

УДК 629.1.03

Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесно- шагающим движителем с помощью математического моделирования

Дьяков А. С.^{1,*}, Рязанцев В. И.¹,
Анкинович Г. Г.¹

[*Diakov57@list.ru](mailto:Diakov57@list.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлена математическая модель транспортного робототехнического комплекса повышенной проходимости с нетрадиционным типом движителя, разработанная в программном комплексе инвариантного моделирования систем тел «ЭЙЛЕР». Основной особенностью комплекса является использование колесно-шагающих трехкатковых движителей. Рассмотрен процесс продольного шагания при котором происходят большие перемещения движителя. Проведена оценка подвижности транспортного робототехнического комплекса при преодолении единичной ступени, двойной ступени и рва высоты которых больше диаметра катка движителя. Созданная модель транспортного робототехнического комплекса позволила выявить потенциальные возможности преодоления препятствий, соизмеримых с его габаритами, за счет реализации функции продольного шагания.

Ключевые слова: транспортный робототехнический комплекс, математическая модель, проходимость, нетрадиционный тип движителя

Введение

"Согласно результатам исследований, мировой рынок только военной робототехники возрастет с 6 миллиардов долларов в 2010 году до 9 млрд долларов в 2016 году", сообщается в специальном выпуске российского журнала "Национальная оборона" [1].

Одним из важнейших направлений развития перспективной военной техники является создание транспортных робототехнических комплексов (ТРК), позволяющих снять ограничения, определяемые человеческим фактором, за счет исключения человека из процесса непосредственного управления объектом, что расширяет возможности улучшения подвижности и повышения живучести.

Исследованию улучшения подвижности ТРК посвящены работы российских и иностранных ученых [9-17], в которых в основном рассматривается управление движением. Вопросы взаимодействия колесного движителя с опорным основанием при преодолении

естественных и искусственных препятствий освещены в работах [7,8], однако в этих исследованиях не рассматривается преодоление препятствий соизмеримых с габаритами ТРК. В связи с этим решение задач профильной проходимости за счет использования колесно-шагающих трехкатковых движителей является важной и актуальной задачей.

Для теоретического исследования потенциальных свойств подвижности ТРК целесообразно использовать программные комплексы инвариантного моделирования динамики систем тел, такие как Adams [2], ФРУНД [3], «Универсальный механизм» [4], «Эйлер» [5] и другие, позволяющие решать задачи с «большими перемещениями», характерными для ТРК. Термин «большое перемещение» означает точное описание в уравнениях динамики угловой ориентации тела, без использования допущения о малости углов поворота [6].

Возможность движения наземного транспортного средства определяется, в первую очередь, реализацией тяговых усилий при взаимодействии колесного движителя с опорным основанием. Очевидно, что величины продольных реакций зависят от вертикальной нагрузки, приходящейся на движитель. Таким образом, при оценке подвижности ТРК будем использовать значения нормальных реакций катков движителя.

1 Математическая модель ТРК

Для исследования динамики движения ТРК при преодолении препятствий, соизмеримых с его геометрическими размерами, разработана пространственная математическая модель рис.1, в программном комплексе «Эйлер».

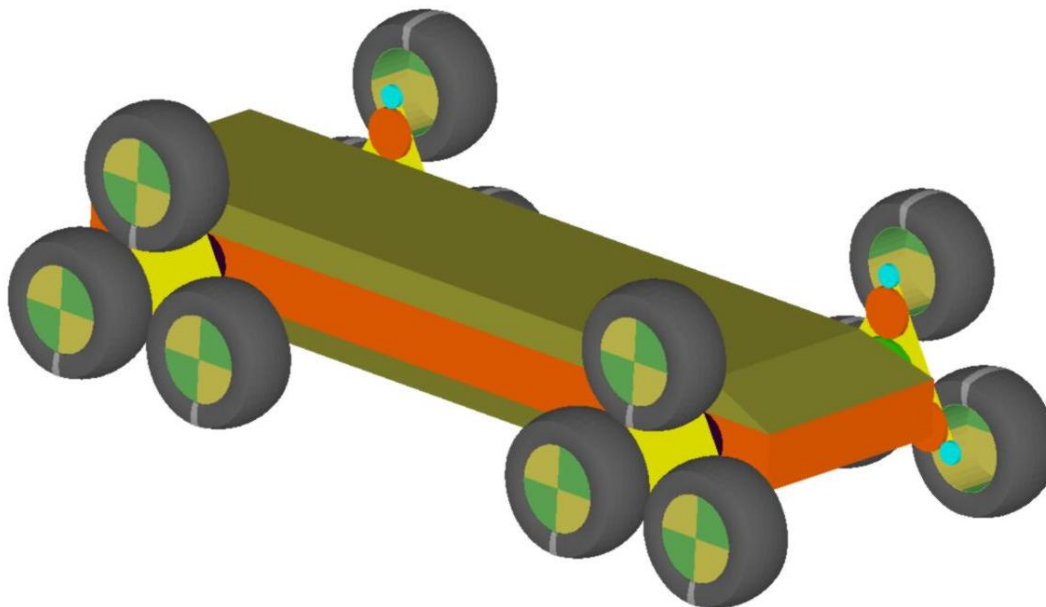


Рисунок 1 – Пространственная математическая модель ТРК с колесно-шагающим трехкатковым движителем

ТРК представляет собой универсальную платформу модульного типа, снаряженная масса которой составляет 2 тонны. Основной особенностью ТРК является использование колесно-шагающих трехкатковых движителей [7]. Схема движителя приведена на рис.2.

