

DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

УДК 621.865.8

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С АКТИВНО ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ РАМОЙ

*С.В. Харузин<sup>1</sup>, А.А. Иванов<sup>2</sup>, О.А. Шмаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предложена структура системы управления автономным движением шестиколёсной повозки с активно трансформируемой рамой по поверхности с недетерминированным рельефом. Разработаны алгоритмы управления движением при преодолении произвольной последовательности препятствий типа эскарп, ров и спуск. Структура и алгоритмы управления реализованы в комплексной компьютерной модели системы управления и динамики повозки. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предложенных структурных и алгоритмических решений.

**Ключевые слова:** мобильный робот; вездеход; ситуационное управление; автономное движение; повозка с трансформируемой рамой.

**Ссылка при цитировании:** Харузин С.В., Иванов А.А., Шмаков О.А. Система управления автономным движением транспортного средства с активно трансформируемой рамой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 22–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

## AUTONOMOUS CONTROL SYSTEM FOR A VEHICLE WITH AN ACTIVELY TRANSFORMABLE FRAME

*S.V. Kharuzin<sup>1</sup>, A.A. Ivanov<sup>2</sup>, O.A. Shmakov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup>State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), St. Petersburg, Russian Federation

In this paper we suggest a structure of autonomous control system for a six-wheeled vehicle with an actively transformable frame. A control system of the suggested structure allows the vehicle to move effectively on uneven terrain. Furthermore, we describe algorithms for control of vehicle configuration while it overcomes a random sequence of obstacles belonging to three classes: step, canal and descent from step. These algorithms utilize information about the instant configuration of the vehicle provided by proprioceptive sensors and the predicted height of the obstacle and range from it provided by exteroceptive sensors. Therefore, the algorithms switch vehicle movement modes depend on the instant situation in which it is involved. Stages of vehicle frame transformation are described for each mode. Hereafter the patterns of each feasible switching between modes and the dependency between the desired frame configuration and obstacle height are discussed. The suggested structure and algorithms are then realized and tested in a complex virtual model of control system and vehicle dynamics. Results of virtual modelling ensured the efficiency of the

suggested structural and algorithmical decisions.

**Keywords:** mobile robot; all-terrain vehicle; situational control; autonomous movement; vehicle with transformable frame.

**Citation:** Kharuzin S.V., Ivanov A.A., Shmakov O.A. Autonomous control system for a vehicle with an actively transformable frame. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 22–31. DOI: 10.18721/JCSTCS.10202

### Введение

Для обеспечения перемещения роботизированных колесных и гусеничных транспортных средств по поверхностям с препятствиями, вертикальные габариты которых сопоставимы с размерами движителей, применяются конструктивные решения, реализующие активную трансформацию подвески (колесно-шагающие машины) и/или рамы мобильной платформы. При управлении трансформируемой платформой оператором, наблюдающим одновременно препятствие и робота, адаптивная трансформация подвески/рамы представляется нетривиальной, но выполнимой задачей. В условиях практически интересного применения роботов визуальная информация ограничена изображением, поступающим с бортовых камер. Показания экстерорецептивных и проприорецептивных датчиков системы управления робота могут частично дополнить недостающую информацию. Однако из-за недостаточности информации или ее многоканальности телеоператорное управление многостепенным устройством оказывается практически нереализуемым. Поэтому для обеспечения эффективного движения устройства в среде с произвольными пространственными препятствиями необходимо решение задачи автоматизации, либо обеспечения полной автономности управления трансформацией платформы.

Подходы к решению задачи управления колесными и гусеничными устройствами с трансформируемыми подвесками/рамами достаточно широко представлены в литературе. В [1–3] рассмотрена задача управления морфологией гусеничных платформ с активными рычагами-гусеницами по неполным данным об окружении. В работе [4] изучен подход к построению системы автономного определения и преодоления препятствия типа лестница гусеничной

платформой с использованием элементов нечеткой логики. В статье [5] описаны этапы разработки колесно-гусеничного робота с изменяемым профилем гусеницы и рассмотрены алгоритмы преодоления эскарпов таким устройством. В работах [6–10] рассмотрены подходы к ситуационному планированию стратегии поведения шестиколесной платформы при движении в среде с препятствиями. В качестве информации, на основе которой происходят все необходимые расчеты, предложенные подходы используют показания датчиков конфигурации активной подвески и информацию о наличии контакта мотор-колес и подстилающей поверхности.

Нечеткий алгоритм предварительной классификации препятствия по ключевому параметру и пошаговый алгоритм преодоления типовых препятствий шестиколесной платформой рассмотрен в [11]. Авторами [12] предложена структура адаптивной к неровностям опорной поверхности полуавтоматической локомотивной моды для колесно-шагающего устройства с четырьмя ногами.

