

УДК 629.373.3

doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-17-23

Повышение энергоэффективности движения и опорной проходимости мобильного колесного сочлененного робота путем управления индивидуальным тяговым электроприводом

М.М. Жилейкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Improving the Energy Efficiency of Movement and Cross-Country Capacity of an Articulated Mobile Wheeled Robot by Controlling an Individual Electric Traction Drive

M.M. Zhileykin

Bauman Moscow State Technical University

Сочлененные колесно-шагающие роботы, обладающие хорошим сочетанием массы и грузоподъемности, а также высокими показателями проходимости и маневренности, относятся к перспективным схемам мобильных робототехнических комплексов. Одним из основных требований, предъявляемых к таким комплексам, является высокий уровень автономности. В связи с этим становится актуальным повышение энергоэффективности движения мобильного колесного сочлененного робота (особенно в продолжительном транспортном режиме) путем снижения буксования ведущих колес. Разработан алгоритм работы противобуксовочной системы такого робота с индивидуальным тяговым электроприводом, обеспечивающий повышение энергоэффективности его движения и опорной проходимости за счет снижения пробуксовки ведущих колес. Методами имитационного моделирования доказана эффективность алгоритма работы противобуксовочной системы.

Ключевые слова: мобильный колесный сочлененный робот, мобильный робототехнический комплекс, энергоэффективность движения, противобуксовочная система

Articulated wheel-walking robots having a good combination of weight and load capacity, as well as high cross-country capacity and maneuverability are among the promising schemes of mobile robotic systems. One of the main requirements for such complexes is a high level of autonomy. In this regard, the task of improving the energy efficiency of the articulated mobile wheeled robot movement (especially in long-term transport mode) by reducing the driving wheel skid becomes urgent. An algorithm for the operation of the anti-skid system of such a robot with an individual traction electric drive has been developed. It provides an increase in the energy efficiency of robot movement and cross-country capacity by reducing the skid of the driving wheels. The efficiency of the antiskid system operation algorithm has been proved by the simulation methods.

Keywords: articulated mobile wheeled robot, mobile robotic system, energy efficiency of movement, antiskid system

Для решения транспортных и транспортно-технологических задач в ходе ведения боевых действий, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, выполнения поисковых и исследовательских работ в условиях, опасных для жизни и здоровья человека, применяют мобильные робототехнические комплексы (МРК). Сочлененные колесно-шагающие роботы, обладающие хорошим сочетанием массы и грузоподъемности, а также высокими показателями проходимости и маневренности, относятся к перспективным схемам МРК [1].

Одним из основных требований, предъявляемых к МРК, является высокий уровень автономности, которая обусловлена либо запасом топлива (при использовании двигателя внутреннего сгорания), либо количеством и емкостью электрических батарей (при применении электрического привода) [2–4].

Запасы того и другого весьма ограничены ввиду недостаточной грузоподъемности МРК. В связи с этим становится актуальной задачей повышение энергоэффективности движения МРК, особенно в продолжительном транспортном режиме.

Пробуксовка колес при движении мобильного колесного сочлененного робота (МКСР) по сильнопересеченной местности (рис. 1) приводит к высокому износу шин, нерациональному расходованию емкости электрических батарей и снижению опорной проходимости вследствие повышенного колееобразования [5–9].

Цель работы — повышение энергоэффективности движения МКСР путем снижения буксования ведущих колес.

Алгоритм работы противобуксовочной системы (ПБС). Назначением ПБС является предотвращение пробуксовки ведущих колес [10, 11]. Как и любая другая система управления, ПБС включает в себя подсистемы сбора информации, ее обработки (алгоритмы, вычислительные устройства) и исполнительные устройства.

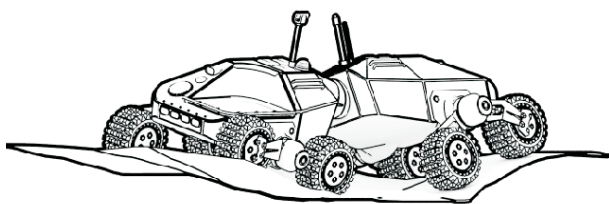


Рис. 1. Внешний вид МКСР, передвигающегося по пересеченной местности

Подсистема сбора информации — состоит из датчиков, собирающих информацию для последующего принятия решения о необходимости вмешательства в управление МКСР и для вычисления управляющих воздействий. Требования к номенклатуре, количеству и точности датчиков предъявляются алгоритмами обработки информации.

