

## Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 627.02:007.52

DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-6-18

**В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев**

### СТРУКТУРА ЭНЕРГОЗАТРАТ ШАГАЮЩИХ МАШИН И РОБОТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БОЛЬШИХ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ\*

*Шагающие машины и роботы при движении в сложных условиях могут быть более эффективными в сравнении с традиционными колесными и гусеничными транспортными средствами. По этой причине они находят применение для работ в экстремальных условиях. Перспективно использование шагающих роботов и при внедрении новых почвосберегающих технологий в лесном и сельском хозяйстве. Известные роботизированные трактора имеют, как правило, движители гусеничного или колесного типа. Тяговые свойства таких тракторов ограничены по сцеплению. Они могут реализовать максимальную силу тяги, несмотря на их высокую энергонасыщенность, меньше собственного веса (коэффициент сцепления даже для хороших грунтов не превосходит 0,8–1). Шагающие машины не имеют этого недостатка. Вместе с тем, скорость передвижения шагающих тракторов ограничена из-за высоких затрат мощности на преодоление сил инерции в каждом цикле (шаге) движения. В работе обсуждается возможность частичной взаимной компенсации энергозатрат на осуществление полезной «тяговой работы» с другими составляющими затрат на движение. Проведено моделирование динамики шагающего робота с цикловыми движителями при реализации тяговых усилий. Шагающие движители такого типа отличаются простотой и надежностью. Определены цикловые зависимости основных составляющих энергозатрат (расходуемых на преодоление цикловых сил инерции в движителе, на обусловленные шагающим способом передвижения колебания корпуса, на прессование грунта и на осуществление полезной «тяговой работы»). При анализе учитывалось, что затраты мощности на совершение тяговой работы, вследствие курсовой неравномерности движения, меняются в зависимости от фазы цикла, а потери мощности на прессование грунта имеют место только при переступании. Анализ базировался на кинематических и инерционных характеристиках шагающих движителей ряда экспериментальных образцов шагающих машин и роботов. Исследована возможность взаимной компенсации различных составляющих энергозатрат шагающих робототехнических систем, предназначенных для реализации значительных тяговых усилий. Показано, что имеется принципиальная возможность разработки такого шагающего движителя, где различные затраты мощности будут лежать в противофазе, либо их максимумы будут смещены во времени. Тем самым можно решить задачу повышения энергоэффективности движения шагающих робототехнических систем. Результаты работы могут быть востребованы при разработке как простейших шагающих машин, например тракторов сельскохозяйственного назначения, так и для сложных робототехнических систем предназначенных для проведения грунтовых работ при дефиците сцепного веса, например, в подводных условиях либо в условиях ослабленной гравитации.*

*Мобильные роботы; роботизированные тракторы; шагающий движитель; тягово-сцепные свойства; энергозатраты на передвижение; взаимодействие с грунтом; динамика управляемого движения; энергетическая эффективность.*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-08-01180, 18-41-340010 и стипендии президента РФ СП-5102.2018.1.

V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev

## THE STRUCTURE OF ENERGY CONSUMPTION OF WALKING MACHINES AND ROBOTS DURING REALIZATION OF LARGE TRACTIVE EFFORT

*The walking machines and robots at the movement in difficult conditions can be more effective in comparison with traditional wheeled and tracked vehicles. For this reason they find application for works in extreme conditions. Use of the walking robots is perspective at implementation of new soil-saving technologies in forestry and agriculture. The known robotic tractors have, as a rule, tracked or wheeled type of mover. Traction properties of such tractors are limited by adhesion. They can realize the maximum traction force, despite of their high power saturation, less than body weight (the adhesion coefficient even for good soil does not surpass 0.8-1). The walking machines have no this disadvantage. At the same time, the speed of movement of the walking tractors is limited because of high power costs for overcoming inertial forces in each cycle (step) of the movement. In work the possibility of partial mutual compensation of energy consumption on implementation of useful "traction work" with other components of costs of the movement is discussed. Modeling of dynamics of the walking robot with cyclic movers at realization of traction efforts is carried out. The walking movers of this type differs by simplicity and reliability. Cyclic dependences of the main components of energy consumption (spent for overcoming cyclic inertial forces in the mover for fluctuations of the frame, caused by the walking way of movement, for pressing of soil and for implementation of useful "traction work") are defined. In the analysis it was considered that power costs of performance of traction work, due to course unevenness of the movement, changes depending on a cycle phase, and power losses on pressing of soil take place only at a feet changing. The analysis was based on kinematic and inertial characteristics of the walking movers of a number of experimental samples of the walking machines and robots. The possibility of mutual compensation of various components of energy consumption of the walking robotic systems intended for realization of considerable traction efforts is investigated. It is shown that there is a basic possibility of development of such walking mover, where various costs of power will be in antiphase, or their maximum will be displaced in time. Thereby it is possible to solve a task of increasing of energy efficiency of the walking robotic systems movement. Results of work can be demanded in developing both in simplest walking machines, for example tractors for agricultural purposes, and for the difficult robotic systems, intended for executing of soil works with deficit of adhesion weight, for example, in underwater conditions or in the conditions of the weakened gravitation.*

*Mobile robots; robotic tractors; walking mover; traction properties; energy consumption for movement; interaction with soil; controlled movement dynamics; energy efficiency.*

