видно из рис. 1, адаптированного из работы [8], колёсно-шагающие шасси (КШШ) в сравнении с другими типами шасси позволяют получить наиболее сбалансированный набор свойств в части обеспечения максимальной подвижности в неструктурированной среде наряду с наибольшей энергоэффективностью.



Figure 1. Mobility in unstructured environments vs. speed and energetic efficiency of the possible hybrid locomotion systems (Adapted with permission from [13], copyright 2012, L. Bruzzone and G. Quaglia).

Обозначения типов мобильных платформ: W – wheeled (колёсный), T – tracked (гусеничный), L – legged (шагающий), WT – wheeled-tracked (колёсно-гусеничный), LW – legged-wheeled (колёсно-шагающий), LT – legged-tracked (гусенично-шагающий), LWT – legged-wheeled-tracked (колёсно-гусенично-шагающий)

Рис. 1. Области существования мобильных платформ различных типов в системе координат «подвижность в неструктурированной среде» – «скорость и энергоэффективность»

В настоящей статье предлагается концепция многостепенного КШШ исследовательского лунохода, включающая конструктивно-компоновочную схему шасси и способ его применения, т.е. алгоритмы движения на пересечённой местности различного типа. Конечным результатом работы предполагается получение в ходе экспериментальных исследований ряда характеристик лабораторного макета шасси, проведение верификации разработанных компьютерных моделей и алгоритмов автоматического управления движением многостепенным КШШ. Выполнение этих задач позволит получить научно-технический задел в области управления движением колёсно-шагающими системами, повысить качество моделирования и проектирования луноходов.

Разрабатываемые алгоритмы необходимы:

- ◆ для общего повышения опорной и профильной проходимости путём реализации возможностей, заложенных в конструкцию КШШ: важнейшим фактором здесь является контроль и противодействие буксованию движителей [9];
- ◆ для автоматизации движения шасси по сложному рельефу и повышения точности автономного движения;
- ◆ для предотвращения опрокидывания [10, 11];
- ◆ для реализации дополнительных функциональных возможностей, получаемых от добавления приводов шагания [12].

Выбор схемного решения КШШ для проведения экспериментальных исследований. Широкие исследования КШШ проводились в нашей стране коллективом ВНИИтрансмаш под руководством Александра Леоновича Кемурджиана, – тем же коллективом, который создал шасси аппаратов «Луноход-1» и «Луноход-2» [2, 3]. Работы в области совершенствования систем передвижения напланетных транспортных средств продолжились и после завершения программы «Луноходов». Поиск путей повышения характеристик систем передвижения планетоходов привёл к созданию целого ряда экспериментальных самоходных шасси с колёсно-шагающими движителями (рис.2).

Опираясь на эти разработки, необходимо учитывать те факты, что с одной стороны, в то время уровень развития техники, в первую очередь, вычислительной, не позволял использовать в полном объёме все возможности КШШ, с другой стороны, – как по этой причине, так и из соображений экономии массы, разработчики применяли достаточно нетривиальные конструктивные решения, с тем, чтобы шагание осуществлялось нужным образом при использовании всего одного привода на один опорный элемент, как это и реализовано, например, в макетах КШМ и ЭОСАШ, показанных на рис. 2.

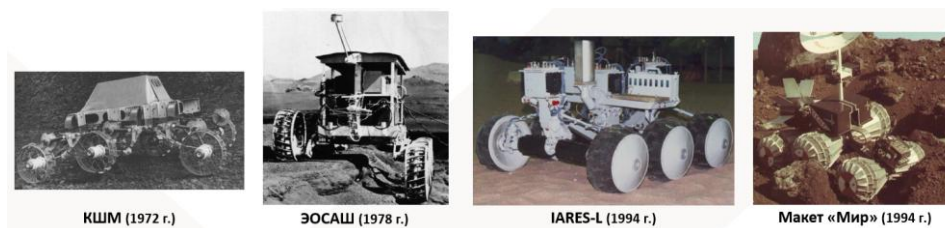


Рис. 2. Примеры макетов КШШ ВНИИтрансмаш

В любом случае, построение КШШ требует введения дополнительных приводов или специальных управляющих элементов приводов (например, фрикционных или электромагнитных тормозов), что, очевидно, означает определённое усложнение конструкции.

Исследование КШШ в наше время продолжается на новом уровне [13, 14], что привело к появлению огромного количества различных конструктивных решений, находящихся применение как в наземных мобильных роботах различного назначения, так и в прототипах планетоходов [15–21]. Необходимо отметить, что по способу осуществления колёсного шагания принципиально выделяют всего два способа: безотрывное шагание и отрывное шагание [2]. Однако, обобщая обзор различных вариантов конструктивной реализации КШШ, удобнее их рассматривать с точки зрения функциональных (кинема-

тических, динамических) особенностей, определяющих возможности реализации тех или иных алгоритмов передвижения (паттернов). Проведённый анализ показывает, что наибольшее распространение среди КШШ в настоящее время получили схемы, которые условно можно отнести к группе «колесо на ноге». Суть данных схем состоит в установке колеса на конце одно- или многостепенного механизма, – по сути вырожденного манипулятора (рис. 3).



Рис. 3. Варианты реализации КШШ типа «колесо на ноге»

В этой связи был выполнен анализ существующих схем КШШ, целью которого было определить необходимое и достаточное количество приводов шагания для построения рассматриваемого исследовательского лунохода и экспериментального макета КШШ.

Самый простой способ построения КШШ состоит в том, чтобы добавить по одному приводу шагания на каждый опорный элемент (колесо), как показано на рис. 3,а.

Уже такая схема принципиально позволяет реализовать режим колёсного шагания. Но при этом в общем случае не имеется возможности движения колесом по заданной траектории, – например, по прямой вдоль поверхности или более сложным образом. В результате, процесс шагания получается с неминуемым колебанием углового положения корпуса.

Кроме того, проблемой с точки зрения управления становится взаимовлияние одних управляемых параметров на другие. В качестве основных управляемых параметров при движении КШШ рассматриваются:

- ◆ ориентация корпуса – крен-тангаж (дифферент);
- ◆ положение центра масс системы относительно опорного многоугольника;
- ◆ углы контакта колёс с опорной поверхностью;
- ◆ распределение нагрузки по колёсам;
- ◆ величина клиренса, высоты корпуса, а также ширина колеи.