Подсистема обработки информации — это в первую очередь алгоритмы работы системы. Информационная система проводит диагностику состояния движения МКСР, т. е. по показаниям датчиков определяет, к какому из двух возможных состояний принадлежит текущий набор полученных данных:

- ситуация штатная, корректировки работы индивидуального тягового электропривода (ИТЭП) не требуется;
- начинается процесс развития буксования колеса, необходима корректировка работы ИТЭП.

Исполнительные устройства — это системы и агрегаты, которые, получив управляющую команду от подсистемы обработки информации, осуществляют ее физическое исполнение. В рассматриваемом случае исполнительным устройством является тяговый электродвигатель (ТЭД) колеса, которое начинает буксовать.

Разработку любой системы управления начинают с формулирования ее целей. Для цифровой системы управления цель управления должна быть формализована в виде:

- математического определения вида нештатной ситуации (система управления должна понимать, с чем борется);
- математической формулировки диагностического признака и алгоритма его вычисления;
- математической формулировки правила диагностирования состояния движения;
- алгоритмов вычисления управляющих воздействий.

Таким образом, необходимо сформулировать диагностический признак, на основании которого ПБС будет распознавать опасность возникновения буксования колеса и принимать решение о вмешательстве в процесс управления ТЭД колеса с целью предотвращения развития буксования. Рассмотрим схему поворота МКСР при криволинейном движении (рис. 2).

Ввиду симметричности конструкции МКСР относительно шарнира складывания S идеальная схема поворота имеет ось симметрии OS . Тогда можно утверждать, что справедливы сле-

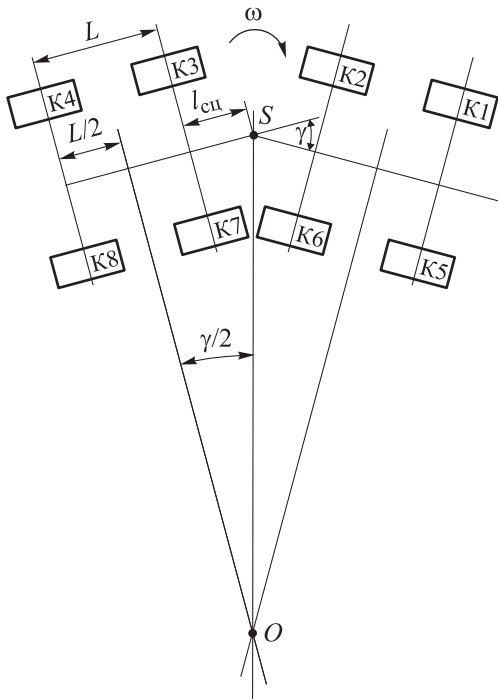


Рис. 2. Схема поворота МКСП при криволинейном движении:

O — центр поворота; L — база колес; $l_{сш}$ — расстояние от оси до шарнира S складывания секций; γ — угол складывания секций; ω — угловая скорость поворота МКСП; К1...К8 — номера колес

дующие равенства для угловых скоростей вращения колес:

$$\omega_{К1} = \omega_{К4}; \omega_{К2} = \omega_{К3}; \omega_{К5} = \omega_{К8}; \omega_{К6} = \omega_{К7},$$

где $\omega_{К1}, \dots, \omega_{К8}$ — угловые скорости вращения колес К1...К8.

Диагностическим признаком буксования колес МКСП будет выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} \omega_{К1} &> 1,2 \frac{\omega_{К4} + \omega_{К8}}{2}; & \omega_{К2} &> 1,2 \frac{\omega_{К3} + \omega_{К7}}{2}; \\ \omega_{К3} &> 1,2 \frac{\omega_{К2} + \omega_{К6}}{2}; & \omega_{К4} &> 1,2 \frac{\omega_{К1} + \omega_{К5}}{2}; \\ \omega_{К5} &> 1,2 \frac{\omega_{К4} + \omega_{К8}}{2}; & \omega_{К6} &> 1,2 \frac{\omega_{К3} + \omega_{К7}}{2}; \\ \omega_{К7} &> 1,2 \frac{\omega_{К2} + \omega_{К6}}{2}; & \omega_{К8} &> 1,2 \frac{\omega_{К1} + \omega_{К5}}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициент «1,2» в неравенствах (1) означает 20%-ное превышение угловой скорости вращения текущего колеса полусуммы таковых для колес оси, с которой происходит сравнение по угловым скоростям вращения колес.