**Введение.** Шагающие машины и роботы при движении в сложных условиях могут быть более эффективными в сравнении с традиционными колесными и гусеничными транспортными средствами. При использовании шагающего способа передвижения имеют место принципиально более высокие возможности по адаптации к опорной поверхности и профильная проходимость, высокая маневренность, допускающая перемещение машины в произвольном направлении и повороты на месте, возможность работы на слабых грунтах, возможность управления опорными реакциями и положением корпуса при движении и др. [1–4]. По этой причине робототехнические системы с шагающими движителями находят применение для работ в экстремальных условиях (для работы в условиях тундры, пустыни или горной местности, для работы в подводных условиях [5–6], для исследования планет и др. [7–9]). Возможно использование шагающих роботов и в военных целях [10–12]. Перспективно использование машин и роботов с шагающими движителями и при внедрении новых почвосберегающих технологий в лесном и сельском хозяйстве. Шагающий движитель, благодаря дискретному и близкому к статическому взаимодействию стоп с грунтом, практически не разрушает экологически ранимый почвенный покров [13–16]. Работы по созданию разнообразных роботизированных тракторов ведутся во всех развитых странах мира, включая

России. В частности, выделяется категория автономных бескабинных тракторов [17–18]. Их отличает сравнительно невысокая стоимость – за счет экономии, связанной с отсутствием кабины для водителя. Управление такими тракторами может осуществляться в дистанционном режиме, например, с планшета или со стационарного компьютера. Известные роботизированные трактора имеют, как правило, движители гусеничного или колесного типа. Тяговые свойства таких тракторов ограничены по сцеплению. Они могут реализовать максимальную силу тяги, несмотря на их высокую энергонасыщенность, меньше собственного веса (коэффициент сцепления даже для хороших грунтов не превосходит 0,8–1) [19, 20]. Отсутствие кабины приводит к дополнительному снижению тяговых свойств из-за снижения сцепного веса трактора. Шагающие машины не имеют этого недостатка. При шагающем способе передвижения, в отличие от колесных и гусеничных машин, грунт не является препятствием для движения, а лишь требует необходимых затрат мощности на его прессование [7]. На рис. 1,а приведена схема сил, действующих в курсовом направлении на колесную, гусеничную и шагающую машину, где  $F_{\text{тяги}}$  – сила тяги, идущая на совершение полезной (тяговой) работы;  $F_{\text{сцепл.}}$  – сила сцепления;  $F_{\text{сопр.}}$  – сила сопротивления движению со стороны грунта. Как видно из схемы сил, для наземных колесных и гусеничных транспортных средств  $F_{\text{тяги}} = F_{\text{сцепл.}} - F_{\text{сопр.}}$ . Силы сцепления и сопротивления движению пропорциональны нормальной реакции грунта  $N$ . Для слабонесущих грунтов соотношение коэффициентов сцепления и сопротивления движению таково, что даже гусеничный движитель на таких грунтах не позволяет реализовать значительных тяговых усилий. На слабых грунтах у гусеничных машин коэффициент сцепления лежит, как правило, в пределах 0,2–0,3, а коэффициент сопротивления движению 0,1–0,2. Шагающий движитель может обеспечить более высокие тягово-сцепные свойства при меньшей массе машины, так как для шагающих машин (рис. 1,б) сила тяги равна силе сцепления  $F_{\text{тяги}} = F_{\text{сцепл.}}$ . Кроме того, аналог коэффициента сцепления для шагающих машин, при большой глубине следовой дорожки (следовой колеи), может быть  $\gg 1$ . Это позволяет реализовать повышенную горизонтальную силу тяги. Таким образом, реализуемая по сцеплению сила тяги у шагающих машин может быть существенно больше веса машины.

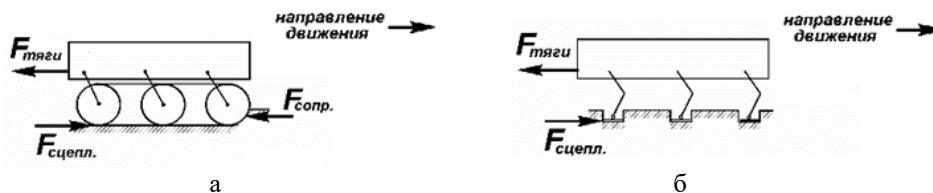


Рис. 1. Силы, действующие в курсовом направлении на колесную или гусеничную (а) и шагающую (б) машину

Вместе с тем, скорость передвижения шагающих тракторов существенно ограничена из-за высоких энергозатрат на преодоление сил инерции в каждом цикле (шаге) движения. Основной объем указанных дополнительных затрат мощности связан, во-первых, с обеспечением периодического движения ног (с этапами разгона и торможения), причем у машин для работы на слабых грунтах проблема усложняется массивными стопами с развитой опорной поверхностью, предназначенными для снижения давления на грунт; а во-вторых, с несовершенством тракторной опорных точек механизмов шагания, вследствие чего имеет место неравномерность курсового движения шагающей машины и пространственные колебания ее корпуса при каждом шаге. В работе обсуждается возможность частичной вза-

имной компенсации энергозатрат на осуществление полезной «тяговой работы» с другими составляющими энергозатрат (расходуемых на преодоление цикловых сил инерции в движителе, на колебания корпуса, на прессование грунта и др.).

**Структура дополнительных затрат мощности на движение у шагающих машин с движителями циклового типа.** При проведении динамического анализа использовалась адаптированная к условиям рассматриваемой задачи обобщенная динамическая модель многоногой шагающей машины с побортно объединенными в шагающие модули цикловыми движителями [21, 22]. Анализ базировался на кинематических и инерционных характеристиках шагающих движителей ряда экспериментальных образцов шагающих машин и роботов [23–25] разработанных на Факультете автоматизированных систем, транспорта и вооружений ВолгГТУ (рис. 2). Наличие реальных образцов шагающих машин существенно облегчило проведение анализа.



