

УДК 629.3

Г.О. Котиев, А.С. Дьяков

МЕТОД РАЗРАБОТКИ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Все современные исследования, связанные с роботизацией и с созданием дистанционно управляемых транспортных средств, направлены на обеспечение управляемого движения без экипажа, но практически отсутствуют работы, направленные на повышение подвижности безэкипажных транспортных средств (БНТС). В этой связи обеспечение высокой подвижности БНТС путем выбора типа движителей и оптимальных конструктивных параметров ходовых систем при отсутствии ограничений, связанных с психофизиологическими возможностями человека, является актуальной научной проблемой. Обеспечение высокой подвижности БНТС при движении по дорогам и местности, а так же при преодолении препятствий может быть достигнуто за счет решения следующих задач на этапе проектирования: 1. Научного обоснования совокупности эксплуатационных свойств БНТС, направленных на обеспечение высокой подвижности при отсутствии человека на борту. 2. Разработка математических моделей БНТС, отличающихся возможностью моделирования «больших» перемещений. Под «большими» понимаются такие перемещения, при описании которых нельзя пренебречь геометрической нелинейностью при моделировании динамики БНТС (падения, перевороты транспортных средств и т.д.). 3. Проведение выбор типа движителя и оптимизации конструктивных параметров ходовых систем с целью обеспечения заданных показателей подвижности БНТС. 4. Проведение технико-экономического анализа оптимальных конструктивных решений для различных ходовых систем БНТС. Совокупность решения задач представляет собой метод обеспечения подвижности БНТС, позволяющий на этапе проектирования осуществить научно обоснованный выбор типа движителя и провести оптимизацию конструктивных параметров ходовых систем при отсутствии ограничений, связанных с психофизиологическими возможностями человека.

Ходовая система; подвижность; безэкипажное транспортное средство; математическое моделирование; динамика; оптимизация; технико-экономический анализ.

G.O. Kotiev, A.S. Diakov

METHOD OF DEVELOPING HIGH-MOBILITY SUSPENSION SYSTEMS OF UNMANNED GROUND VEHICLES

All modern research related to robotization and the creation of remote-controlled vehicles but are aimed at ensuring the controlled motion without a crew, but almost no work aimed at increasing the mobility of unmanned vehicles (BNTS). In this context, ensuring high mobility BNTS by choosing the type of propulsion and optimal design parameters of running systems with no limitations associated with psychophysiological human capabilities, it is an actual scientific problem. Ensuring high mobility BNTS when driving on roads and terrain, as well as in overcoming the obstacles it can be achieved by solving the following problems at the design stage: 1. Scientific studies aggregate performance properties BNTS aimed at ensuring high mobility in the absence of people on board. 2. Development of mathematical models BNTS other than the possibility of modeling the "big" movements. By "large" refers to such movements, the description of which can not be neglected in the modeling of geometric nonlinearity dynamics BNTS (fall, coups vehicles, etc.). 3. Conducting range of propeller type and optimize design parameters of running systems to ensure set parameters BNTS mobility. 4. Conduct a feasibility study of optimal design solutions for a variety of running BNTS systems. The set of solutions of problems is a method of providing mobility BNTS allowing the design phase to implement evidence-based selection-type propeller and optimize design parameters of running systems with no limitations associated with psychophysiological human capabilities.

Suspension system; mobility; unmanned vehicle; mathematical modeling; dynamics; optimization; engineering-economic analysis.

Введение. Для развития различных отраслей экономики и обеспечения обороноспособности особое значение имеет эффективное выполнение транспортных задач в условиях не пригодных или опасных для человека. Особая роль в решении этой проблемы отводится безэкипажным наземным транспортным средствам (БНТС).

В РФ создание БНТС идет по трем основным направлениям. Первое направление связано с роботизацией существующих образцов транспортных средств, созданных для экипажного применения, за счет внедрения дистанционного управления. Второе направление не связано напрямую с модернизацией существующей транспортной базы, однако в качестве основы применяются компоненты существующих образцов. Третье направление предполагает создание транспортных средств изначально проектируемых для безэкипажного применения [1, 8–10].

Все современные исследования, связанные с роботизацией и с созданием дистанционно управляемых транспортных средств (рис. 1), направлены на обеспечение управляемого движения в отсутствие экипажа на борту, при этом практически отсутствуют работы, направленные на повышение подвижности БНТС при отсутствии ограничений, связанных с психофизиологическими возможностями человека.

