

УДК 629.373.3

doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-10-16

Циклограмма энергоэффективного шага мобильного робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем

М.М. Жилейкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана

A Cyclogram of an Energy Efficient Step of a Mobile Robotic System with Wheel-Walking Propulsion

M.M. Zhileykin

Bauman Moscow State Technical University

Для решения широкого спектра транспортных и транспортно-технологических задач используют мобильные робототехнические комплексы. Одним из главных требований, предъявляемых к таким комплексам, является высокий уровень профильной и опорной проходимости. Проблему энергетической эффективности колесно-шагающих мобильных робототехнических комплексов в значительной степени определяют перспективы их использования. Рассмотрен мобильный робототехнический комплекс с колесно-шагающим движителем, позволяющим повысить его проходимость на опорных поверхностях с низкими несущими свойствами за счет новых схемных решений ходовой части и алгоритмов управления опорно-ходовым шагающим модулем. Разработана циклограмма энергоэффективного шага мобильного робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем, что обеспечивает высокие показатели его проходимости на опорных основаниях с низкой несущей способностью.

Ключевые слова: мобильные робототехнические комплексы, колесно-шагающий движитель, энергетическая эффективность, опорная поверхность, низкие несущие свойства

Mobile robotic systems are employed to perform a wide range of transportation and technological tasks. One of the main requirements to these systems is their high capability to traverse complex terrains and surfaces. Future applications of wheel-walking mobile systems largely define the problem of their energy efficiency. This paper presents a mobile robotic system with wheel-walking propulsion that can increase the system's traverse capability on support surfaces with low bearing properties due to a new chassis layout and algorithms controlling the walking module. A cyclogram of the energy efficient step of the mobile robotic system with wheel-walking propulsion is developed, which provides high indicators of traverse capability on support bases with low bearing capacity.

Keywords: mobile robotic systems, wheel-walking propulsion, energy efficiency, support surface, low load-bearing properties

Для решения транспортных и транспортно-технологических задач при ведении боевых действий, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и выполнении поисковых и исследовательских работ в условиях, опасных для жизни и здоровья человека, применяют мобильные робототехнические комплексы (МРК).

Одним из главных требований, предъявляемых к МРК, является высокий уровень профильной и опорной проходимости при его движении по сложному рельефу пересеченной местности или городской застройки, по опорным поверхностям с низкой несущей способностью. Для реализации указанных требований перед разработчиками возникает задача создания новых типов движителей, схемных решений для ходовых систем и алгоритмов управления движением.

Практически невозможно создать универсальную конструкцию движителя, позволяющую одинаково уверенно передвигаться в разнообразных условиях окружающей среды. Основное внимание разработчики уделяют различным колесным и гусеничным движителям и несколько меньшее — шагающему. Каждый тип движителя имеет свою область применения.

Так, в качестве движителя МРК, предназначенного для использования на труднопроходимой местности, выбирают гусеничный ход как

наиболее универсальный [1–3]. При преимущественном использовании робота на дорогах более предпочтительным является колесный вариант транспортного средства. Применение шагающих машин перспективно лишь в среде, где скорость колесного или гусеничного движителя уступает скорости шагающего аналога (например, в горной местности, очагах разрушений и т. п.) [4–6]. В настоящее время движители роботов конструируют с возможностью адаптации к опорной поверхности [7, 8].

Проблему энергетической эффективности колесно-шагающих МРК в значительной степени определяют перспективы их использования.

Цель работы — создание МРК с колесно-шагающим движителем (МРК КШД), повышающим проходимость комплекса на опорных поверхностях с низкой несущей способностью за счет новых схемных решений ходовой части и алгоритмов управления опорно-ходовым шагающим модулем.