а



б



в



г

Рис. 2. Шагающие машины ВолгГТУ: шагающая опора дождевальная машины «Кубань» (а), многоцелевое шагающее шасси (б), робототехнический комплекс «Восьминог» (в), подводный шагающий робот МАК-1 (г)

Во всех шагающих машинах использовались движители на базе одностепенных 4-х звенных цикловых механизмов шагания «λ-образного» типа [26]. Механизм шагания предложен Н.В. Умновым (ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, МГТУ им. Н.Э. Баумана). Схема механизма и траектория его опорной точки С в относительном движении представлена на рис. 3. Точки на траектории расположены через равные промежутки времени – через  $\frac{1}{24}$  периода цикла. Точки с заливкой соответствуют опорной фазе. В подводном шагающем аппарате МАК-1 механизм шагания с целью повышения его адаптивности и профильной проходимости

был несколько усовершенствован. Была реализована возможность корректировки длины и высоты шага путем введения в механизм шагания управляемого поворотного звена – дополнительного кривошипа с линейным электроприводом [27]. Входящие в состав движителя механизмы шагания кинематически связаны и работают в противофазе. В результате в любой момент времени хотя бы одна из ног движителя находится в опорной фазе. Использование цикловых движителей позволяет не заботиться о сохранении походки и устойчивости и исключает необходимость адаптивной системы управления. В результате машины имеют минимальное число управляемых приводов и становятся проще, надежнее и на порядок дешевле аналогов с адаптивным управлением.



Рис. 3. Схема механизма шагания (а) и траектория его опорной точки в относительном движении (б):

1 – ведущий кривошип; 2 – Г-образное опорное звено (шатун); 3 – коромысло; 4 – стопа

Несовершенство траектории опорной точки простых и надежных четырехзвенных механизмов шагания приводит к неравномерности курсового движения и вертикальным колебаниям корпуса в каждом цикле движения. Это требует дополнительных затрат мощности силового привода  $W_{дон}$  которые расходуются на возникающие при ходьбе колебания в системе. Они складываются из мощности  $W_0^G$ , затрачиваемой на преодоление силы тяжести машины при вертикальных колебаниях ее корпуса, мощности  $W_0^\Phi$  идущей на преодоление цикловых сил инерции корпуса, а также суммарных затрат мощности  $W_{ос}^\Phi$  на преодоление сил инерции в звеньях движителя, которые также носят периодический характер. Другие составляющие затрат мощности, в рассматриваемом диапазоне невысоких скоростей передвижения, пренебрежительно малы.

Мощность, необходимая на преодоление силы тяжести при вертикальных колебаниях корпуса шагающей машины равна

$$W_0^G = Gv_z, \quad (1)$$

где  $v_z$  – вертикальная составляющая скорости корпуса.

Мощность, потребляемая при колебаниях корпуса шагающей машины (без учета движителей) на преодоление цикловых сил инерции равна:

$$W_{0x}^\Phi = \Phi_{0x}v_x + \Phi_{0z}v_z, \quad (2)$$

где  $\Phi_{0x} = -m_0 a_x$ ,  $\Phi_{0z} = -m_0 a_z$  – курсовая и вертикальная составляющие главного вектора сил инерции шагающей машины (без учета движителей);  $a_x$ ,  $a_z$  – курсовая и вертикальная составляющие ускорения шагающей опоры, соответственно.

Мощность, расходуемая на преодоление цикловых сил инерции в движителе, складывается из затрат мощности на преодоление сил инерции в звеньях 4-х звенных механизмов шагания:

$$W_{ос}^{\Phi} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (\Phi_{ijkx} \dot{x}_{Cijk} + \Phi_{ijkz} \dot{z}_{Cijk} + M_{ijy}^{\Phi} \omega_{ijy}), \quad (3)$$

где  $\Phi_{ijkx}$ ,  $\Phi_{ijkz}$  – курсовая и вертикальная составляющие силы инерции  $i$ -го звена ( $i = 1, 2, 3, 4$ )  $j$ -го механизма шагания ( $j = 1, 2$ )  $k$ -го борта ( $k = 1, 2$ );  $\dot{x}_{Cijk}$ ,  $\dot{z}_{Cijk}$  – курсовая и вертикальная составляющие скорости центра масс звеньев;  $M_{ijy}^{\Phi}$  и  $\omega_{ijy}$  – момент сил инерции звена и его угловая скорость в плоскости шагания.

Проекции сил инерции и момент сил инерции звеньев механизмов шагания равны, соответственно:  $\Phi_{ijkx} = -m_i \ddot{x}_{Cijk}$ ,  $\Phi_{ijkz} = -m_i \ddot{z}_{Cijk}$ ,  $M_{ijk}^{\Phi} = -J_{Ci} \ddot{\phi}_{ijk}$ , где  $m_i$  и  $J_{Ci}$  – масса и момент инерции звена;  $\ddot{x}_{Cijk}$ ,  $\ddot{z}_{Cijk}$  – курсовая и вертикальная составляющие ускорения центра масс звена в плоскости шагания;  $\ddot{\phi}_{ijk}$  – угловое ускорение звена.