Уставка крутящего момента, который должен быть реализован на i -м ТЭД, определяется выражением [12]

$$M_{дв i} = h_{др} h_{ПБС i} \frac{N_{дв max}}{\omega_{К i}},$$

где $M_{дв i}$ — выходной момент i -го ТЭД; $h_{др}$ — степень использования мощности двигателя (нажатие водителем педали газа), $h_{др} = [0...1]$; $h_{ПБС i}$ — управляющий сигнал ПБС для i -го колеса, $h_{ПБС i} = [0; 1]$; $N_{дв max}$ — максимальная мощность ТЭД; $\omega_{К i}$ — угловая скорость вращения i -го колеса.

Внешняя характеристика ТЭД (зависимость крутящего момента на валу M от угловой скорости вращения вала $\omega_{К}$) соответствует показанной на рис. 3 при следующих условиях [12]:

- выходной момент ограничен максимальным значением M_{max} ;
- выходной момент ограничен внешней характеристикой ТЭД (по максимальной мощности $N_{дв max}$);
- угловая скорость вращения колеса ограничена (по максимальной возможной скорости движения) своим максимальным значением.

Алгоритм изменения управляющего сигнала $h_{ПБС i}$ может быть представлен следующим образом. Пробуксовка i -го колеса определяется из условий (1). Если условие пробуксовки выполнено, то $h_{ПБС i} = 0$. В противном случае $h_{ПБС i} = 1$.

Критерии эффективности работы ПБС для МКСП. Эффективность работы ПБС при прохождении участка местности с неровным недеформируемым опорным основанием будем оценивать по следующим параметрам.

Среднеквадратическое значение коэффициента скольжения для всех ведущих колес СКЗ_{Si}. Коэффициент скольжения S_i i -го колеса опре-

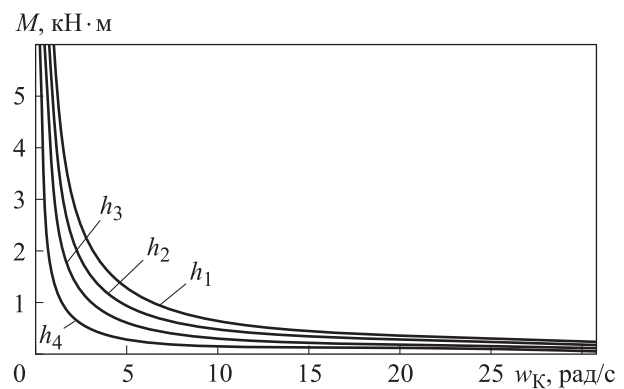


Рис. 3. Характеристики ТЭД, приведенные к угловой скорости вращения колесного двигателя при различной степени нажатия водителем педали газа:

$$h_1 = 1; h_2 = 0,75h_1; h_3 = 0,5h_1; h_4 = 0,25h_1$$

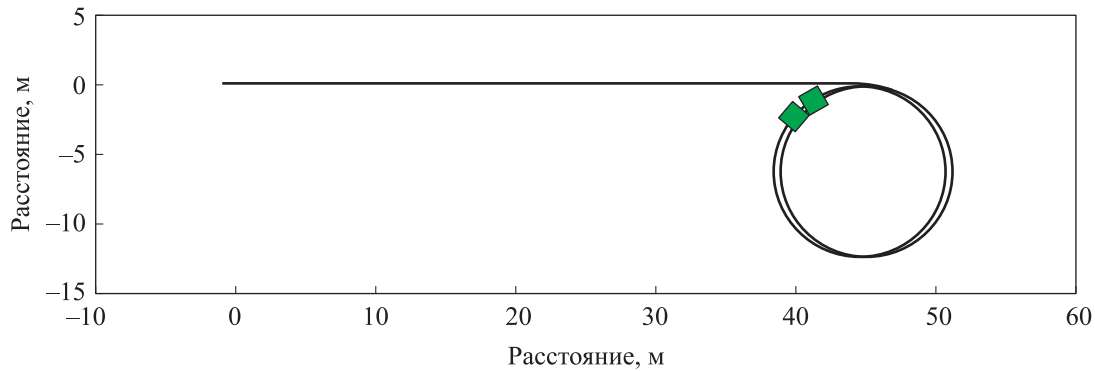


Рис. 4. Траектория движения МКСП по пересеченной местности

деляется по известным зависимостям, приведенным, например, в работе [13].

