

УДК 629.3.033

EDN: LDHONZ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОДВИЖНОСТИ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ТРЕХКАТКОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А.С. ДьяковORCID: 0009-0005-7787-2354 e-mail: Diakov_as@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Д.С. Федоров**ORCID: 0009-0006-6141-7864 e-mail: dfedorov@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Н.Е. Рахимжанов**ORCID: 0009-0003-7877-767X e-mail: nurjanrakimjanov@mail.ruВоенная академия материально-технического обеспечения
Омск, Россия

Разработан алгоритм обеспечения заданного уровня подвижности на этапе проектирования псевдошагающего робота с трехкатковым движителем. Оценка ходовых качеств исследуемого робота производится на основании имитационного математического моделирования его движения с использованием программных комплексов исследования динамики систем твердых тел. Требования к подвижности сформулированы в виде препятствий виртуального полигона, представлены результаты моделирования преодоления этих препятствий – нагрузки, действующие на движитель. Выбраны параметры приводов и движителя, обеспечивающие прохождение роботом всех препятствий. Определен отклик конструкции на изменение управляющего сигнала: время разгона до максимальной скорости, время торможения до полной остановки, максимальная скорость робота. Спрогнозировано отклонение робота от прямого курса при движении по косоугору. Получена картина нагрузок и прогноз проходимости робота, сделан вывод о соответствии робота предъявленным к нему требованиям.

Ключевые слова: мобильный робот, движитель, ходовая система, проходимость, подвижность, виртуальные испытания, прогнозирование, моделирование, препятствие, виртуальный полигон.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дьяков, А.С. Комплексная оценка подвижности виртуальной модели мобильного робота с трехкатковым движителем / А.С. Дьяков, Д.С. Федоров, Н.Е. Рахимжанов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 82-93. EDN: LDHONZ

INTEGRATED TECHNOLOGY FOR ENSURING STABILITY OF A ROBOT MODEL WITH A THREE-WHEEL PROPULSION

A.S. DyakovORCID: 0009-0005-7787-2354 e-mail: Diakov_as@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***D.S. Fedorov**ORCID: 0009-0006-6141-7864 e-mail: dfedorov@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

N.E. Rakimzhanov

ORCID: **0009-0003-7877-767X** e-mail: **nurjanrakimjanov@mail.ru**

Branch of VA MTO in Omsk

Omsk, Russia

Abstract. The article presents an algorithm for ensuring a given level of mobility of a pseudo-walking robot with a three-roller propulsion unit at the design stage. The driving performance of the robot under study is assessed on the basis of mathematical simulation of its movement using software packages for studying the dynamics of rigid body systems. The mobility requirements are formulated in the form of obstacles of a virtual test site. The results of modeling the overcoming of these obstacles – the loads acting on the propulsion unit are presented. The parameters of the drives and propulsion unit were selected to ensure that the robot passes all obstacles. The response of the structure to a change in the control signal is determined: acceleration time to maximum speed, braking time to a complete stop, maximum speed of the robot. The robot's deviation from the straight course when moving along a slope was predicted. A picture of the loads and a forecast of the robot's cross-country ability were obtained, and it was concluded that the robot meets the stated requirements.

Key words: mobile robot, propulsion system, cross-country ability, mobility, virtual testing, forecasting, modeling, obstacle, virtual test site.

FOR CITATION: A.S. Dyakov D.S. Fedorov N.E. Rakimzhanov. Integrated technology for ensuring stability of a robot model with a three-wheel propulsion. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 82-93. EDN: LDHONZ

Введение

Количество роботов, вовлеченных во все сферы деятельности, растет ежегодно. Отдельную нишу в этом многообразии занимают подвижные роботы, предназначенные для автоматизации труда, связанного с транспортировкой некоторой полезной нагрузки, а также для выполнения задач в непригодных или опасных для человека условиях. Зачастую выполнение таких задач сопряжено с передвижением по разноуровневому городскому пространству или пересеченной природной местности. Таким образом, условия работы и рельеф местности «под ногами» каждого робототехнического комплекса уникальны. Исходя из этой уникальной комбинации условий работы и рельефа, назначается наиболее подходящая конструкция движителя для конкретного мобильного робота. Зачастую, особенно для тяжелых машин, предпочтение в выборе ходовой системы отдается традиционным колесному и гусеничному движителю. При этом гусеничный движитель выбирается для более сложных условий движения. Роботы оснащаются шагающими движителями в тех случаях, когда для робота достаточна совсем небольшая скорость передвижения, и основным требованием является высокая проходимость; характерные условия работы: завалы, скалы, курумы, большой уклон. В отдельных отраслях применяются колесно-шагающие роботы, способные передвигаться по сложному ландшафту, что характерно для шагающих машин, и развивающие высокую скорость, присущую традиционным движителям. Сочетание этих качеств в одном изделии достигается за счет усложнения и удорожания конструкции. Существует также группа псевдошагающих движителей и некоторое количество разработок, оборудованных ими. Такие движители обеспечивают роботу проходимость сравнимую с проходимостью шагающих машин и быстроходность, которая приближается к колесным аналогам. Конструкция же и управление такими движителями проще, чем колесно-шагающими: «псевдошаг» осуществляется исключительно вращением кривошипа; основное передвижение осуществляется или посредством опоры на внешний край этого кривошипа или за счет качения колеса, зафиксированного на конце кривошипа.

Среди псевдошагающих роботов возможно выделить: группу с однозвенным движителем-кривошипом (WHege, RHex [1], модель робота, разработанная Федоровым, Дьяковым и Евсеевым [2]); группу роботов с движителем-трансформером (TurboQuad, α -WaLTR, STEP [1]); роботы с «лыжей», соединяющей концы двух кривошипов (ПрОП-М [3]); роботов с колесом на конце кривошипа (исследуются в этой статье). Выделенные группы представлены на рис. 1.