Для устранения отмеченных недостатков необходимо увеличивать количество приводов шагания на каждый опорный элемент. Так, уже два привода позволяют реализовать необходимую траекторию движения колеса в продольной плоскости механизма шагания (рис. 3,б). Дальнейшее увеличение степеней подвижности механизма шагания приводит к дополнительному увеличению кинематических и функциональных возможностей шасси (рис. 3,в). Но обоснованность расширения этих возможностей наряду с усложнением приводной системы, ростом нагрузки на вычислительный модуль бортовой системы управления, а также компоненты системы энергопитания требуют отдельного анализа в каждом конкретном случае с учётом общих требований, предъявляемых к роботу.

Руководствуясь этими соображениями в рамках настоящей работы для построения макета КШШ было принято решение остановиться на варианте двухстепенного механизма шагания, так как дальнейшее повышение числа приводов связано с существенным усложнением и удорожанием системы, а также упомянутым ростом требований к служебным системам, что является весьма чувствительным вопросом при проектировании лунохода.

Так как в качестве объекта предполагаемого применения КШШ рассматриваются планетоходы, то особую важность приобретает критерий энергоэффективности, в особенности, на низких скоростях. Высокая энергоэффективность обуславливается двумя основными признаками:

- ◆ наличием в составе КШШ классических колёс для наиболее экономичного передвижения везде, где проходимость колёс достаточна (существуют варианты применения опорно-двигательных элементов отличных от простых колёс),
- ◆ статической устойчивостью схемы (в том числе, при совершении шага).

Нетрудно убедиться, что выбранная схема КШШ удовлетворяет и данному критерию по обоим пунктам.

Конструктивное построение исследовательского КШШ. В качестве базовой конструкции КШШ предполагается использовать четырёхопорное полноприводное и полностью управляемое колёсное шасси с двухступенными механизмами шагания на каждом из опорно-двигательных модулей (ОДМ). Внешний вид КШШ показан на рис. 4.

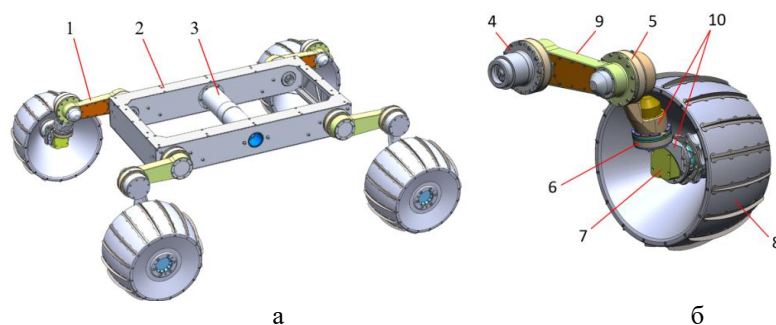


Рис. 4. Общая конструктивная схема КШШ: 1 – ОДМ; 2 – рама; 3 – механизм синхронизации; 4 – привод бедра (ПБ); 5 – привод колена (ПК); 6 – привод поворота колеса (РП); 7 – тяговый привод колеса (ТП); 8 – колесо; 9 – рычаг бедра; 10 – рычаг голени

Шасси предусматривает два режима работы: режим активной подвески, реализуемый за счёт механизмов шагания, и режим пассивной подвески, для реализации которого шасси оснащено системой тяг, обеспечивающих кинематически определённые связи между всеми ОДМ. Смена режимов работы шасси осуществляется за счёт специальных механизмов блокировки/разблокировки движения ОДМ относительно рамы.

На рис. 5 показаны основные возможности шасси при работе КШШ в режиме активной подвески, в том числе, преодоление уклонов с углом наклона поверхности до 30° в колёсно-шагающем режиме, движение через препятствия высотой до 500 мм, преодоление канав (рвов) шириной до 400 мм, а также в режиме пассивной подвески на примере движения через одиночное препятствие высотой 380 мм.

Конструкция КШШ предусматривает ряд дополнительных функциональных возможностей, таких как:

- ◆ изменение клиренса (дорожного просвета) от максимального значения с вертикально развёрнутыми рычагами ОДМ до нулевого, соответствующего посадке дна корпуса КШШ на грунт,
- ◆ изменение колёсной базы в диапазоне от -700 до +400 мм относительно номинального положения, показанного на рис. 4,а,
- ◆ разворот на месте за счёт качения колёс по окружности,
- ◆ движение крабовым ходом.

Конструкция КШШ предусматривает ряд дополнительных функциональных возможностей, таких как:

- ◆ изменение клиренса (дорожного просвета) от максимального значения с вертикально развёрнутыми рычагами ОДМ до нулевого, соответствующего посадке дна корпуса КШШ на грунт;

- ◆ изменение колёсной базы в диапазоне от -700 до +400 мм относительно номинального положения, показанного на рис. 4,а;
- ◆ разворот на месте за счёт качения колёс по окружности;
- ◆ движение крабовым ходом.



Рис. 5. Преодоление КШШ различных типов препятствий

Разработка алгоритмов движения. КШШ в широком смысле теоретически дают возможность реализации трёх режимов движения: чисто колёсного (как обычное колёсное шасси без задействования механизмов шагания), чисто шагающего (приводы колёс зафиксированы) и гибридного (одновременно функционируют и колёса, и приводы шагания). Вопросы управления КШШ продолжают быть актуальными в научном сообществе. При этом в научной литературе сформировалось уже достаточно много общепринятых подходов, в частности, повсеместное применение трёхуровневой системы управления [22], с редкими нюансами, а также описание движения при помощи паттернов, известных также, как типовые операции (ТОП) [23]. Такие паттерны существуют для всех трёх перечисленных возможных режимов работы КШШ (колёсного, шагающего, гибридного).

Паттерны колёсного режима. Для колёсного режима применяемые паттерны, наверное, очевидны, и не требуют подробной на них остановки. В целом, управление движением в колёсном режиме сводится к трём принципиально различным паттернам:

- ◆ «синхронному» (синхронное изменение ориентации управляемых колёс на одинаковый угол и направление),
- ◆ симметричному (маневрирование с ориентацией управляемых колёс симметрично относительно поперечной оси платформы),
- ◆ танковому ходу (маневрирование за счёт разницы угловых скоростей колёс противоположных бортов) [24].

