

Научная статья

УДК 629.1.032

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-164-179>

EDN: EWDBIX



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

В.Н. Кузнецова¹ ✉, Р.В. Романенко²¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия²Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия✉ ответственный автор
dissovetsibadi@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Транспортно-технологические средства на базе гусеничной ходовой части нашли свое применение как для военной, так и для гражданских отраслей. Их широкое использование обусловлено целым рядом преимуществ, способствующих дальнейшему развитию механизации производств, повышению эффективности транспортировки грузов в условиях Крайнего Севера, развитию инфраструктуры при освоении новых территорий. Обеспечение проходимости и подвижности машин с гусеничным двигателем, в том числе гусеничных транспортеров-тягачей, возможно путем использования дизель-генераторов и электромеханических трансмиссий. Возможность управления движением гусеничной машины (ГМ) с выносного пульта (дистанционное управление), что в свою очередь характеризует ГМ с электромеханической трансмиссией (ЭМТ), как наземный робототехнический комплекс (НРТК). Одной из составляющих научных исследований в этом направлении является проведение имитационного моделирования движения быстроходной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией. Целью моделирования процесса движения является обоснование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной машины и подтверждение адекватности ранее выполненных теоретических исследований.

Методы исследования. Моделирование проводилось в среде программирования VISSIM по типовым циклам движения, которые эквивалентным образом отражают условия эксплуатации и применения машины на гусеничном ходу в условиях пересеченной местности и грунтовых дорог, а также натурным экспериментом на экспериментальном образце для подтверждения теоретических исследований.

Результаты. В результате исследований получены количественные оценки влияния мощности дизель-генератора и заряда накопителя энергии на динамические показатели ГМ с ЭМТ. Установлено, что для выполнения требований к перспективному образцам мощность накопителя энергии должна составлять при использовании штатного ДВС не менее 2,5 кВт·ч.

Обсуждение и заключение. Результаты исследований возможно использовать при создании на основе существующего научно-технического задела перспективного наземного робототехнического комплекса.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромеханическая трансмиссия, гусеничная машина, экспериментальные исследования, накопитель мощности

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Результаты исследования прямолинейного движения быстроходной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 2. С. 164-179. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-164-179>

© Кузнецова В.Н., Романенко Р.В., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-164-179>
EDN: EWDBIX

STUDY RESULTS IN CURVILINEAR MOTION OF HIGH-SPEED TRACK MACHINE WITH ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION

Viktoria N. Kuznetsova¹ ✉, Roman V. Romanenko²

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

²Omsk Automobile and Armored Tank Engineering Institute,
Omsk, Russia

✉ corresponding author
dissovetsibadi@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. Transport and technological means based on tracked undercarriages have found their use in both military and civilian industries. Their widespread use is due to a number of advantages that contribute to the further development of mechanization of production, increasing the efficiency of transportation of minerals, and developing infrastructure during the development of new territories. Ensuring cross-country ability and mobility of vehicles with tracked undercarriages, including tracked conveyor-tractors, is possible through the use of hybrid electromechanical transmissions. One of the components of scientific research in this direction is carrying out simulation modeling of the movement of equipment. Modeling the motion process will make it possible to substantiate the energy characteristics of the electromechanical transmission of a tracked vehicle and confirm the adequacy of previously performed theoretical studies.

Research methods. The main objective of the simulation was to confirm the effectiveness of the theoretical studies performed. The studies in the VISSIM programming environment using typical motion cycles that equivalently reflect the operating conditions and use of a tracked machine were carried out.

Results. As a result of the research, quantitative estimates of the influence of the power of a diesel generator and the charge of an energy storage device on the dynamic performance of equipment were obtained. It has been established that in order to meet the requirements for promising samples, the power of the energy storage device should be at least 2.5 kWh when using a standard internal combustion engine.

Discussion and conclusion. The research results can be used to create, based on the existing scientific and technical background, a promising robotic complex with an electromechanical transmission.

KEYWORDS: electromechanical transmission, tracked vehicle, experimental studies, adequacy

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors express their gratitude to the editors of the Russian Automobile and Highway Industry Journal and the reviewers of the article.