Предложенный в [13] подход использует элементы теории обучения с подкреплением для того, чтобы минимизировать расхождение фактических и желаемых состояний шестиколесного робота с активной подвеской при преодолении препятствия типа уступ. Вопросы предотвращения проскальзывания при движении по неровной поверхности с низким коэффициентом трения между колесами и опорной поверхностью изучены в [14]. В [15] рассмотрены алгоритмы предотвращения опрокидывания платформы при движении по неровной опорной поверхности.

Наша задача – разработка структуры и алгоритмов системы управления автономным движением робота на колесной платформе с трансформируемой рамой в среде с пространственными препятствиями.

В настоящей статье предложены структура и алгоритмы системы адаптивно-ситуационного управления шестиколесной платформой с трансформируемой рамой при преодолении произвольной последовательности препятствий типа эскарп, ров и обрыв с априорно неизвестными размерами. Структура и алгоритмы управления реализованы в комплексной компьютерной модели системы управления и динамики платформы. Для обоснования работоспособности и эффективности предложенных структурных и алгоритмических решений выполнены расчеты динамики автономного управляемого движения модели платформы.

### Структура системы управления шестиколесной трансформируемой платформы

Изображение 3D CAD-модели трансформируемой колесной платформы с девятью приводами приведено на рис. 1 а. Платформа состоит из трех двухколесных модулей (поз. 1–3). Оси вращения моторколес (поз. 4–9) имеют фиксированное положение на модулях. Трансформация рамы происходит с помощью приводов поступательного перемещения переднего и заднего модулей (поз. 1, 2) относительно среднего модуля (поз. 3). Расстояние от мостов модулей до моста среднего модуля может увеличиваться на 33 % от номинального расстояния.

Привод шарнира вращения на среднем модуле обеспечивает поворот переднего модуля вокруг оси своего моста в диапазоне  $\pm 90^\circ$ .

Обеспечивающая движение с преодолением препятствий система управления робота содержит блоки в соответствии со схемой на рис. 2. На основе обновляемой с заданной частотой информации, поступающей с экстерорецептивных и проприорецептивных датчиков, правил классификации препятствий и целевых функций, блок генерации заданий формирует временные зависимости, задающие движение приводов в интервале обновления. Регулятор играет стандартную роль, формируя управляющие сигналы по рассогласованию задаваемого и наблюдаемого состояния. Минимальное число проприорецептивных датчиков соответствует числу приводов робота. Количество датчиков внешней среды (экстерорецептивных) должно быть достаточным для классификации препятствий и ориентации робота.

Препятствия могут быть разделены на три класса: 1) допускающие движение с пассивно адаптирующейся подвеской; 2) требующие для преодоления активную трансформацию рамы; 3) препятствия, непреодолимые при любых допустимых конфигурациях рамы платформы. Для препятствий первого и второго класса реализуются правила поведения при преодолении типовых препятствий. В третьем классе реали-

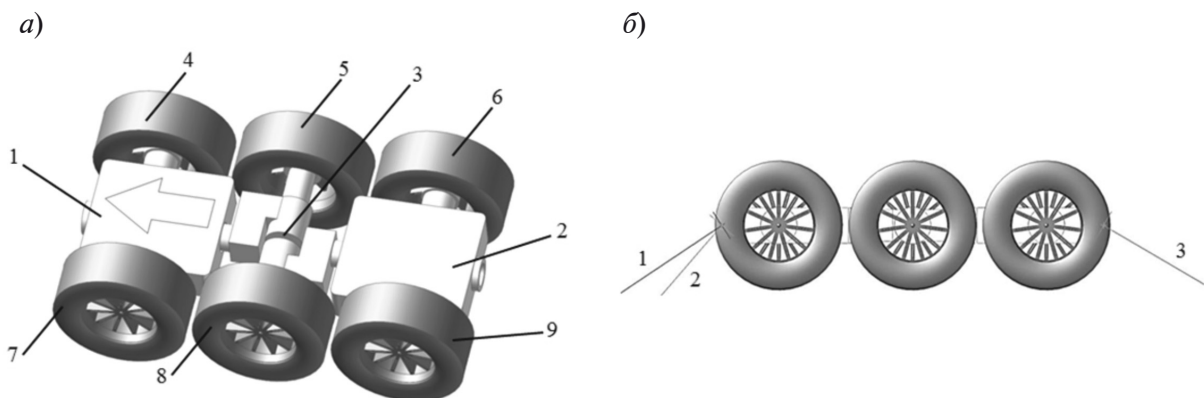


Рис. 1. 3D CAD-модель трансформируемой колесной платформы (а) и схема расположения дальномеров (б)