Средняя степень неравномерности вращения ведущих колес

$$\varepsilon = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} \omega_{K_i},$$

где n_k — число ведущих колес МКСП, $n_k = 8$.

Интегральная мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления движению,

$$P = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{1}{T} \int_0^T M_{K_i} \omega_{K_i} dt,$$

где T — время движения; M_{K_i} — крутящий момент, подведенный к i -му колесу.

Условия движения при моделировании криволинейного движения МКСП по недеформируемому опорному основанию. Математическая модель движения многоосной колесной машины приведена в работе [13], модель качения эластичного колеса по неровностям недеформируемого опорного основания — в трудах [14, 15]. Программное обеспечение реализовано

в программном комплексе MATLAB/Simulink. При этом исходные данные для модели движения формируются в m-файле на языке MATLAB.

Для проверки работоспособности и эффективности разработанного алгоритма функционирования ПБС проведено моделирование криволинейного движения МКСП на недеформируемом опорном основании (см. рис. 1) с дисперсией высоты неровностей, равной $0,02624 \text{ м}^2$. Траектория движения МКСП показана на рис. 4. Курсовая скорость движения поддерживалась с помощью пропорционально-интегрального регулятора на уровне 7 км/ч .

Техническая характеристика МКСП, принятая при моделировании

Колесная база одной секции, м	0,966
Колея, м	1,5
Свободный радиус колеса, м	0,25
Передаточное число колесного редуктора	15
Максимальная скорость вращения вала ТЭД, мин^{-1}	3500
Максимальный крутящий момент ТЭД, Н·м	1260
Полная масса одной секции, кг	750

Значения $СКЗ_{Si}$ для колес МКСП при движении с отключенной и включенной ПБС

Номер колеса (см. рис. 1)	$СКЗ_{Si}$		Снижение $СКЗ_{Si}$, %
	при отключенной ПБС	при включенной ПБС	
K1	4,41	3,79	14,1
K2	3,03	2,94	3,0
K3	3,12	2,74	12,2
K4	4,09	3,61	11,7
K5	4,20	3,79	9,8
K6	3,53	3,44	2,6
K7	3,50	3,04	13,1
K8	4,14	3,68	16,6