Циклограмма совершения шага. Рассмотрим МРК КШД (рис. 1) [9], включающий в себя переднюю 7 и заднюю 4 корпусные секции, соединенные сцепным устройством 6. Передняя и задняя корпусные секции снабжены левым 5 и правым 3 механизмами поворота продольных левых (передних и задних) 8 и правых (перед-

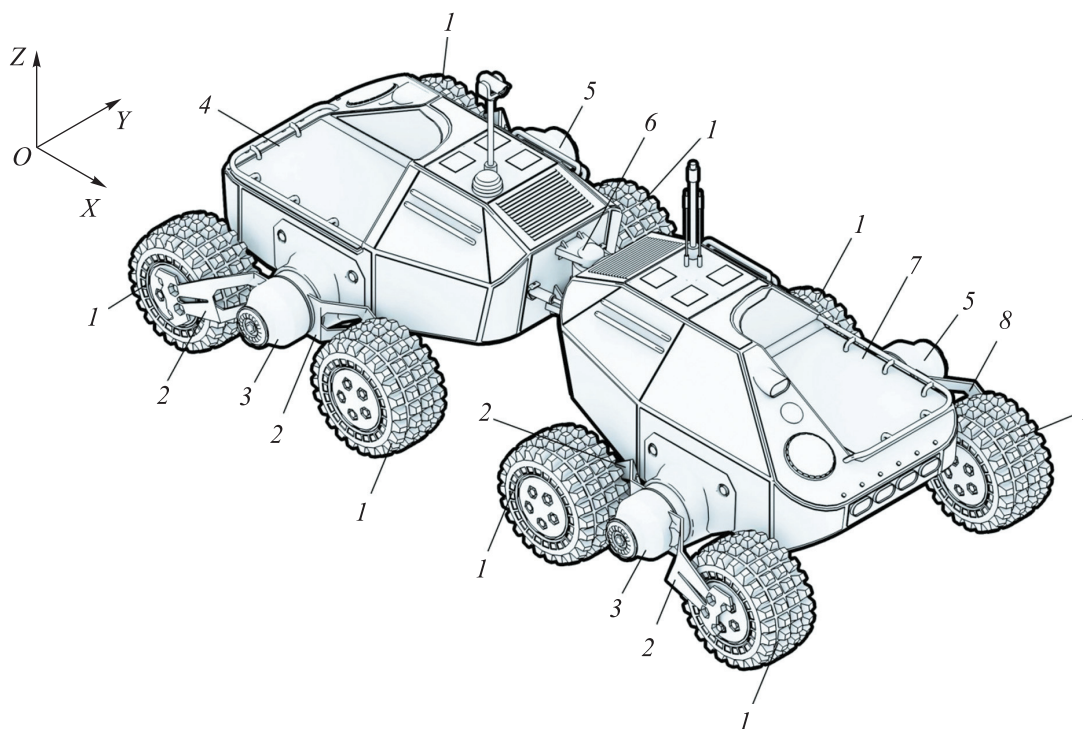


Рис. 1. Внешний вид МРК КШД

них и задних) 2 рычагов, связанных каждый со своим ведущим колесом 1. Все ведущие колеса снабжены индивидуальным тяговым приводом.

МРК КШД может двигаться периодической волновой походкой. Циклограмма одного шага приведена на рис. 2. Все колесные опоры (КО) совершают относительно корпуса одинаковые периодические движения со сдвигом по фазе (по времени).