Fig. 1. 3D CAD-model of transformable six-wheeled vehicle (a) and optical range sensor beams (b)

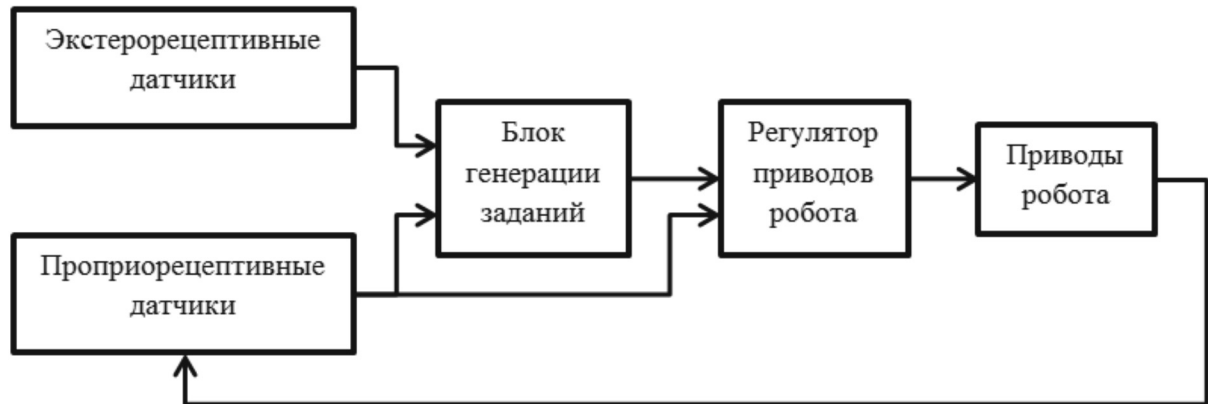


Рис. 2. Структурная схема системы управления движением трансформируемой платформы

Fig. 2. Generalized structure of control system

зуются алгоритмы остановки и возврата в номинальное (движение с пассивно трансформируемой подвеской) состояние.

Выявление препятствий и определение их типа происходит по показаниям трех зафиксированных на модулях дальномеров и двух двухосевых инклинометров на переднем и заднем модулях. Направления измерения дальномеров (поз. 1) и (поз. 2, 3) на рис. 1 б образуют с горизонтальными плоскостями модулей углы  $30^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно.

### Стратегии преодоления типовых препятствий

В настоящем разделе рассмотрены стратегии поведения платформы в пяти типовых сценариях: подъем на эскарп, спуск с эскарпа, преодоление рва, простое дви-

жение вперед, экстренная остановка при выявлении непреодолимого препятствия. Каждому типовому сценарию соответствует свой режим движения. Схема возможных переходов между режимами движения приведена на рис. 3. Из номинального режима, которому соответствует сценарий простого движения вперед, возможен переход в режим преодоления эскарпа, режим спуска с эскарпа, режим преодоления рва и режим экстренной остановки. Первые три режима преодоления типовых препятствий характеризуются этапами последовательно выполняемых трансформаций рамы платформы. По завершении последнего этапа трансформации происходит выход в номинальный режим.