Под ограничениями, связанными с психофизиологическими возможностями человека, следует понимать:

- ◆ воздействие окружающей среды несовместимое с жизнью (химическое, бактериологическое и радиационное воздействие на организм);
- ◆ положение человека относительно опорной поверхности;
- ◆ величина усилий на органах управления;
- ◆ вибронгруженность;
- ◆ утомляемость (включая скорости реакции и восприятия зрительной информации).



Рис. 1. Роботизированные ТС разработанных в РФ: а – транспортный робототехнический комплекс «КЛАВИР» [11]; б – дистанционно-управляемый робототехнический комплекс разминирования [11]; в – мобильный робототехнический комплекс «МРК-002-БГ-57» [12]; г – транспортный робототехнический комплекс «АЛИСА» [11]; д - беспилотный автомобиль «КАМАЗ» [13]; ж – робототехнический комплекс разминирования «УРАН-6» [14]

В этой связи обеспечение высокой подвижности БНТС путем обоснованного выбора типа двигателей и оптимальных конструктивных параметров ходовых систем на этапе проектирования является актуальной научной проблемой.

Обеспечение высокой подвижности БНТС при движении по дорогам и местности, а так же при преодолении препятствий может быть достигнуто за счет решения следующих задач на этапе проектирования:

1. Научного обоснования совокупности эксплуатационных свойств БНТС, направленных на обеспечение высокой подвижности при отсутствии человека на борту.

2. Разработка математических моделей БНТС, отличающихся возможностью моделирования «больших» перемещений. Под «большими» понимаются такие перемещения, при описании которых нельзя пренебречь геометрической нелинейностью при моделировании динамики БНТС (падения, перевороты транспортных средств и т.д.).

3. Проведение выбора типа двигателя и оптимизации конструктивных параметров ходовых систем с целью обеспечения заданных показателей подвижности БНТС.

4. Проведение технико-экономического анализа оптимальных конструктивных решений для различных ходовых систем БНТС.

Структурная схема реализации метода обеспечения высокой подвижности БНТС представлена на рис. 2.



Рис.2. Структурная схема реализации метода обеспечения подвижности

1. Обоснование совокупности показателей эксплуатационных свойств БНТС.

На первом этапе в зависимости от функционального назначения и области применения определяется уровень эксплуатационных свойств БНТС, которые, в отличие от экипажных транспортных средств, могут совершать «большие» перемещения с изменением устойчивого положения машины относительно опорной поверхности, а также ограничены нормами по ударной- и вибробезопасности, скоростями управляющих воздействий и т.д. Также на первом этапе определяется перечень возможных конструктивных реализаций движителей и кинематических характеристик несущей системы.

2. Разработка программных средств имитационного математического моделирования динамики БНТС. На втором этапе с использованием программного комплекса инвариантного моделирования динамики систем тел [3] создаются программные средства имитации динамики БНТС, в том числе, с нетрадиционными типами движителей и различными типами энергетических установок, с целью прогнозирования подвижности на основе имитационного математического моделирования на совокупности статистически заданных условий эксплуатации и при преодолении препятствий. Основной особенностью таких программных средств является моделирование «больших» перемещений [2]. Уравнения динамики в этом случае выражаются в форме дифференциально-алгебраических уравнений. Формирование таких уравнений производится автоматически с помощью универсальных комплексов моделирования динамики систем тел [3]. В качестве примера рассмотрим модель БНТС с колесным движителем, структурная схема которой представлена на рис. 3. Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры БНТС с колесной формулой 8x8 и тяговым электродвигателем

Масса БНТС, кг	7000
Момент инерции, относительно оси x J_x , кг·м ²	4267
Момент инерции, относительно оси y J_y , кг·м ²	13274
Момент инерции, относительно оси z J_z , кг·м ²	15935
Номинальная мощность тягового электродвигателя N_e , Вт	2000
Минимальные устойчивые обороты электродвигателя ω_{\min} , рад/с	10
Максимальные обороты электродвигателя ω_{\max} , рад/с	42
Радиус колеса r , м	0,5