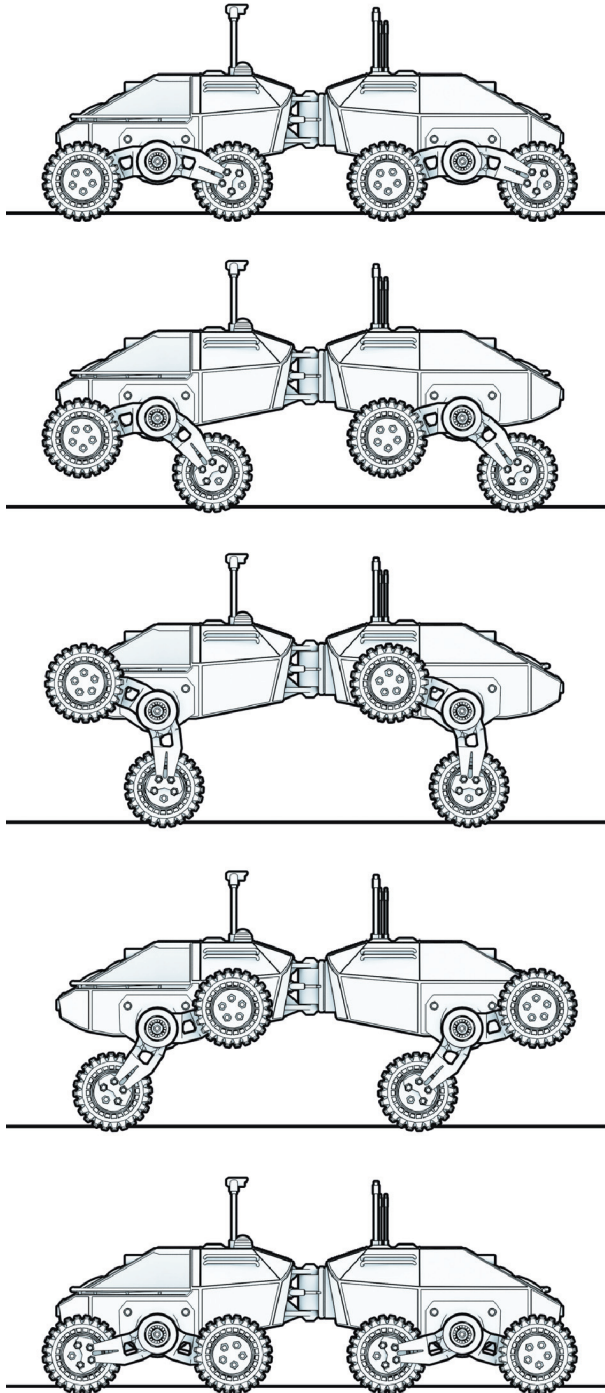


Рис. 2. Циклограмма одного шага МРК КШД

Энергетические затраты МРК КШД на совершение одного шага. Изложим методику расчета энергозатрат МРК КШД на совершение одного шага на этапе проектирования, рассматривая прямолинейное плоское движение машины в плоскости XOZ неподвижной системы координат (см. рис. 1) по ровной горизонтальной опорной поверхности.

При определении энергозатрат, связанных с движением КО относительно корпуса, примем, что приведенная к колесу масса опоры постоянна и равна m . При малых угловых скоростях поворота правых продольных рычагов (см. рис. 1) погрешность, вносимая этим допущением, будет незначительной.

Мощность в j -м шарнире i -й КО обозначим через W_{ij} . Тогда энергозатраты (совершаемая работа) E на передвижение МРК КШД за период времени T (время одного шагового цикла)

$$E = \int_0^T \sum_{i,j} W_{ij} dt, \quad (1)$$

где t — время.

Приводы в шарнирах КО развивают в течение периода T как положительную, так и отрицательную мощность, т. е. выделяют энергию в режиме разгона и поглощают ее в режиме торможения. Будем полагать, что рекуперации энергии нет. Тогда выражение (1) можно записать как

$$E = \int_0^T \sum_{i,j} W_{i,j}^+ dt;$$

$$W_{i,j}^+ = \begin{cases} W_{ij} & \text{при } W_{ij} > 0; \\ 0 & \text{при } W_{ij} \leq 0. \end{cases}$$

Энергозатраты на передвижение МРК КШД в режиме шагания состоят из энергозатрат на следующие операции [10]:

- E_l — обеспечение колебательного движения КО относительно корпуса МРК КШД;
- E_m — поддержание веса МРК КШД;
- E_f — преодоление сопротивления движению МРК КШД.

Тогда за один шаговый цикл $E = E_l + E_m + E_f$. Проведем оценку этих энергозатрат в предположении, что они независимы.

Энергозатраты на обеспечение колебательного движения КО относительно корпуса. Расчетная схема для определения энергозатрат на обеспечение колебательного движения КО относительно корпуса МРК КШД приведена на рис. 3.

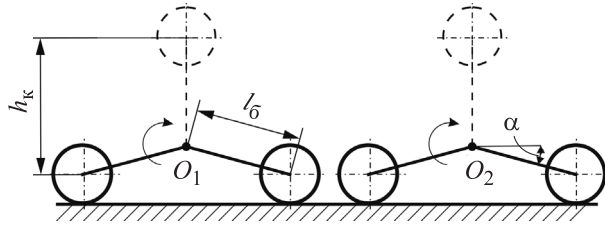


Рис. 3. Расчетная схема для определения энергозатрат на обеспечение колебательного движения КО относительно корпуса МРК КШД; O_1, O_2 — положение осей шарниров поворота КО; l_6 — длина балансира КО; h_k — высота подъема колеса; α — угол наклона балансира КО в статическом положении

В данном случае необходимо затратить энергию для подъема задней КО массой m на высоту $h_k = l_6(1 + \sin \alpha)$. Тогда для всех четырех КО обеих секций машины

$$E_l = 4mgh_k = 4mgl_6(1 + \sin \alpha),$$

где g — ускорение свободного падения.