Паттерны шагающего режима. В шагающем режиме известно огромное количество паттернов, среди которых:

- ◆ простое шагание всеми ОДМ поочередно,
- ◆ рысь – когда шагают одновременно диагональные конечности,
- ◆ различные прыжковые варианты – подскокивание, продольные прыжки, непрерывные сальто – вперёд или назад [25].

Паттерны гибридного режима. В гибридном (колёсно-шагающем) режиме наиболее распространены циркульные ходы [26, 27] и режим активной подвески, в котором колёса находятся в контакте с поверхностью, а задача состоит в поддержании заданного крена, дифферента, клиренса и прочих параметров [28, 29]. Преодоление ступеней, прямых и наклонных, также обычно выполняют специальным паттерном [30]. Возможны также одиночный [31] и побортной безотрывный шаг. Алгоритмы управления через динамические паттерны в настоящее время являются темой активных исследований, подробное представление о которой даёт работа [32].

Построение сценариев движения. Чтобы строить из паттернов сценарии, шасси должно быть способно эти отдельные паттерны выполнять, обеспечивая устойчивость и точность движения. Для исследуемого шасси было разработано три группы ТОП. Для каждой ТОП разработаны регуляторы на основе обратной модели динамики (см. выражения (1) и (2)).

Первую группу составляют пошарнирные режимы, в том числе управление шарниром в общем виде (паттерн «Joint») и несколько производных паттернов, среди которых:

- ◆ переход в домашнее положение (номинальную конфигурацию) («Home»);
- ◆ прямое управление поворотом колёс («Steer»);
- ◆ прямое управление скоростью колёс («Drive»);
- ◆ поворот на месте («SpotTurn»).

$$\tau_{md} = M(q)v + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (1)$$

$$v = \ddot{q}_d + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q), \quad (2)$$

где τ_{md} – вектор задающих значений моментов шарниров, v – вектор управляющих воздействий, M – матрица инерции, C – матрица коэффициентов центробежных и Кориолисовых сил, $g(q)$ – вектор гравитационных сил, q, \dot{q} – фактическое положение и скорость шарниров, $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ – желаемые значения положений, скоростей и ускорений шарниров, K_P, K_D – матрицы коэффициентов ПД-регулятора.

Вторая группа алгоритмов отвечает за управление отдельным ОДМ, а именно – его рабочей точкой. Разработаны регуляторы для скоростного, позиционного, траекторного и гибридного сило-позиционного режимов. Для траекторного режима закон управления описывается следующими уравнениями:

$$\bar{v}_d = k_v(p_d - p_a), \quad (3)$$

$$v_d = \bar{v}_d + k_{ve}(\bar{v}_d - v_a), \quad (4)$$

$$\dot{q}_d = J^{-1}v_d \quad (5)$$

где \bar{v}_d – номинальное значение скорости для компенсации ошибки по положению, p_d, p_a – желаемое и фактическое положение шасси, v_d – задающее значение скорости с учётом компенсации ошибки по отработке скорости, k_v, k_{ve} – коэффициенты регулятора, \dot{q}_d – задающее значение скорости шарниров, J – матрица Якоби ОДМ.

Отличие законов управления для прочих режимов заключается в расчёте номинальной скорости \bar{v}_d .

Отдельно реализованы ТОП безотрывный шаг («SlideStep») и простой (отрывный) шаг («Step»). Безотрывный шаг обеспечивает движение центра колеса вперёд, в то время как скорость вращения колеса задаётся исходя из условия отсутствия проскальзывания, а в вертикальной проекции обеспечивается контроль усилия.

Безотрывный шаг может выполняться одним ОДМ, либо парой. Если это пара диагональная – реализуется безотрывный вариант паттерна «рысь», если пары располагаются по осям – вариант циркульного хода. Отрывный шаг состоит из трёх движений: движения вверх и вперёд выполняются в позиционном режиме, а вниз – с контролем усилия.

Таким образом, первые две группы ТОП описывают движение отдельных узлов и подсистем КШШ.

Для управления на уровне шасси в целом разработана третья группа ТОП, включающая колёсные – симметричный «PlaneMotion» и синхронный «CrabLine», режим управления конфигурацией «Posture», а также два режима соответствующие совмещению управления конфигурацией с каждым из колёсных режимов («FullMotion» и «CrabMotion» соответственно). Режим «Posture» обеспечивает управление креном, дифферентом, высотой шасси, а также вылетом всех ОДМ, и, как следствие, – клиренсом и колёсной базой. Если задача ограничивается стабилизацией всех этих параметров, то результатом является режим активной подвески.

Для отработки алгоритмов было разработано два механизма создания сценария – через скриптовый файл и через графический интерфейс. В обоих случаях результатом является таблица, каждая строка которой характеризует соответствующую ТОП.

Механизм исполнения сценария показан на рис. 6,а, для перехода к следующей ТОП необходимо успешное выполнение условия завершения предыдущей ТОП.

Пример сценария, составленного из разработанных ТОП, представлен на рис. 6,б.

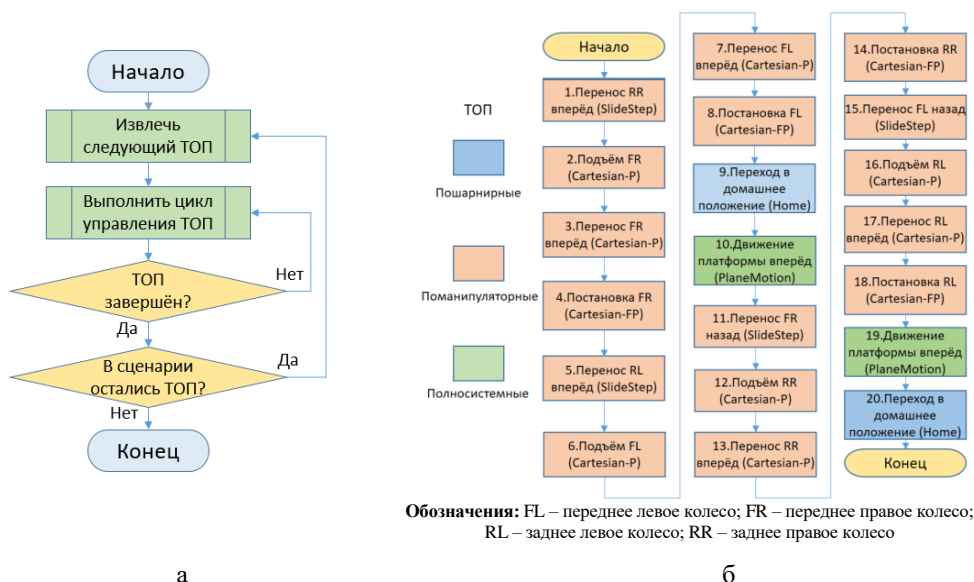


Рис. 6. Механизм исполнения (слева) и пример сценария (справа)