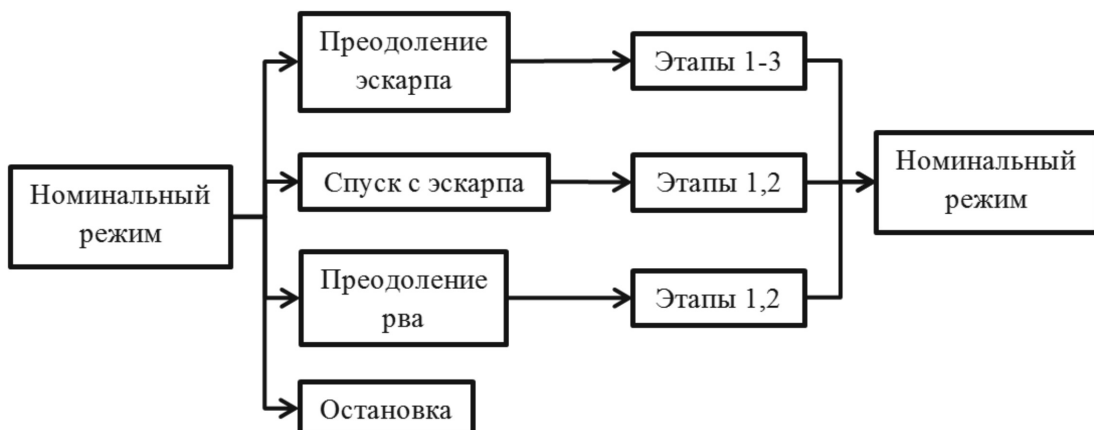


Рис. 3. Схема возможных переходов между режимами движения

Fig. 3. Diagram of executable switches between movement modes

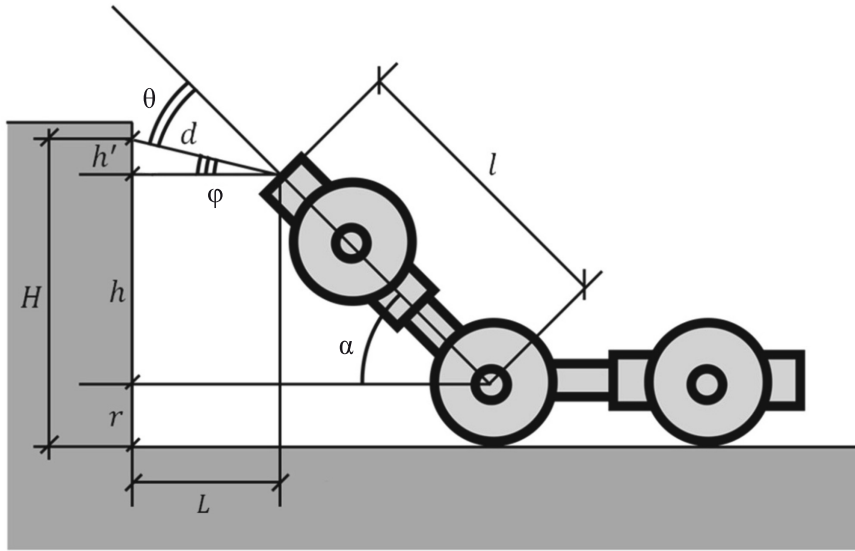


Рис. 4. Схема расчета измеряемой высоты препятствия и измеряемого расстояния до него  
Fig. 4. Diagram for calculation of estimated parameters. Range sensor is placed on front module

Выявление наличия препятствия и его типа происходит по значениям прогнозируемой высоты препятствия и прогнозируемого расстояния до него. Под прогнозируемой высотой препятствия понимается длина вертикальной проекции отрезка, соединяющего точку падения луча дальномера и точку опоры средних или же передних (для дальномеров, установленных в переднем модуле) колес. Для расчета параметров, связанных с задним дальномером, принимается, что либо средние, либо задние колеса контактируют с опорной поверхностью. Под прогнозируемым расстоянием понимается горизонтальная проекция отрезка, соединяющего точку падения и точку испускания луча дальномера. Ниже приведен расчет указанных величин на примере дальномера переднего модуля. Схема расчета приведена на рис. 4.

Расчет прогнозируемых высоты  $H$  и расстояния  $L$  происходит в соответствии с выражениями:

$$H = r + l \cdot \sin(\alpha) + d \cdot \sin(\alpha - \theta), \quad (1)$$

$$L = d \cdot \cos(\alpha - \theta), \quad (2)$$

где  $r$  – радиус колеса;  $l$  – расстояние от оси средних колес до точки испускания луча дальномера;  $d$  – отрезок, соединяющий

точку испускания луча дальномера и точку его падения;  $\alpha$  – угол наклона переднего модуля относительно заднего;  $\theta$  – угол, характеризующий направление луча дальномера.

Определение наличия препятствия в непосредственной близости от платформы происходит по показаниям первого и второго дальномеров. В случае если прогнозируемая высота датчика 2 соответствует углублению, глубина которого превышает радиус колеса, а прогнозируемая длина датчика 1 показывает, что расстояние до стенки рва (наличие стенки определяется по рассогласованию прогнозируемых высот датчиков 1 и 2) меньше либо равно расстоянию между колесами платформы с максимально выдвинутыми модулями, то активируется режим преодоления рва. Если ширина рва превышает расстояние между колесами платформы, активируется режим спуска с эскарпа. Препятствие типа эскарп соответствует прогнозируемой высоте датчика 2, превышающей четверть радиуса колеса. Активация режима при относительно малой высоте эскарпа необходима, чтобы обеспечить его преодоление при малом коэффициенте трения между опорной поверхностью и колесами. Если прогнозируемая высота препятствия превышает установ-



ленные пределы, то активируется режим экстренной остановки.