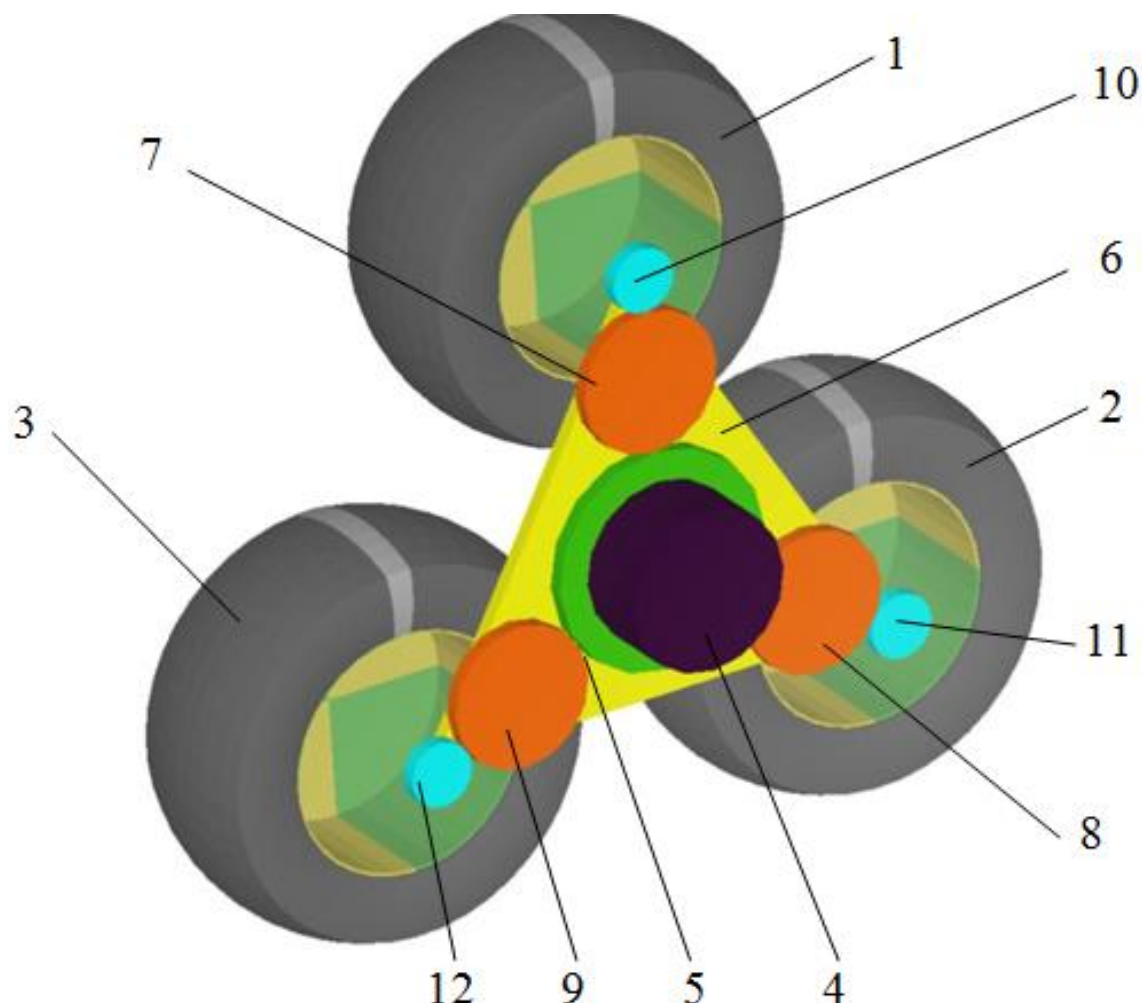


Рисунок 2 – Схема колесно-шагающего трехкаткового движителя

1 – каток «1»; 2 – каток «2»; 3 – каток «3»; 4 – ступица; 5 – ведущая шестерня; 6 – вращающая треугольная платформа; 7 – промежуточная шестерня «1»; 8 – промежуточная шестерня «2»; 9 – промежуточная шестерня «3»; 10 – малая шестерня «1»; 11 – малая шестерня «2»; 12 – малая шестерня «3»

Данный тип движителя (рис.2) состоит из следующих элементов: трех катков с номерами «1,2,3», оси которых жестко соединены между собой треугольной платформой 6, обеспечивающей равные межосевые расстояния. Оси катков жестко соединены с малыми шестернями 10,11,12, которые соединены через промежуточные шестерни 7,8,9 с ведущей шестерней 5, расположенной на ступице 4, соединённой с корпусом платформы.

Движитель работает следующим образом: момент подводится к ведущей шестерне 5; через промежуточные шестерни 7,8,9 момент передается на малые шестерни 10,11,12,

тем самым приводя во вращение катки 1,2,3. При движении по ровному, твердому основанию, момент передается только на те катки, которые находятся в контакте с опорной поверхностью. В случае преодоления препятствий, высота которых больше диаметра катка, движение ТРК происходит за счет реализации продольных реакций при взаимодействии катка с опорной поверхностью при вращении треугольной платформы, которая, в свою очередь, приводится в движение моментом, подводимым к ступице.

2 Результаты имитационного математического моделирования при движении ТРК по ровному твердому опорному основанию

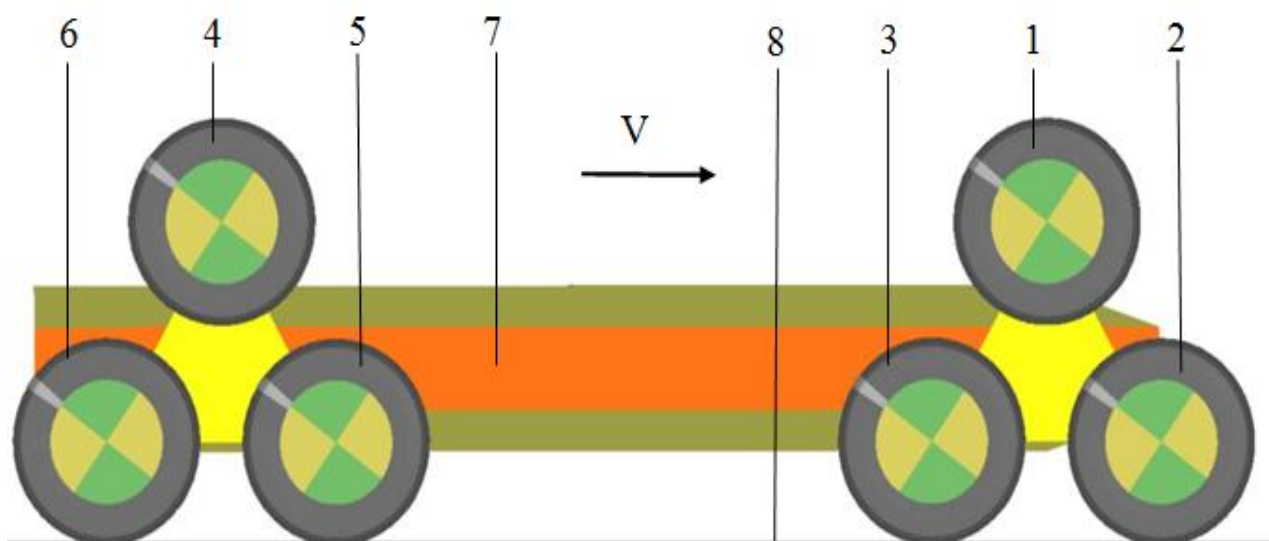


Рисунок 3 – Движение ТРК по твердому опорному основанию

1 – каток переднего движителя «1»; 2 – каток переднего движителя «2»; 3 – каток переднего движителя «3»; 4 – каток заднего движителя «1»; 5 – каток заднего движителя «2»; 6 – каток заднего движителя «3»; 7 – платформа ТРК; 8 – твердое опорное основание.

Рассмотрим распределение нормальных реакций катков движителей, находящихся в контакте с твердым опорным основанием, во время прямолинейного движения. Так как центр масс находится на равном расстоянии между левым и правым движителем, проанализируем нормальные реакции катков движителей только по одному борту. Результаты моделирования представлены в виде графиков изменения нормальных реакций катков переднего и заднего движителей в начале движения (рис.4).

