

## Проектирование наземных транспортных средств

УДК 629.113

В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров

### ПОДВИЖНОСТЬ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

В статье дается определение подвижности мобильных наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов. Она рассматривается как интегральная характеристика конструкционных и эксплуатационных, экономических, эргономических и экологических свойств наземных мобильных систем и комплексов. Также подвижность характеризует конкурентоспособность объектов как товара.

Приведена концептуальная схема иерархии задач управления транспортно-технологических машин, включающая в себя четыре задачи, относящиеся к области конструкционных параметров: поддержание подвижности, поддержание курсовой ориентации, поддержание скорости движения, устранение критических ситуаций при движении транспортно-технологической системы; а также задача: обеспечения экологической безопасности; обеспечения номинальной экономической эффективности и обеспечения комфортабельности транспортно-технологической системы.

*Ключевые слова:* подвижность, мобильность, живучесть, управляемость, надежность, экономичность, экологичность, эргономичность.

*Подвижность – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины*, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [3-11]. Таким образом, процесс поддержания подвижности является ключевым в решении проблемы обеспечения устойчивого и безопасного функционирования мобильных наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов. Также в процессе эксплуатации должна обеспечиваться эксплуатационная и конструкционная подвижность.

*Эксплуатационная подвижность* (ЭП) определяет возможность выполнения поставленной задачи по условиям эксплуатации, включающим в себя как характеристики местности, так и режимы нагружения машины.

*Конструкционная подвижность* (КП) связана с техническими характеристиками машины, которые в ходе эксплуатации могут существенно изменяться и приводить как к частичной потере подвижности, так и к ее полной потере. Изменения конструкционной подвижности связаны, с одной стороны, с износом узлов, систем и деталей машины, что приводит к отказам функционирования, а с другой стороны, с разрушениями конструкции, обусловленными агрессивностью внешней среды. Агрессивность внешней среды может проявляться весьма в разнообразных формах, однако чаще всего это механические воздействия: *износные* и *ударные*. Износы определяют отказную надежность машины, а ударные механические взаимодействия могут носить как естественный характер вследствие контакта с местностью, так и искусственный при столкновениях с другими машинами и/или объектами внешней среды, а также повреждения, полученные в ходе боевых действий и террористических актов от воздействия средств поражения со стороны противника.

*Подвижность* (П) машины есть обобщенная функция эксплуатационной и конструкционной подвижностей.

$$П = f(ЭП; КП). \quad (1)$$

С позиции подвижности машины сложно ввести разграничения на активную и пассивную безопасности, так как эти понятия охватывают широкий круг задач, связанных с поддержанием устойчивого и безопасного движения, и не имеют четких границ разделения. Более приемлемым является выделение *подвижности по мобильности и живучести*, которые дополняются задачей устранения критических ситуаций – динамической адаптивностью наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов к текущему состоянию машины и местности.

**Подвижность по мобильности** (мобильность – от лат. mobilis – подвижный) – способность машины к быстрому передвижению, действию. По существу, этот термин относится к понятию «движение» или более широко определяет «готовность к быстрой реакции, быстрому включению в деятельность». Это может быть физическое движение или движение через некоторые «сферы»: природные, климатические, дорожно-транспортные, технические, социальные. Термин «мобильность» обычно используется с уточняющими определениями. Например, тягово-скоростная мобильность, курсовая и траекторная мобильность. Все эти понятия объединяются в способность к движению в каких-либо условиях и решаются в трех основных задачах управления машиной: *поддержание скорости движения, обеспечение курсовой ориентации, устранение критических ситуаций*. Последняя задача управления осуществляет **динамическую адаптивность машины к условиям эксплуатации и к собственному техническому состоянию**. В англоязычной интерпретации теории подвижности этой задачи в соответствии ставится термин – **agility** (быстрота, ловкость, живость, резвость, проворство, сообразительность).