В качестве предельных выбраны значения прогнозируемой глубины или высоты, составляющие  $\pm 560$  мм. Эта величина соответствует максимальной высоте эскарпа, на которую возможен подъем колеса переднего модуля с учетом толщины модуля. Если прогнозируемая высота лежит в диапазоне от  $-r/2$  до  $r/4$ , то активен номинальный режим движения.

Движение платформы в среде с произвольным расположением типовых препятствий можно разделить на этапы, соответствующие режимам движения платформы. На рис. 5 приведены схемы конфигурации платформы на различных этапах режимов движения по полосе препятствий. При движении по рельефу, определяемому датчиками 1–3 как «плавно меняющийся», плат-

форма движется в номинальном режиме (поз. 1). В этом режиме движения модули втянуты, а активные шарниры поворотной трансформации, передние и средние колеса – пассивны. Управляющие воздействия подаются только на задние колеса.

Выявление уступа выводит платформу из номинального режима в первый этап преодоления эскарпа. Конечная конфигурация платформы на этом этапе соответствует поз. 2. Достижение положения поз. 2 определяется по резкому изменению показаний датчиков. Положение поз. 3 достигается выпрямлением рамы и коррекцией угловой скорости заднего привода (увеличением на величину угловой скорости в шарнире трансформации). Переход в положение поз. 4 производится трансформацией рамы до вступления средних колес в контакт с опорной поверхностью,

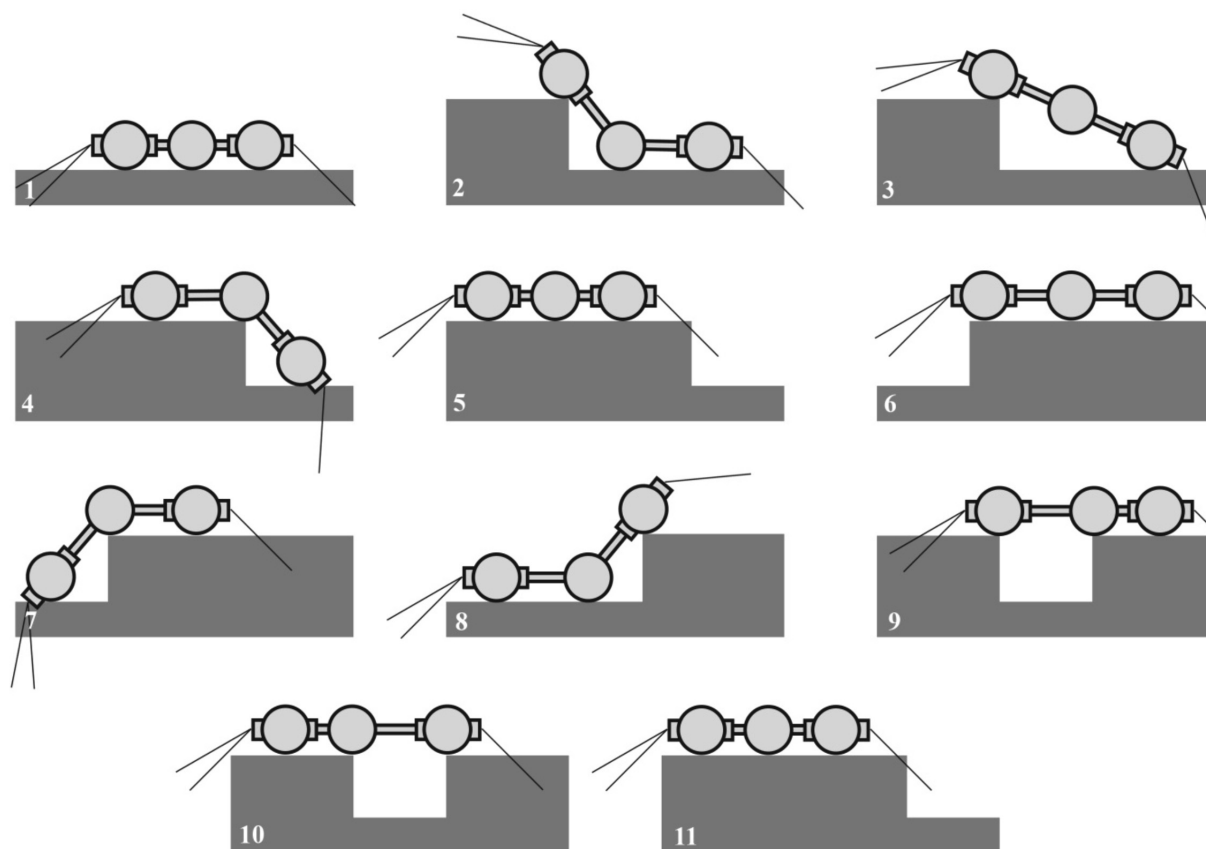


Рис. 5. Схемы конфигурации платформы на различных этапах режимов движения по полосе препятствий