Построение компьютерной модели КШШ. Проверка работоспособности алгоритмов движения и концепции шасси в целом проводилась путём моделирования. Модели КШШ были разработаны в двух вариантах: первый в среде Matlab-ADAMS, второй в среде Matlab-Simscapе Multibody, где в ADAMS и в модуле Simscapе Multibody моделируется физика движения шасси, а в Matlab-Simulink реализованы алгоритмы управления. От моделей требовалось передать основные физические взаимодействия – влияние силы тяжести, сил динамики и контактных усилий. Разница между двумя вариантами «физических» (динамических) моделей (ADAMS, Simscapе Multibody) заключается в различных подходах к описанию и моделированию (симуляции) процесса взаимодействия колеса с опорной поверхностью. Впоследствии при сравнении моделей с макетом планируется получить некоторую верифицированную модель, которую можно было бы использовать в проектировании других подобных систем.

На рис. 7,а показана структура модели в Matlab-Simulink. В ней за управление отвечают два блока – диспетчер задач «Script Manager» и непосредственно регулятор исполнения движения «Controller». Внешний вид динамической модели, подготовленной в MSC ADAMS показан на рис. 7,б. Управление моделью осуществляется путём передачи задающего момента шарниров в модель динамики. В ADAMS управляющий момент, таким образом, подаётся непосредственно на соответствующие тела в виде силовых компонентов «Однокомпонентный момент» (Single-component Torque).

Среди предполагаемых режимов функционирования шасси можно выделить два наиболее характерных: поддержание ориентации корпуса в режиме активной подвески и подъём на уклон в режиме безотрывного шагания.

Для проверки разработанных алгоритмов в части реализации режима активной подвески было проведено два компьютерных эксперимента, в которых задача заключалась в преодолении некоторой эстакады (подъём-плато-спуск), как показано слева на рис. 8.

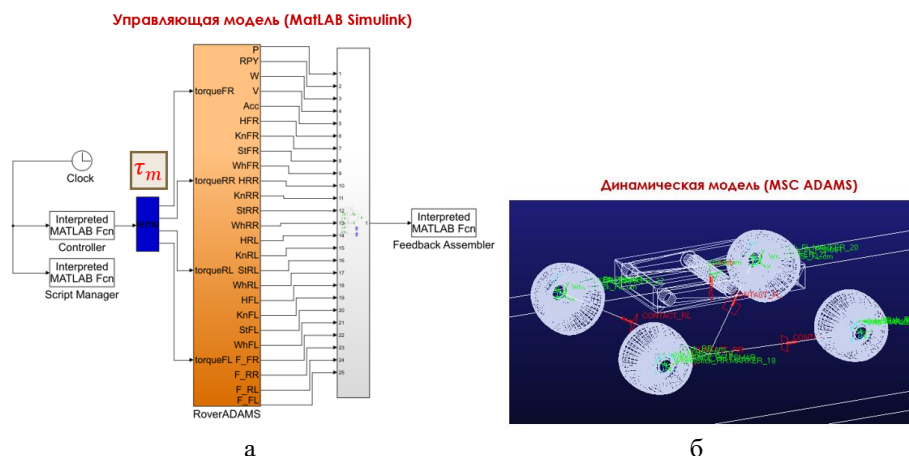


Рис. 7. Компьютерная имитационная модель КШШ

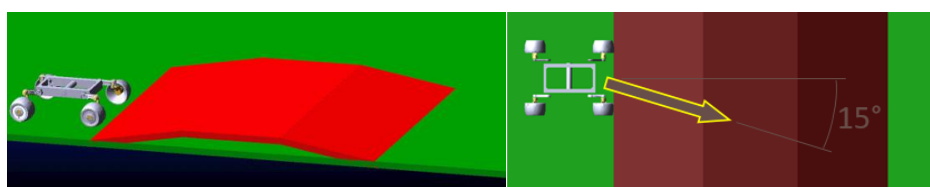


Рис. 8. Схемы компьютерных экспериментов движения КШШ в режиме активной подвески (слева преодоление препятствия вдоль линии наибольшего подъёма, справа – под углом к линии наибольшего подъёма)

В первом случае задача состояла во фронтальном преодолении горки в направлении максимального подъёма. На рис. 9 слева показано движение в режиме без стабилизации корпуса, справа – со стабилизацией корпуса.

Управление движением КШШ на рис. 9 выполняется с учётом допущения, что известны все координаты и вектор скорости платформы, а также силы контакта колёс с поверхностью. В обеспечение получения данных параметров на реальном макете в создаваемом КШШ планируется добавить оценку скорости и перемещения платформы с учётом проскальзывания по данным экстероцептивных датчиков, а также оценку сил контакта с поверхностью, для чего в конструкции предусмотрена установка силомоментных датчиков на колёсах.