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 22.04.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kuznetsova V.N., Romanenko R.V. Study results in curvilinear motion of high-speed track machine with electrical transmission. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (2): 164-179. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-2-164-179>

© Kuznetsova V.N., Romanenko R.V., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование транспортных тягачей на базе гусеничной ходовой части обусловлено целым рядом преимуществ, способствующих повышению оперативности транспортировки грузов, в том числе военной номенклатуры в труднодоступных участках местности, развитию инфраструктуры при освоении новых территорий (Арктики). Обеспечение проходимости и подвижности машин с гусеничной ходовой частью возможно путем использования гибридных электромеханических трансмиссий^{1,2} [1, 2, 3, 4, 5]. Кроме указанных преимуществ электромеханические трансмиссии позволяют значительно повысить тягово-динамические свойства техники и обеспечить экономию топлива до 25–30%. Автоматизация привода электромеханической трансмиссии, его высокая надежность, точность управления открывает возможность для реализации удаленного метода управления³ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Актуальность данного направления исследований давно признана во многих странах, где существуют национальные программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию транспортных средств с электромеханическими трансмиссиями как для военной, так и для гражданских отраслей. Однако не все проведенные в данном направлении работы завершили испытаниями, результаты которых можно признать положительными. Заданные техническим заданием требования по тягово-динамическим показателям и запасу хода к гусеничным машинам не выполнялись. В настоящее время отсутствуют универсальные инженерные методы выбора оптимальной конструкции и параметров электромеханической трансмиссии, позволяющих на стадии проектирования учитывать особенности данного типа моторно-трансмиссионных установок.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Типовые циклы движения для образцов гусеничных машин с гибридной электромеханической трансмиссией в настоящее время не нормированы и редко используются при раз-

работке моторно-трансмиссионных установок. Максимальная и средняя скорость движения, запас хода по топливу и маслу должны определяться и оцениваться только при движении образцов по трассам, имеющим заданные постоянные количественные характеристики. Таким образом, для детального компьютерного моделирования процесса движения машины были разработаны типовые циклы движения (таблица 1), которые эквивалентным образом отображают характеристики реальных условий эксплуатации пересеченной местности [16, 17].

Соппротивление движению изменяется в зависимости от дорожно-грунтовых и погодных условий. Наиболее резкие изменения характерны для гористой местности, где коэффициент попеременно принимает отрицательные и положительные значения. Существенное изменение сопротивления происходит также при переходе образца с грунтовой дороги на дорогу с искусственным покрытием, при прохождении брода или участков с местным переувлажнением грунта, на границе вспаханных и неспаханных земель, мерзлых и оттаявших грунтов, при выпадении большого количества осадков и т.д.

В таблице 1 представлены характеристики типовой трассы и цикла движения, максимально отражающие условия эксплуатации ГМ по пересеченной местности.

Трассы, на которых эксплуатируются ГМ, по геометрическим размерам неровностей микропрофиля делятся на пять типов:

1 – микропрофиль, характеризующийся малозаметными неровностями высотой от 2 до 5 см. Это микропрофиль твердого покрытия автомобильной дороги, а также трасс, проложенных по такырам пустынь;

2 – микропрофиль с небольшими ухабами глубиной от 5 до 10 см. Этот микропрофиль характерен для дорог со щебенчатым, гравийным покрытием, а также для улучшенных грунтовых дорог в хорошем состоянии. Встречается на трассах, проложенных по равнинам с труднодеформируемым грунтом;

3 – микропрофиль с неровностями длиной от 6 до 12 м и средней высотой от 10 до 15 см.

¹ Дидманидзе О.Н., Иванов С.А., Пуляев Н.Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии. М.: Мегаринт, 2018. 189 с.

² Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчет. Машиностроение, 1981. 302 с.

³ Гук М.Э., Юденков В.С. Синтез оптимального регулятора с переключаемой структурой для управления асинхронным электродвигателем: материалы конф. Минск: БГУИР, 2014. С. 359–362.

Такой микропрофиль имеют грунтовые дороги. Этот тип микропрофиля, как правило, формируется на связных грунтах (глинистых, суглинистых, супесчаных), находящихся в твердой консистенции;

4 – микропрофиль с преобладанием неровностей длиной от 6 до 12 м и средней высотой от 15 до 25 см. Он формируется на связных грунтах полутвердой консистенции и песчаных уплотненных грунтах;

5 – микропрофиль разбитых участков танковых трасс, проложенных по легко деформируемым грунтам. В нем явно преобладают неровности длиной от 6 до 12 м и высотой от 25 до 50 см, а в некоторых случаях и больше. Такой микропрофиль формируется на песчаных рыхлых грунтах и связных грунтах пластичной консистенции, а также образуется и на более твердых грунтах в результате многократного прохождения гусеничной машины и под влия-

нием других факторов, например, разрушения полотна дороги пересекающими ее временными водотоками.

Экспериментальные исследования показывают, что в условиях эксплуатации по пересеченной местности работа двигателя осуществляется на режимах близких к циклическим и отражает процесс движения ГМ: разгон после преодоления препятствия, неровности и торможение перед ними^{4,5,6} [18, 19]. Исходя из вышеизложенного, на каждом из предлагаемых участков типовой трассы движение должно осуществляться согласно циклу: разгон – движение с постоянной скоростью – поворот – торможение.