Fig. 5. Simplified images of different platform configurations at different stages of movement

определяемый по показаниям дальномеров 1,2. Затем происходит подтягивание заднего модуля и переход в номинальный режим (поз. 5). Положение, при котором платформа находится в непосредственной близости от края спуска с эскарпа (поз. 6), соответствует первому этапу режима спуска. Передний и задний модули вытягиваются на длину, обеспечивающую безопасный спуск (т. е. длину, при которой возможен одновременный контакт средних колес и поверхности уступа и передних колес и опорной поверхности в непосредственной близости от уступа), вращающий момент подается только на задние колеса, привод изгибания платформы пассивен. При переходе от положения поз. 7 к поз. 8 активируются приводы передних и средних колес, коэффициент регулятора вращающего момента срединного шарнира уменьшается в 10 раз, что обеспечивает плавный спуск среднего моста.

При определении по дальномерам 1,2 препятствия типа ров происходит последовательный переход (поз. 9, 10, 11). На первом этапе преодоления рва передний модуль выдвигается так, чтобы расстояние между опорными точками переднего и среднего колес равнялось ширине рва. Как только дальномеры фиксируют опорную поверхность под колесами переднего модуля, происходит переход ко второму этапу преодоления рва: срединный модуль сдвигается в сторону переднего, продольный габарит платформы при этом не изменяется. Это действие необходимо для переноса веса к переднему модулю. Активными в этом случае являются приводы трансформации (режим удержания) и задних колес. При преодолении препятствий типа спуск и ров выход в номинальный режим движения (первое описанное состояние) происходит, когда третий дальномер фиксирует наличие под задними колесами опорной поверхности.

### Структура алгоритма управления платформой

Алгоритм состоит из шести этапов, последовательно выполняемых на каждом шаге моделирования. На первом этапе происходит опрос экстерорецептивных

и проприорецептивных датчиков, расчет измеряемых величин высоты препятствия и расстояния до него. На основе полученной информации происходит выбор режима движения платформы. Затем, в зависимости от состояния платформы и текущего этапа преодоления препятствия, формируется задание на реконфигурацию платформы. Далее полученное задание корректируется в соответствии с текущими заданиями на скорости вращения колес и выдвижения звеньев. Этот шаг необходим ввиду того, что при выдвижении или втягивании модулей расстояние между колесами уменьшается или увеличивается. Если колеса при этом вращаются, это может привести к их пробуксовке как одному из следствий потери сцепления с опорной поверхностью. Поэтому значения желаемых скоростей вращения колес корректируются по отношению к скоростям выдвижения модулей. Корректировка происходит так, чтобы при выдвижении заднего модуля выполнялся режим качения задних колес. Аналогично, при втягивании модуля скорость вращения колес увеличивается, что предотвращает «отставание» колес от модуля. В случае выдвижения/втягивания переднего модуля затормаживаются/ускоряются задние и средние колеса. В общем виде корректирующее выражение для расчета угловой скорости вращения колеса имеет вид:

$$\omega = \omega_0 \pm \left( \frac{v}{r_w} \right), \quad (3)$$

где  $\omega$  — конечная угловая скорость колеса;  $v$  — скорость выдвижения/втягивания переднего/заднего модулей;  $r_w$  — радиус колеса платформы.

Последними этапами работы алгоритма являются расчет рассогласований между текущими заданиями и фактическими величинами скоростей вращения колес, угла сгиба платформы и длин, на которые должны быть выдвинуты модули, и передача полученных значений ошибок на ПИД-регуляторы. Сформированные вращающие моменты и усилия затем прикладываются к исполнительным системам платформы.