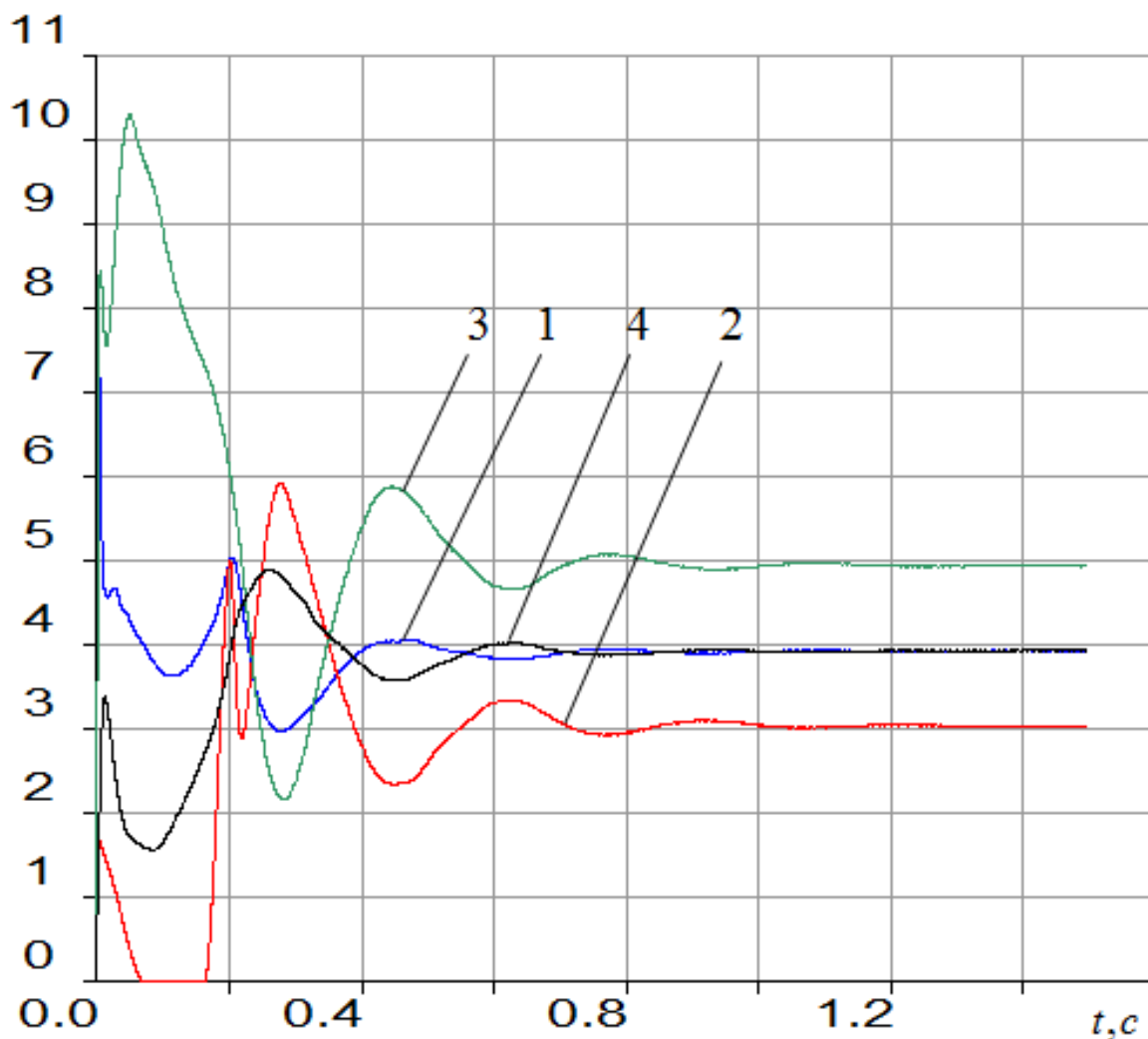


Рисунок 4 – Изменение нормальных реакций катков движителей при движении из произвольного положения

1 – изменение нормальной реакции переднего катка «2» R_{z1-2} ; 2 – изменение нормальной реакции переднего катка «3» R_{z1-3} ; 3 – изменение нормальной реакции заднего катка «2» R_{z2-2} ; 4 – изменение нормальной реакции заднего катка «3» R_{z2-3} .

Из анализа графика на рис.4, следует, что в период начала движения происходит перераспределение нормальных реакция катков движителей, как между катками движителя, так и между передними и задними осями движителей.

Наиболее нагруженным является каток «2» заднего движителя, а наименее нагруженным каток «3» переднего движителя. Нормальные реакции катка «2» переднего движителя и каток «3» заднего движителя практически совпадают по величине. Такой характер перераспределения нормальных реакций катков движителей объясняется тем, что треугольная платформа стремится повернуться по ходу движения, но этого момента недостаточно,

пока сопротивление качению катка движителей меньше, чем подводимый момент к ступице для поворота треугольной платформы движителя.

3 Результаты имитационного математического моделирования при преодолении ТРК ступени, высота которой больше диаметра катка движителя

Рассмотрим случай преодоления ТРК препятствия в виде ступени, высота которой больше диаметра катка движителя рис.5.

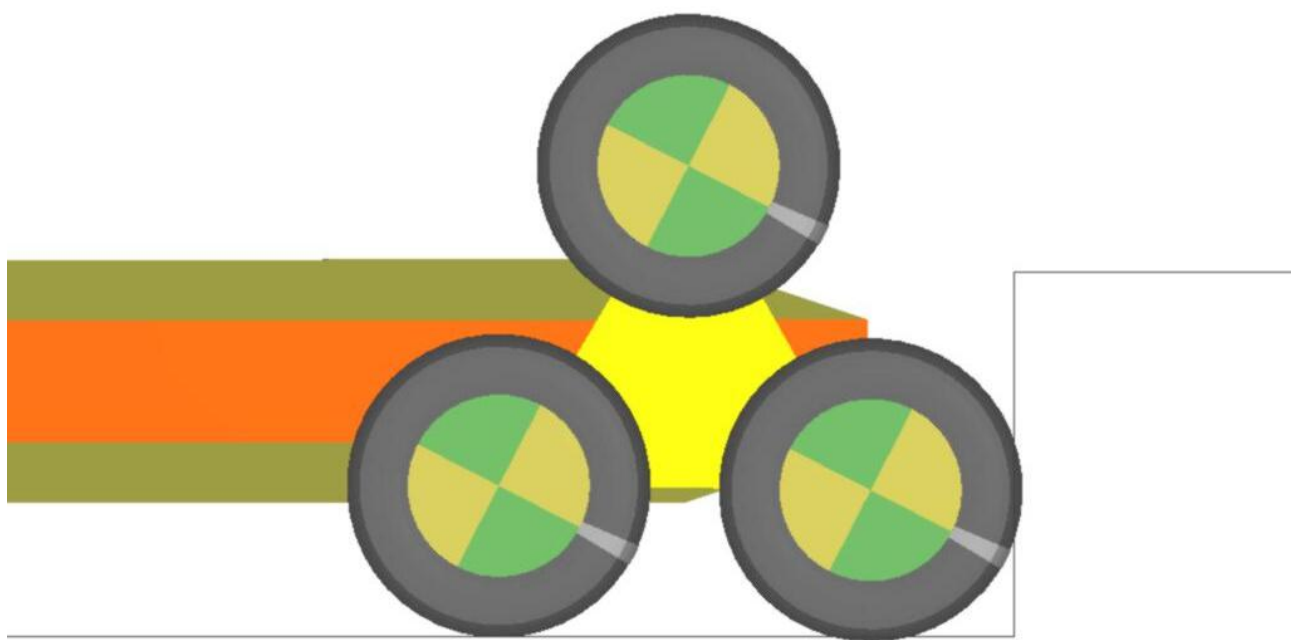


Рисунок 5 – Положение ТРК перед преодолением ступени, высота которой больше диаметра катка движителя

Ввиду того, что момент реализуемый на катке не превышает предельный по сцеплению при взаимодействии со ступенью, чем момент подводимый к ступице, треугольная платформа начнет поворот относительно оси переднего колеса, совершая продольное шагание.

Характер изменения нормальных реакций катков переднего движителя при реализации функции шагания представлен на рис.6.