В таблице 1 приведены основные характеристики типовой трассы и циклов движения при моделировании процесса движения ВГМ для определения основных энергетических показателей ЭМТ.

Таблица 1

Характеристики типовой трассы и циклов движения

Источник: составлено авторами

Table 1

Characteristics of typical route and traffic cycles

Source: compiled by the authors

№ участка	f_c	Длина участка, м	№ п/п режима	Режим	Величина ускорения, м/с ²	Скорость, км/ч
1	0,06	450	1.1	Ускорение	Расчетная	0,5–45
			1.2	Постоянная скорость		45
			1.3	Поворот		45
			1.4	Торможение	-2,0	45–15
2	0,105	400	2.1	Ускорение	Расчетная	15–35
			2.2	Постоянная скорость		35
			2.3	Поворот		35
			2.4	Торможение	-2,0	35–10
3	0,17	150	3.1	Ускорение	Расчетная	10–25
			3.2	Постоянная скорость		25
			3.3	Поворот		25
			3.4	Торможение	-5,0	25–0,5
4	0,02	400	4.1	Ускорение	Расчетная	0,5–55
			4.2	Постоянная скорость		55
			4.3	Поворот		55
			4.4	Торможение	-2,0	55–15
5	0,06	350	5.1	Ускорение	Расчетная	15–45
			5.2	Постоянная скорость		45
			5.3	Поворот		45
			5.4	Торможение	-2,0	45–10

⁴ Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. М.: Машиностроение. 1993. 320 с.

⁵ Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.

⁶ Носов Н.А., Галышев В.Д., Волков Ю.И., Харченко А.И. Расчет и конструирование гусеничных машин. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.

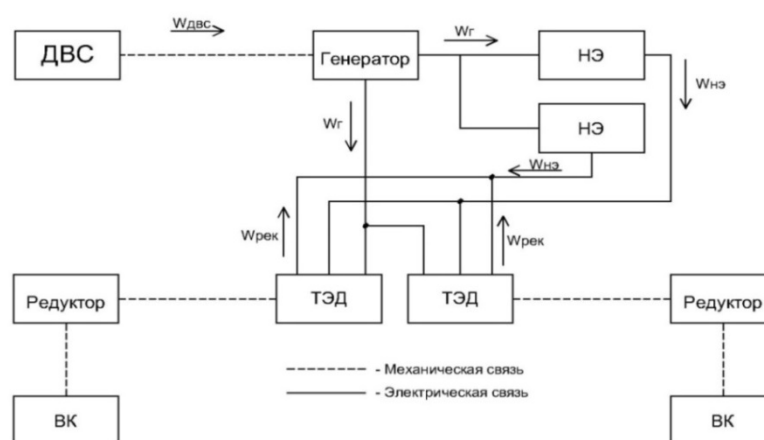


Рисунок 2 – Схема распределения потоков механической и электрической энергии ЭМТ
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Scheme of distribution of EMT mechanical and electrical energy flows
Source: compiled by the authors.

Последовательность и условия распределения мощности в электромеханической трансмиссии должны основываться на условиях движения и обеспечивать выполнение требований к динамике, а также обеспечивать минимальный расход топлива ДВС.

На рисунке 2 представлена схема распределения потоков механической и электрической энергии между компонентами ЭМТ, которые вычисляются для интегральной оценки результатов движения.

Из приведенной структурной схемы следует возможность реализации трех режимов работы ЭМТ:

1. Раздельная работа дизель-генератора и накопителя энергии.
2. Совместная работа дизель-генератора и накопителя энергии.

Различие данных режимов состоит в том, что при раздельной работе Г и НЭ на отдельных участках движения энергия поступает на ТЭД только от генератора. При совместной работе имеет место одновременная работа Г и НЭ на ТЭД.

Целесообразность реализации того или иного режима зависит от нескольких факторов, среди них основными являются:

- требуемые значения момента дизель-генератора $M_{дг}$ и момента тягового электродвигателя $M_{тэд}$ для обеспечения движения в заданных условиях;
- степень заряженности НЭ;

– оптимальные (по условиям минимизации удельного расхода топлива) значения момента и частоты вращения вала ДВС.

Эффективность работы ЭМТ зависит от алгоритма ее управления. Основными вопросами являются – определение последовательности распределения потоков мощности и условие подключения второго потока мощности от накопителя энергии. Основываясь на возможных режимах работы электромеханической трансмиссии последовательного типа и основных мероприятиях по организации эффективной работы дизель-генератора в составе ЭМТ можно предложить базовый алгоритм функционирования агрегатов энергоустановки и выбора оптимального с точки зрения энергетической эффективности режима работы ЭМТ, представленный на рисунке 3.