Для определения мощностей (1–3) был проведен полный кинематический анализ движения механизмов шагания движителя. При определении скоростей и ускорений узловых точек механизмов шагания они рассматривались как плоские многозвенные механизмы. При составлении дифференциальных уравнений движения звеньев их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые накладываются внешние связи. Выражения для скоростей узловых точек получались последовательным рассмотрением движений звеньев механизма. Угловые ускорения звеньев движителя определялись дифференцированием их угловых скоростей. Для задания движения корпуса шагающей машины к уравнениям движения также добавлялись формулы для проекций относительных скоростей опорных точек, являющихся узловыми точками опорного звена, а также формулы для относительных координат опорных точек, необходимых для определения момента смены стоп.

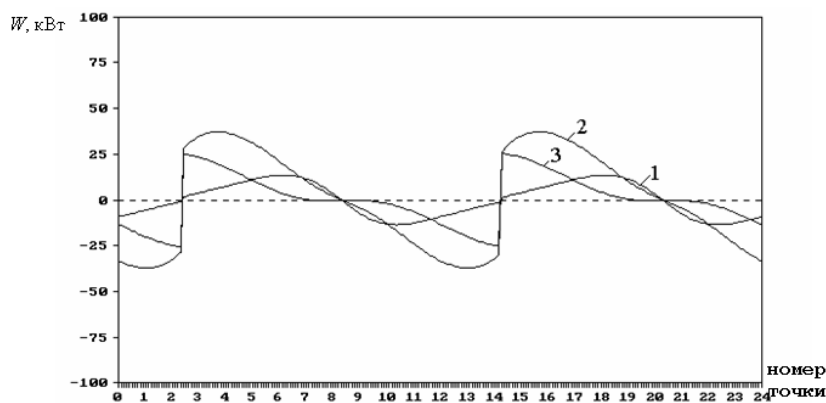


Рис. 4. Структура дополнительных затрат мощности на движение шагающего робототехнического комплекса «Восьминог» за цикл движения (2 шага) при средней курсовой скорости 5 км/ч:  $W_{Leg}^{\Phi}$  (кривая 1);  $W_0^{\Phi}$  (кривая 2);  $W_0^G$  (кривая 3)

При анализе исследовалась структура энергозатрат шагающей машины в диапазоне скоростей от 1–10 км/ч. На рис. 5 представлена, для примера, структура дополнительных затрат мощности робота «Восьминог» при скорости движения 5 км/ч. Представлен случай синхронного движения бортов машины при равномерном вращении ведущих кривошипов механизмов шагания. На рисунке, для большей наглядности, по оси абсцисс расположены порядковые номера точек относи-

тельной траектории опорной точки механизма шагания (рис. 3,б). Это позволяет на полученных зависимостях определить участки, соответствующие опорной фазе и фазе переноса, а также определить момент смены стоп.

Основной вклад в суммарные энергозатраты на движение шагающей машины при рассматриваемой скорости вносит мощность (3), затрачиваемая на преодоление сил инерции корпуса. Несколько ей уступает мощность (2), расходуемая на преодоление силы тяжести при вертикальных колебаниях корпуса машины. Затраты мощности на преодоление сил инерции в двигателе (1), в рассматриваемом случае, вносят наименьший вклад в суммарную потребляемую мощность. Положения максимальных значений основных составляющих энергозатрат  $W_0^{\Phi}$  и  $W_0^G$  приблизительно совпадают. В результате суммарные затраты мощности на передвижение меняются скачкообразно. Такое изменение потребляемой мощности требует необоснованного увеличения мощности силовой установки и бортовых тяговых электродвигателей и приводит к дополнительным потерям, в частности, из-за снижения к.п.д. электропривода. Значения сил инерции в двигателе в рассматриваемом диапазоне скоростей сравнительно невелики и они не могут существенно влиять на энергозатраты расходуемые на движения машины.

**Влияние затрат на прессование грунта и «полезного» тягового усилия на структуру затрат мощности на движение.** При анализе структуры энергозатрат шагающего способа передвижения средние потери мощности на прессование грунта за цикл оценивались как

$$W_{fcp} = k_f v_{xcp} G, \quad (4)$$

где  $G$  – вес шагающей машины;  $v_{xcp}$  – средняя за цикл курсовая скорость машины;  $k_f$  – аналог коэффициента сопротивления движению.

Ориентировочные значения коэффициента сопротивления движению определялись аналитически, по формуле  $k_f = A_f / GS$ , где  $A_f$  – работа, затрачиваемая на прессование грунта за цикл;  $S$  – перемещение машины за цикл. В нашем случае прессование грунта за цикл (2 шага) происходит дважды, поэтому  $A_f = 2Gh$ , где  $h$  – глубина следовой дорожки. При анализе учитывалось, что затраты мощности  $W_f$  на прессование грунта имеют место лишь часть цикла, в момент смены стоп (участки 1–3 и 12–14 траектории). Также считалось, что  $W_f$  находится в линейной зависимости от нормальной реакции деформируемого грунта.

Мощность потребная на реализацию полезного тягового усилия оценивалась по формуле

$$W_{тяги} = F_{тяги} v_x, \quad (5)$$

где тяговое усилие  $F_{тяги}$  в течение цикла считалось неизменным.

На рис. 5 представлены затраты мощности на прессование грунта и мощность, требуемая на реализацию «полезного» тягового усилия для 5-ти тонного робота «Восьминог» при тяговом усилии 50 кН. Такое тяговое усилие реализуется по сцеплению при коэффициенте сцепления равном 1. Там же показано изменение за цикл  $W_{дон}$  – суммы дополнительных затрат мощности (1–3).