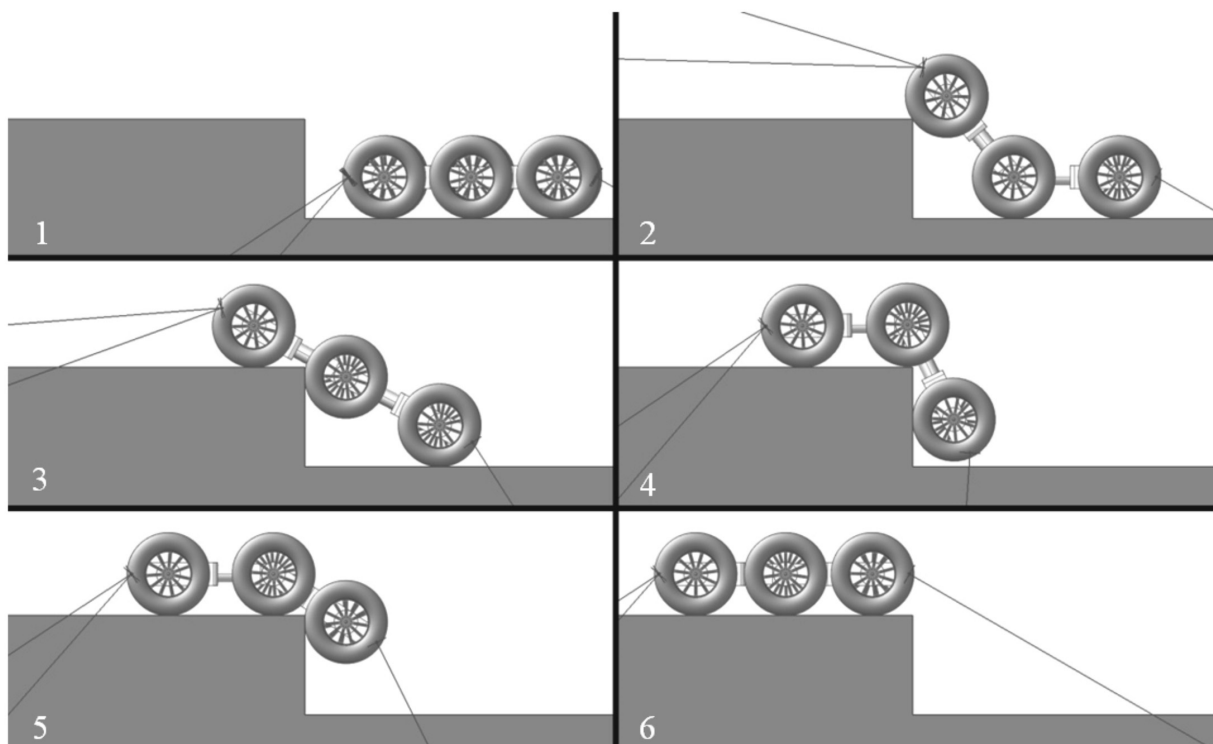


Рис. 6. Кинограмма анимации результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа

Fig. 6. Obstacle negotiation process

### Виртуальный эксперимент

Разработанный подход к построению системы управления автономным движением в среде с препятствиями апробирован на комплексной компьютерной модели системы управления и динамики трансформируемой платформы.

Во время виртуального моделирования происходило итерационное выполнение последовательности шагов рассмотренного алгоритма с частотой 100 Гц. Сформированные виртуальной моделью системы управления вращающие моменты и усилия прикладывались к элементам механической системы повозки – колесам и модулям. Тестирование проводилось при различных параметрах контактирующих поверхностей. В частности, величина коэффициента трения во время экспериментов выбиралась из диапазона от 0,3 до 0,7.

Работа алгоритма рассмотрена на примере результатов моделирования динамики платформы при преодолении эскарпа

с величиной коэффициента трения между опорными поверхностями и колесами тележки 0,3. Кинограмма анимации результатов моделирования приведена на рис. 6.

При подъезде к эскарпу платформа движется в первом режиме (поз. 1). Затем платформа начинает подъем передних колес на опорную поверхность уступа (поз. 2). По достижении рассчитанного из геометрических соображений угла поворота срединного шарнира начинается поворот в обратную сторону (поз. 3, 4). Затем начинается третий этап преодоления эскарпа – задний модуль втягивается и поднимается на опорную поверхность уступа (поз. 5, 6). По завершении этапа платформа переходит в номинальный режим.

### Заключение

Апробирование разработанного алгоритма на виртуальной динамической модели показало его эффективность при преодолении платформой уступов различной



высоты, спуске с относительно высоких уступов и при пересечении рвов. Включенные алгоритмы в систему управления движением платформы обеспечивают преодо-

ление препятствий с малым динамическим коэффициентом трения между опорными поверхностями и колесами устройства (от 0,3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Anastasios I. M.** Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles // *The International Journal of Robotics Research*. 2007.

2. **Martin P.** Controlling Robot Morphology from Incomplete Measurements // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. IEEE, 2016.

3. **Michael B.** Hierarchical Rough Terrain Motion Planning using an Optimal Sampling-Based Method // *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA-2013)*. Karlsruhe, Germany, 2013.

4. **Mihankhah E.** Autonomous Staircase Detection and Stair Climbing for a Tracked Mobile Robot Using Fuzzy Controller // *Proc. of 2008 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics*. Bangkok, Thailand, 2009.