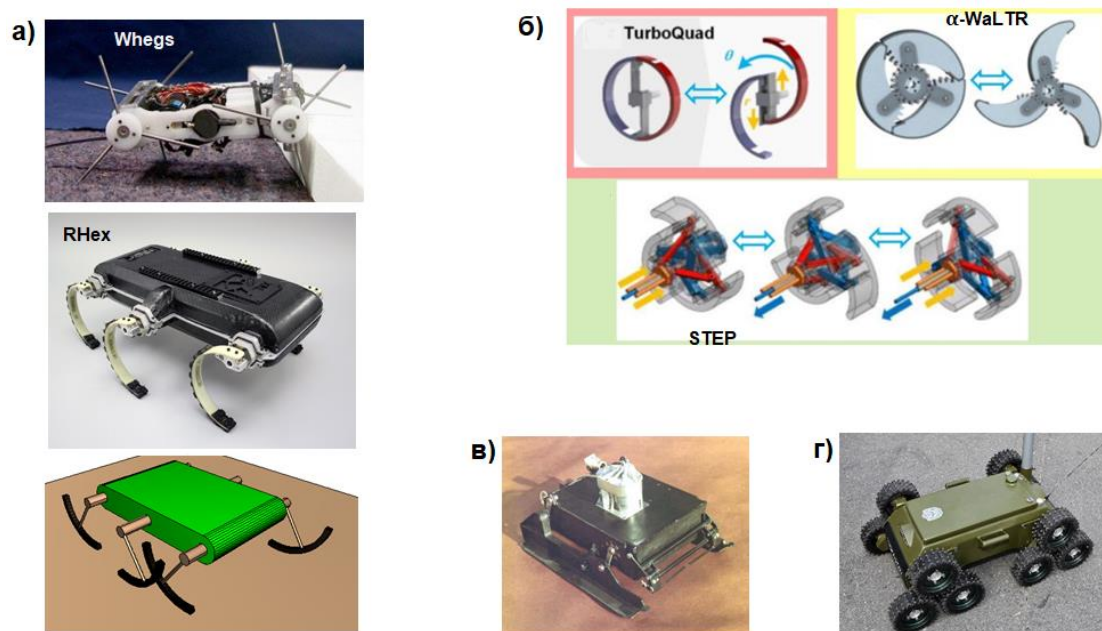


Рис. 1. Классификация псевдошагающих роботов по типу движителя:

- а – группа роботов с однозвенным движителем-кривошипом;*
- б – группа движителей-трансформеров, которыми оборудуются роботы;*
- в – группа роботов со звеном, соединяющим концы двух кривошипов;*
- г – группа роботов с колесом на конце кривошипа*

Fig. 1. Classification of pseudo-walking robots by type of propulsion unit:

- a – group of robots with a single-link crank propulsion;*
- б – group of transforming propulsion for robots;*
- в – group of robots with a link connecting the ends of two cranks;*
- г – group of robots with a wheel at the end of a crank*

Движитель с колесом на конце кривошипа, которым оснащена исследуемая модель робота, впервые разработан в 1967 г. фирмой *Lockheed* для их вездехода *Terrastar*. В 1970 г. на базе этого движителя для нужд министерства обороны США была разработана самоходная 105-мм гаубица M101 [4]. В дальнейшем транспортные комплексы подобным движителем не оснащались. Позднее были созданы мобильные роботы *MSRox* [1] Витязь-ПУК [5] и другие, оснащенные подобной ходовой системой, которая подходит для городского и сельского ландшафта. Математическое моделирование динамики безэкипажного транспортного средства, оснащенного движителем с тремя катками на конце кривошипа производилось А.С. Дьяковым, В.И. Рязанцевым и Г.Г. Анкиновичем [6]. При грамотном подборе размеров и характеристик такого движителя робот сможет преодолевать бордюры, водостоки, барьеры, лестницы, ямы, подъемы, спуски и косогоры.

Исходной точкой описываемого исследования являются предъявленные к роботу требования: заранее определенные масса робота и полезной нагрузки, перечень и размеры типовых препятствий, которые роботу необходимо преодолевать.

1. Описание конструкции робота

Наиболее важные характеристики робота представлены в табл. 1. Внешний вид динамической модели, структуры робота и движителя представлены на рис. 2. Полезная нагрузка крепится к верхней крышке корпуса робота. Привод каждого движителя осуществляется от отдельного электродвигателя, подключаемого через волновой редуктор к ведущей шестерне движителя.

Таблица 1.
Основные параметры модели робота

Table 1.
Basic parameters of the robot model

Параметр	Значение
Снаряженная масса робота, кг	120
Полная масса робота, кг	165
Ширина колеи, мм	725
Расстояние между передней и задней осями движителей, мм	525
Габаритная длина робота, мм	1000
Номинальная мощность электродвигателя, Вт	400
Максимальный момент, Н·м	1.5