Согласно предложенному алгоритму работы электромеханической трансмиссии можно выделить следующие основные режимы работы:

1. Режим интенсивного разгона и поворота. Данный режим необходим для обеспечения динамических показателей ГМ, а также для преодоления препятствий. При этом требуемая для реализации заданного ускорения и скорости мощность и, соответственно, момент на валу ТЭД обеспечивается совместной работой Г и НЭ. Разгон и поворот машины осуществляется по схеме: ДВС – Г – И – ТЭД – БР – ВК (Г – генератор, И – инвертор, БР – бортовой редуктор).

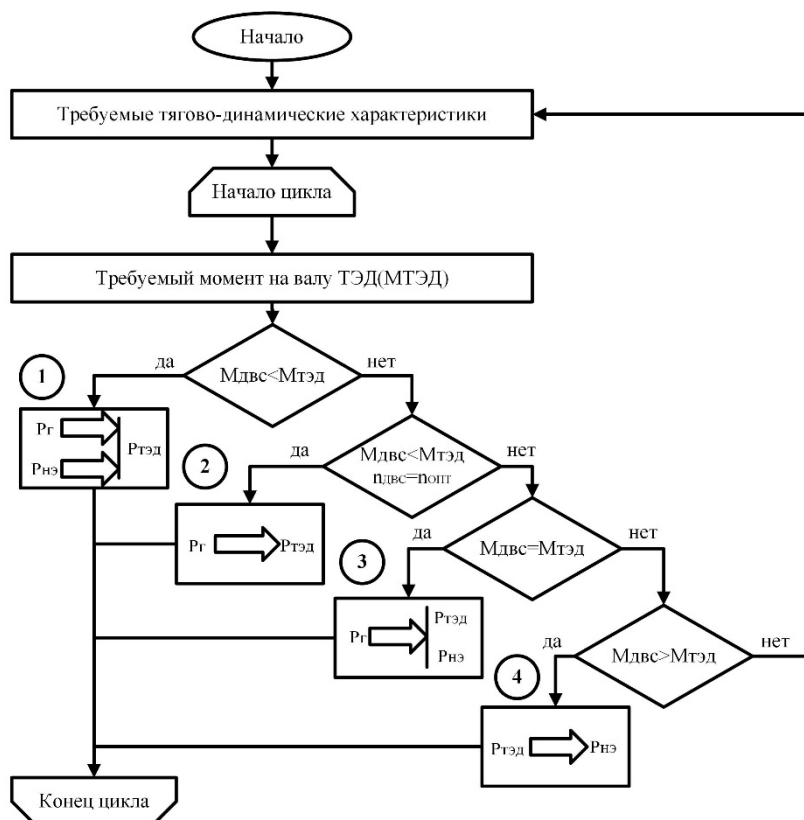


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма взаимодействия элементов электромеханической трансмиссии военной гусеничной машины:
 $P_{тэд}$ – мощность электрического тока тягового электродвигателя;
 P_g – мощность электрического тока генератора;
 $P_{нэ}$ – плотность электрической энергии накопителя энергии;
 $M_{двс}$ – момент дизель-генератора, $M_{тэд}$ – момент тягового электрического
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Block diagram of the algorithm of interaction of elements electromechanical transmission of a military tracked vehicle:
 P_{tad} – electric current power of the traction motor;
 P_g – electric current power of the generator;
 P_{ne} – electric energy density of the energy storage device;
 M_{dvs} – torque of diesel generator, M_{tad} – torque of traction electric
 Source: compiled by the authors.

Распределение потоков мощности от ДВС и от НЭ производится блоком управления (БУ) в соответствии с алгоритмом управления.

2. Режим равномерного движения ГМ. Этот режим целесообразен в случае, когда требуемый момент на валу ТЭД превышает момент ДВС, $M_{тэд} > M_{двс}$, однако частота вращения ДВС соответствует оптимальной по значению удельного расхода топлива. Обеспечивается работой только генератора. Равномерное прямолинейное движение выполняется с приводом ведущих колес по схеме: ДВС – Г – И – ТЭД – БР – ВК. В этом случае возможен заряд

накопителей энергии от генератора по каналу ДВС – Г – И – НЭ.

3. Режим движения, когда требуемый момент на валу ТЭД равен моменту ДВС, $M_{тэд} = M_{двс}$. Движение осуществляется только за счет энергии генератора, при этом часть энергии поступает на заряд накопителя.

4. Режим снижения скорости движения. В данном режиме момент и частота вращения вала ТЭД меньше $M_{двс}$, $M_{тэд} < M_{двс}$. В этом случае кинетическая энергия машины передается на заряд НЭ по каналу ВК – БР – ТЭД – И – НЭ.