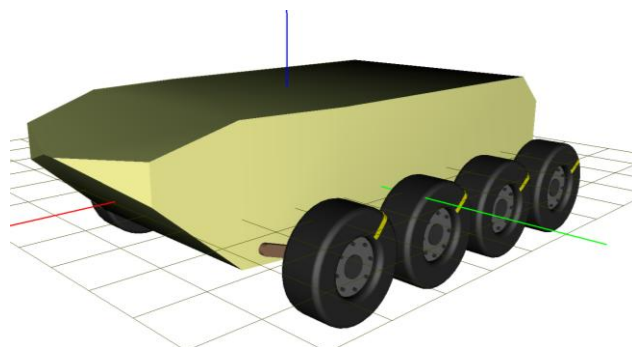


Рис. 3. Модель БНТС с колесным движителем в сборе

В программном комплексе многотельного моделирования «Универсальный механизм» [3] математическая модель БНТС представляется в виде совокупности тел, с различными упруго-демпфирующими характеристиками. Тела связываются между собой кинематическими парами различных видов и классов. Кроме кинематических пар, тела могут быть соединены пружинами, демпферами, сайлентблоками, шарнирами с зазором и другими нелинейными элементами.

Модель корпуса БНТС

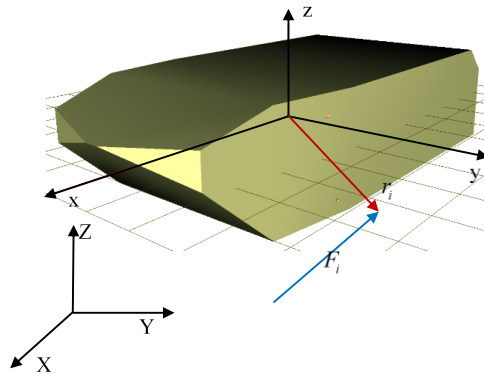


Рис. 4. Модель корпуса БНТС

Уравнения динамики корпуса:

$$\begin{cases} m\ddot{S}_c = \sum_1^{k_f} F_i; \\ J\dot{\omega}_c = \sum_1^{k_f} (A^T F_i) \times r_i + \sum_1^{k_m} M_{ei} + I \times \omega_c, \end{cases}$$

где $S_c = (X, Y, Z)^T$ – вектор координат центра масс корпуса в неподвижной системе координат; $\omega_c = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – вектор проекции угловой скорости корпуса на подвижную, связанную с корпусом, систему координат; m – диагональная матрица масс тела; $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$ – диагональная матрица главных центральных моментов инерции корпуса; F_i – трехмерный вектор внешних сил, действующих на точку, заданный в неподвижной системе координат; r_i – радиус-вектор точки приложения силы в подвижной системе координат; k_f – количество внешних сил, действующих на корпус; M_{ei} – трехмерный вектор внешних моментов, действующих на точку, заданный в подвижной системе координат; k_m – количество внешних моментов; $I \times \omega_c$ – вектор моментов гироскопических сил; I – вектор кинетического момента тела; A – ортогональная матрица поворота (ориентации) – переводит вектор, заданный в подвижной системе координат, в неподвижную систему.

В описании модели используются кинематические уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = (\omega_x \cos \psi - \omega_y \sin \psi) / \cos \theta \\ \dot{\theta} = (\omega_x \sin \psi + \omega_y \cos \psi) \quad ; \\ \dot{\psi} = (\omega_y \sin \psi - \omega_x \cos \psi) \text{tg} \theta + \omega_z \end{cases}$$

где φ, θ, ψ – корабельные углы Эйлера – углы последовательных поворотов вокруг осей x, y, z связанной с корпусом системой координат. Матрица поворота определяется через углы:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi & -\sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi & -\sin \varphi \cos \theta \\ -\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix}$$

Модель системы поддресоривания

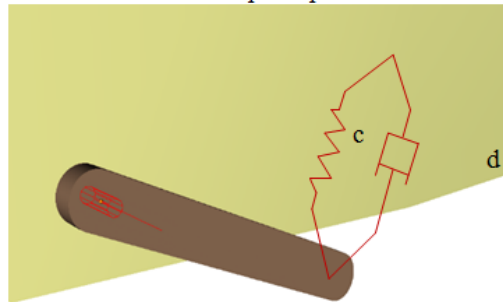


Рис. 5. Модель подвески катка

Упруго-демпфирующая сила:

$$F = F_0 - c \cdot (x - x_0) - d \cdot \dot{x} + Q \cdot \sin(\omega \cdot t + a);$$

где F_0 – постоянная составляющая силы; c, d коэффициенты жесткости и диссипации; x_0 – значение координаты x , при которой упругая составляющая обращается в ноль; \dot{x} – скорость деформации; Q, ω, a – амплитуда, частота и начальная фаза гармонического возбуждения.