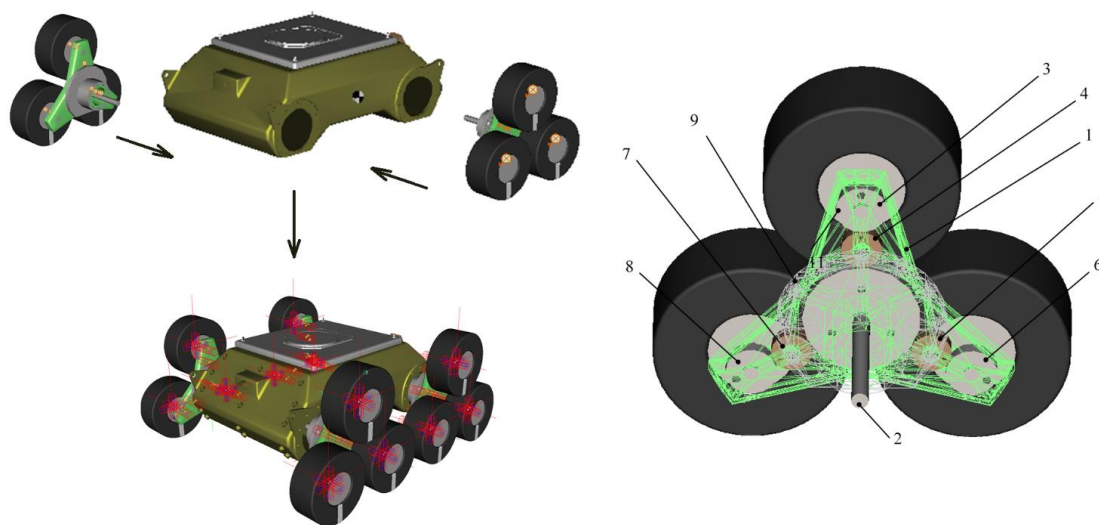


Рис. 2. Структура модели робота и модели движителя

Fig. 2. Structure of the robot model and propulsion model

Ключевой конструктивной особенностью исследуемого робота является использование трехкатковых псевдошагающих движителей. Оси катков жестко соединены с шестернями, обозначенными на рис. 2 цифрами 3, 6, 8, которые соединены через промежуточные шестерни 4, 5, 7 с ведущей шестерней и ее валом 2. Треугольное водило, на котором закреплены эти шестерни, обозначено цифрой 1, опорой является ступица 9. Движитель работает следующим образом: момент подводится к ведущей шестерне 2; через промежуточные шестерни 4, 5, 7 момент передается на шестерни 3, 6, 8, тем самым приводя во вращение катки. При движении по ровному, твердому основанию момент передается только на те катки, которые находятся в контакте с опорной поверхностью. Преодоление ступеней, высота которых больше радиуса катка, происходит за счет реализации продольных реакций при взаимодействии катка с опорной поверхностью: треугольное водило вращается вокруг остановленного препятствием катка.

2. Описание математической модели

Создание компьютерных моделей для определения эксплуатационных показателей робота проводилось в программном комплексе анализа динамики систем тел «Универсальный Механизм» [7]. Уравнения движения системы тел в нем строятся с использованием формализма Ньютона-Эйлера и имеют вид дифференциально-алгебраических уравнений. Уравнения движения систем тел в общем случае можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} M(q, t) \cdot \ddot{q} + k(q, \dot{q}, t) = Q(q, \dot{q}, t) + G^T(q) \cdot \lambda, \\ h(q, p) = 0 \end{cases}$$

где q – основные координаты объекта, p – вспомогательные координаты (локальные координаты в разрезанных шарнирах); M – матрица масс, k , Q – столбцы сил инерции и обобщенных сил соответственно; λ – множители Лагранжа, соответствующие силам реакций в разрезанных шарнирах; второе уравнение системы – алгебраические уравнения связей или условия замыкания разрезанных шарниров. Матрица G является матрицей Якоби уравнений связей после исключения из них вспомогательных координат. Анализ уравнений движения производится путем численного решения методом Парка с автоматическим контролем точности.

2.1. Математическая модель корпуса

Модель подрессоренной части состоит из невесомой геометрической модели и массово-инерционной модели, представляющей собой точечную массу, расположенную в центре масс кузова, и тензор инерции. Масса и положение центра масс подрессоренной части подбирались из условия обеспечения требуемой общей массы робота в сборе и требуемого положения центра масс робота в сборе. Моменты инерции определялись по геометрической модели кузова из условия равномерного распределения массы по внутреннему объему. Плотность материала отдельных элементов подбиралась для обеспечения требуемых масс агрегатов. Приводы моделируются в виде скалярных моментов между опорами в корпусе и ведущими шестернями движителей.

2.2. Математическая модель взаимодействия шин с опорной поверхностью

Вычисление сил и моментов, действующих на колесо со стороны опорной поверхности, производится при помощи различных математических моделей шины: для плоской твердой опорной поверхности и для неровной твердой опорной поверхности. Модель взаимодействия с плоской поверхностью реализована средствами программного комплекса «Универсальный Механизм», математически эта модель соответствует описанной В.А. Гореловым, А.И. Комиссаровым и Б.Б. Косицыным [8]. Модель взаимодействия шины с неровной поверхностью реализована в пакете *Matlab Simulink* и скомпилирована в подключаемую динамическую библиотеку, такая модель была представлена в работе В.А. Горелова и А.И. Комиссарова [9].

2.3. Регулятор продольной скорости робота

Для управления продольной скоростью движения при моделировании испытаний использовались пропорциональные регуляторы угловых скоростей выходных валов электродвигателей. Управляющий сигнал регулятора s определялся по формуле:

$$s = \min(1, \max(-1, k_{\pi} \cdot e))$$

где k_{π} – коэффициент усиления пропорционального регулятора; e – ошибка регулирования для соответствующего выходного вала. Ошибка регулирования вычислялась как разность требуемого значения угловой скорости выходного вала и текущего значения скорости соответствующего выходного вала. Требуемое значение угловой скорости выходного вала электродвигателя рассчитывалось через требуемую продольную скорость робота V_0 :

$$\omega_0 = \frac{V_0}{r} \cdot \frac{U_{\text{ред}}}{U_1 \cdot U_2}$$

где r – статический радиус колеса; $U_{\text{ред}}$ – передаточное число волнового редуктора; U_1 , U_2 – передаточные числа ступеней редуктора движителя.

3. Описание численных экспериментов

Для верификации распределения масс между элементами модели было проведено уравновешивание модели в поле гравитации на ровной горизонтальной дороге. Верификация была выполнена как для ненагруженного робота, так и для робота с полезной нагрузкой 45 кг.

3.1. Выбор передаточных чисел волновых редукторов двигателей

Подбор передаточных чисел волновых редукторов двигателей производился на основе моделирования движения робота на подъеме в 30° . Изначально передаточное отношение волновых редукторов, обеспечивающих поворот треугольного водила и смену опорных катков было выбрано исходя из обеспечения въезда робота без нагрузки на лестницу ($U_{ред1} = U_{ред2} = 50$). Виртуальные испытания заезда робота с полезной нагрузкой в подъем 30° с подобранными для лестницы передаточными числами показали, что происходит застревание робота. Для гарантированного преодоления подъема передаточное число $U_{ред2}$ для задних волновых редукторов выбраны из условия обеспечения динамического фактора робота превышающим 0,8 (это больше, чем необходимо для равномерного движения на данный подъем и обеспечивает некоторый запас по тяге):

$$U_{ред2} = \frac{0,8 \cdot r \cdot M_{робота} \cdot g \cdot U_p - M_{э.д.мах} \cdot \eta \cdot U_{ред1}}{M_{э.д.мах} \cdot \eta}$$

где $M_{робота}$ – масса робота; g – ускорение свободного падения; $U_p = 2,65$ – передаточное число внутреннего редуктора двигателя; $M_{э.д.мах}$ – максимальный момент электродвигателя; $\eta = 0,75$ – коэффициент полезного действия волнового редуктора.