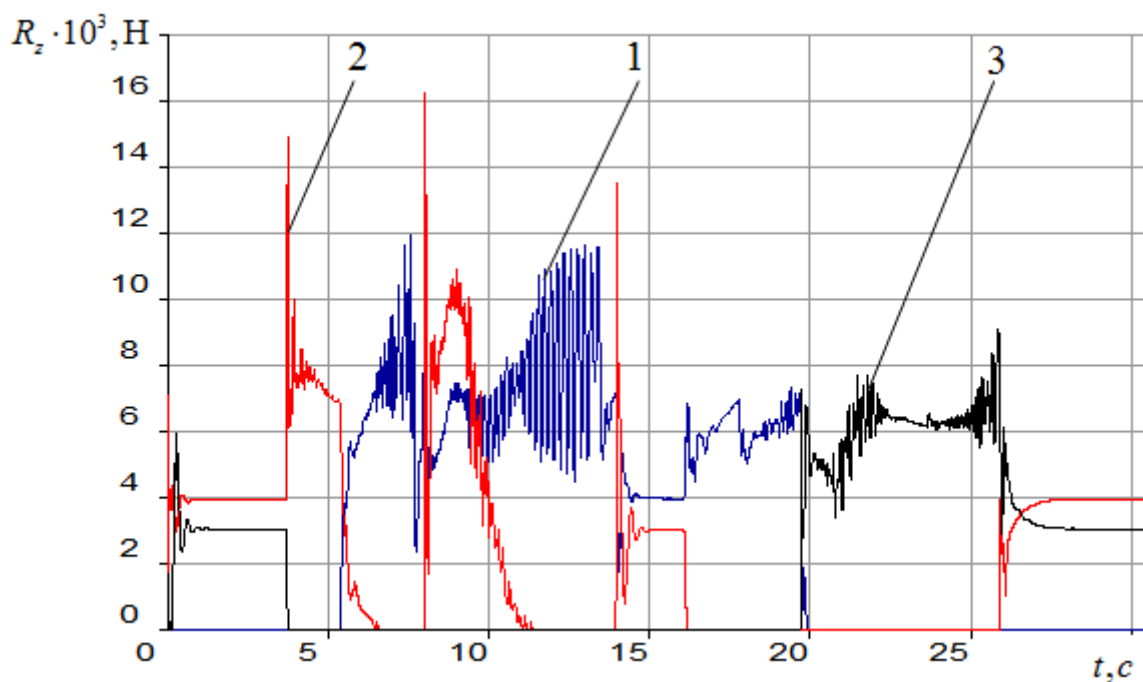


Рисунок 6 - Изменение нормальных реакций катков переднего движителя R_z , в ходе реализации продольного шагания для преодоления ступени

1 – изменение нормальной реакции переднего катка «1» R_{z1-1} ; 2 – изменение нормальной реакции переднего катка «2» R_{z1-2} ; 3 – изменение нормальной реакции переднего катка «3» R_{z1-3} .

Перераспределение нормальных реакций катков позволяет провести анализ нагружения переднего движителя в процессе реализации функции продольного шагания для преодоления ступени. Анализ результатов моделирования, представленных на рис.6, позволяет сделать вывод, что шагание ТРК при преодолении ступени сопровождается пиковыми нагрузками на движитель в завершающей фазе шага (рис.7).

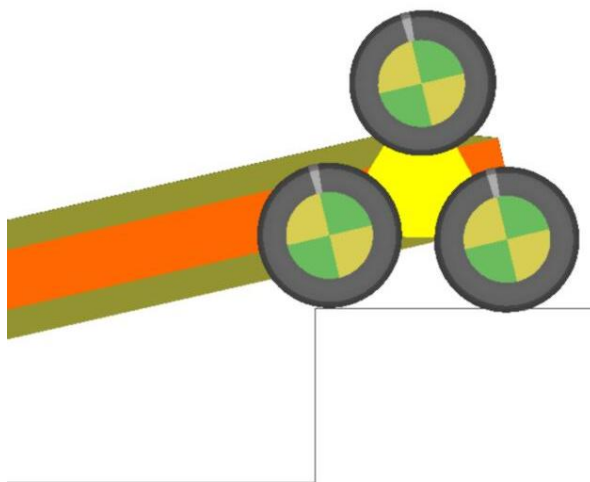


Рисунок 7 – Заключительная фаза продольного шага переднего движителя

Изменение нормальных реакций катков заднего движителя в процессе реализации функции шагания представлена на рис.8.

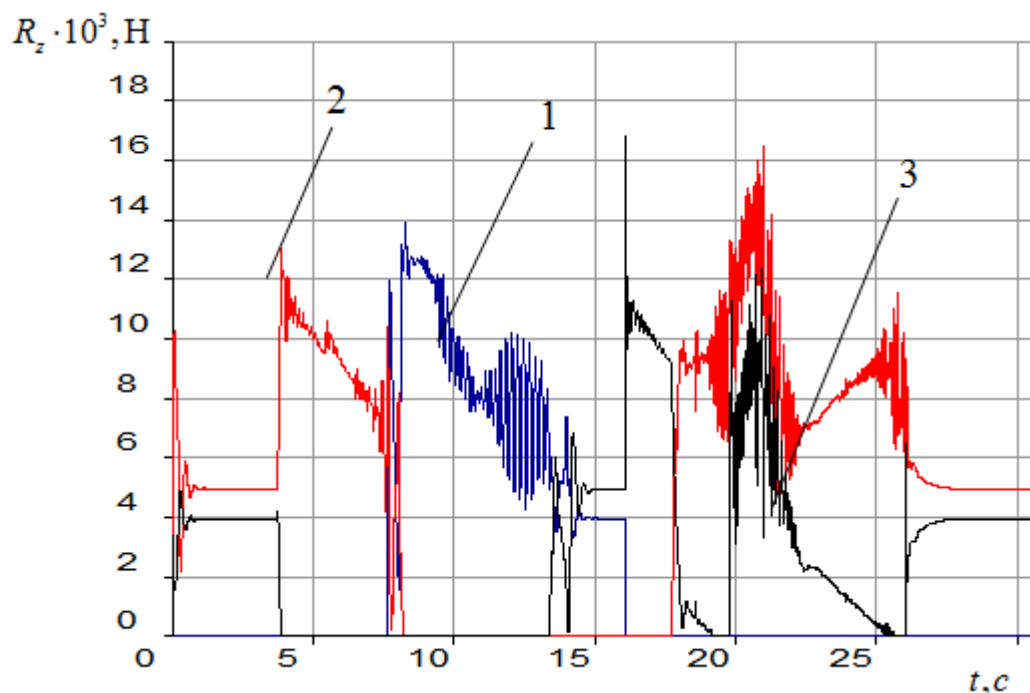


Рисунок 8 - Изменение нормальных реакций катков заднего движителя R_z , в процессе реализации продольного шагания для преодоления ступени

1 – изменение нормальной реакции заднего катка «1» R_{z2-1} ; 2 – изменение нормальной реакции заднего катка «2» R_{z2-2} ; 3 – изменение нормальной реакции заднего катка «3» R_{z2-3} .

Аналогично, перераспределение нормальных реакций катков в процессе продольного шагания, для преодоления ступени позволяет провести анализ нагружения заднего движителя. На рис.9 показано положение модели после преодоления единичной ступени с помощью реализации функции продольного шагания за счет работы движителей с тремя катками.