Энергозатраты на поддержание веса. Расчетная схема для определения энергозатрат на поддержание веса МРК КШД приведена на рис. 4.

В данном случае необходимо затратить энергию для подъема корпуса МРК КШД массой M и четырех КО массой m каждая на высоту $h_m = l_6(1 - \sin \alpha)$:

$$E_m = (M + 4m)gh_m = (M + 4m)gl_6(1 - \sin \alpha).$$

Энергозатраты на преодоление сопротивления движению. При движении эластичного колеса по деформируемой опорной поверхности энергозатраты на преодоление сопротивления движению E_f складываются из энергозатрат на следующие операции [11–13]:

- вертикальную деформацию грунта E_{fv} ;

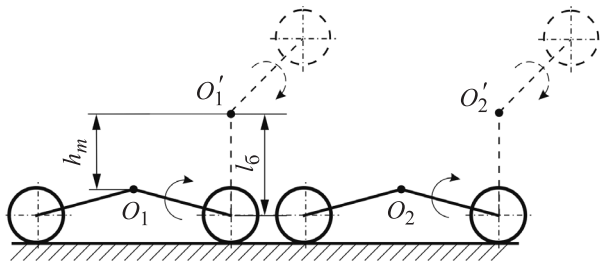


Рис. 4. Расчетная схема для определения энергозатрат на поддержание веса МРК КШД; O_1, O_2 и O_1', O_2' — предыдущее и текущее положение шарниров поворота КО; l_6 — длина балансира КО; h_m — высота подъема корпуса

- преодоление сопротивления продольной силе P_x на оси колеса E_{fp_x} ;
- преодоление потерь на нормальную и окружную деформации шины E_{ft} ;
- преодоление прилипания грунта к шине E_{fn} ;
- горизонтальную деформацию грунта E_{fg} ;
- буксование E_{fb} ;
- раскрутку КО и продольный разгон машины E_{fe} .

Таким образом, $E_f = E_{fv} + E_{fp_x} + E_{ft} + E_{fn} + E_{fg} + E_{fb} + E_{fe}$.

Энергозатраты на вертикальную деформацию грунта. Эти энергозатраты определяются по формуле [14]

$$E_{fv} = Sb \int_0^{h_r} p dh_r,$$

где S, b и h_r — длина, ширина и глубина колеи соответственно; p — давление в пятне контакта шины с опорным основанием.

Примем следующие упрощающие допущения:

- давление p постоянно по всей поверхности пятна контакта;
- проекция пятна контакта на горизонтальную поверхность имеет прямоугольную форму.

Рассмотрим упрощенную расчетную схему взаимодействия эластичного колеса с деформированным опорным основанием при движении МРК КШД в режиме шагания (рис. 5).

Согласно расчетной схеме (см. рис. 4) и принятым допущениям, можно записать

$$p = \frac{P_z}{bL}; \quad P_z = \frac{1}{4}(M + 8m)g;$$

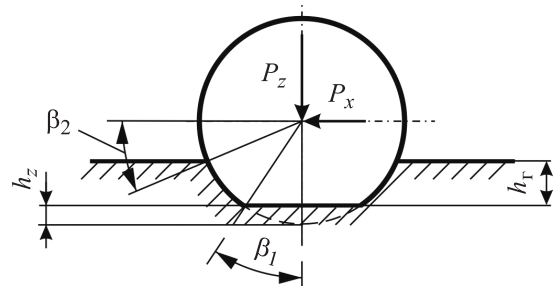


Рис. 5. Упрощенная расчетная схема взаимодействия эластичного колеса с деформированным опорным основанием при движении МРК КШД в режиме шагания;

β_1, β_2 — углы профиля взаимодействия эластичного колеса с деформированным опорным основанием; P_x — сила сопротивления, действующая со стороны оси МРК КШД на колесо; P_z — вертикальная нагрузка на колесо; h_z — прогиб шины

$$L = 2 \left[r_k \left(\frac{\pi}{2} - \beta_1 - \beta_2 \right) + r_k \beta_1 \right] = 2r_k \left(\frac{\pi}{2} - \beta_2 \right);$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{r_k - h_z}{r_k}; \quad \beta_2 = \arcsin \frac{r_k - h_z - h_r}{r_k},$$

где L — протяженность пятна контакта; r_k — свободный радиус колеса.