После подстановки значений всех параметров получено значение $U_{ред2} = 257$.

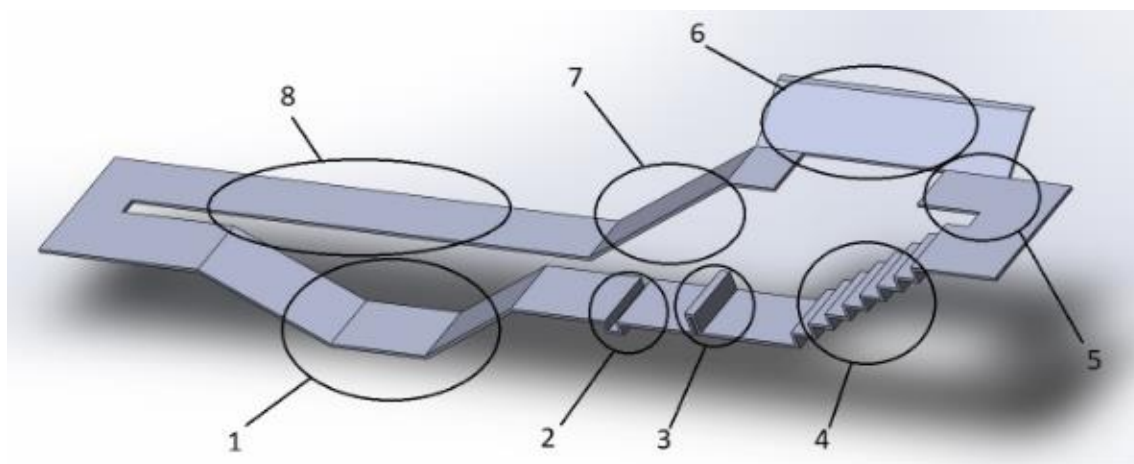


Рис. 3. Виртуальный полигон:

1 – ров (угол спуска и подъема 30°); 2 – открытый водосток; 3 – бордюр; 4 – лестница;
5 – лифтовая зона (разворот на месте); 6 – косогор 30° ; 7 – спуск 30° ;
8 – участок разгона-торможения

Fig. 3. Virtual test site:

1 – ditch (angle of descent and ascent 30°); 2 – open drain; 3 – curb; 4 – stairs;
5 – lift zone (U-turn on the spot); 6 – slope 30° ; 7 – descent 30° ; 8 – acceleration-braking section

3.2. Моделирование движения по виртуальному полигону

Комплексная оценка подвижности мобильного робота основывается на представлении ландшафта, по которому будет передвигаться робот, в виде виртуального полигона, объединяющего в себе ряд типовых препятствий, габариты которых определяются характером рельефа, и на последующем моделировании передвижения робота по этому полигону. В целях облегчения моделирования целесообразно провести виртуальные испытания по преодолению препятствий отдельно друг от друга и делать вывод о подвижности робота по совокупности этих испытаний. Также были определены нагрузки, действующие на бортовые редукторы, для всех препятствий виртуального полигона. Эти нагрузки являются определяющими на последующих этапах проектирования приводов робота и именно они определяют конструктивный облик приводов. На рис. 3 представлен виртуальный полигон, с помощью которого производится дальнейшая оценка подвижности исследуемого робота.

3.3. Движение на спуске 30°

При исследовании движения на спуск 30° робот изначально располагался на горизонтальном участке, затем начинал движение с последующим съездом на наклонный участок. При этом регуляторы стремились поддерживать продольную скорость робота на уровне 0,5 км/ч. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. Результаты моделирования (рис. 4) свидетельствуют о том, что на спуске 30° происходит разгон робота, поскольку его электродвигатели не обеспечивают компенсации скатывающейся составляющей силы тяжести. Максимальным углом спуска, на котором обеспечивается поддержание равномерной скорости робота за счет торможения электродвигателями является угол 20°.

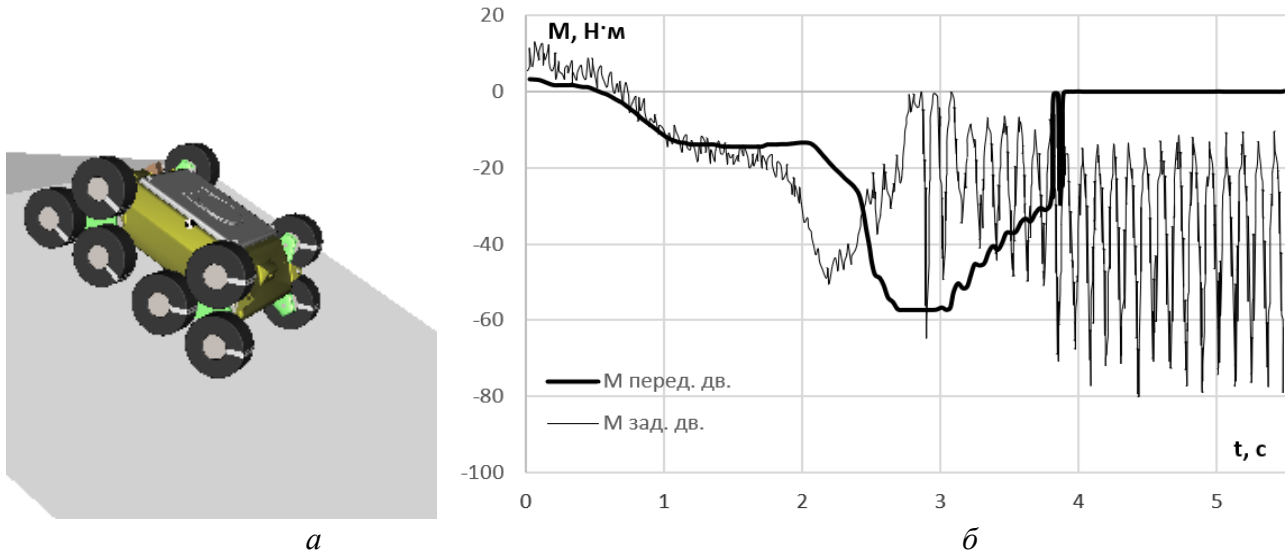


Рис. 4. Движение на спуске 30°:

*а – моделирование спуска;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота*

Fig. 4. Movement downhill at 30°:

*а – robot descending simulation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side*

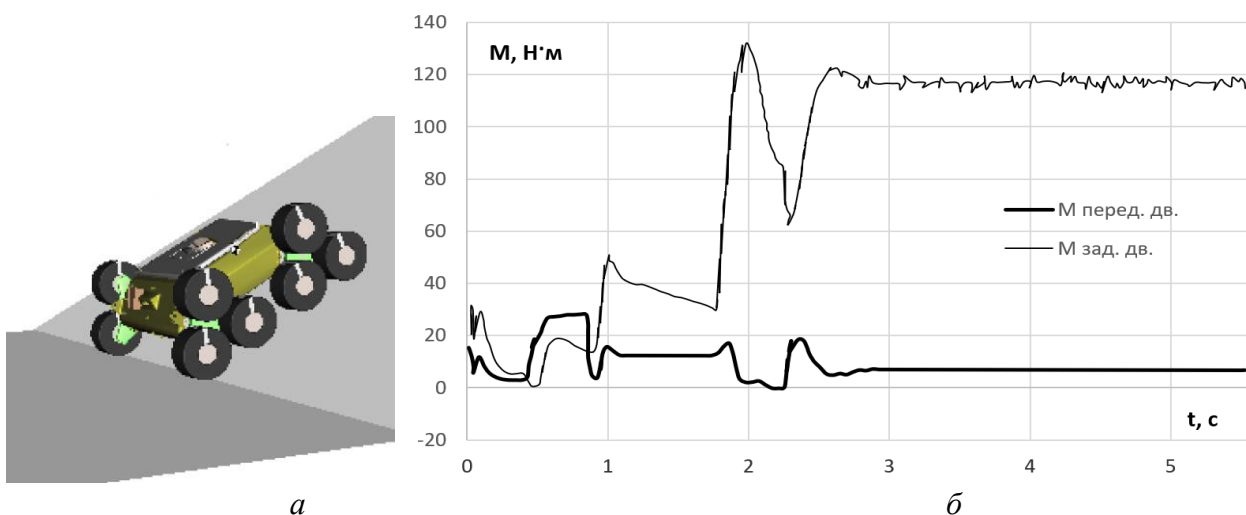


Рис. 5. Движение на подъеме 30°:

*а – моделирование подъема;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота*

Fig. 5. Movement uphill 30°:

*а – robot climbing simulation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side*

3.4. Преодоление подъема 30°

Робот изначально располагался на горизонтальном участке, а затем начиналось его движение с последующим въездом на наклонный участок (рис. 5). При этом регуляторы стремились поддерживать продольную скорость робота на уровне 2 км/ч. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. Моделирование показало, что робот с полезной нагрузкой способен преодолеть подъем 30° при принятых параметрах трансмиссии.

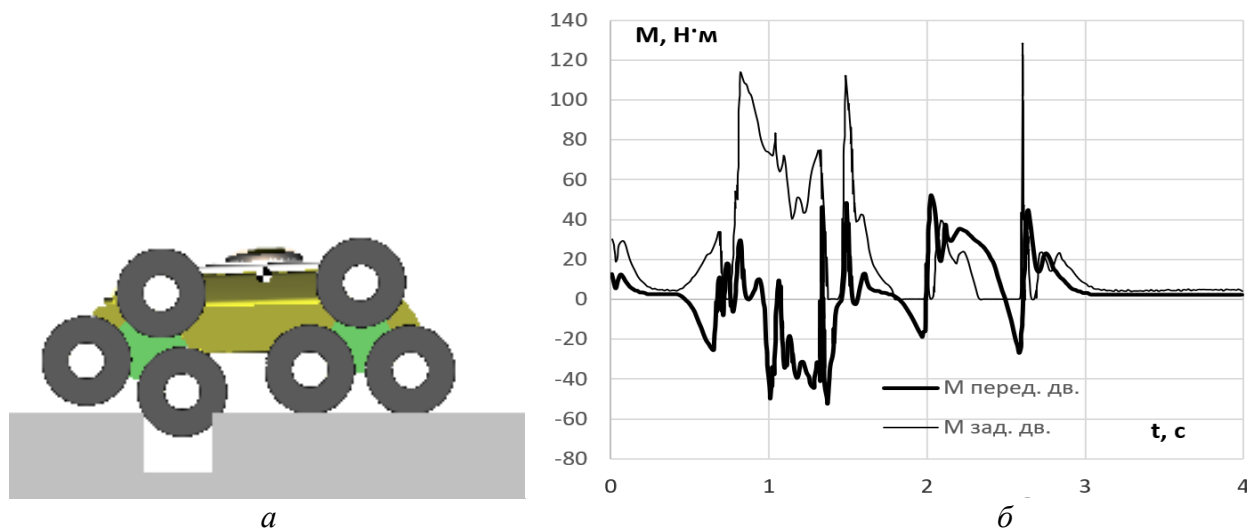


Рис. 6. Преодоление водостока:

а – преодоление водостока задними движителями;

б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота

Fig. 6. Overcoming the drain:

a – simulation of overcoming the drain with rear propulsions;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