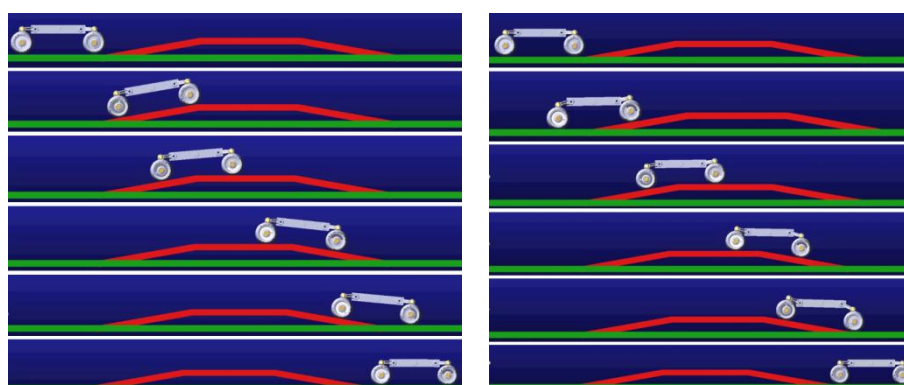


Рис. 9. Движение КШШ через препятствие «эстакада» без стабилизации корпуса (слева) и со стабилизацией корпуса (справа)

На рис. 10 показаны графики изменения дифферента и скорости платформы во время движения по рис. 9. Полученные результаты подтверждают работу алгоритма, демонстрируя наличие стабилизации корпуса в ходе движения, хотя и не полностью (отклонение от нулевого положения по графику на рис. 10 составляет около $\pm 1,5^\circ$). Цель более строгого поддержания положения корпуса (построения более точного регулятора) на данный момент представляется нецелесообразной, так как предварительно необходимо произвести верификацию модели. По графикам скорости видно, что в обоих режимах завершение движения происходит практически одновременно, то есть, выполнение сценария происходит без потерь или выигрыша времени.

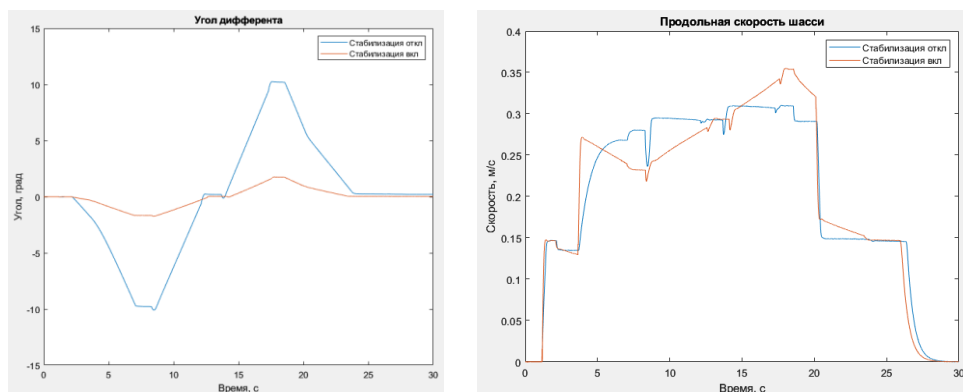


Рис. 10. Графики изменение дифферента корпуса (слева) и скорости КШШ (справа) при движении через препятствие «эстакада» вдоль линии наибольшего подъёма

Во втором случае (рис. 8, справа), при изменении тактики преодоления уклона, когда движение происходит под некоторым углом к направлению максимального подъёма, дополнительно присутствует ещё и некоторый выигрыш по времени, как следует из графиков на рис. 11. При этом, в отличие от случая по рис. 9, 10, который в общем случае является «плоской» схемой движения, в данном «неплоском» варианте стабилизация осуществляется по двум координатам: и по дифференту, и по углу крена (рис. 11, слева). Таким образом, полученные результаты подтвердили работоспособность алгоритма и в этом более общем случае движения.

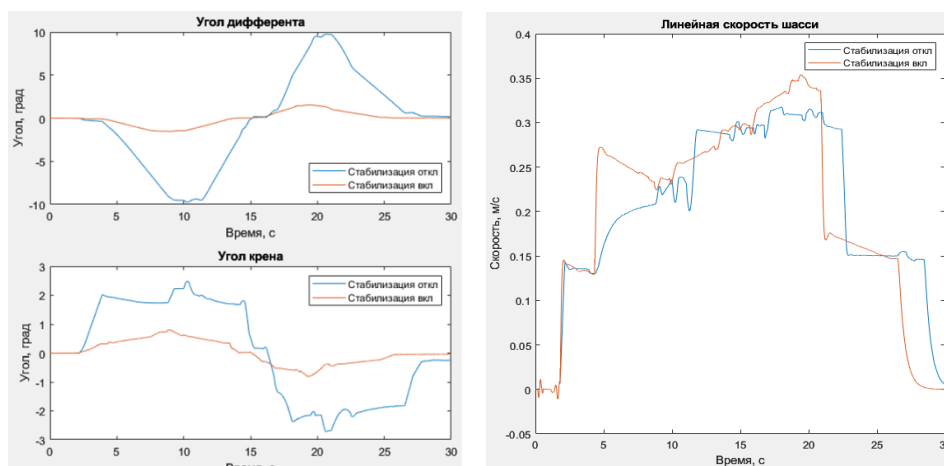


Рис. 11. Графики изменение углов наклона корпуса (слева) и скорости КШШ (справа) при движении через препятствие «эстакада» под углом к линии наибольшего подъёма

Преодоление уклонов в режиме безотрывного шагания заключается в поочередном выносе вперёд колёсных опор с их одновременным перекачиванием по поверхности при заблокированных остальных колёсах, не работающих в этот момент, и в переносе на заключительном этапе вперёд корпуса за счёт согласованной работы всех приводов шагания при неподвижных относительно поверхности колёсах, выполняющих роль опорных элементов. На рис. 12 представлены фрагменты моделирования данного режима, иллюстрирующие последовательность этапов совершения одного шага.

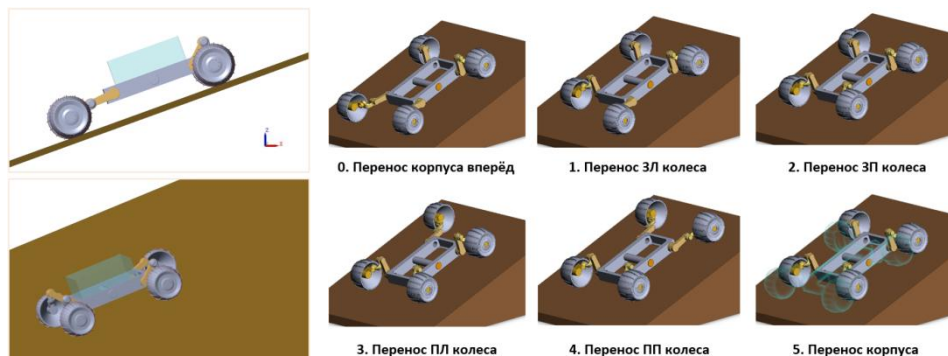


Рис. 12. Фрагменты моделирования колёсно-шагающего режима движения КШШ

Проверка алгоритма данного колёсно-шагающего режима проводилась на модели, построенной в пакете Matlab-Simscapе Multibody. Сам сценарий также задавался в Matlab и готовился на основе разработанных ТОП. Моделирование подтвердило общую работоспособность алгоритма движения. На рис. 13 показаны графики изменения во времени за период двух шагов углов поворота звеньев бедра и голени каждого из ОДМ.