Под оптимальными значениями крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала ДВС подразумеваются такие значения $M_{двс}$ и $n_{двс}$, при которых достигаются минимальные значения удельного расхода топлива g для необходимой мощности ДВС.

Блок-схема алгоритма работы электро-механической трансмиссии (см. рисунок 3) разработана с учетом различных режимов движения гусеничной машины (разгон, криволинейное движение (поворот, торможение), что обеспечивает минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении.

К преимуществам электро-механической трансмиссии следует отнести ее простоту, автономность, вариативность компоновки элементов ЭМТ, возможность дистанционного управления. Недостатками являются большая потребляемая мощность ТЭД забегавшего борта и трудность обеспечения стабильного радиуса поворота и прямолинейного движения при разных сопротивлениях движению каждой из гусениц.

Разработана система уравнений, описывающая управляемое движение гусеничной машины с электро-механической трансмиссией:

$$\dot{X}_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \sin \varphi + R_6 \cos \varphi]; \quad (1)$$

$$\dot{Y}_c = \frac{1}{m} [(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}) \cos \varphi - R_6 \sin \varphi]; \quad (2)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{J_c} [(P_2 - P_1 + P_{f1} - P_{f2}) \frac{B}{2} - \sin \varphi \cdot M_c]; \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_e = [M_\partial - M_{en} k_e] \frac{1}{J_1}; \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{мэ\partial 1} = [M_{мэ\partial 1} \cdot k_e - \frac{P_1 \cdot R_{ек}}{i_{6n}}] \frac{1}{J_2}; \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{мэ\partial 2} = [M_{мэ\partial 2} \cdot k_e - \frac{P_1 \cdot R_{ек}}{i_{6n}}] \frac{1}{J_3}. \quad (6)$$

В математической модели учтены магнитные и электрические потери в тяговых электродвигателях (ТЭД) при переходных процессах [19, 20]. Данная модель позволяет проводить

моделирование основных элементов электро-механической трансмиссии. Для подтверждения адекватности выполненных теоретических исследований в среде программирования VISSIM по типовым циклам движения, в том числе прямолинейного, проведено имитационное моделирование, которое эквивалентным образом отражает условия эксплуатации и применения машины на гусеничном ходу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными задачами проведения имитационного моделирования являлись:

- определение количественных значений механических потерь на буксование гусеничного движителя, а также определение значений магнитных и электрических потерь в электроприводе;

- исследование энергетических характеристик ЭМТ при прямолинейном движении военной гусеничной машины по типовым циклам;

- исследование управляемого криволинейного движения военной гусеничной машины с электро-механической трансмиссией.

Для проведения имитационного моделирования были использованы следующие исходные данные:

- требования к показателям подвижности транспортеров-тягачей;

- тип гусеничной машины – многоцелевой транспортер легкобронированный (МТ-ЛБу): общий вес машины 15 т, в том числе 11 т собственный вес, 4 т грузоподъемность;

- скорость движения до 70 км/ч;

- типовая трасса: фрагмент, требующий наибольшего ускорения и поворот $r = 104$ м.

На предлагаемом участке типовой трассы движение осуществлялась согласно циклу: разгон – движение с постоянной скоростью – поворот – торможение (см. таблицу 1).

На рисунке 4 приведены количественные значения магнитных и электрических потерь в электромашинах. Как видно из рисунка 4, магнитные и электрические потери достигают максимальных значений в процессе разгона и торможение машины составляет до 20 кВт, а в установившемся движении до 10 кВт в каждом тяговом электродвигателе.

Таким образом, проведенные исследования показали, что потери на буксование в переходных процессах достигают 15%, а электрические и магнитные потери в электроприводе – 13%.

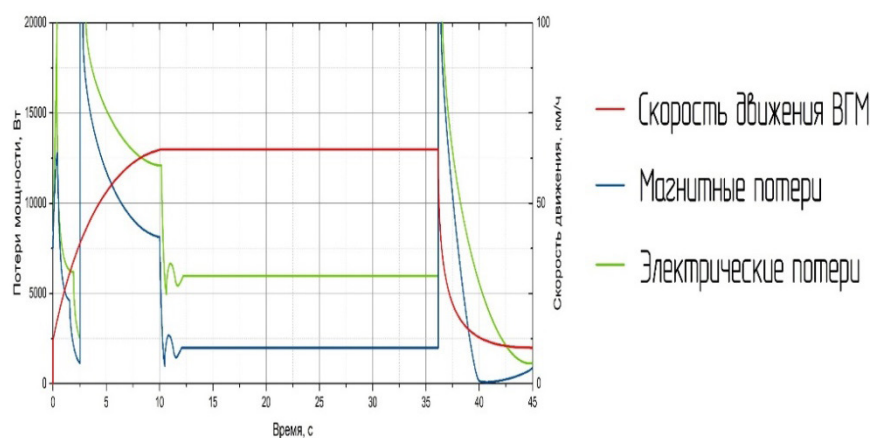


Рисунок 4 – Мощность электрических и магнитных потерь в ТЭД
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Power of electric and magnetic losses in the TED
Source: compiled by the authors.