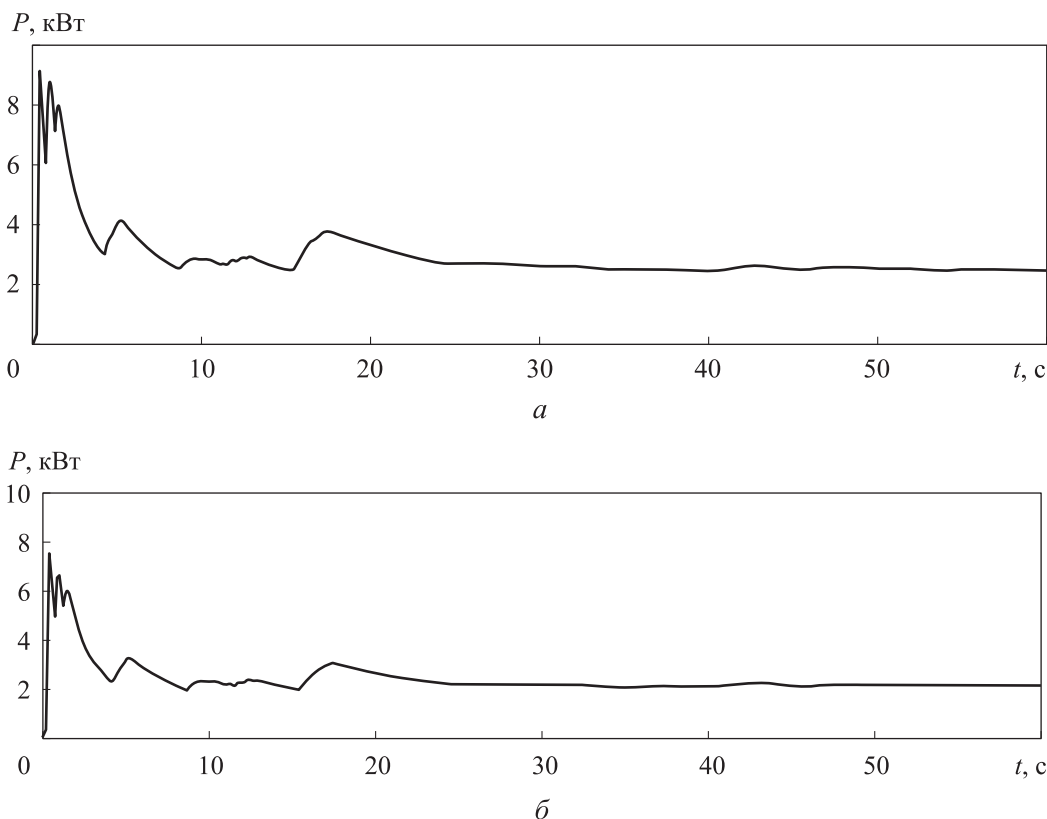


Рис. 5. Зависимости интегральной мощности P , затрачиваемой на преодоление сопротивления движению, от времени t при отключенной ПБС (а) и включенной ПБС (б)

Результаты моделирования криволинейного движения МКСР по недеформированному опорному основанию. Значения $СКЗ_{Si}$ для колес МКСР при движении с отключенной и включенной ПБС приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что среднее квадратическое значение коэффициента скольжения при использовании ПБС снизилось на 2,6...16,6 %. При этом степень неравномерности вращения ведущих колес при движении МКСР с отключенной ПБС составила 10,37, а с включенной ПБС — 9,47, т. е. значение ϵ уменьшилось на 8,7 %.

Зависимость интегральной мощности P , затрачиваемой на преодоление сопротивления движению, от времени при отключенной ПБС, показана на рис. 5, а, а при включенной ПБС — на рис. 5, б.

Анализ рис. 5 показывает, что при включенной ПБС пиковые значения интегральной мощности, затрачиваемой на преодоление сопротивления движению, снижаются

на 13,2 %, установившиеся значения — на 24,8 %.

Выводы

1. Предложен алгоритм работы противобуксовочной системы МКСР с ИТЭП, обеспечивающий повышение энергоэффективности движения работа и опорной проходимости путем снижения пробуксовки ведущих колес.

2. Методами имитационного моделирования установлено, что при движении МКСР по пересеченной местности с использованием ПБС уменьшаются следующие параметры:

- среднее квадратическое значение коэффициента скольжения на 2,6...16,6 %;
- неравномерность вращения ведущих колес на 8,7 %.
- пиковые значения интегральной мощности, затрачиваемой на преодоление сопротивления движению, на 13,2 %, установившиеся значения — на 24,8 %.

Литература

- [1] Жилейкин М.М., Жилейкин Ю.М. Сочлененное транспортное средство с колесно-шагающим двигателем. Патент 2684956 РФ, бюл. № 11, 2019. 32 с.
- [2] Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. *Специальная техника*, 2000, № 2, с. 16.
- [3] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kotiev G.O., Beketov S.A., Makarov V.S. Interaction between elements of the track ground contacting area with the soil at curvilinear motion of the timber harvesting machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 386(1), article no. 012016, doi: 10.1088/1757-899X/386/1/012016
- [4] Береснев П.О., Михеев А.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Кострова З.А., Колотилин В.Е., Еремин А.А., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массо-инерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2014, № 4(111), с. 136–150.
- [5] Raibert M.H. *Legged Robots that Balance*. Cambridge, Massachusetts, London, England, MIT Press, 1989. 314 p.
- [6] Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2013, № 3(152), с. 42–57.
- [7] Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 12, с. 21–24.
- [8] Дьяков А.С., Котиев Г.О. Основы метода проектирования ходовых систем безэкипажных наземных транспортных средств. *Труды НАМИ*, 2016, № 4(267), с. 45–53.
- [9] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 199 с.
- [10] Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. New York, Wiley IEEE, 2001. 560 p.
- [11] Benes L., Hermanek P., Novak P. Tensile resistance of wheeled combine harvester. *Engineering for Rural Development. MM Science Journal*, 2018, vol. 2018, pp. 2481–2483, doi: 10.17973/mmsj.2018_10_201848
- [12] Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Алгоритм управления индивидуальным приводом колесных движителей транспортных средств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение*, 2011, № S5, с. 39–58.
- [13] Жилейкин М.М. *Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 238 с.
- [14] Жилейкин М.М., Падалкин Б.В. Математическая модель качения эластичного колеса по неровностям недеформируемого основания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 3, с. 24–29, doi: 10.18698/0536-1044-2016-3-24-29
- [15] Kupreyanov A.A., Morozov M.V., Belousov B.N., Ksenevich T.I., Vantsevich V.V. Experimental research of tire elastomer-surface tribological properties. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2014, paper no. DETC2014-34126, V003T01A040, doi: 10.1115/DETC2014-34126