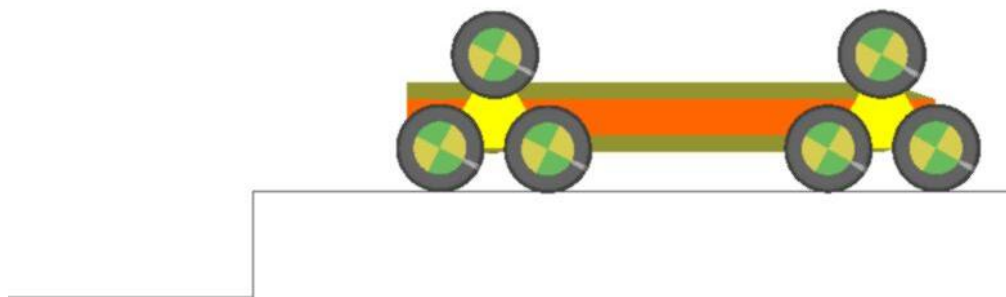


Рисунок 9 – Положение модели ТРК после преодоления единичной ступени

4 Результаты имитационного математического моделирования при преодолении ТРК двух ступеней, высота которой больше диаметра катка движителя

На рис.10 показано положение ТРК, перед преодолением двух ступеней, высоты которых больше диаметра катка движителя.

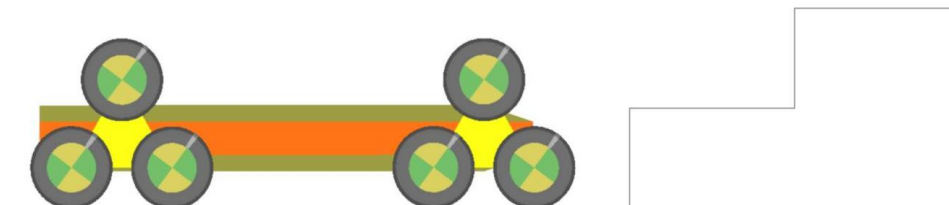


Рисунок 10 – Положение модели ТРК перед преодолением двух ступеней

На рис.11 представлено распределение нормальных реакций катков переднего движителя и на рис.12 распределение нормальных реакций катков заднего движителя, в процессе продольного шагания при преодолении двух ступеней, высота которых больше диаметра катка движителя.

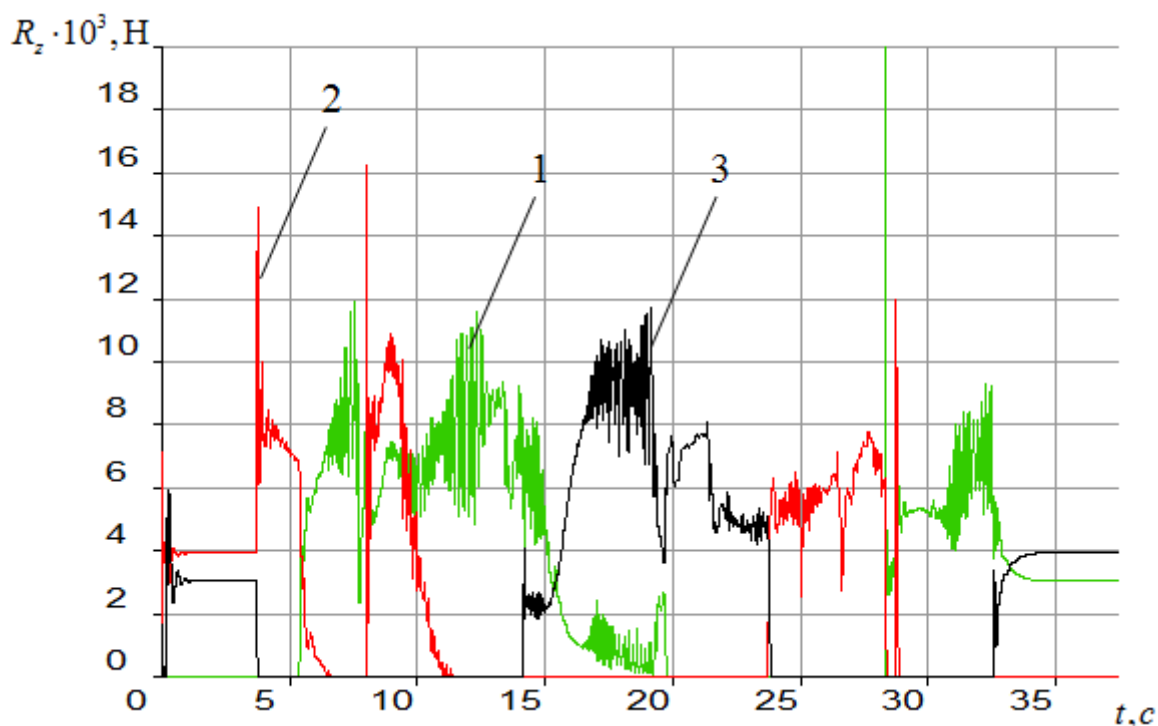


Рисунок 11 - Изменение нормальных реакций катков переднего движителя, в процессе реализации продольного шагания для преодоления двух ступеней

1 – изменение нормальной реакции переднего катка «1» R_{z1-1} ; 2 – изменение нормальной реакции переднего катка «2» R_{z1-2} ; 3 – изменение нормальной реакции переднего катка «3» R_{z1-3} .

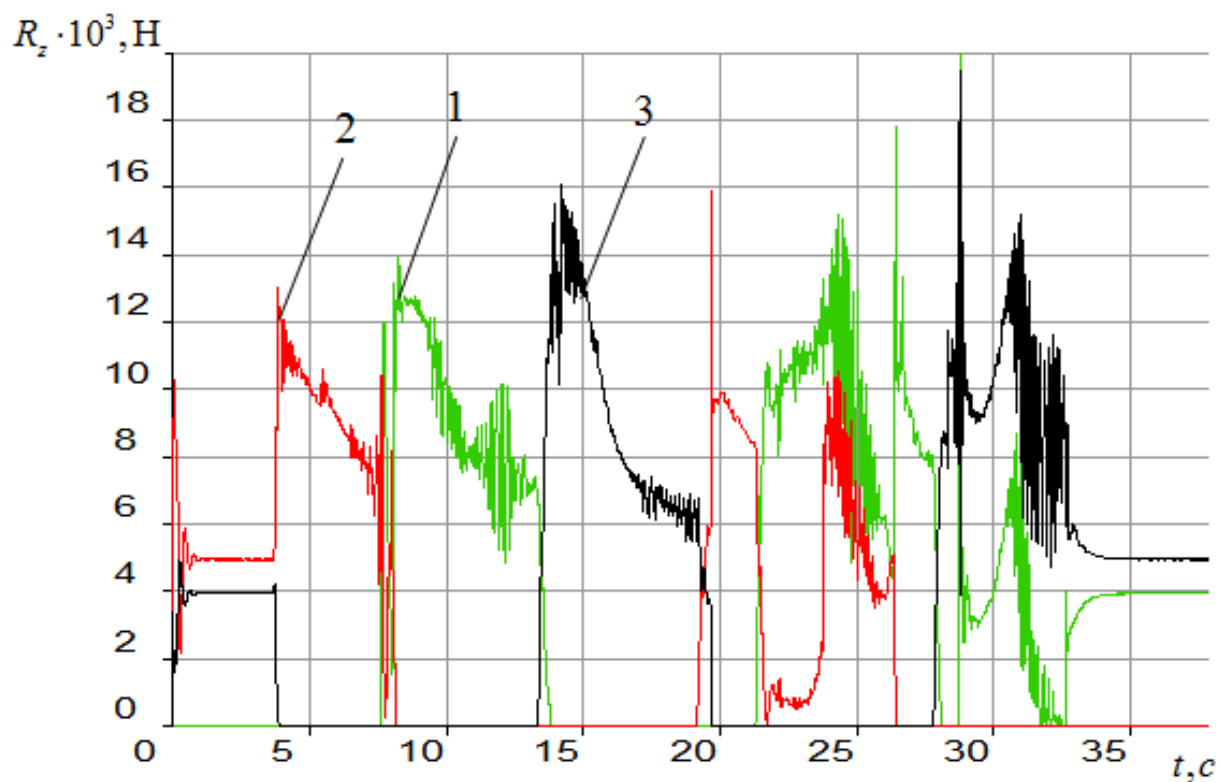
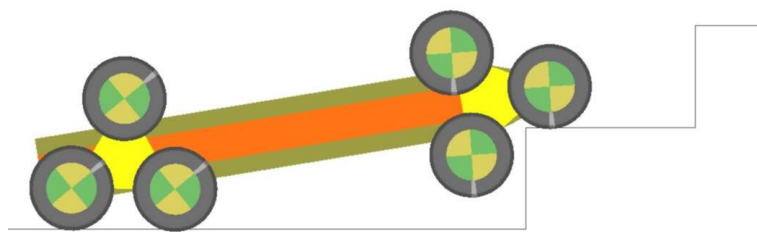