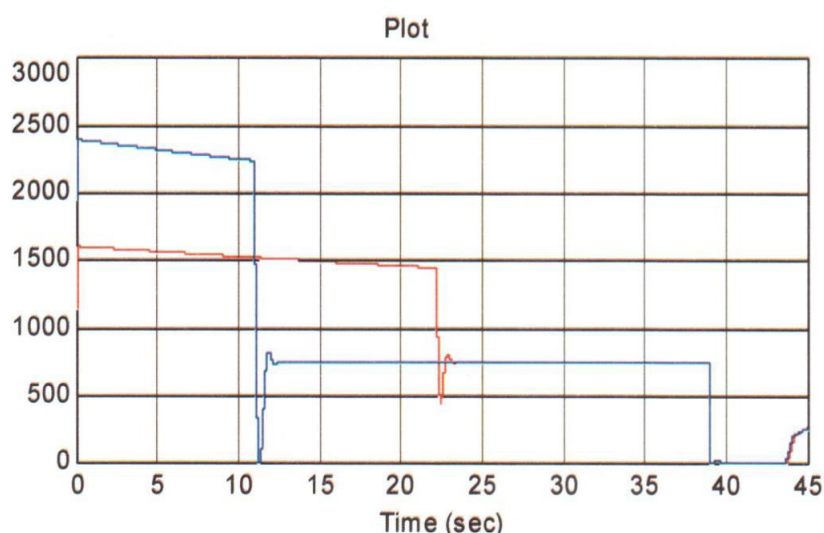


Рисунок 5 – Изменение момента ДГ во времени
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Variation of DG torque over time
Source: compiled by the authors.

Для определения необходимых энергетических показателей накопителей энергии (НЭ), позволяющих выполнять требования к показателям подвижности, были также проведены исследования движения ВГМ с ЭМТ по типовым циклам. На рисунке 5 показано изменение момента дизель-генератора (ДГ) в 170 кВт во времени без учета НЭ, он не может придать машине требуемое ускорение. Разгон до скорости в 45 км/ч происходит за 20 сек. Для обеспечения тягово-динамических характеристик необходимо увеличить мощность ДГ до 250 кВт.

За счет введения в математическую модель регулировки магнитного потока генератора $\Phi_{гн}$ удалось при рекуперативном торможении предотвратить противоток в генераторе и направить всю электрическую энергию от ТЭД, работающих в генераторном режиме, только на заряд НЭ. В рассматриваемом случае рационально использовать мощность дизель-генератора (ЯМЗ-238Н, тяговый генератор ТГ-200) с накопителем энергии мощностью 2,5 кВт·час.

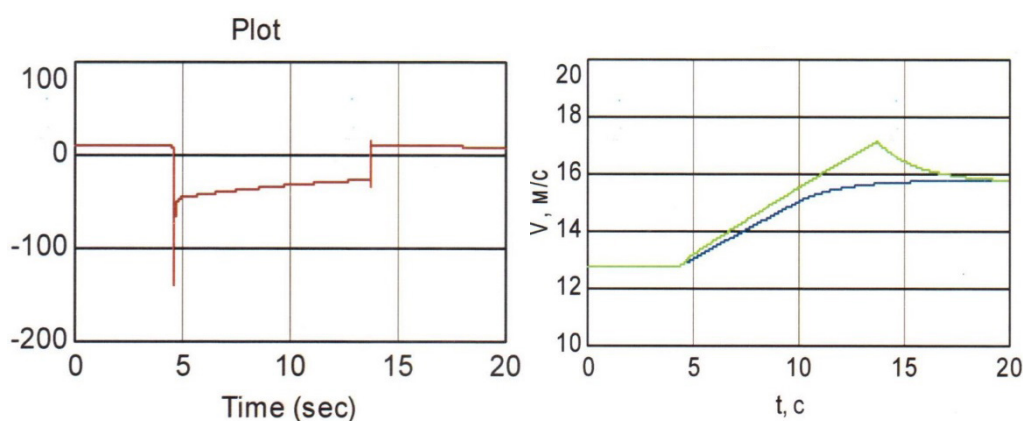


Рисунок 6 – Изменение тока разряда НЭ и изменение скорости движения ВГМ
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Variation of NE discharge current and change of VGM velocity
Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 приведены графики тока разряда НЭ и скорости ВГМ. Для сравнения на графике скорости ВГМ приведена зависимость скорости от времени в случае отсутствия второго потока мощности, то есть накопителя энергии (синяя линия). Машина достигает скорости в 16 м/с медленнее на 21%.