Оценка мобильности и построение алгоритмов управления автотракторной техникой выполняются на основе следующих критериев: 1) *по запасу тягового усилия*; 2) *по балансу мощности*; 3) *по курсовой ориентации (управляемости и маневренности)*. При этом имеется место следующие решения задачи поддержания подвижности по мобильности: 1) **концепция управления движением** ( $\lambda_p = \text{var}$ ,  $\lambda_k = \text{const}$ ,  $\lambda_s = \text{const}$ ) – для заданных условий эксплуатации и данной конструкционной конфигурации машины определяются оптимальные режимы управления движением; 2) **концепция конструкции машины** ( $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_p = \text{const}$ ,  $\lambda_s = \text{const}$ ) – для заданных условий эксплуатации и выбранных режимов управления движением определяется рациональная конструкционная конфигурация машины; 3) **концепция условий эксплуатации** ( $\lambda_s = \text{var}$ ,  $\lambda_k = \text{const}$ ,  $\lambda_p = \text{const}$ ) – для данной конструкционной конфигурации машины и выбранных режимов управления движением определяются критические характеристики условий эксплуатации. Здесь  $\lambda_k$  – параметры машины, включая параметры движителя;  $\lambda_s$  – характеристики эксплуатационных условий, включая свойства и параметры полотна пути;  $\lambda_p$  – параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые. Причем эти параметры могут рассматриваться как по отдельности, так и в виде каких-либо комплексных характеристик  $\lambda \equiv \xi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p)$ .

**Подвижность по живучести** (жизнестойкость) – обеспечение управления состоянием машины, направленным на поддержание *работоспособности* наземных транспортных систем и транспортно-технологических комплексов к текущему состоянию машины и местности. При этом следует различать *частичную* и *полную* потерю работоспособности.

Жизнестойкость машин можно разделить на *отказную*, связанную с износами, и *эксплуатационную*, которая определяется функционированием машины в природно-климатической среде и социально-технической сфере деятельности. Таким образом, жизнестойкость может быть связана не только со свойствами местности, но с воздействиями от деятельности человека: техногенные катастрофы, военные действия, дорожно-транспортные происшествия, сверхтяжелые (ненормированные) режимы работы.

Жизнестойкость может быть разделена на структурную и функциональную составляющие. Если исследование структурной составляющей живучести в основном сводится к выявлению уяз-

вимых мест в топологии системы и определению степени их влияния на целостность системы, то исследование функциональной составляющей живучести сводится к определению способности системы решать стоящие перед ней задачи при изменяющихся возможностях ее элементов.

Оценка жизнестойкости машины по отказной надежности проводится по критерию *вероятности безотказной работы*, а по эксплуатационной надежности – *вероятности работоспособности в послеаварийном или пораженном состоянии*.

**Комплексная оценка подвижности** наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов производится на основе системы критериев и ограничивающих условий:

*по мобильности*

$$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \Delta P_{\varphi}, \quad (2)$$

$$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \geq [W_f(\Phi_f, \lambda) + \Delta W(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda)], \quad (3)$$

$$\Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \lambda \equiv \xi(\lambda_k; \lambda_3; \lambda_p); \quad (4)$$

*по живучести*

$$R_{\text{он}}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } R_{\text{он}}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \geq R_{\eta}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t); \quad (5)$$

$$\Phi_f \text{ при } R_{\text{эн}}(\Phi_{\text{ив}}, \lambda, t) \geq R_{\gamma}(\Phi_{\text{ив}}, \lambda, t). \quad (6)$$

Критерии построены в зависимости от параметров взаимодействия движителя с полотном пути  $\Phi_{\varphi}$ ,  $\Phi_f$  и с учетом других характеристик  $\lambda \equiv \xi(\lambda_k; \lambda_3; \lambda_p)$ . Здесь  $\Delta P_{\varphi}$  – запас силы тяги,  $W_{\varphi}$  – мощность, реализуемая движителем по сцеплению,  $\Delta W = W_{\text{эу}} - W_f$  – запас мощности по двигателю,  $W_{\text{эу}}$  – мощность энергетической установки,  $W_f$  – мощность сопротивлений,  $\Phi_R$  – обобщенная функция радиуса кривизны траектории движения,  $R_{\text{он}}$  – вероятность безотказной работы,  $R_{\eta}$  – предельная вероятность безотказной работы техники в оптимальных (заданных для расчета) условиях работы и технологии изготовления машины;  $R_{\text{эн}}$  – вероятности работоспособности в послеаварийном или пораженном состоянии,  $\Phi_{\text{ив}}$  – обобщенная функция интенсивности аварийного или поражающего воздействия,  $R_{\gamma}$  – предельная вероятность работоспособности техники после заданной (в расчетах) интенсивности аварийного или поражающего воздействия,  $t$  – время работы или воздействия в соответствии с рассматриваемым типом надежности.