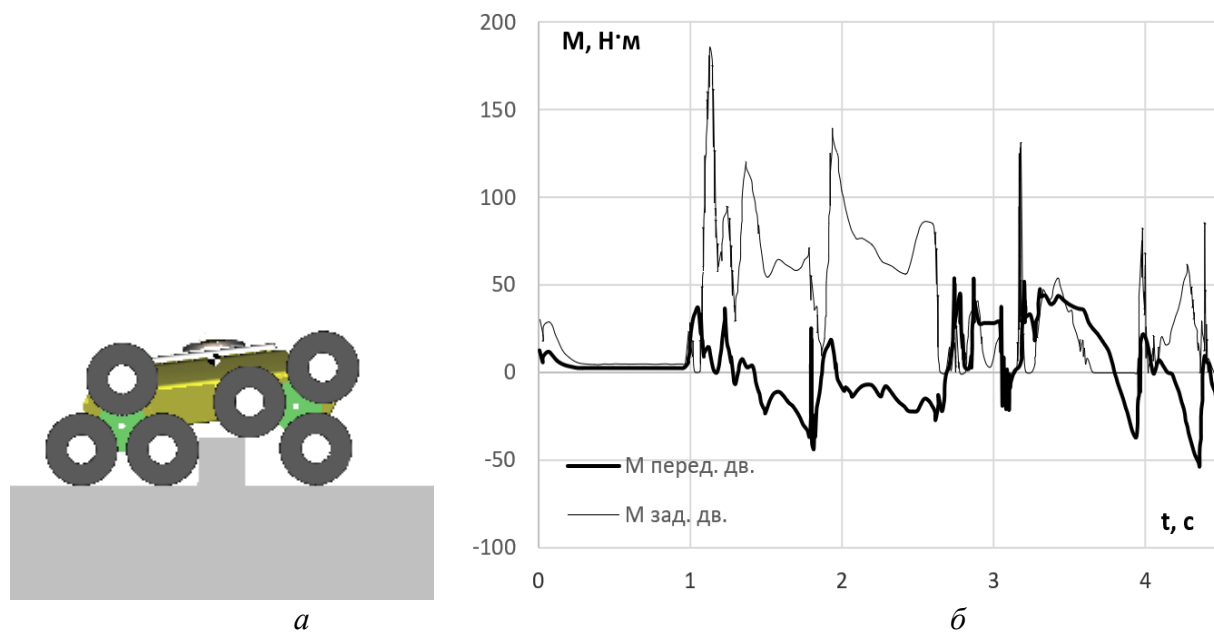


Рис. 7. Преодоление бордюра:

а – моделирование преодоления бордюра;

б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота

Fig. 7. Overcoming the curb:

a – curb overcoming simulation;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

3.5. Преодоление водостока

При моделировании движения через водосток шириной 175 мм и высотой 150 мм (рис. 6) поддерживались угловые скорости входных валов редукторов движителей робота для обеспечения постоянной продольной скорости центра масс робота 2 км/ч.

3.6. Преодоление бордюра

При моделировании движения через бордюр высотой 150 мм и шириной 150 мм (рис. 7) поддерживались угловые скорости входных валов редукторов движителей робота для обеспечения постоянной продольной скорости центра масс робота 2 км/ч.

3.7. Преодоление лестницы

При моделировании робот изначально располагался на горизонтальном участке, затем начинал движение со скоростью 2 км/ч и производил въезд на неровность (рис. 8). высота ступени которой равна 200 мм и ширина ступени – 400 мм. В процессе подъема регуляторы стремились поддерживать скорость робота. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7.

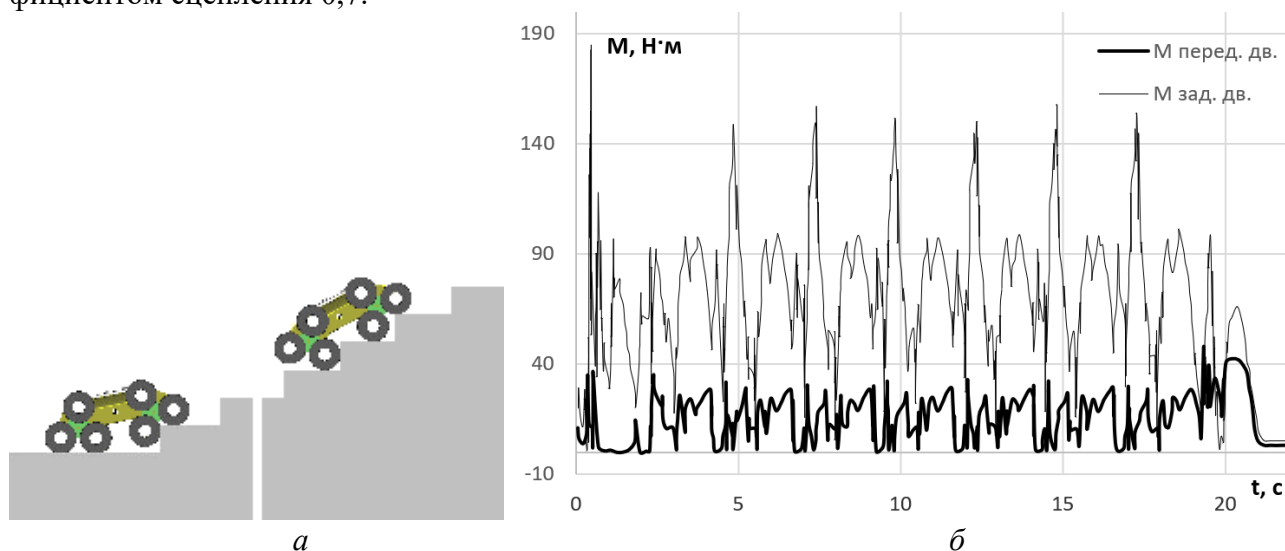


Рис. 8. Преодоление лестницы:

а – моделирование подъема по лестнице;

б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота

Fig. 8. Overcoming the stairs:

a – stair climbing simulation;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

3.8. Разворот на месте

Моделирование разворота проводилось на ровной горизонтальной поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. В процессе расчета регуляторы стремились поддерживать постоянные угловые скорости на входе в редукторы движителей, соответствующие продольной скорости 2 км/ч. На правом и левом бортах угловые скорости имели противоположные направления. Робот способен выполнять разворот на месте вокруг геометрического центра верхней проекции, на рис. 9 показаны траектории его деталей при повороте.