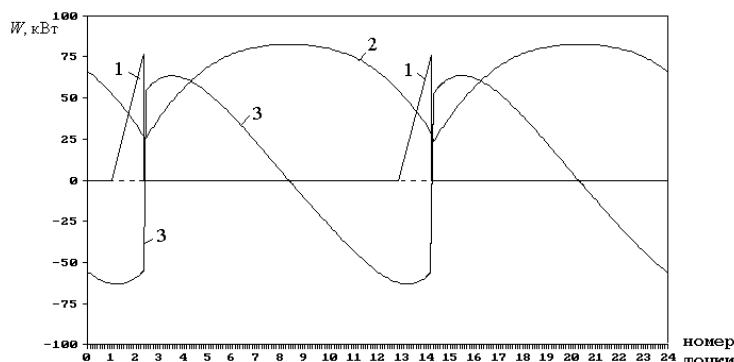


Рис. 5. Структура затрат мощности за цикл (2 шага) шагающего робота «Восьминог» при реализации тягового усилия  $F_{тяги} = 50$  кН при средней курсовой скорости 5 км/ч:  $W_f$  (кривая 1);  $W_{тяги}$  (кривая 2);  $W_{дон}$  (кривая 3)

Анализ полученных результатов показывает, что затраты мощности на реализацию полезного тягового усилия  $W_{тяги}$  и дополнительные затраты мощности  $W_{дон}$ , обусловленные шагающим способом передвижения, частично лежат в противофазе (участки 9–14 и 21–3 траектории), либо их максимумы смещены во времени (участки 6–12 и 18–24 кривой 2 и участки 3–5 и 15–17 кривой 3), а потери мощности  $W_f$ , обусловленные прессованием грунта, полностью лежат в противофазе с дополнительной мощностью  $W_{дон}$ . Взаимная компенсация части энергозатрат обеспечивает повышение энергоэффективности шагающих робототехнических систем в тяговых режимах движения.

**Оптимизация структуры энергозатрат за счет управления движением опорной точки по траектории.** В ходе проведения анализа также рассматривалась возможность оптимизации структуры энергозатрат на движения подводного шагающего робота МАК-1 за счет управления движением опорной точки по траектории. Силовой электропривод робота выполнен на базе асинхронных электродвигателей с частотным регулированием скорости вращения и имеется возможность обеспечить требуемую неравномерность вращения ведущего кривошипа механизма шагания. Тем самым, например, можно ускорить фазу переноса опорных точек и обеспечить более равномерное движение робота с меньшими вертикальными колебаниями корпуса. Затраты мощности  $W_{дс}^{\Phi}$  на преодоление сил инерции в движителе при этом возрастут, а мощности  $W_0^G$  и  $W_0^{\Phi}$  уменьшаться. В результате общая мощность, расходуемая на движение, будет иметь более сглаженный вид. Однако, как показал анализ, положительный эффект имеет место только при сравнительно небольших значениях реализуемого тягового усилия.

**Заключение.** Таким образом, имеется принципиальная возможность разработки такого шагающего движителя на базе цикловых механизмов в котором различные затраты мощности обусловленные самим шагающим способом передвижения и затраты мощности на прессование грунта и на реализацию полезного тягового усилия будут лежать в противофазе, либо их максимумы будут смещены во времени. Тем самым можно решить задачу повышения энергоэффективности движения шагающих робототехнических систем. За счет управления законом движения опорной точки по траектории (за счет неравномерного вращения ведущего кривошипа механизмов шагания) можно несколько уменьшить неравномерность требуемой мощности на движение лишь в случае сравнительно небольшого тягового усилия. При реализации больших тяговых усилий (при  $F_{тяги} > G$ ) суммарные



энергозатраты в основном определяются затратами мощности на реализацию тягового усилия. Дополнительные затраты мощности, обусловленные шагающим способом передвижения, в этом случае мало влияют на общие энергозатраты на передвижение.

Результаты работы могут быть востребованы при разработке как простейших шагающих машин, например шагающих тракторов сельскохозяйственного назначения, так и для сложных шагающих робототехнических систем предназначенных для проведения грунтовых работ при дефиците сцепного веса, например, в подводных условиях либо в условиях ослабленной гравитации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Чернышев В.В.* Оценка устойчивости по опрокидыванию подводного шагающего аппарата // Нелинейная динамика машин. School-NDM 2016: Сб. тр. III междунар. школы-конференции молодых учёных (г. Москва, 12-15 апр. 2016 г.) / под ред. В.К. Асташева [и др.]; Российский науч. фонд, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М., 2016. – С. 110-114.
2. *Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V.* Passive foot control in cyclic walking mechanism // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference : Proceedings / St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). – Publisher: IEEE, 2017. – 5 p. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
3. *Брискин Е.С., Шурыгин В.А., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В.* Курсовая устойчивость шагающей машины "Восьминог" // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – Т. 4, № 1-3. – С. 56-58.
4. *Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V.* Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds // Procedia Engineering, Vol. 176: Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2016), June 29 – July 01, 2016, Samara, Russia / ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. – Elsevier publishing, 2017. – P. 387-393.
5. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В., Гаврилов А.Е.* Управление движением подводных шагающих аппаратов передвигающихся по дну // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1 (174). – С. 141-155.
6. *Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sherstobitov S.V., Grigoryan G.G., Savin A.G.* On ground and profile practicability of multi-legged walking machines // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proceedings of the Fourth International Conference, 24-26th September 2001. – London, 2001. – P. 1005-1012.
7. *Кемурджиан А.Л.* Планетоходы. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
8. *Чернышев В.В., Гончаров А.А., Арыканцев В.В.* Тягово-сцепные свойства шагающих роботов в условиях ослабленной гравитации // Робототехника и искусственный интеллект: Мат. X всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Железнодорожск, 8 декабря 2018 г.) / под науч. ред. В.А. Углева; Сибирский федеральный ун-т, Межинститутская базовая кафедра «Прикладная физика и космические технологии». – Красноярск, 2018. – С. 14-19.
9. *Арыканцев В.В., Гончаров А.А., Чернышев В.В.* Моделирование контактного взаимодействия опорных элементов (стоп) шагающего движителя с грунтом в условиях сложного нагружения // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции: Тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Санкт-Петербург, 7-8 июня 2018 г.) / Гос. научный центр Российской Федерации «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский ин-т робототехники и технической кибернетики» (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК). – СПб., 2018. – С. 258-265. – Режим доступа: [http://er.rtc.ru/images/docs/Trudy\\_konf\\_ER-2018.pdf](http://er.rtc.ru/images/docs/Trudy_konf_ER-2018.pdf).
10. *Caldwell D.G., Warren H.A.* Is there a future for climbing and walking robotic system in military operations? // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001. – P. 969-977.