Представленную систему критериев (2)-(6) с ограничивающими условиями можно свести к более обоснованной системе целевых функций:

$$\Phi_{\varphi}(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \Phi_f(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \rho(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, R(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}. \quad (7)$$

Здесь  $\Phi_{\varphi}$  – обобщенная функция сцепления движителя машины с материалом опорного основания;  $\Phi_f$  – обобщенная функция сопротивления движению машины;  $v$  – скорость движения машины;  $\rho = R_{\text{п}} / B$  – относительный радиус поворота, где  $B$  – колея машины,  $R$  – вероятность безотказной работоспособности машины как функция  $R(R_{\text{он}}; R_{\text{эн}})$  отказной и эксплуатационной надежности;  $\lambda$  – конструкционные ( $\lambda_k$ ), эксплуатационные ( $\lambda_3$ ) и режимные ( $\lambda_p$ ) параметры и характеристики машины и процесса ее движения.

Решение задачи многокритериальной оптимизации, представленной системой уравнений (7) подробно изложено в работе [1, 5]. Были представлены три решения задачи ее поддержания:

1) концепция управления движением ( $\lambda_k = \text{const}, \lambda_3 = \text{const}, \lambda_p = \text{var}$ );

2) концепция конструкции машины ( $\lambda_k = \text{var}, \lambda_3 = \text{const}, \lambda_p = \text{const}$ );

3) концепция условий эксплуатации ( $\lambda_k = \text{const}, \lambda_3 = \text{var}, \lambda_p = \text{const}$ ),

где  $\lambda_k$  – параметры машины, включая и параметры движителя,  $\lambda_3$  – характеристики эксплу-

атационных условий, включая свойства и параметры полотна пути,  $\lambda_p$  – параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые.

Решения имеют непосредственное отношение лишь к ограниченным задачам поддержания подвижности автотракторной техники и созданных на ее основе транспортно-технологических машин. Однако имеют место и другие варианты решения проблемы поддержания подвижности, которые определяются функцией «var-const» по отношению к параметрам  $\lambda_k$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_p$ . При этом наиболее интересным является комплексное решение задачи подвижности, когда  $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_s = \text{var}$ ,  $\lambda_p = \text{var}$ , то есть оценка конкурентоспособности существующей, модифицируемой или вновь создаваемой автотракторной техники.

Для качественной и количественной оценки конкурентоспособности автотракторной техники можно предложить ряд методов: построения экспертной системы, нахождения регрессии, квалиметрии и многокритериальной оптимизации [1, 5]. При этом последний метод направлен не столько на оценку качества существующей конструкции, сколько на выбор рациональных технических, технологических, эксплуатационных и потребительских параметров проектируемой машины. Этот метод в отличие от первых трех может быть совмещен с системой автоматического проектирования, а оценку отличия качества существующей машины от других можно производить как отклонение их от оптимального эталона, что в целом делается и в других методах. Однако другие методы не позволяют производить математически точный выбор рациональных параметров проектируемой автотракторной техники.

**Под конкурентоспособностью автотракторной техники понимается такое комплексное свойство конкретной машины, определяющее ее качество в соответствии с фактическими значениями технических, технологических, эксплуатационных и потребительских показателей, которое характеризует ее способность конкурировать с аналогичными образцами машин, выпускаемых (разрабатываемых) конкурирующими фирмами.**

Методика оценки конкурентоспособности наземных транспортно-технологических машин (ТТМ) сводится к следующему: 1) раздробить оценочные характеристики до числовых показателей; 2) выразить оценочные показатели в безразмерной форме; 3) принять условие, что рост показателя определяет повышение эффективности, вследствие чего ряд показателей должен быть либо взят как обратная величина, либо как результат от вычитания из единицы; 4) повторяющиеся величины должны учитываться столько раз, сколько они встречаются, что определит их ранжировку (весовую значимость); 5) все оценки должны браться по модулю; 6) число оценочных характеристик для сравниваемых различных типов ТТМ должно быть одинаково. Наибольшую трудность вызывает оценка эстетических показателей. Она может быть проведена на основе вероятностных оценок по результатам опросов потребителей или экспертов. Вероятностные оценки могут быть положены в основу балльной характеристики эстетичности машины. Однако нельзя пренебрегать общеизвестным утверждением, что «на вкус и цвет товарищей нет». С этой точки зрения наиболее подходящим для оценки конкурентоспособности автотракторной техники является метод построения экспертных систем [1, 5].