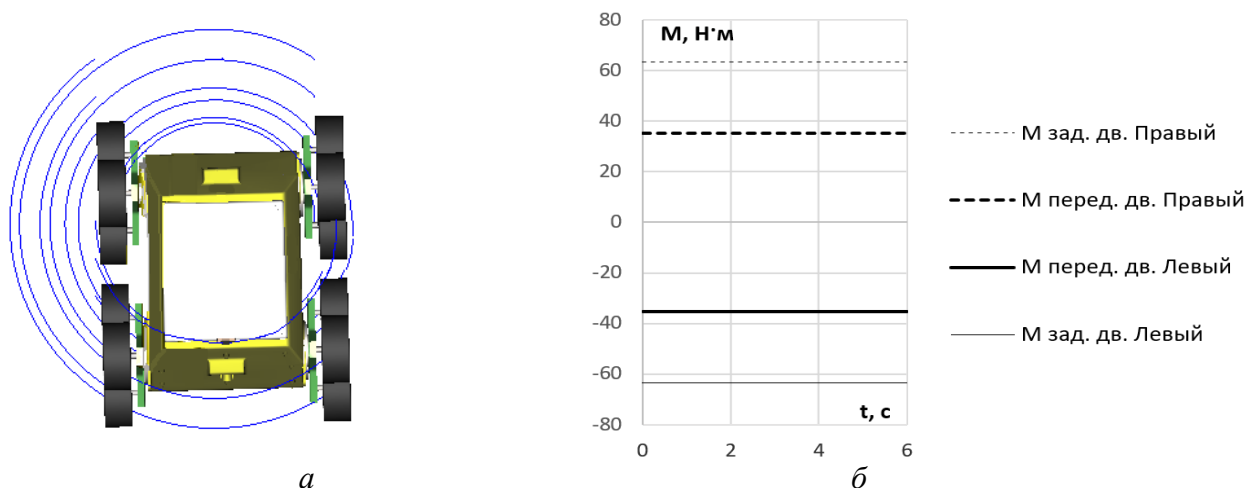


Рис. 9. Разворот на месте:

a – траектории деталей робота при развороте;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей

Fig. 9. U-turn on the spot:

a – trajectories of robot parts during rotation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions

3.9. Движение на косогоре 30°

Робот изначально располагался на наклонном участке, а затем начиналось его движение с начальной скоростью $V_0 = 2$ км/ч (рис. 10) с поддержанием продольной скорости без регулирования курса.

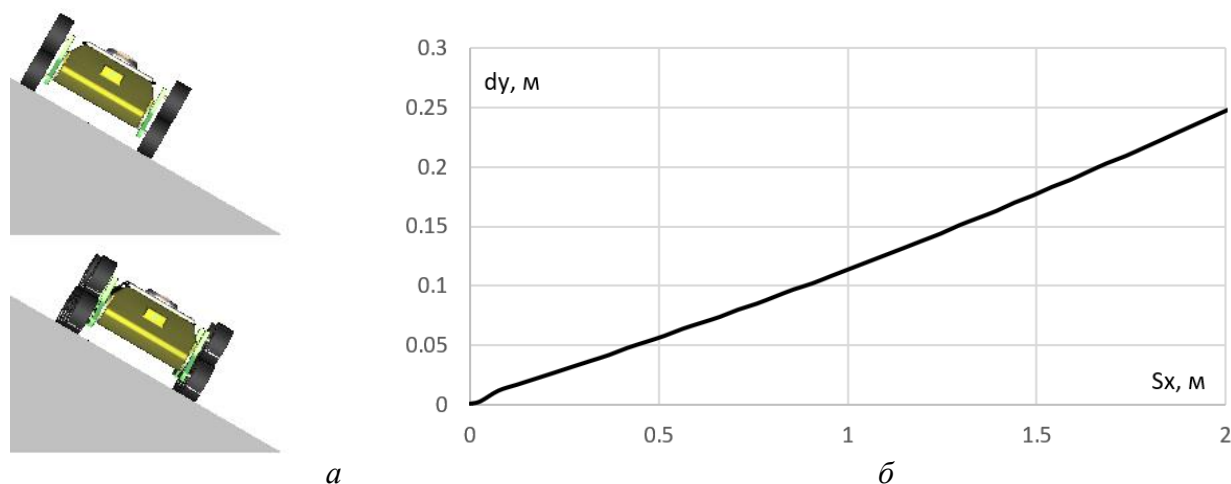


Рис. 10. Движение на косогоре:

a – моделирование движения на косогоре;
б – зависимость бокового смещения робота от пройденного им пути

Fig. 10. Movement on a hillside:

a – simulation of movement on a slope;
б – dependence of the lateral displacement of the robot on the path it has traveled

Проведенные испытания свидетельствуют, что робот смещает в боковом направлении к низу косогора. Величина бокового смещения равна 12 % от пройденного по косогору расстояния (рис. 10). Данное отклонение вызвано неравномерностью распределения нагрузок между движителями и может быть устранено за счет введения регулирования курса робота. На основании результатов моделирования можно сделать вывод о способности робота с полезной нагрузкой двигаться по косогору 30°.

3.10. Разгон-торможение

На данном горизонтальном участке полигона производился разгон робота с места до максимальной скорости, а затем осуществлялось резкое торможение до полной остановки (рис. 11а). При этом управляющие сигналы электродвигателей формировались по функции (рис. 11с) без обратной связи по скорости вала редуктора.