Проведенные исследования прямолинейного движения показали, что для обеспечения выполнения заданных требований по динамике и запасу хода емкость накопителя энергии для военной гусеничной машины легкой весовой категории (массой 11,5 т) должна составлять не менее 2,5 кВт/ч.

Следующим этапом исследования являлся этап моделирования криволинейного движения военной гусеничной машины. На рисунке 7 показано изменение мощности тяговых электродвигателей при криволинейном движении ВГМ с большой и малой кривизной. Мощность, передаваемая тяговым электродвигателем забегающего борта при скорости машины, равной 18 м/с в установившемся радиусе поворота $r = 104$ м, составляет 180 кВт. В процессе входа в поворот рекуперативная мощность, как видно из графика, составляет 150 кВт, в установившемся повороте – 5 кВт.

Результаты моделирования криволинейного движения ВГМ с ЭМТ показали, что при движении ВГМ рекуперативная мощность достигает наибольших величин при переходных режимах изменения траектории движения, в

эти периоды она сопоставима с мощностью ТЭД забегающего борта, а при установившемся повороте равна мощности ДВС. Мощность ТЭД должна составлять не менее 80% от мощности первичного источника энергии.

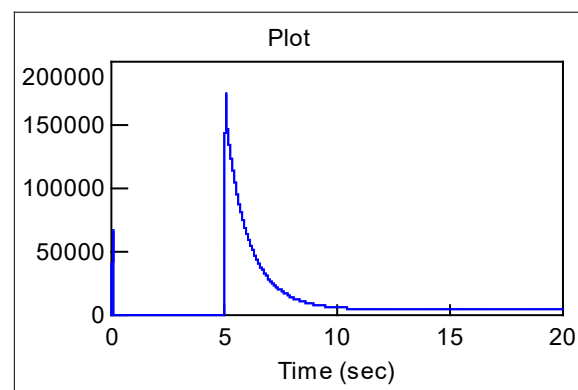


Рисунок 7 – Изменение мощности рекуперации ТЭД при движении ВГМ со скоростью 18 м/с
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Variation of TDP regeneration power when the HGM is moving at a speed of 18 meters per second
Source: compiled by the authors.

Наряду с расчетными исследованиями энергетических характеристик в данной работе приведены результаты экспериментальных исследований ВГМ с ЭМТ (генератора и тяговых электродвигателей) в различных режимах работы, а также проверка адекватности разработанной математической модели.

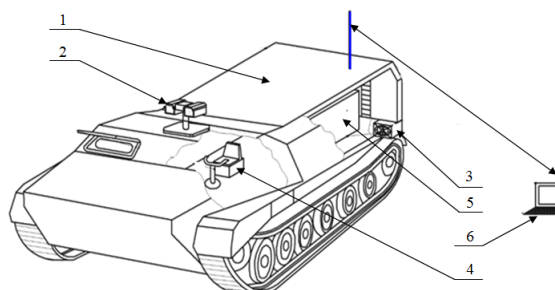


Рисунок 8 – Опытный образец перспективной роботизированной военной гусеничной машины с ЭМТ «Мобильный робототехнический комплекс»
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – A prototype of a promising robotic military tracked vehicle with EMT Mobile robotic complex
Source: compiled by the authors.



Рисунок 9 – Пробеговые испытания ВГМ с ЭМТ
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Run tests of VGM with EMT
Source: compiled by the authors.

В качестве экспериментального образца использовался опытный образец перспективной роботизированной военной гусеничной машины «Мобильный робототехнический комплекс» (рисунок 8), изготовленной на базе гусеничного шасси от МТ-Лбу на ВПК ООО «Станкомаш» (г. Челябинск). На данное техническое решение получен патент на изобретение RU 2 716 050, сущность которого заключается в повышении эффективности применения и надежности работы комплекса, расширении его функциональных возможностей, улучшении свойства подвижности путем применения в его составе составных элементов электромеханической трансмиссии.

На исследуемой машине с помощью комплекта монтажных частей были установлены изделия электромеханической трансмиссии и цифровой системы управления. Установленные изделия были подключены между собой через кабельный комплект системы. Информация о происходящих процессах в ЭМТ отображалась по цифровой линии связи в режиме реального времени. Параметры контролировались специальным комплексом телеметрии, пишущими осциллографами TDS2012B, клещами электроизмерительными цифровыми СМР – 1005, вольтметрами В7-46 и цифровым измерителем сопротивления изоляции 2803 IN, для определения момента на валу ТЭД использовался датчик момента М40-10К.

В процессе экспериментальных исследований (рисунок 9), перед началом каждой серии экспериментов и по их окончанию, осуществлялась проверка измерительной аппаратуры.