Модель взаимодействия колеса с твердой ровным опорным основанием

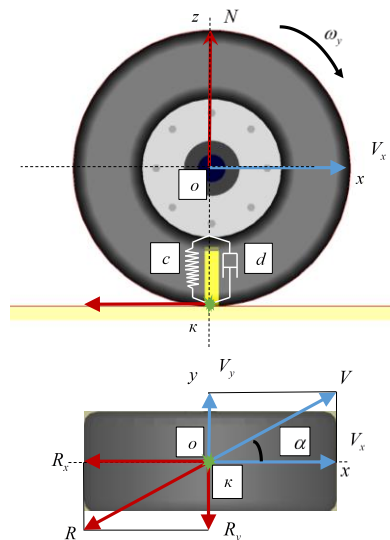


Рис. 6. Модель взаимодействия шины с опорным основанием

Для расчета нормальной реакции используется следующая линейная вязкоупругая модель [3]:

$$N = -c\Delta - d\dot{\Delta},$$

где $\Delta, \dot{\Delta}$ – деформация и скорость деформации шины; c, d – постоянные коэффициенты жесткости и диссипации контактного взаимодействия.

Величина силы взаимодействия колеса с опорной поверхностью определяется по следующей зависимости:

$$R = -\mu_s N \frac{v_s}{|v_s|};$$

где v_s – вектор скорости скольжения; μ_s – коэффициент трения скольжения.

В случае если коэффициент μ_s не превышает предельного значения по условиям сцепления сила взаимодействия R вычисляется по следующей модели:

$$R = F_k - c \cdot x_k - d \cdot v_s;$$

т.е. в зоне минимальных проскальзываний сила взаимодействия от нулевого до максимального значения изменяется с заданным градиентом.

Для проверки модели проведены расчеты динамического поведения БНТС при различных режимах движения.

На рис. 7 представлены графики параметров движения, полученные по результатам моделирования динамики разгона БНТС.

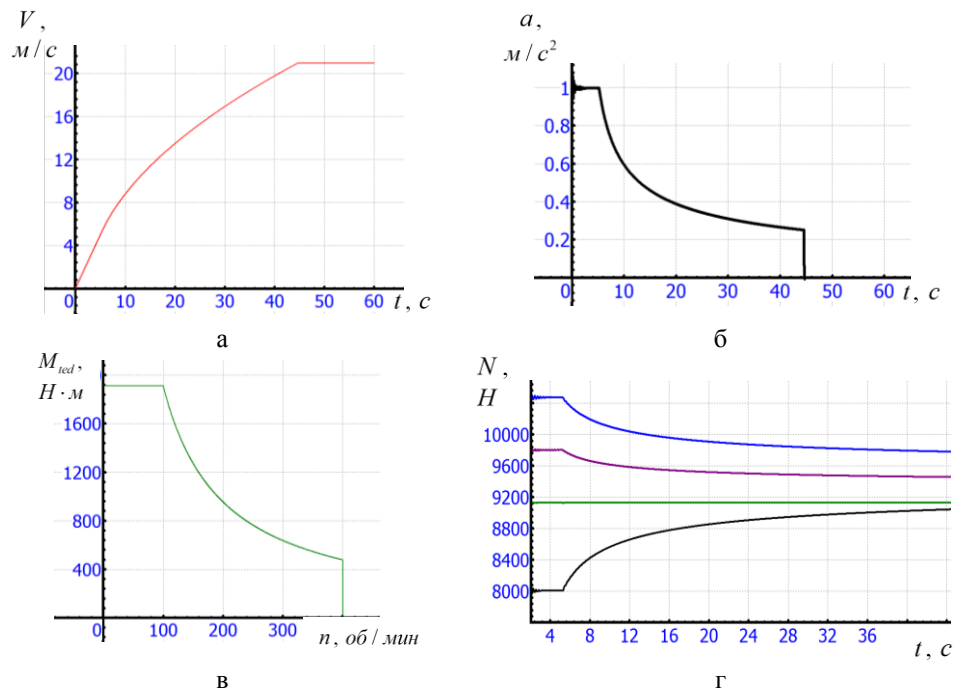


Рис. 7. Графики параметров движения, полученные по результатам моделирования динамики разгона БНТС: а – график изменения скорости БНТС; б – график изменения ускорения БНТС; в – характеристика тягового электродвигателя; г – перераспределение нормальных реакций колес по одному борту.