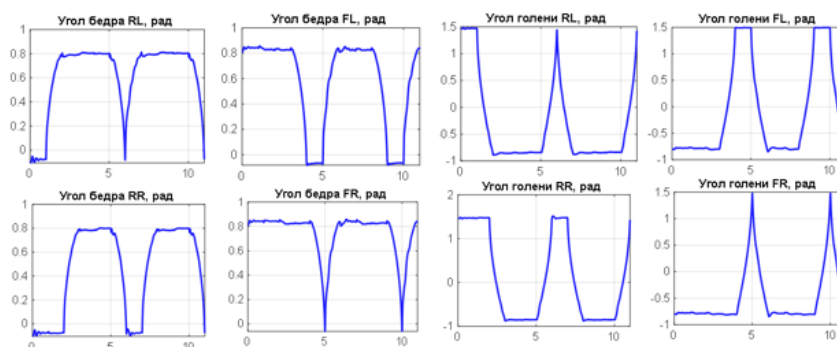


Рис. 13. Изменение углов поворота звеньев ОДМ в колёсно-шагающем режиме движения на уклоне

Заключение. Исследования, описанные в настоящей статье, направлены на разработку алгоритмов автоматического управления движением колёсно-шагающего шасси мобильного робота-планетохода. Конечная цель проекта, в рамках которого выполнено настоящее исследование, заключается в экспериментальной отработке разработанных алгоритмов и, в общем смысле, – в отработке методических подходов к разработке алгоритмов управления на основе экспериментально верифицированных компьютерных моделей, что создаст основу для повышения качества проектирования систем передвижения будущих луноходов, имеющих возможность реализации различных вариантов колёсно-шагающих режимов движения.

В работе дано краткое обоснование и описана общая концепция многостепенного КШШ, разрабатываемого в качестве объекта будущих экспериментальных исследований. Данная концепция, условно отнесённая к группе КШШ типа «колесо на ноге», строится

на основе четырёх однотипных ОДМ, оснащённых двухступенным механизмом шагания. Функциональные возможности рассматриваемой схемы КШШ позволяют реализовывать алгоритмы преодоления таких препятствий как песчаные уклоны с углами наклона, соответствующими углам естественного откоса грунта (30° - 32°), преодолевать канавы и одиночные препятствия типа камней высотой, превышающей диаметр колеса, реализовывать различные варианты алгоритмов маневрирования.

На основании функциональных возможностей КШШ и теоретических проработок предложена методика построения сценариев его функционирования на основе типовых операций из набора предварительно разработанных для КШШ выбранного типа типовых операций (так называемых, паттернов движения). Предложена методика построения компьютерной имитационной модели КШШ. Проверка разработанных алгоритмов на имитационной модели подтвердила их работоспособность и адекватность.

Дальнейшие направления исследований направлены на подготовку и проведение экспериментальных работ как на отдельных элементах, так и на КШШ в целом, с целью идентификации и уточнения параметров имитационных моделей, а также отработки разработанных алгоритмов как на верифицированных моделях, так и на макете КШШ.

Работа выполнена в рамках государственного задания на 2026 г. № 075- 00558-26-00 от 12.01.2026 на тему «Разработка и экспериментальные исследования алгоритмов автоматического управления движением колёсно-шагающего шасси мобильного робота для передвижения в экстремальных напланетных условиях и при неопределённости характеристик подстилающей поверхности» (FNRG-2025-0018) 1024061000019-4-2.2.2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев А.В. [и др.]. Разработка предложений по составу и техническому облику группировки мобильных РТС для реализации программы исследования и освоения Луны // Сб. тезисов 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2020. – С. 146-149.
2. Планетоходы / под ред. А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
3. Li C. et al. Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side // Space Science Reviews. – 2021. – Vol. 217, No. 2. – P. 35.
4. Ghosh R. et al. Path Planning for the Pragyan Rover: Experiences and Challenges // 2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo). – IEEE, 2024. – P. 70-75.
5. Передвижение по грунтам Луны и планет / под ред. А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
6. Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 / под ред. В.Л. Барсукова. – М.: Наука, 1978. – Т. 2. – 184 с.
7. Черкасов И.И., Кемурджиан А.Л., Шварёв В.В., Громов В.В. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с.
8. Bruzzone L., Nodehi S.E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review // Machines. – 2022. – Vol. 10, Issue 8. – Article 648. – DOI: 10.3390/machines10080648,
9. Маленков М.И., Волов В.А., Лазарев Е.А. Методы и результаты анализа качества ходовой части планетоходов // Вестник машиностроения. – 2016. – № 7. – С. 6-13.
10. Почежерцев А.Г. [и др.]. Исследование возможных причин неустойчивого поведения колёсного РТК на наклонной поверхности с использованием компьютерной модели // Тр. 31-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб., 2020. – С. 63-72.
11. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots // Proceedings of the International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics». – SaintPetersburg: ООО "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019. – P. 559-567.
12. Васильев А.В., Шардыко И.В. Разработка и моделирование многостепенного колёсно-шагающего шасси лунохода // Сб. тезисов 36-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». – СПб.: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2025. – С. 330-333.
13. Bjelonic M. [et al.]. A Survey of Wheeled-Legged Robots // Robotics in Natural Settings. CLAWAR 2022: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol.530 / ed. by J.M. Cascalho [et al.]. – Springer, 2022. – P. 83-94. – DOI: 10.1007/978-3-031-15226-9_11.