Тогда экспресс-модель конкурентоспособности машины с разбивкой по конструкционным блокам в общем виде может быть представлена следующей системой уравнений:

$$a_{ki}(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}; a_{si}(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}; a_{pi}(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}; a_{ti}(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}; a_{ri}(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}; a_{ci}(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}; \quad (8.a)$$

$${}_A P_\Phi(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}; v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}; \exists(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}; \Pi(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}. \quad (8.б)$$

Здесь  $a_i(\lambda) \in A$ , ( $i = 1, 2, \dots, 11$ );  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p, \lambda_t, \lambda_\Pi)$  при  $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_s = \text{var}$ ,  $\lambda_p = \text{var}$ ,

$\lambda_t = \text{var}$ ,  $\lambda_\Pi = \text{var}$ . Целевые функции (8.б) относятся к машине в целом.

Примеры решения задачи оптимизации целевых функций (7) и (8) с целью нахождения рациональной конструкции машины в заданных условиях эксплуатации на основе многокритериальной оптимизации рассмотрена в работах [1, 5].

Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух машин, выполненная на основе многокритериальной оптимизации, представлена на рис. 1.

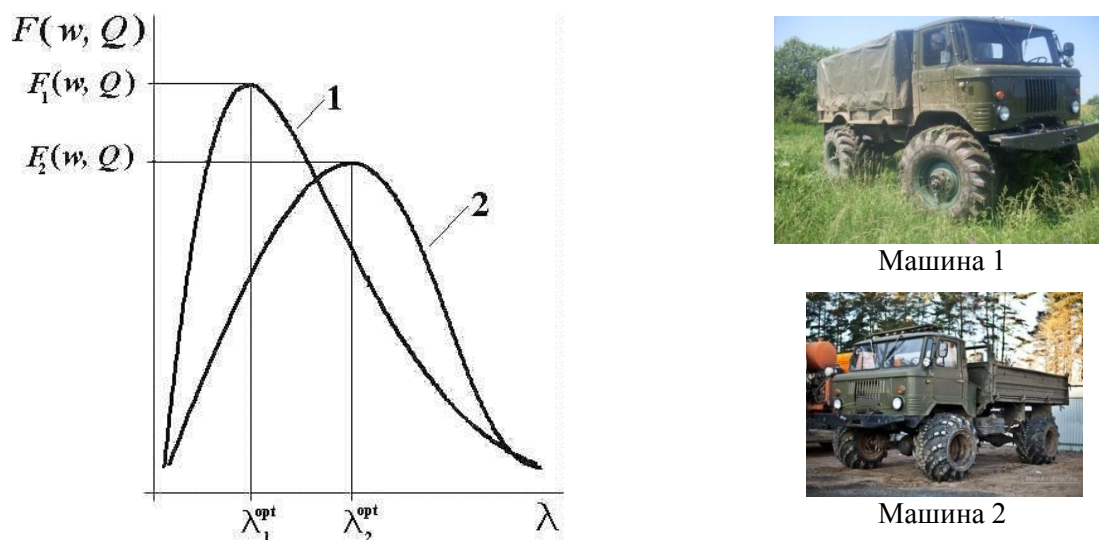


Рис. 1. Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух машин, выполненная на основе многокритериальной оптимизации [5]