На рис. 8 представлены модели БНТС с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» [3], с оригинальными моделями взаимодействия движителей с опорной поверхностью.

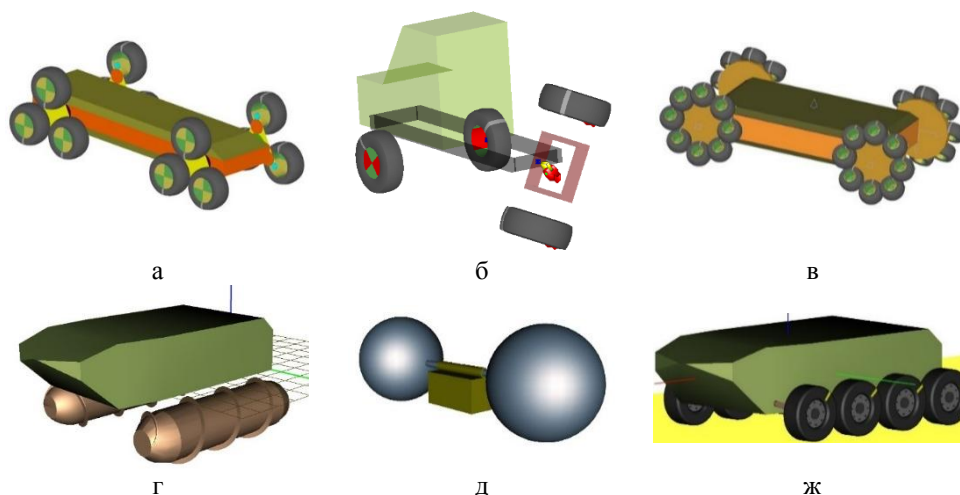


Рис. 8. Имитационные математические модели БНТС: а – БНТС с трехкатковыми колесно-шагающими движителями [7]; б – БНТС с реализацией бокового шага задней оси [6]; в – БНТС с омни-колесными движителями; г – БНТС с роторно-винтовыми движителями; д – одноосный БНТС с шарообразными движителями; ж – БНТС с колесными движителями

3. Оптимизация конструктивных параметров. На третьем этапе проводится оптимизация конструктивных параметров ходовых систем БНТС и выбор типа движителя. В качестве целевой функции выбран максимум интегрального показателя подвижности при учете ограничений по энергоэффективности. Под интегральным показателем подвижности следует понимать среднюю скорость движения по дорогам и местности на заданном маршруте.

4. Техничко-экономический анализ. На четвертом этапе проводится технико-экономический анализ ходовых систем БНТС. Высокий технический уровень разработки высокоподвижных БНТС не обеспечивает в полной мере целесообразность внедрения, так как затраты на создание, капитальные вложения, себестоимость могут оказаться чрезмерно большими с точки зрения потенциального потребителя. Поэтому для принятия в производство новой разработки необходим тщательный технико-экономический анализ, то есть исследование взаимосвязей технических, организационных и экономических параметров и показателей, позволяющее найти наилучшее проектное решение при выбранном критерии. Техничко-экономический анализ предусматривает комплексное сравнение по проектным вариантам и с конкурирующими объектами основных технических параметров и экономических показателей, формирующих заданный критерий, для выбора наилучшего варианта по максимуму (или минимуму) целевой функции определенной методом анализа иерархий.