11. *Digney B.L., Penzes S.* High utility robotics in urban combat operations // Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR 2003: Proc. of the 6-th Int. Conf. Catania, Italy, 2003. – P. 707-716.
12. Boston Dynamics. – Режим доступа: <https://www.bostondynamics.com>.
13. *Арыканцев В.В., Чернышев В.В.* Определение допустимого давления лыжеобразной стопы шагающего движителя на грунт // Робототехника в сельскохозяйственных технологиях: Матер. междунар. науч.-практ. конф. (10-12 нояб. 2014 г.). – Мичуринск, 2014. – С. 131-135.
14. *Арыканцев В.В., Терехов С.Е., Чернышев В.В.* Влияние формы стопы шагающего движителя на напряжённое состояние грунта // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования: Сб. науч. тр. по матер. ежегодных конференций. Т. 3. Вып. 1: Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Транспортно-технологическому комплексу – энергоэффективную альтернативу» (г. Воронеж, 16-18 марта 2016 г.). – Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2016. – С. 166-171.
15. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* Испытания подводного шагающего аппарата в условиях водных объектов Волго-Ахтубинской поймы // Системы контроля окружающей среды. – 2017. – № 8 (28). – С. 24-29.
16. *Арыканцев В.В., Чернышев В.В.* Исследование «компрессионного эффекта», возникающего при смене стоп шагающего движителя на подводных грунтах // Современные методы и средства океанологических исследований: Матер. XV всерос. науч.-техн. конф. «МСОИ–2017» / сост.: Н.А. Римский-Корсаков, А.В. Зарещкий; Федеральное агентство научных организаций. – М., 2017. – Т. II. – С. 178-182.
17. *West E.* Modern farming. Farming with robots. Going it alone // Farm machinery journal. – 2017. – No. 39. – P. 42-45.
18. Autonomous Tractor Corporation. – Режим доступа: <https://www.autonomoustractor.com>.
19. *Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G.* Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 (Busan, South Korea, June 19-24, 2016) / Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. – Busan, 2016. – 9 p.
20. *Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V., Gavrilov A.E., Sharonov N.G.* Development of the walking mover for underwater walking vehicle // Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation» (Zadar (Croatia, EU), 21-24th October 2015) / ed. by B.R. Katalinic ; Danube Adria Association for Automation & Manufacturing (DAAAM International Vienna). – Vienna (Austria), 2015. – P. 1143-1148.
21. *Чернышев В.В., Шурыгин В.А.* Моделирование динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с грунтом с низкой несущей способностью // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 19: Межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолгГТУ 2013. – № 24 (127). – С. 82-86.
22. *Chernyshev V.V., Briskin E.S., Zhoga V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G.* Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations // The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan, Korea, June 30 – July 3, 2014 / Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO). – Busan (Korea), 2014. – 9 p. (pdf). – Режим доступа: <http://imsd-acmd2014.ksme.or.kr/>.
23. *Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Жога В.В., Шаронов Н.Г., Шаров К.В., Фролова Н.Е., Покровский Д.Н.* Шагающая машина "Восьминог" // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48-49.
24. *Брискин Е.С., Вершинина И.П., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г.* Об управлении движением шагающей машины со двоянными ортогонально-поворотными движителями // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168-176.
25. *Чернышев В.В., Арыканцев В.В.* МАК-1 – подводный шагающий робот // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2. – С. 45-50.

26. Чернышев В.В., Арыканцев В.В. Цикловой механизм шагания с трансформируемой траекторией опорной точки // Теория механизмов и машин. – 2017. – Т. 15, № 2 (34). – С. 71-79. – Режим доступа: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
27. Пат. 2207583 РФ, МПК 7 В 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Чернышев В.В., Брискин Е.С., Савин А.Ю. ВолгГТУ, 2003.