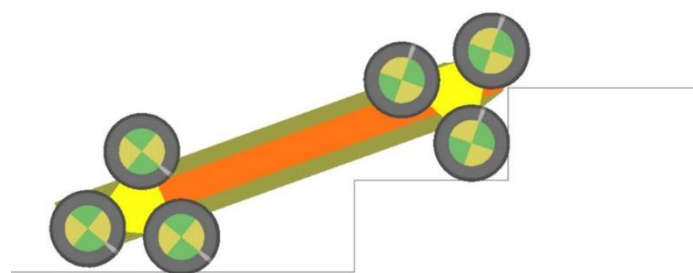
Рисунок 12 - Изменение нормальных реакций катков заднего движителя R_z , в процессе реализации продольного шагания для преодоления двух ступеней

1 – изменение нормальной реакции переднего катка «1» R_{z2-1} ; 2 – изменение нормальной реакции переднего катка «2» R_{z2-2} ; 3 – изменение нормальной реакции переднего катка «3» R_{z2-3} .

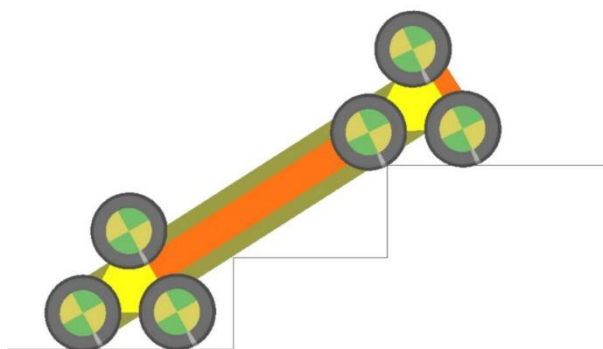
Анализ графиков на рис.11-12 показывает, что пиковые нагрузки на катки заднего движителя на 20% больше чем переднего. На рис.13 показаны этапы преодоления двух ступеней ТРК.



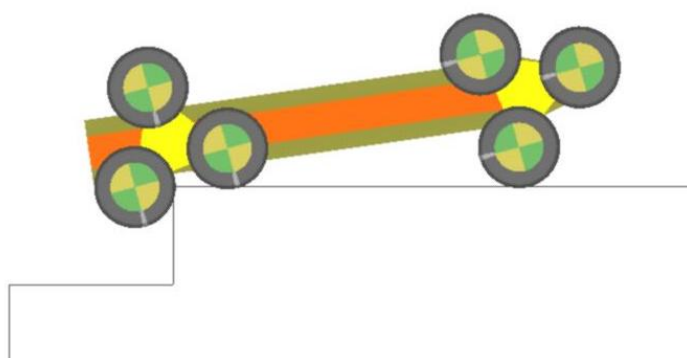
а)



б)



в)

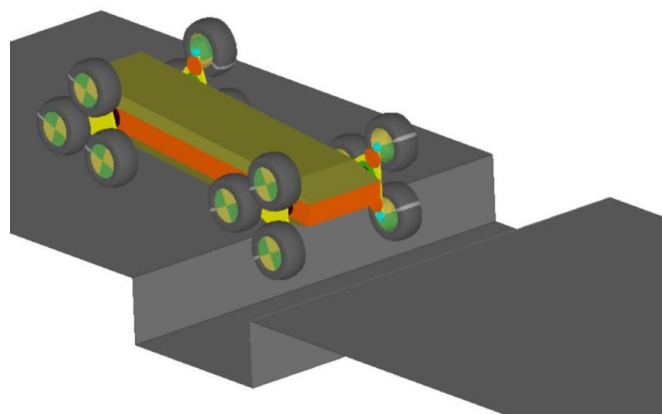


г)

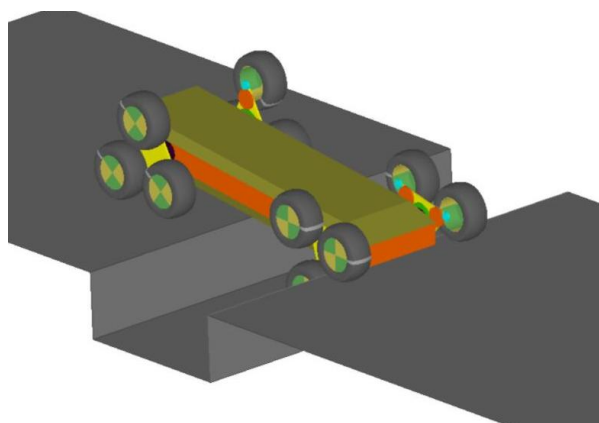
Рисунок 13 - Этапы преодоления двух ступеней ТРК

5 Результаты имитационного математического моделирования при преодолении ТРК рва, глубина которого больше диаметра катка движителя

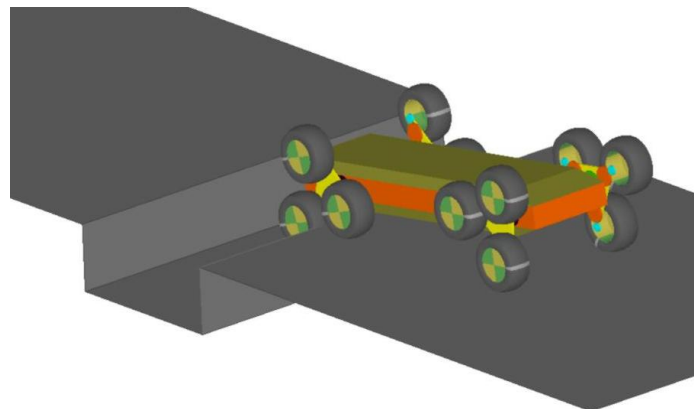
Рассмотрим вариант преодоления рва, глубина которого больше диаметра катка движителя. Этапы преодоления показаны на рис.13-15.



а)



б)



в)

Рисунок 14 – Этапы преодоления рва ТРК

На рис.15 представлены распределение нормальных реакций катков переднего движителя и на рис.16 распределение нормальных реакций катков заднего движителя, в процессе продольного шагания при преодолении рва, глубина которого больше диаметра катка движителя.