14. *García J.M., Duarte F.G.* Mobile rolling robots designed to overcome obstacles: A review // *Forces in Mechanics*. – 2024. – Vol. 16, No. 100283. – DOI: 10.1016/j.finmec.2024.100283.
15. *Yakubu M. [et al.]*. A novel mobility concept for terrestrial wheel-legged lunar rover // *IEEE Access*. – 2025.
16. Flexibility and granular terrain adaptability of a linkage-based wheel-legged robot: LinkWhег // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2025.
17. *Yang H. [et al.]*. Adaptive Active Compliance Control for Wheel-Legged Vehicles on Uneven Roads Based on a Parallel Integrated Framework // *2024 8th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. – IEEE, 2024. – P. 1-6.
18. *Добрецов Р.Ю., Попов Д.С., Прямыцын И.Б.* Обоснование базовых параметров реконфигурируемого шасси с планетарно-колёсным движителем // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 232-239.
19. *Bouton A. [et al.]*. Experimental study of alternative rover configurations and mobility modes for planetary exploration // *2023 IEEE Aerospace Conference*. – IEEE, 2023. – P. 1-13.
20. *Pan D. [et al.]*. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover // *Scientia Sinica Technologica*. – 2022. – Vol. 52, No. 2. – P. 278-291.
21. *Skibbe J., Barthelmes S., Buse F.* Locomotion control functions for the active chassis of the MMX rover // *2021 IEEE Aerospace Conference, AERO 2021*. – 2021.
22. *Barthelmes S., Konigorski U.* Model-based chassis control system for an over-actuated planetary exploration rover // *At-Automatisierungstechnik*. – 2020. – Vol. 68, No. 1. – P. 58-71.
23. *De Luca A. [et al.]*. Autonomous obstacle crossing strategies for the hybrid wheeled-legged robot centauro // *Frontiers in Robotics and AI*. – 2021. – Vol. 8. – P. 721001.
24. *Lin C.J. [et al.]*. Design and implementation of a 4WS4WD mobile ro-bot and its control applications // *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. – IEEE, 2013. – P. 235-240.
25. *Zhou Q. [et al.]*. Max: A wheeled-legged quadruped robot for multimodal agile locomotion // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 21, No. 4. – P. 7562-7582.
26. *Pan D. [et al.]*. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover // *Scientia Sinica Technologica*. – 2022. – Vol. 52, No. 2. – P. 278-291.
27. *Cao C. [et al.]*. Push-pull locomotion: Increasing travel velocity in loose regolith via induced wheel slip // *Journal of Terramechanics*. – 2023. – Vol. 110. – P. 87-99.
28. *Cordes F., Kirchner F., Babu A.* Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain // *Journal of Field Robotics*. – 2018. – Vol. 35, No. 7. – P. 1149-1181.
29. *Bouloubasis A.K., McKee G.* VOL.A Multitasking Surface Exploration Rover System // *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*. – IntechOpen, 2007.
30. *Zhu B. [et al.]*. Probabilistic path planning for wheel-legged rover in dense environment based on extended MDP and configuration topology analysis // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2025.
31. *Halme A. [et al.]*. WorkPartner: interactive human-like service robot for outdoor applications // *The international journal of robotics Research*. – 2003. – Vol. 22, No. 7-8. – P. 627-640.
32. *Bjelonic M.* Planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots: diss. – ETH Zurich, 2021.

REFERENCES

1. *Vasil'ev A.V. [i dr.]*. Razrabotka predlozheniy po sostavu i tekhnicheskomu obliku gruppirovki mobil'nykh RTS dlya realizatsii programmy issledovaniya i osvoeniya Luny [Development of proposals for the composition and technical design of a group of mobile robotic systems for the implementation of the lunar exploration and development program], *Sb. tezisov 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"]. Saint-Petersburg: IPTS OOO «Politehnika-print», 2020, pp. 146-149.
2. *Planetokhody* [Planet rovers], ed. by A.L. Kemurdzhiana. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 400 p.
3. *Li C. et al.* Overview of the Chang'e-4 mission: Opening the frontier of scientific exploration of the lunar far side, *Space Science Reviews*, 2021, Vol. 217, No. 2, pp. 35.
4. *Ghosh R. et al.* Path Planning for the Pragyan Rover: Experiences and Challenges, *2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo)*. IEEE, 2024, pp. 70-75.
5. *Peredvizhenie po gruntam Luny i planet* [Lunar and planets soil locomotion], ed. by A.L. Kemurdzhiana. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 272 p.
6. *Peredvizhnaya laboratoriya na Lune Lunokhod-1* [Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1], ed. by V.L. Barsukova. Moscow: Nauka, 1978, Vol. 2, 184 p.