Закключение. Совокупность решения задач представляет собой метод обеспечения подвижности БНТС, позволяющий на этапе проектирования осуществить научно обоснованный выбор типа движителя и провести оптимизацию конструктивных параметров ходовых систем при отсутствии ограничений, связанных с психофизиологическими возможностями человека.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудианов Н.А., Хрущев В.С. Обоснование облика боевых и обеспечивающих робототехнических комплексов Сухопутных войск // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 8. – URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/937.html>.
2. Горобцов А.С., Карцов С.К., Поляков Ю.А. Особенности построения пространственных динамических моделей автомобилей с учётом больших движений твёрдых тел // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2013. – Вып. 6. – Ч. 1. – С. 102-115.
3. Программный комплекс «Универсальный механизм». – Режим доступа: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1> (дата обращения 24.02.2016).
4. Котиев Г.О., Горелов В.А. Закон распределения мощности по колесам для транспортного робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 124-127.
5. Наумов В.Н., Котиев Г.О., Горелов В.А., Машков К.Ю., Чижев Д.А. Метод математического моделирования прямолинейного движения роботизированных транспортных средств по деформируемым грунтам // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. Специальный выпуск «Робототехника и мехатроника». – 2012. – С. 57-64.
6. Дьяков А.С., Котиев Г.О., Шивирев М.В. Боковое шагание транспортной машины // Вестник машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 86-88.
7. Дьяков А.С., Рязанцев В.И., Анкинович Г.Г. Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем с помощью математического моделирования // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. – С. 291-307. DOI: 10.7463/1214.0747961.
8. Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 12. – С. 21-24.
9. Лапинов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спецвыпуск «Специальная робототехника и мехатроника». – 2012. – С. 7-23.
10. Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. Проблемы развития роботизированного вооружения сухопутных войск // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 21-24.
11. Рубцов И.В., Бошляков А.А., Лапинов В.С., Машков К.Ю., Носков В.П. Проблемы и перспективы развития мобильной робототехники военного назначения // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2015. – Вып. 05 (41). – URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/rmrs/1399.html>.
12. РИА НОВОСТИ. – Режим доступа: <http://ria.ru/ast/20140416/1004132456.html> (дата обращения 24.02.2016).
13. Официальный сайт ПАО «КАМАЗ». – Режим доступа: http://www.kamaz.ru/press/news/bespilotnyu_kamaz_uzhe_na_doroge/ (дата обращения 20.02.2016).
14. Официальный сайт ООО «766 Управление производственно-технологической комплектации». – Режим доступа: <http://766uprk.ru/index.php?do=static&page=uran-6> (дата обращения 15.02.2016).
15. Williams R., Carter B., Gallina P., and Rosati G. Wheeled Omni-directional Robot Dynamics Including Slip // In: Proc. of the 2002 ASME Design Engineering Technical Conf., Montreal, Canada, 2002. – P. 201-207.
16. Tadakuma K., Tadakuma R., Berengeres J. Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle with “Omni-Ball”: Spherical Wheels // In: Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, San Diego, CA. – 2007. – P. 33-39.
17. 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.
18. Park T., Lee J., Yi B., Kim W., You B. Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-directional Mobile Robots // In: Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington DC, 2002. – P. 732-737.
19. Udengaard M., Iagnemma K. Design of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain // In: Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Pasadena, CA. – 2008. – P. 1666-1671.
20. Wong J. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Wiley, New York. 2008.

21. Quinn R.D., Nelson G.M., Ritzmann R.E., Bachmann R.J., Kingsley D.A., Offi J.T., and Allen T.J., Parallel Strategies For Implementing Biological Principles Into Mobile Robots // Int. J. of Robotics Research (IJRR). – 2003. – Vol. 22. – P. 169-186.
22. Boxerbaum A., Oro J., Peterson G., and Quinn R.D. The Latest Generation Whegs Robot Features a Passive-Compliant Body Joint // in IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2008.
23. Boxerbaum A.S., Klein M.A., Bachmann R., Quinn R.D., Harkins R., and Vaidyanathan R. Design of a semi-autonomous hybrid mobility surf-zone robot // in 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore: IEEE, Jul. 2009. – P. 974-979. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5229713>.
24. Ward C. and Iagnemma K. A Dynamic-Model-Based Wheel Slip Detector for Mobile Robots on Outdoor Terrain // IEEE Trans. On Robotics. – 2008. – Vol. 24, No. 4. – P. 821-831.