## REFERENCES

1. Arykantsev V.V., Gavrilov A.E., Kalinin YA.V., Maloletov A.V., Chernyshev V.V. Otsenka ustoychivosti po oprokidyvaniyu podvodnogo shagayushchego apparata [Estimation of stability on overturning of underwater walking apparatus], Nelineynaya dinamika mashin. School-NDM 2016: Sb. tr. III mezhdunar. shkoly-konferentsii molodykh uchenykh (g. Moskva, 12-15 apr. 2016 g.) [Nonlinear dynamics of machines. School-NDM 2016: proceedings of the III international school-conference of young scientists (Moscow, 12-15 APR. 2016)], ed. by V.K. Astasheva [et al.]; Russian scientific Foundation, Institute of machine science. A.A. Blagonravova Russian Academy of Sciences. Moscow, 2016, pp. 110-114.
2. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V. Passive foot control in cyclic walking mechanism, *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017) (Saint Petersburg, Russia, 16-19 May 2017): International Conference : Proceedings*. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Publisher: IEEE, 2017 5 p. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076189. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8076189/>.
3. Briskin E.S., Shurygin V.A., Zhoga V.V., Chernyshev V.V., Maloletov A.V. Kursovaya ustoychivost' shagayushchey mashiny "Vos'minog" [Stability walking machine "Octopus"], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control system], 2006, Vol. 4, No. 1-3, pp. 56-58.
4. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds, *Procedia Engineering. Vol. 176: Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2016), June 29 – July 01, 2016, Samara, Russia*, ed. by Viktor Sverbilov and Andrew Plummer. Elsevier publishing, 2017, pp. 387-393.
5. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E. Upravlenie dvizheniem podvodnykh shagayushchikh apparatov peredvigayushchikhsya po dnu [Movement control of underwater walking vehicles moving along the bottom], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 1 (174), pp. 141-155.
6. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sherstobitov S.V., Grigoryan G.G., Savin A.G. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, *Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proceedins of the Fourth International Conference, 24-26th September 2001*. London, 2001, pp. 1005-1012.
7. Kemurdzhian A.L. Planetokhody [Planetary Rovers]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 400 p.
8. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Tyagovo-stsepnnye svoystva shagayushchikh robotov v usloviyakh oslablennoy gravitatsii [Traction-coupling properties of walking robots in conditions of weakened gravity], *Robototekhnika i iskusstvennyy intellekt: Mat. X vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. ZHeleznogorsk, 8 dekabrya 2018 g.)* [Robotics and artificial intelligence: Proceedings of the X all-Russian scientific and technical conference with international participation (Zheleznogorsk, December 8, 2018)], ed. by V.A. Ugleva; Siberian Federal University, Interinstitutional base Department "Applied physics and space technologies". Krasnoyarsk, 2018, pp. 14-19.
9. Arykantsev V.V., Goncharov A.A., Chernyshev V.V. Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya opornykh elementov (stop) shagayushchego dvizhitelya s gruntom v usloviyakh slozhnogo nagruzheniya [Simulation of contact interaction of support elements (stop) of walking propulsor with soil under complex loading], *Ekstremal'naya robototekhnika i konversionnye tendentsii: Tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Sankt-Peterburg, 7-8 iyunya 2018 g.)* [Extreme robotics and conversion trends: Proceedings of the international scientific and technical conference (St. Petersburg, 7-8 June 2018)], State scientific center of the Russian Federation "Central research and development Institute of robotics and technical Cybernetics" (SSC RF CNII RTK). Saynt Petersburg, 2018, pp. 258-265. Available at: [http://er.rtc.ru/images/docs/Trudy\\_konf\\_ER-2018.pdf](http://er.rtc.ru/images/docs/Trudy_konf_ER-2018.pdf).

10. Caldwell D.G., Warren H.A. Is there a future for climbing and walking robotic system in military operations?, *Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany, 2001*, pp. 969-977.
11. Digney B.L., Penzes S. High utility robotics in urban combat operations, *Climbing and Walking Robots and their Supporting Technologies. CLAWAR 2003: Proc. of the 6-th Int. Conf. Catania, Italy, 2003*, pp. 707-716.
12. Boston Dynamics. Available at: <https://www.bostondynamics.com>.
13. Arykantsev V.V., Chernyshev V.V. Opredelenie dopustimogo davleniya lyzheobraznoy stopy shagayushchego dvizhitelya na grunt [Determination of the permissible pressure of the ski-like foot of the walking mover on the ground], *Robototekhnika v sel'skokhozyaystvennykh tekhnologiyakh: Mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (10-12 noyab. 2014 g.)* [Robotics in agricultural technologies: Materials of the international scientific and practical conference (10-12 November 2014)]. Michurinsk, 2014, pp. 131-135.
14. Arykantsev V.V., Terekhov S.E., Chernyshev V.V. Vliyanie formy stopy shagayushchego dvizhitelya na napryazhennoe sostoyanie grunta [The influence of the foot shape of the walking engine on the stress state of the soil ], *Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskoy komplekse: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya: Sb. nauch. tr. po mater. ezhegodnykh konferentsiy* [Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use: Collection of scientific papers on the materials of annual conferences], Vol. 3, Issue 1: *Mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transportno-tekhnologicheskoyu kompleksu – energoeffektivnyuyu al'ternativu» (g. Voronezh, 16-18 marta 2016 g.)* [Materials of the international scientific and practical conference "Transport and technological complex-energy-efficient alternative" (Voronezh, March 16-18, 2016)]. Voronezh: VGLTU im. G.F. Morozova, 2016, pp. 166-171.
15. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. Ispytaniya podvodnogo shagayushchego apparata v usloviyakh vodnykh ob'ektov Volgo-Akhtubinskoy poymy [Tests of underwater walking apparatus in water bodies of the Volga-Akhtuba floodplain], *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental control systems], 2017, No. 8 (28), pp. 24-29.
16. Arykantsev V.V., Chernyshev V.V. Issledovanie «kompresionnogo effekta», vznikayushchego pri smene stop shagayushchego dvizhitelya na podvodnykh gruntakh [Study of the "compression effect" arising from the change of the foot of the walking thruster on underwater soils], *Sovremennyye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy: Mater. XV vseros. nauch.-tekhn. konf. «MSOI–2017»* [Modern methods and means of Oceanological research: Proceedings of the XV all-Russian scientific and technical conference "MCOI–2017"], compilers: N.A. Rimskiy-Korsakov, A.V. Zaretskiy; Federal Agency of scientific organizations. Moscoq, 2017, Vol. II, pp. 178-182.
17. West E. Modern farming. Farming with robots. Going it alone, *Farm machinery journal*, 2017, No. 39, pp. 42-45.
18. Autonomous Tractor Corporation. Available at: <https://www.autonomoustractor.com>.
19. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Gavrilov A.E., Kalinin Ya.V., Sharonov N.G. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1, *Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2016 (Busan, South Korea, June 19-24, 2016)*, Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OOAE) Division of The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Pusan National University. Busan, 2016, 9 p.
20. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V., Kalinin Ya.V., Gavrilov A.E., Sharonov N.G. Development of the walking mover for underwater walking vehicle, *Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation» (Zadar (Croatia, EU), 21-24th October 2015)*, ed. by B.R. Katalinic; Danube Adria Association for Automation & Manufacturing (DAAAM International Vienna). Vienna (Austria), 2015, pp. 1143-1148.
21. Chernyshev V.V., Shurygin V.A. Modelirovanie dinamiki vzaimodeystviya dvizhitelya podvodnogo shagayushchego apparata s gruntom s nizkoy nesushchey sposobnost'yu [Modeling the dynamics of the interaction of the propulsor of the underwater walking apparatus with a soil with low bearing capacity], *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Aktual'nye problemy upravleniya, vychislitel'noy tekhniki i informatiki v tekhnicheskikh sistemakh". Vyp. 19: Mezhevuz. sb. nauch. tr.* [Izvestia Volggtu. Series "Actual problems of control, computer engineering and Informatics in technical systems". Issue. 19: interuniversity collection of scientific works]. Volgograd: VolgGTU 2013, No. 24 (127), pp. 82-86.

22. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Zhoga V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Modeling of the Dynamics of the Walking Machine with the Cyclic Propulsors as System Solids with Elastic and Damping Relations, *The 3rd Joint International Conference on Multibody System Dynamics. The 7th Asian Conference on Multibody Dynamics, Busan, Korea, June 30 – July 3, 2014 / Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO)*. Busan (Korea), 2014, 9 p. (pdf). Available at: <http://imsd-acmd2014.ksme.or.kr/>.
23. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Zhoga V.V., Sharonov N.G., Sharov K.V., Frolova N.E., Pokrovskiy D.N. Shagayushchaya mashina "Vos'minog" [Walking machine "Octopus"], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2004, No. 5, pp. 48-49.
24. Briskin E.S., Vershinina I.P., Maloletov A.V., Sharonov N.G. Ob upravlenii dvizheniem shagayushchey mashiny so sdvoennymi ortogonal'no-povorotnymi dvizhitelyami [About motion control walking machine with dual orthogonal-rotating propulsion], *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* [News of wounds. Theory and control systems], 2014, No. 3, pp. 168-176.
25. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. MAK-1 – podvodnyy shagayushchiy robot [MAC-1-underwater walking robot], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical Cybernetics], 2015, No. 2, pp. 45-50.
26. Chernyshev V.V., Arykantsev V.V. TSiklovoy mekhanizm shaganiya s transformiruemoj traektoriej opornoj toчки [Cyclic pacing mechanism with transformable trajectory of the reference point], *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines], 2017, Vol. 15, No. 2 (34), pp. 71-79. Available at: <http://tmm.spbstu.ru/34/Chernyshev.pdf>.
27. Chernyshev V.V., Briskin E.S., Savin A.Yu. Patent 2207583 RF, MPK 7 V 62 D 57/032. SHagayushchaya opora dlya transportnykh sredstv povyshennoj prokhodimosti [Walking support for cross-country vehicles]. VolgGTU, 2003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.А. Несмиянов.

**Чернышев Вадим Викторович** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВолгГТУ»); e-mail: [vad.chernyshev@mail.ru](mailto:vad.chernyshev@mail.ru); 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28; тел.: +78442248099; д.т.н.; доцент; профессор.

**Арыканцев Владимир Владимирович** – e-mail: [arvstu@mail.ru](mailto:arvstu@mail.ru); ассистент.

**Chernyshev Vadim Viktorovich** – Volgograd State Technical University (VSTU); e-mail: [vad.chernyshev@mail.ru](mailto:vad.chernyshev@mail.ru); Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28; phone: +78442248099; dr. of eng. sc.; associate professor; professor.

**Arykantsev Vladimir Vladimirovich** – e-mail: [arvstu@mail.ru](mailto:arvstu@mail.ru); assistant.

УДК 007:621.865.8

DOI 10.23683/2311-3103-2019-1-18-27

**Н.А. Рудианов, В.С. Хрущев**

### **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Анализируется опыт и перспективные направления разработки боевых и обеспечивающих робототехнических комплексов Сухопутных войск. Показано, что роботизация наземной военной техники и вооружения идет по направлениям создания унифицированных комплектов (модулей) аппаратуры дистанционного управления для установки на штатные образцы вооружения с целью их беззипажного применения при выполнении боевых, специальных и обеспечивающих задач и разработки перспективных РТК на оригинальной базе для выполнения боевых, разведывательных и обеспечивающих задач с использованием имеющихся и вновь создаваемых аппаратных и программных модулей. Анализируется агрегатно-модульный метод создания оборудования – проектирование и компоновки роботов и*