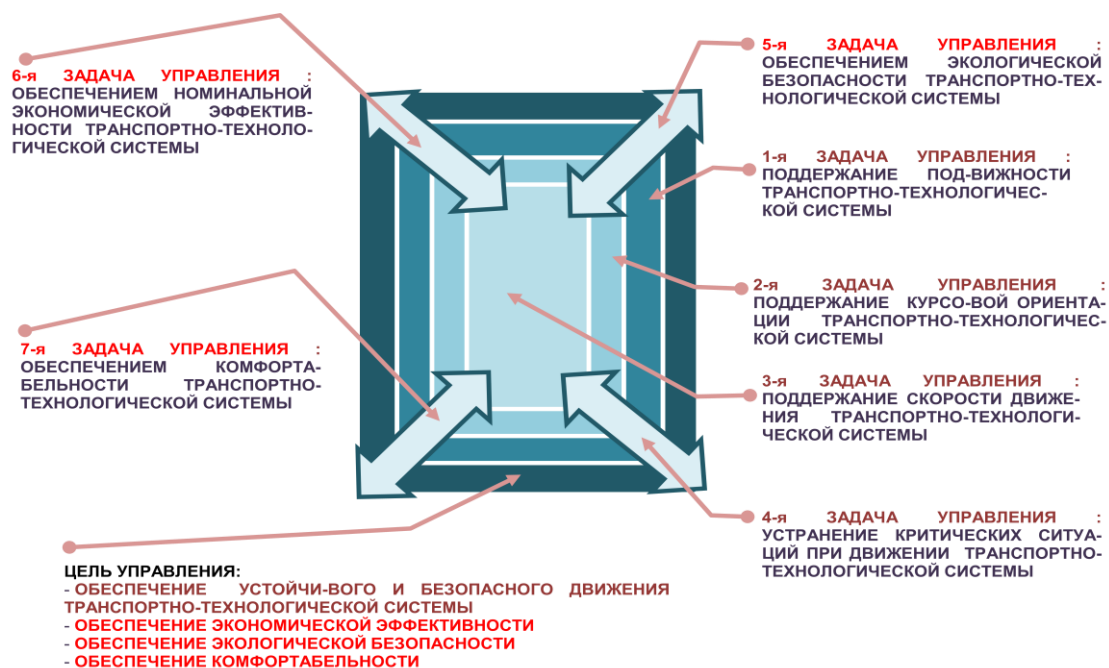


Рис. 2. Иерархия задач управления ТТМ

Из рис. 1 видно, что наилучшей является первая машина.

В результате можно сделать вывод о том, что концептуальная схема иерархии задач управления для обеспечения подвижности ТТМ, рассмотренная в работах [1, 2, 5], может быть представлена в виде схемы, представленной на рис. 2. Она включает в себя не только четыре задачи, относящиеся к области конструкционных параметров (поддержание: подвижности, курсовой ориентации, скорости движения, устранение критических ситуаций при движении транспортно-технологической системы), но также задачи: обеспечения экологической безопасности; номинальной экономической эффективности и комфортабельности транспортно-технологической системы.

## Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е.Бушуева, В.И. Сагунов; НГТУ. – Н.Новгород, 2001. – 271 с.
2. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание: монография / Под. общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2004. – 961 с.
3. **Беляков, В.В.** Транспортно-технологические проблемы Северного Кавказа / В.В. Беляков, У.Ш.Вахидов, Ю.И. Молев; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2009. – 330 с.
4. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ...док. тех. наук: 05.05.03. Нижний Новгород 1999. – 485 с.
5. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №3. С. 145–174.
6. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу // В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 156–166.
7. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №1. С. 143–151.
8. **Галкин, Д.А.** Влияние параметров шин на подвижность многоосных колесных машин / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6; URL: [www.science-education.ru/106-7882](http://www.science-education.ru/106-7882) (дата обращения: 24.12.2012).
9. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5; URL: [www.science-education.ru/105-6927](http://www.science-education.ru/105-6927) (дата обращения: 17.09.2012).
10. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
11. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.

*Дата поступления  
в редакцию 17.10.2013*

**V.V. Belyakov, D.V. Zezyulin, V.E. Kolotilin, V.S. Makarov**

**MOVABILITY OF GROUND TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Subject/topic/purpose:** To determine the movability of mobile ground-based transport vehicles and transport-technological complexes.

**Methodology of work:** The definition of the movability of ground vehicles.

**Results/application:** Movability is a generalized block diagram unites portability, survivability, manageability, reliability, economic efficiency, environmental friendliness and ergonomics.

**Findings:** The article presents a definition of movability of mobile ground-based transport vehicles and transport-technological complexes.

*Key words:* movability, portability, survivability, manageability, reliability, economic efficiency, environmental friendliness, ergonomics.