REFERENCES

1. Rudianov N.A., Khrushchev V.S. Obosnovanie oblika boevykh i obespechivayushchikh robototekhnicheskikh kompleksov Sukhoputnykh voysk [Justification appearance of combat and support robotic systems Ground Forces], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering magazine: science and innovation], 2013, Issue 8. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/937.html>.
2. Gorobtsov A.S., Kartsov S.K., Polyakov Yu.A. Osobennosti postroeniya prostranstvennykh dinamicheskikh modeley avtomobiley s uchetom bol'shikh dvizheniy tverdykh tel [Features of spatial dynamic models of cars in view of the large movements of solids], *Izvestiya Tul'skogo gos. un-ta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical science], 2013, Issue 6, Part 1, pp. 102-115.
3. Programmyy kompleks «Universal'nyy mekhanizm» [Software Package «Universal mechanism»]. Available at: <http://www.umlub.ru/pages/index.php?id=1> (Accessed 24 February 2016).
4. Kotiev G.O., Gorelov V.A. Zakon raspredeleniya moshchnosti po kolesam dlya transportnogo robototekhnicheskogo kompleksa [The law of distribution capacity on wheels for vehicle robotic complex], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 124-127.
5. Naumov V.N., Kotiev G.O., Gorelov V.A., Mashkov K.Yu., Chizhov D.A. Metod matematicheskogo modelirovaniya pryamolineynogo dvizheniya robotizirovannykh transportnykh sredstv po deformiruemyim gruntam [Mathematical modeling method of rectilinear motion of robotic vehicles on the deformable soils], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Mashinostroenie. Spetsial'nyy vypusk «Robototekhnika i mekhatronika»* [Vestnik Bauman Moscow State Technical University. Engineering. Special issue «Robotics and Mechatronics»], 2012, pp. 57-64.
6. D'yakov A.S., Kotiev G.O., Shivirev M.V. Bokovoe shaganie transportnoy mashiny [Side pacing transport machines], *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik engineering], 2015, No. 11, pp. 86-88.
7. D'yakov A.S., Ryazantsev V.I., Ankinovich G.G. Reshenie zadach profil'noy prokhozimosti robototekhnicheskogo kompleksa s kolesno-shagayushchim dvizhitelem s pomoshch'yu matematicheskogo modelirovaniya [Meeting the challenges of the profile cross-robotic system with wheel-propelled walking with the help of mathematical modeling], *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and education. Bauman Moscow State Technical University], 2014, No. 12, pp. 291-307. DOI: 10.7463/1214.0747961.
8. Noskov V.P., Rubtsov I.V. Opyt resheniya zadachi avtonomnogo upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov [Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2005, No. 12, pp. 21-24.
9. Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Opyt sozdaniya avtonomnykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Experience of creation of autonomous mobile robot for special purposes], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spetsvypusk «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Vestnik Bauman Moscow State Technical University. Engineering. Special issue «Special robotics and mechatronics»], 2012, pp. 7-23.

10. Sheremet I.B., Rudianov N.A., Ryabov A.V., Khrushchev V.S. Problemy razvitiya robotizirovannogo vooruzheniya sukhoputnykh voysk [Justification of combat and support a family of robots to fight in], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 21-24.
11. Rubtsov I.V., Boshlyakov A.A., Lapshov V.S., Mashkov K.Yu., Noskov V.P. Problemy i perspektivy razvitiya mobil'noy robototekhniki voennogo naznacheniya [Problems and prospects of development of mobile robotics for military use], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering magazine: science and innovation], 2015, Issue 05 (41). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/rmrs/1399.html>.
12. RIA NOVOSTI [RIA NOVOSTI]. Available at: <http://ria.ru/ast/20140416/1004132456.html> (Accessed 24 February 2016).
13. Ofitsial'nyy sayt PAO «KAMAZ» [Official site PAO «KAMAZ»]. Available at: http://www.kamaz.ru/press/news/bespilotnyy_kamaz_uzhe_na_doroge/ (accessed 20 February 2016).
14. Ofitsial'nyy sayt OOO «766 Upravlenie proizvodstvenno-tekhnologicheskoy komplektatsii» [Official site OOO «766 Department of industrial and technological fitment»]. Available at: <http://766uptk.ru/index.php?do=static&page=uran-6> (accessed 15 February 2016).
15. Williams R., Carter B., Gallina P., and Rosati G. Wheeled Omni-directional Robot Dynamics Including Slip, In: *Proc. of the 2002 ASME Design Engineering Technical Conf., Montreal, Canada, 2002*, pp. 201-207.
16. Tadakuma K., Tadakuma R., Berengeres J. Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle with “Omni-Ball”: Spherical Wheels, In: *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems, San Diego, CA, 2007*, pp. 33-39.
17. 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.
18. Park T., Lee J., Yi B., Kim W., You B. Optimal Design and Actuator Sizing of Redundantly Actuated Omni-directional Mobile Robots, In: *Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Washington DC, 2002*, pp. 732-737.
19. Udengaard M., Iagnemma K. Design of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain, In: *Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Pasadena, CA, 2008*, pp. 1666-1671.
20. Wong J. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Wiley, New York. 2008.
21. Quinn R.D., Nelson G.M., Ritzmann R.E., Bachmann R.J., Kingsley D.A., Offi J.T., and Allen T.J., Parallel Strategies For Implementing Biological Principles Into Mobile Robots, *Int. J. of Robotics Research (IJRR)*, 2003, Vol. 22, pp. 169-186.
22. Boxerbaum A., Oro J., Peterson G., and Quinn R.D. The Latest Generation Whegs Robot Features a Passive-Compliant Body Joint, in *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008.
23. Boxerbaum A.S., Klein M.A., Bachmann R., Quinn R.D., Harkins R., and Vaidyanathan R. Design of a semi-autonomous hybrid mobility surf-zone robot, in *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Singapore: IEEE, Jul. 2009*, pp 974-979. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5229713>.
24. Ward C. and Iagnemma K. A Dynamic-Model-Based Wheel Slip Detector for Mobile Robots on Outdoor Terrain, *IEEE Trans. On Robotics*, 2008, Vol. 24, No. 4, pp. 821-831.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Наумов.