7. Cherkasov I.I., Kemurdzhian A.L., Shvarev V.V., Gromov V.V. Avtomaticheskie stantsii dlya izucheniya poverkhnostnogo pokrova Luny [Automatic stations for Lunar surface layer survey]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 200 p.
8. Bruzzone L., Nodehi S.E., Fanghella P. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review, *Machines*, 2022, Vol. 10, Issue 8, Article 648. DOI: 10.3390/machines10080648,
9. Malenkov M.I., Volov V.A., Lazarev E.A. Metody i rezul'taty analiza kachestva khodovoy chasti planetokhodov [Methods and results of analysis of the quality of the chassis of planetary rovers], *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2016, No. 7, pp. 6-13.
10. Pochezherstev A.G. [i dr.]. Issledovanie vozmozhnykh prichin neustoychivogo povedeniya kolesnogo RTK na naklonnoy poverkhnosti s ispol'zovaniem komp'yuternoy modeli [Study of possible causes of unstable behavior of a wheeled mobile robot on an inclined surface using a computer model], *Tr. 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 31-th International scientific and technical conference «Extreme robotics»]. Saint Petersburg, 2020, pp. 63-72.
11. Vasiliev A.V., Shardyko I.V. Analysis, detection, reaction and prevention of potential critical situations for light-weight mobile robots, *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference «Extreme Robotics»*. Saint Petersburg: OOO "Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Gangut», 2019, pp. 559-567.
12. Vasil'ev A.V., Shardyko I.V. Razrabotka i modelirovanie mnogostepennogo kolesno-shagayushchego shassi lunokhoda [Design and simulating of an articulated wheeled-legged chassis of the lunar rover], *Sb. tezisov 36-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika»* [Proceedings of the 36th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics"]. Saint Petersburg: IPTS OOO «Politekhnika-print», 2025, pp. 330-333.
13. Bjelonic M. [et al.]. A Survey of Wheeled-Legged Robots // Robotics in Natural Settings. CLAWAR 2022: Lecture Notes in Networks and Systems. Vol.530, ed. by J.M. Cascalho [et al.]. Springer, 2022, pp. 83-94. DOI: 10.1007/978-3-031-15226-9_11.
14. Garcia J.M., Duarte F.G. Mobile rolling robots designed to overcome obstacles: A review, *Forces in Mechanics*, 2024, Vol. 16, No. 100283. DOI: 10.1016/j.finmec.2024.100283.
15. Yakubu M. [et al.]. A novel mobility concept for terrestrial wheel-legged lunar rover, *IEEE Access*, 2025.
16. Flexibility and granular terrain adaptability of a linkage-based wheel-legged robot: LinkWhег, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025.
17. Yang H. [et al.]. Adaptive Active Compliance Control for Wheel-Legged Vehicles on Uneven Roads Based on a Parallel Integrated Framework, *2024 8th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. IEEE, 2024, pp. 1-6.
18. Dobretsov R.Yu., Popov D.S., Pryamitsyn I.B. Obosnovanie bazovykh parametrov rekonfiguriruemogo shassi s planetarno-kolesnym dvizhitelem [Justification of the basic parameters of a reconfigurable chassis with a planetary-wheel drive], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2023, Vol. 11, No. 3, pp. 232-239.
19. Bouton A. [et al.]. Experimental study of alternative rover configurations and mobility modes for planetary exploration, *2023 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2023, pp. 1-13.
20. Pan D. [et al.]. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover, *Scientia Sinica Technologica*, 2022, Vol. 52, No. 2, pp. 278-291.
21. Skibbe J., Barthelmes S., Buse F. Locomotion control functions for the active chassis of the MMX rover, *2021 IEEE Aerospace Conference, AERO 2021*, 2021.
22. Barthelmes S., Konigorski U. Model-based chassis control system for an over-actuated planetary exploration rover, *At-Automatisierungstechnik*, 2020, Vol. 68, No. 1, pp. 58-71.
23. De Luca A. [et al.]. Autonomous obstacle crossing strategies for the hybrid wheeled-legged robot centauro, *Frontiers in Robotics and AI*, 2021, Vol. 8, pp. 721001.
24. Lin C.J. [et al.]. Design and implementation of a 4WS4WD mobile ro-bot and its control applications, *2013 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. IEEE, 2013, pp. 235-240.
25. Zhou Q. [et al.]. Max: A wheeled-legged quadruped robot for multimodal agile locomotion, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 4, pp. 7562-7582.
26. Pan D. [et al.]. Design and verification of the active suspension mobility system of the Zhurong Mars rover, *Scientia Sinica Technologica*, 2022, Vol. 52, No. 2, pp. 278-291.
27. Cao C. [et al.]. Push-pull locomotion: Increasing travel velocity in loose regolith via induced wheel slip, *Journal of Terramechanics*, 2023, Vol. 110, pp. 87-99.
28. Cordes F., Kirchner F., Babu A. Design and field testing of a rover with an actively articulated suspension system in a Mars analog terrain, *Journal of Field Robotics*, 2018, Vol. 35, No. 7, pp. 1149-1181.

29. *Bouloubasis A.K., McKee G. VOL.A Multitasking Surface Exploration Rover System, Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots. IntechOpen, 2007.*
30. *Zhu B. [et al.]. Probabilistic path planning for wheel-legged rover in dense environment based on extended MDP and configuration topology analysis, IEEE Transactions on Robotics, 2025.*
31. *Halme A. [et al.]. WorkPartner: interactive human-like service robot for outdoor applications, The international journal of robotics Research, 2003, Vol. 22, No. 7-8, pp. 627-640.*
32. *Vjelonic M. Planning and control for hybrid locomotion of wheeled-legged robots: diss. ETH Zurich, 2021.*

Васильев Андрей Викторович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: andrey@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; к.т.н.; с.н.с.

Шардыко Игорь Вячеславович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125526093; н.с.

Жуков Юрий Александрович – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125524700; ведущий программист.

Vasiliev Andrey Viktorovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: andrey@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Shardyko Igor Vyacheslavovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: i.shardyko@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125526093; researcher.

Zhukov Yuriy Alexandrovich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics; e-mail: yu.zhukov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125524700; leading programmer.

УДК 629.584

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-120-135

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов, А.Ю. Родионов, Р.П. Василенко, М.О. Панчук
МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА И АНПА,
ОСНАЩЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ КАНАЛОМ СВЯЗИ,
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Выполнение автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) инспекционных и манипуляционных операций под контролем оператора ограничено низкой пропускной способностью гидроакустического канала связи, не позволяющей передавать видеопоток и качественные фотоизображения в реальном времени. В то же время существующие методы автоматического распознавания целевых объектов бортовыми системами технического зрения АНПА не гарантируют точного определения местоположения и формы объекта при наличии на нем дефектов (заиливание, биологические обрастания, механические повреждения). Для решения указанной проблемы в статье ставится задача разработки метода, обеспечивающего посредством низкопропускного гидроакустического канала связи информационное взаимодействие оператора с АНПА для оценки оператором качества распознавания целевых объектов с последующим формированием целеуказаний для аппарата и его бортового манипулятора. В основе метода используется алгоритм идентификации объектов с дефектами, использующий модифицированное ИСР-совмещение облаков точек с исключением дефектных областей и характерных особенностей (ХО). Выявленные ХО и области дефектов преобразуются в компактный набор геометрических примитивов, передаваемый оператору по гидроакустическому каналу связи с АНПА. На основе полученной информации, поступающей от АНПА телеметрии, а также эталонной трёхмерной модели объекта графический интерфейс визуализирует сканируемую сцену, позволяя оператору оценить точность распознавания. Натурные испытания метода проводились с использованием гидроакустического модема производства ИПМТ ДВО РАН и бортового вычислителя NVIDIA Jetson TX2. Передаваемый в