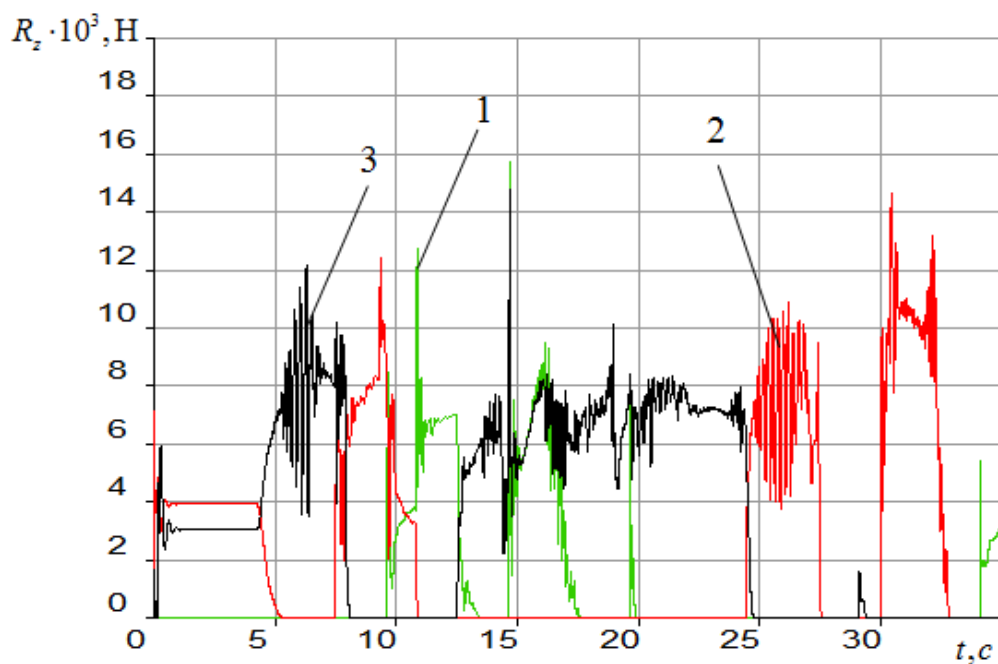


Рисунок 15 - Изменение нормальных реакций катков переднего движителя, в процессе реализации продольного шагания для преодоления рва

1 – изменение нормальной реакции переднего катка «1» R_{z1-1} ; 2 – изменение нормальной реакции переднего катка «2» R_{z1-2} ; 3 – изменение нормальной реакции переднего катка «3» R_{z1-3} .

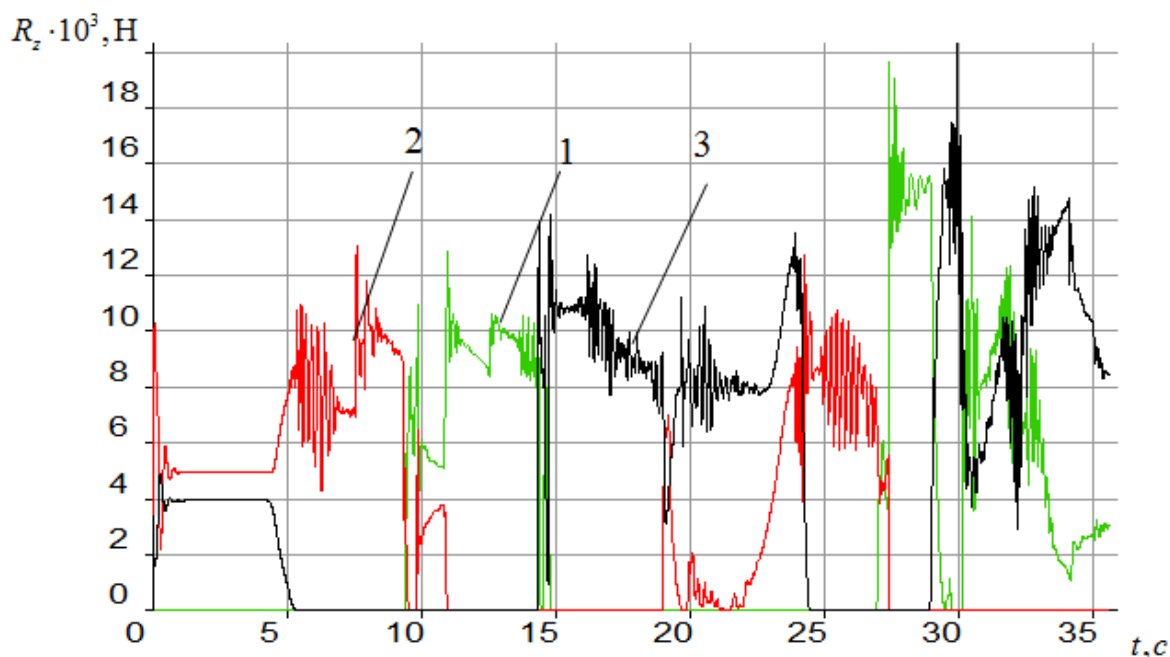


Рисунок 16 - Изменение нормальных реакций катков заднего движителя R_z , в процессе реализации продольного шагания для преодоления рва

1 – изменение нормальной реакции заднего катка «1» R_{z2-1} ; 2 – изменение нормальной реакции заднего катка «2» R_{z2-2} ; 3 – изменение нормальной реакции заднего катка «3» R_{z2-3} .

Заключение

Создана новая модель ТРК, которая позволила выявить потенциальные возможности преодоления препятствий, соизмеримых с его габаритами, за счет реализации продольного шагания с помощью колесно-шагающих трехкатковых движителей. Модель позволяет исследовать процесс продольного шагания при преодолении препятствий различных габаритов и форм. По результатам моделирования возможно определение пиковых режимов нагружения на элементы конструкции.

Анализ результатов моделирования динамики движения ТРК при преодолении препятствий, соизмеримых с его габаритами, позволяет сделать вывод, что использование колесно-шагающих трехкатковых движителей может обеспечивать требуемый уровень проходимости и как следствие, обеспечить повышение подвижности ТРК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и «Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана».

Список литературы

1. Состояние и перспектива применения современных робототехнических систем // Национальная оборона. 2014. № 5. Режим доступа: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2014/0515/185213228/detail.shtml> (дата обращения 12.11.2014).
2. MSC.Software: сайт компании. Режим доступа: <http://www.mscsoftware.ru> (дата обращения 10.10.2014).
3. ПК FRUND: Математическое моделирование в науке и машиностроении: сайт. Волгоградский гос. техн. ун-т. Режим доступа: <http://frund.vstu.ru> (дата обращения 10.10.2014).
4. ПК «Универсальный механизм» // Universal Mechanism: Software Lab: сайт. Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения 15.10.2014).
5. ПК «Эйлер» // ЗАО «АвтоМеханика»: сайт компании. Режим доступа: <http://www.euler.ru> (дата обращения 15.10.2014).
6. Горобцов А.С., Карцов С.К., Поляков Ю.А. Особенности построения пространственных динамических моделей автомобилей с учётом больших движений твёрдых тел // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 6, ч. 1. С. 102-115.
7. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.