Котиев Георгий Олегович – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; e-mail: kotievgo@yandex.ru; 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; тел.: +74992636140; кафедра «Колесные машины»; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой.

Дьяков Алексей Сергеевич – e-mail: diakov57@list.ru; тел.: +79689797602; кафедра «Колесные машины»; к.т.н.; доцент.

Kotiev Georg Olegovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: kotievgo@yandex.ru; 5-1, 2nd Bauman street, Moscow, 105005, Russia; phone: +74992636140; the department of wheel vehicles; dr. of eng. sc.; professor.

Diakov Alexey Sergeevich – e-mail: diakov57@list.ru; phone: +79689797602; the department of wheel vehicles; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 007:621.865.8

А.И. Наговицин, А.Г. Севрюков

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В РВИА СВ

Проведен краткий анализ состояния работ и проблем по созданию отечественных робототехнических комплексов военного назначения. Определены задачи, решаемые робототехническими комплексами военного назначения в интересах Ракетных войск и артиллерии. Предложено к разработке четыре типа робототехнических комплекса специально для оснащения ими ракетных и артиллерийских частей и подразделений: робототехнический комплекс артиллерийской разведки (РТК АР), применяемый в качестве разведывательного средства на наиболее опасных направлениях, на переднем крае и в расположении противника, в любых погодных условиях, в любое время суток, в неблагоприятных для действий человека условиях, с возможностью работать в полуавтоматическом и автоматическом режимах; робототехнический комплекс воздушной артиллерийской разведки (РТК ВАР), применяемый в качестве разведывательного средства на наиболее опасных направлениях, в любое время суток, в неблагоприятных для действий человека условиях; робототехнический комплекс уничтожения бронеемких объектов и отдельных целей (дистанционный управляемый самоходный противотанковый ракетный комплекс), применяемый в качестве разведывательно-огневого средства на танкоопасных направлениях, в огневых засадах, при ведении боевых действий оборонительного и наступательного характера, при бое в населенном пункте, горах, при проведении специальных операций, в любое время суток, в полуавтоматическом и автоматическом режимах; робототехнический комплекс огневого поражения (подвижная огневая точка). Определены их предназначение, возможное оснащение и требуемые характеристики. Разработаны предложения по их штатной принадлежности. Обоснована необходимая численность робототехнических комплексов в каждом подразделении и общая потребность для рода войск. Кроме того разработаны предложения по их боевому применению в Ракетных войсках и артиллерии Сухопутных войск. В статье сформулирован вывод о том, что наличие робототехнического комплекса в составе артиллерийских (реактивных) и разведывательных подразделений Ракетных войск и артиллерии повысит эффективность их боевого применения в первую очередь по таким показателям, как дальность и достоверность разведки, точность и оперативность огневого поражения. Актуальность вопросов, рассмотренных в статье, также обусловлена необходимостью разработки предложений по рациональной организационной структуре подразделений Ракетных войск и артиллерии общевойсковых соединений, с учетом их оснащения робототехническими комплексами военного назначения.

Роботы; робототехнический комплекс военного назначения; беспилотный летательный аппарат; навигация; комплекс воздушной разведки; робототехнический комплекс артиллерийской разведки.