Тогда

$$E_{f_b} = (r_k - h_z) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) \frac{(M + 8m)g}{2r_k \left(\frac{\pi}{2} - \beta_2 \right)} h_r.$$

Энергозатраты на преодоление сопротивления продольной силе на оси колеса. Эти энергозатраты вычисляются по формуле

$$E_{f_{P_x}} = P_z \varphi (r_k - h_z) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) =$$

$$= (M + 8m) g \varphi (r_k - h_z) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right),$$

где φ — коэффициент сцепления.

Энергозатраты на преодоление потерь на нормальную и окружную деформации шины. Согласно рекомендациям работы [15], энергозатраты на преодоление потерь на нормальную и окружную деформации шины можно определить следующим образом:

$$E_{f_t} = f_{ш} P_z r_k \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = f_{ш} (M + 8m) g r_k \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right);$$

$$f_{ш} = f_0 + f_m;$$

$$f_0 = \frac{(1 + 0,467 \cdot 10^{-3} v_x^2) (\alpha_f + \beta_f R_z^2)}{1 + p_w};$$

$$f_m = \frac{\lambda_k M_k^2}{R_z r_k r_{k0}}; \quad r_{k0} = r_k - \lambda_k M_k,$$

где $f_{ш}$ — коэффициент сопротивления качению эластичного колеса; f_0 — коэффициент сопротивления качению в ведомом режиме; f_m — дополнительная составляющая коэффициента сопротивления качению эластичного колеса, нагруженного крутящим моментом; v_x — курсовая скорость МРК КШД; α_f, β_f — коэффициенты, определяющиеся для данной шины в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [15]; R_z — вертикальная реакция взаимодействия шины с опорным основанием; p_w — внутреннее давление воздуха в шине; λ_k — коэффициент тангенциальной эластичности шины; M_k — крутящий момент, подведенный к колесу; r_{k0} — радиус качения эластичного колеса без учета скольжения.

Энергозатраты на преодоление прилипания грунта к шине. Количественно эти энергозатраты можно оценить по формуле [14]

$$E_{f_n} \cong 0,5 p_l b L S,$$

где p_l — удельная сила прилипания, значения которой приведены в работе [14].

Энергозатраты на горизонтальную деформацию грунта. Этими энергозатратами можно пренебречь ($E_{f_r} \cong 0$), так как при совершении шага колесо перекачивается на величину $S = (r_k - h_z)(\pi/2 - \alpha) \cong r_k$. При таком малом линейном перемещении центра колеса валик грунта не успевает образоваться.

Энергозатраты на буксование. Так как при шагании вращение колеса относительно его оси заблокировано, колесо перекачивается по опорной поверхности без пробуксовки, т. е. $E_{f_b} = 0$.

Энергозатраты на раскрутку КО и продольный разгон машины. Поскольку шагающий режим не является основным режимом движения и служит только для преодоления сложных участков местности, скорость движения мала и инерционностью звеньев можно пренебречь ($E_{f_e} = 0$).

Выводы

1. Разработана циклограмма энергоэффективного шага МРК КШД, что обеспечивает такому транспортному средству высокие показатели проходимости при движении по опорным основаниям с низкой несущей способностью. Энергозатраты при перемещении шагом гораздо меньше, чем при движении за счет колесного хода, так как в первом случае отсутствуют затраты энергии на горизонтальную деформацию грунта, буксование, раскрутку КО и продольный разгон машины. Указанные затраты энергии особенно значимы на рыхлых и сыпучих опорных основаниях (таких как песок, снег и т. п.). Следовательно, предложенная циклограмма шагания является более энергоэффективным способом передвижения по сравнению с перемещением МРК вследствие принудительного вращения колесных движителей.

2. Отсутствие буксования колес при шагании по опорным основаниям с низкой несущей способностью приведет к снижению погружения колеса в грунт, т. е. к уменьшению глубины колеи. Таким образом, благодаря применению шагания МРК будет способен преодолевать участки

местности, которые невозможно было бы пройти за счет принудительного вращения колесных движителей. Это позволяет говорить об увеличении опорной проходимости машины.

3. Трудности заключаются в том, что в режиме шагания возможно только прямолинейное движение, совершение поворота весьма проблематично.