References

- [1] Zhileykin M.M., Zhileykin Yu.M. *Sochlenennoye transportnoye sredstvo s kolesno-shagayushchim dvizhitelem* [Articulated vehicle with a wheel-walking engine]. Patent no. 2684956 RF, 2019.
- [2] Batanov A.F., Gritsynin S.N., Murkin S.V. Robotic systems for use in emergency situations. *Spetsial'naya tekhnika*, 2000, no. 2, p. 16 (in Russ.).
- [3] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kotiev G.O., Beketov S.A., Makarov V.S. Interaction between elements of the track ground contacting area with the soil at curvilinear motion of the timber harvesting machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 386(1), article no. 012016, doi: 10.1088/1757-899X/386/1/012016
- [4] Beresnev P.O., Mikheyev A.V., Belyayev A.M., Papunin A.V., Kostrova Z.A., Kolotilin V.E., Eremin A.A., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyakov V.V., Kurkin A.A. Statistical model

- for selecting geometric parameters, mass-inertia, power and speed characteristics of multi-axis wheeled transport and technological machines. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*, 2014, no. 4(111), pp. 136–150 (in Russ.).
- [5] Raibert M.H. *Legged Robots that Balance*. Cambridge, Massachusetts, London, England, MIT Press, 1989. 314 p.
- [6] Kudryashov V.B., Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Problems of robotization for military ground technics. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, no. 3(152), pp. 42–57 (in Russ.).
- [7] Noskov V.P., Rubtsov I.V. Experience in solving the problem of Autonomous motion control for mobile robots. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, 2005, no. 12, pp. 21–24 (in Russ.).
- [8] D'yakov A.S., Kotiyev G.O. Basic of the method of designing chassis systems of unmanned ground vehicles. *Trudy NAMI*, 2016, no. 4(267), pp. 45–53 (in Russ.).
- [9] Lapshin V.V. *Mekhanika i upravleniye dvizheniyem shagayushchikh mashin* [Mechanics and motion control of walking machines]. Moscow, Bauman Press, 2012. 199 p.
- [10] Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. New York, Wiley IEEE, 2001. 560 p.
- [11] Benes L., Hermanek P., Novak P. Tensile resistance of wheeled combine harvester. *Engineering for Rural Development. MM Science Journal*, 2018, vol. 2018, pp. 2481–2483, doi: 10.17973/mmsj.2018_10_201848
- [12] Gorelov V.A., Kotiyev G.O., Miroshnichenko A.V. Control algorithm individual drive a vehicle wheel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2011, no. S5, pp. 39–58 (in Russ.).
- [13] Zhileykin M.M. *Teoreticheskiye osnovy povysheniya pokazateley ustoychivosti i upravlyayemosti kolesnykh mashin na baze metodov nechetkoy logiki* [Theoretical foundations for improving the stability and controllability of wheeled vehicles based on fuzzy logic methods]. Moscow, Bauman Press, 2016. 238 p.
- [14] Zhileykin M.M., Padalkin B.V. A Mathematical Model of Rolling an Elastic Wheel on a Rough Rigid Support Base. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 3, pp. 24–29, doi: 10.18698/0536-1044-2016-3-24-29
- [15] Kupreyanov A.A., Morozov M.V., Belousov B.N., Ksenevich T.I., Vantsevich V.V. Experimental research of tire elastomer-surface tribological properties. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2014, paper no. DETC2014-34126, V003T01A040, doi: 10.1115/DETC2014-34126

Статья поступила в редакцию 10.11.2020

Информация об авторе

ЖИЛЕЙКИН Михаил Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

Information about the author

ZHILEYKIN Mikhail Mikhailovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: jileykin_m@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Жилейкин М.М. Повышение энергоэффективности движения и опорной проходимости мобильного колесного сочлененного робота путем управления индивидуальным тяговым электроприводом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 5, с. 17–23, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-17-23

Please cite this article in English as:

Zhileykin M.M. Improving the Energy Efficiency of Movement and Cross-Country Capacity of an Articulated Mobile Wheeled Robot by Controlling an Individual Electric Traction Drive. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 17–23, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-17-23