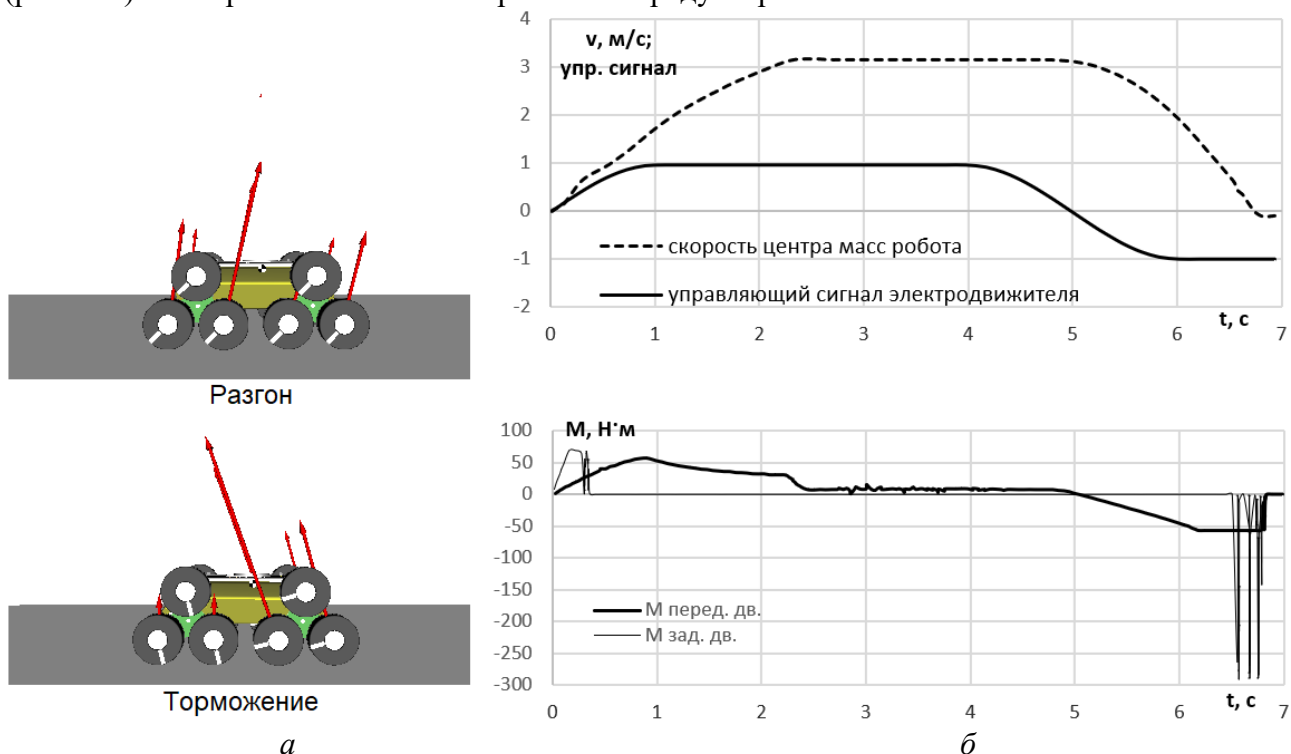


Рис. 11. Разгон-торможение:

a – векторы сил, действующие на шестерни колес при моделировании;
б – изменение скорости робота и моментов на входе в бортовые редукторы движителей при изменении закона управления

Fig. 11. Acceleration-braking:

a – vectors of forces acting on the gear wheels during simulation;
б – change in robot speed and moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions when changing the control law

В результате моделирования при выбранном законе управления электродвигателями установлено следующее:

- 1) разгон до максимальной скорости обеспечивается за 2,4 с;
- 2) величина максимальной скорости составила 3,157 м/с (11.37 км/ч);
- 3) полная остановка с максимальной скорости осуществляется за 2 с.

Заключение

Изложен метод проверки соответствия подвижности мобильного робота заданным требованиям на этапе проектирования. Зачастую к мобильному роботу выдвигается требование повышенной проходимости, вследствие чего использование нетрадиционного движителя становится необходимостью. В таких условиях проектирование ведется при отсутствии уже разработанных методик и ходовых макетов. Описанный в статье алгоритм может использоваться не только для оценки ходовых качеств конкретного движителя на конкретном виртуальном полигоне, но и для обоснованного выбора наиболее подходящего движителя для конкретной местности.

Для псевдошагающего робота с трехкатковым двигателем был проведен выбор оптимальных передаточных чисел приводов. При моделировании преодоления препятствий моменты на входе в задние бортовые редукторы не превышали 200 Н·м, в передние – 150 Н·м. При моделировании резкого разгона-торможения моменты на входе в задние бортовые редукторы не превышали 300 Н·м, в передние – 75 Н·м. Также наблюдается отклонение робота от курса при движении по косоугору. Вышеописанные явления являются прогнозируемыми – они вызваны разницей передаточных отношений передних и задних приводов. Результаты проведенных виртуальных испытаний свидетельствуют о соответствии подвижности робота заданному уровню и могут быть использованы в качестве расчетных нагрузок при дальнейшем проектировании.

Библиографический список

1. **Seo, T.** Stair-climbing Robots: A review on mechanism, sensing, and performance evaluation / T. Seo, S. Ryu, J.H. Won et al. // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 60539-60561. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3286871.
2. **Дьяков, А.С.** Разработка и исследование модели псевдошагающего робота / А.С. Дьяков, К.Б. Евсеев, Д.С. Федоров // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. x-y. DOI: 10.17816/2074-0530-623720.
3. **Кемурджиан, А.Л.** Планетоходы / А.Л. Кемурджиан. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
4. **Кочнев, Е.Д.** Армейские автомобили НАТО 1946-1991 / Е.Д. Кочнев. – М.: Яуза; Эксмо, 2012. – 603 с.
5. **Зубов, В.Н.** Мобильные вооруженные роботы разработки НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана // Инновационная наука. 2015. № 11-2. С. 59-61.
6. **Дьяков, А.С.** Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесношагающим двигателем с помощью математического моделирования / А.С. Дьяков, В.И. Рязанцев, Г.Г. Анкинович // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 291-307. DOI: 10.7463/1214.0747961.
7. Универсальный механизм 9. Руководство пользователя [Электронный ресурс] URL: <http://www.umlabor.ru/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 15.02.2024)
8. **Горелов, В.А.** Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел / В.А. Горелов, А.И. Комиссаров, Б.Б. Косицын // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 1(96). С. 18-23.
9. **Горелов, В.А.** Математическая модель взаимодействия шины с твердыми неровностями опорной поверхности для случая прямолинейного качения колеса / В.А. Горелов, А.И. Комиссаров // ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ. Труды II Междунар. науч.-техн. конф. Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 129-133.

*Дата поступления
в редакцию: 22.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 23.10.2024*