Литература

- [1] 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
- [2] 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*, 2015, № 4(111), с. 136–150.
- [3] Батанов А.Ф., Грицынин С.Н., Муркин С.В. Робототехнические системы для применения в условиях чрезвычайных ситуаций. *Специальная техника*, 2000, № 2, с. 16.
- [4] Raibert M.H. *Legged Robots that Balance*. Cambridge, Massachusetts, London, England, MIT Press, 1989. 314 p.
- [5] Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2014, № 3(152), с. 42–57.
- [6] Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт решения задачи автономного управления движением мобильных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2005, № 12, с. 21–24.
- [7] Дьяков А.С., Котиев Г.О., Шивирев М.В. Боковое шагание транспортной машины. *Вестник машиностроения*, 2015, № 11, с. 86–88.
- [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] Жилейкин М.М., Жилейкин Ю.М. *Сочлененное транспортное средство с колесно-шагающим движителем*. Патент РФ № 2684956, бюл. № 11, 2019.
- [10] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 199 с.
- [11] Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. New York, Wiley IEEE, 2001. 560 p.
- [12] Benes L., Hermanek P., Novak P. Tensile resistance of wheeled combine harvester with tracked concept of chassis. *MM Science Journal*, 2018, October, pp. 2481–2483, doi: 10.17973/mmsj.2018_10_201848
- [13] 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, vol. 3, doi: 10.1115/DETC2014-34126
- [14] Агейкин Я.С. *Проходимость автомобилей*. Москва, Машиностроение, 1981. 231 с.
- [15] Петрушев В.А., Московкин В.В., Евграфов Ф.Н. *Мощностной баланс автомобиля*. Москва, Машиностроение, 1984. 160 с.

References

- [1] 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
- [2] 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 of selection of geometric parameters, mass- inertia and power characteristics of multiwheeled transportation and technological vehicles. *Transactions of Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev*, 2015, no. 4(111), pp. 136–150 (in Russ.).

- [3] Batanov A.F., Gritsynin S.N., Murkin S.V. Robotic systems for emergency use. *Spetsial'naya tekhnika*, 2000, № 2, с. 16.
- [4] Raibert M.H. *Legged Robots that Balance*. Cambridge, Massachusetts, London, England, MIT Press, 1989. 314 p.
- [5] Kudryashov V.B., Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V. Problems of robotization for military ground technics. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*, 2014, no. 3(152), pp. 42–57.
- [6] Noskov V.P., Rubtsov I.V. Experience in solving the problem of autonomous motion control of mobile robots. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 21–24 (in Russ.).
- [7] D'yakov A.S., Kotiyev G.O., Shivirev M.V. Side stepping of transportation vehicle. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2015, no. 11, pp. 86–88 (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] Zhileykin M.M., Zhileykin Yu.M. *Sochlenennoye transportnoye sredstvo s kolesno-shagayushchim dvizhitelem* [Articulated wheeled vehicle]. Patent no. 2684956 RF, 2019.
- [10] Lapshin V.V. *Mekhanika i upravleniye dvizheniyem shagayushchikh mashin* [Mechanics and motion control of walking machines]. Moscow, Bauman Press, 2012. 199 p.
- [11] Wong J.Y. *Theory of Ground Vehicles*. New York, Wiley IEEE, 2001. 560 p.
- [12] Benes L., Hermanek P., Novak P. Tensile resistance of wheeled combine harvester with tracked concept of chassis. *MM Science Journal*, 2018, October, pp. 2481–2483, doi: 10.17973/mmsj.2018_10_201848
- [13] 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, vol. 3, doi: 10.1115/DETC2014-34126
- [14] Ageykin Ya.S. *Prokhodimost' avtomobilya* [Car cross]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1981. 231 p.
- [15] Petrushev V.A., Moskovkin V.V., Evgrafov F.N. *Moshchnostnoy balans avtomobilya* [Car power balance]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1984. 160 p.

Статья поступила в редакцию 26.12.2019

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. Циклограмма энергоэффективного шага мобильного робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 6, с. 10–16, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-10-16

Please cite this article in English as:

Zhileykin M.M. A Cyclogram of an Energy Efficient Step of a Mobile Robotic System with Wheel-Walking Propulsion. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 6, pp. 10–16, doi: 10.18698/0536-1044-2020-6-10-16