5. **Wenzeng G.** Development of a Transformable Wheel-track Mobile Robot and Obstacle-Crossing Mode Selection // *Proc. of 2014 IEEE Internat. Conf. on Mechatronics and Automation*. Tianjin, China, 2014.

6. **Kyeong B.L.** Behavior planning of an unmanned ground vehicle with actively articulated suspension to negotiate geometric obstacles // *Proc. of 2009 IEEE/RSJ Internat. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, USA, 2009.

7. **Bin X.** Composite Control Based on Optimal Torque Control and Adaptive Kriging Control for the CRAB Rover // *Proc. of 2011 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. Shanghai, China, 2011.

8. **Jingli L.** Study on the Mobile Robot Reconfiguration Control Methods // *Proc. of the IEEE Internat. Conf. on Automation and Logistics*.

Shenyang, China, 2009.

9. **Weidong W.** The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Sixwheeled-legged Robo // *Proc. of 9th Internat. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012)*. IEEE, 2012.

10. **Min X.** Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains // *Proc. of 2011 Internat. Conf. on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. IEEE, 2011.

11. **Kyeong B.L.** Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain // *Proc. of Internat. Conf. on Control Automation and Systems*. Seoul, Korea, 2008.

12. **Shuro N.** Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover // *Proc. of 2012 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Biomimetics*. Guangzhou, China, 2012.

13. **Kyeong B.L.** Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern // *Proc. of Internat. Conf. on Control, Automation and Systems*. KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

14. **Pierre L.** Wheel torque control for a rough terrain rover // *Proc. of 2004 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*. New Orleans, LA, 2004.

15. **Leah K.** Tip-over Prevention: Adaptive Control Development and Experimentation // *Proc. of 2015 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. Washington State Convention Center Seattle, Washington, 2015.

Статья поступила в редакцию 09.11.2016

#### REFERENCES

1. **Anastasios I.M.** Autonomous Stair Climbing for Tracked Vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 2007.

2. **Martin P.** Controlling Robot Morphology from Incomplete Measurements. *Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, 2016.

3. **Michael B.** Hierarchical Rough Terrain Motion Planning using an Optimal Sampling-Based Method. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, 2013.

4. **Mihankhah E.** Autonomous Staircase Detection and Stair Climbing for a Tracked Mobile Robot using Fuzzy Controller. *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, 2009.

5. **Wenzeng G.** Development of a Transformable Wheel-track Mobile Robot and Obstacle-crossing Mode Selection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, China, 2014.

6. **Kyeong B.L.** Behavior planning of an unmanned ground vehicle with actively articulated suspension

to negotiate geometric obstacles. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, USA, 2009.

7. **Bin X.** Composite Control Based on Optimal Torque Control and Adaptive Kriging Control for the CRAB Rover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai International Conference Center, China, 2011.

8. **Jingli L.** Study on the Mobile Robot Reconfiguration Control Methods. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Shenyang, China, 2009.

9. **Weidong W.** The Optimization of Obstacle-Crossing and the Simulation in ADAMS of the Composite Sixwheeled-legged Robo. *Proceedings of the 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012)*, IEEE, 2012.

10. **Min X.** Kinematics Modeling and Step Climbing Study of an All-Terrain Wheeled Mobile Robot on Uneven Terrains. *Proceedings of the International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, IEEE, 2011.

11. **Kyeong B.L.** Obstacle-Overcoming Algorithm for Unmanned Ground Vehicle with Actively Articulated Suspensions on Unstructured Terrain. *Proceedings of the International Conference on Control Automation and Systems*, Seoul, Korea, 2008.

12. **Shuro N.** Concept of Adaptive Gait for Leg-wheel Robot, RT-Mover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guangzhou, China, 2012.

13. **Kyeong B.L.** Deliberative Planner for UGV with Actively Articulated Suspension to Negotiate Geometric Obstacles by Using Centipede Locomotion Pattern. *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea, 2010.

14. **Pierre L.** Wheel torque control for a rough terrain rover. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, 2004.

15. **Leah K.** Tip-over Prevention: Adaptive Control Development and Experimentation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Washington State Convention Center Seattle, Washington, 2015.

Received 09.11.2016

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**ХАРУЗИН Сергей Вадимович**

**KHARUZIN Sergey V.**

E-mail: skharuzin@yandex.ru

**ИВАНОВ Александр Александрович**

**IVANOV Aleksander A.**

E-mail: al\_ivanov@rtc.ru

**ШМАКОВ Олег Александрович**

**SHMAKOV Oleg A.**

E-mail: shmakov@rtc.ru