8. Шухман С.Б., Соловьев В.И., Малкин М.А. Теоретическое исследование профильной проходимости полноприводного автомобиля // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2010. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/163675.html> (дата обращения 01.11.2014).
9. Williams R., Carter B., Gallina P., Rosati G. Wheeled Omni-Directional Robot Dynamics Including Slip // Proc. ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Vol. 5. ASME, 2002. P. 201-207. DOI: [10.1115/DETC2002/MECH-34221](https://doi.org/10.1115/DETC2002/MECH-34221)
10. Tadakuma K., Tadakuma R., Berengeres J. Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle with “Omni-Ball”: Spherical Wheels // Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS 2007), San Diego, CA. IEEE Publ., 2007. P. 33-39. DOI: [10.1109/IROS.2007.4399560](https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399560)
11. Yu H., Dubowsky S., Skwersky A. Omni-directional Mobility Using Active Split Offset Castors // ASME J. of Mechanical Design. 2004. Vol. 126, no.5. P. 822-829. DOI: [10.1115/1.1767181](https://doi.org/10.1115/1.1767181)
12. Park T., Lee J., Yi B., Kim W., You B. Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-directional Mobile Robots // Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'02), Washington DC. IEEE Publ., 2002. P. 732-737. DOI: [10.1109/ROBOT.2002.1013445](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013445)
13. Udengard M., Iagnemma K. Design of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain // Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2008), Pasadena, CA. IEEE Publ., 2008. P. 1666-1671. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543440](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543440)
14. Wong J. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Wiley, New York, 2008.
15. Quinn R.D., Nelson G.M., Bachmann R.J., Kingsley D.A., Offi J.T., Allen T.J., Ritzmann R.E. Parallel Complementary Strategies For Implementing Biological Principles Into Mobile Robots // Int. J. of Robotics Research (IJRR). 2003. Vol. 22. P. 169-186. DOI: [10.1177/027836403128964962](https://doi.org/10.1177/027836403128964962)
16. Boxerbaum A., Oro J., Peterson G., Quinn R.D. The Latest Generation Whegs Robot Features a Passive-Compliant Body Joint // IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE Publ., 2008. P. 1636-1641. DOI: [10.1109/IROS.2008.4650997](https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650997)
17. Bishop B.E., Wick C.E. Educational Control Studies of a Differentially Driven Mobile Robot // Proceedings of the 35th Southwest Symposium on Systems Theory, 16-18 March 2003. IEEE Publ., 2003. P. 308-312. DOI: [10.1109/SSST.2003.1194580](https://doi.org/10.1109/SSST.2003.1194580)

Mathematical Modelling to Solve Tasks of Profiled Cross of Robot Systems with a Wheel-Legged Propulsion

A.S. Diakov^{1,*}, V.I. Ryazantsev¹,
G.G. Ankinovich¹

^{*}Diakov57@list.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: transport robotics, mathematical model, permeability, unconventional type of propulsion

One of the main trends for development of promising military equipment is to create transport robot systems (TRS).

To conduct a theoretical study of the potential properties of TRS mobility was used a software package for invariant simulation of multibody dynamics system "Euler", which allows us to solve problems regarding the "large displacements", typical for TRS.

The modelling results of TRS motion dynamics when overcoming the single-stage and two stages, which are higher than the roller diameter of propeller are obtained.

Analysis of modelling results of the TRS motion dynamics to overcome obstacles commensurate with its dimensions allows us to conclude that the use of wheel-legged three-roller propulsion can provide the required level of permeability and, as a result, increasing TRS mobility.

References

1. The state and prospects of application of modern robotic systems. *Natsional'naya oborona* = *National Defense*, 2014, no. 5. Available at: <http://www.oborona.ru/includes/periodics/defense/2014/0515/185213228/detail.shtml>, accessed 01.11.2014. (in Russian).
2. MSC.Software: company website. Available at: <http://www.mscsoftware.ru>, accessed 01.11.2014. (in Russian).
3. PP FRUND: Mathematical modelling on science and manufacturing: website. Volgograd State Technical University. Available at: <http://frund.vstu.ru>, accessed 01.11.2014. (in Russian).
4. Program package "Universal Mechanism". Universal Mechanism: Software Lab: website. Available at: <http://www.universalmechanism.com>, accessed 01.11.2014. (in Russian).

5. PP "EULER". JSC "Automechanika": company website. Available at: <http://www.euler.ru>, accessed 01.11.2014. (in Russian).
6. Gorobtsov A.S., Kartsov S.K., Polyakov Yu.A. Particularities of construction of cars spatial dynamic models taking into account of large motions of solid bodies. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical science], 2013, is. 6, pt. 1, pp. 102-115. (in Russian).
7. Ageykin Ya.S. *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli* [All-terrain wheels and combined propulsors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 184 p. (in Russian).
8. Shukhman S.B., Solov'ev V.I., Malkin M.A. Calculated research of the all-wheel drive vehicles overcoming geometrical obstacles ability. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2010, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/163675.html>, accessed 01.11.2014. (in Russian).
9. Williams R., Carter B., Gallina P., Rosati G. Wheeled Omni-Directional Robot Dynamics Including Slip. *Proc. ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Vol. 5.* ASME, 2002, pp. 201-207. DOI: [10.1115/DETC2002/MECH-34221](https://doi.org/10.1115/DETC2002/MECH-34221)
10. Tadakuma K., Tadakuma R., Berengeres J. Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle with "Omni-Ball": Spherical Wheels. *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS 2007)*, San Diego, CA. IEEE Publ., 2007, pp. 33-39. DOI: [10.1109/IROS.2007.4399560](https://doi.org/10.1109/IROS.2007.4399560)
11. Yu H., Dubowsky S., Skwersky A. Omni-directional Mobility Using Active Split Offset Castors. *ASME J. of Mechanical Design*, 2004, vol. 126, no.5, pp. 822-829. DOI: [10.1115/1.1767181](https://doi.org/10.1115/1.1767181)
12. Park T., Lee J., Yi B., Kim W., You B. Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-directional Mobile Robots. *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '02)*, Washington DC. IEEE Publ., 2002, pp. 732-737. DOI: [10.1109/ROBOT.2002.1013445](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013445)
13. Udengaard M., Iagnemma K. Design of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. *Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2008)*, Pasadena, CA. IEEE Publ., 2008, pp. 1666-1671. DOI: [10.1109/ROBOT.2008.4543440](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543440)
14. Wong J. *Theory of Ground Vehicles*. 4th ed. Wiley, New York, 2008.
15. Quinn R.D., Nelson G.M., Bachmann R.J., Kingsley D.A., Offi J.T., Allen T.J., Ritzmann R.E. Parallel Complementary Strategies For Implementing Biological Principles Into Mobile Robots. *Int. J. of Robotics Research (IJRR)*, 2003, vol. 22, pp. 169-186. DOI: [10.1177/027836403128964962](https://doi.org/10.1177/027836403128964962)
16. Boxerbaum A., Oro J., Peterson G., Quinn R.D. The Latest Generation Whegs Robot Features a Passive-Compliant Body Joint. *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE Publ., 2008, pp. 1636-1641. DOI: [10.1109/IROS.2008.4650997](https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650997)
17. Bishop B.E., Wick C.E. Educational Control Studies of a Differentially Driven Mobile Robot. *Proceedings of the 35th Southwest Symposium on Systems Theory*, 16-18 March 2003. IEEE Publ., 2003, pp. 308-312. DOI: [10.1109/SSST.2003.1194580](https://doi.org/10.1109/SSST.2003.1194580)