При проведении эксперимента осуществлялась последовательность операций:

1. Принималось число опытов (повторность) при снятии переходных функций $w(t)$ и нагрузочных статических характеристик в соответствии с выражением

$$k = \gamma / \delta^2,$$

где γ – коэффициент вариации; δ – заданная относительная погрешность измерения.

При этом усреднялись или учитывались при обработке систематические погрешности измерений.

2. Определялось время проведения опыта по снятию одной реализации переходной или

частотной характеристики, а затем общее время проведения эксперимента.

3. При проведении эксперимента по оценке методики расчета характеристик цифрового измерительного средства было установлено, что основное влияние на точность измерения оказывают частота дискретизации и разрядность АЦП. Поэтому записи файлов данных осуществлялись на нескольких частотах и производилась оценка вызванных отклонений. Время разгона с места до заданных скоростей определялось с помощью аппаратуры «Ре18е1ег Я-Б» и измерительно-регистрирующего блока с цифровой индикацией скорости, расстояния и времени.

Результаты ходовых испытаний опытного образца ВГМ с ЭМТ представлены в таблице 2.

Результаты испытаний движения опытного образца при установившемся движении представлены в таблице 3.

Таблица 2
Динамические показатели ВГМ с ЭМТ
Источник: составлено авторами.

Table 3
Dynamic indicators of VGM with EMT
Source: compiled by the authors.

№ заезда	Время разгона, с			Максимальная скорость движения, м/с
	8 м/с	15,3 м/с	19,3 м/с	
1	5,8	17,1	24,3	16,7
2	5,5	16,8	23	19
3	6	17,4	24,1	20,3
4	5,9	17,0	25	20,3
5	6,1	17,1	25	20,3

Таблица 3
Энергетические показатели ЭМТ
Источник: составлено авторами.

Table 3
Energy indicators of EMT
Source: compiled by the authors.

№ заезда	$P_{\text{эл}}$, кВт	$I_{\text{ген}}$, А	$U_{\text{ген}}$, В	$N_{\text{дв}}$, об/мин	$M_{\text{кр}}$, Нм	$P_{\text{дв}}$, кВт	$P_{\text{н}}$, кВт
1	97,8	105	780	2547	273,33	72,90	67,65
2	139,5	150	746	2400	423,33	106,40	99,98
3	153	175	740	2343	480	117,77	109,19
4	163,3	190	738	2304	523,33	126,27	116,44
5	170,2	200	733	2250	546,67	128,81	120,90

С учетом того, что увеличивается запас хода на 10%, улучшается динамик разгона на 20%, увеличивается средняя и максимальная скорости, эффективность боевого применения разработанных технических решений (военная гусеничная машина с гибридной силовой установкой и электромеханической трансмиссией) увеличивается на 14%.

На рисунках 10, 11 показаны результаты расчетных и опытных данных, полученных в результате стендовых испытаний. После статистической обработки результатов установлено удовлетворительное совпадение зависимости мощности от крутящего момента ТЭД. Погрешность не превышает 8,4%.

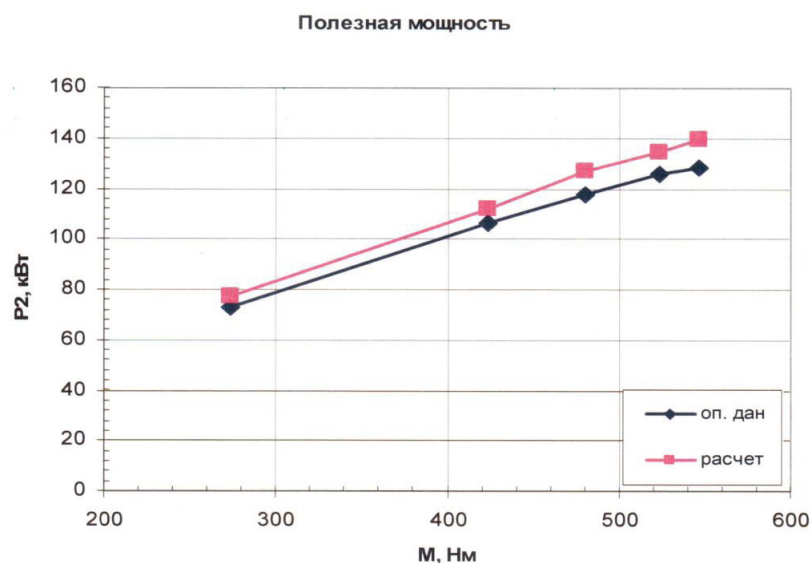


Рисунок 10 – Сравнение мощности на валу ТЭД
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Comparison of power on the TDP shaft
Source: compiled by the authors.

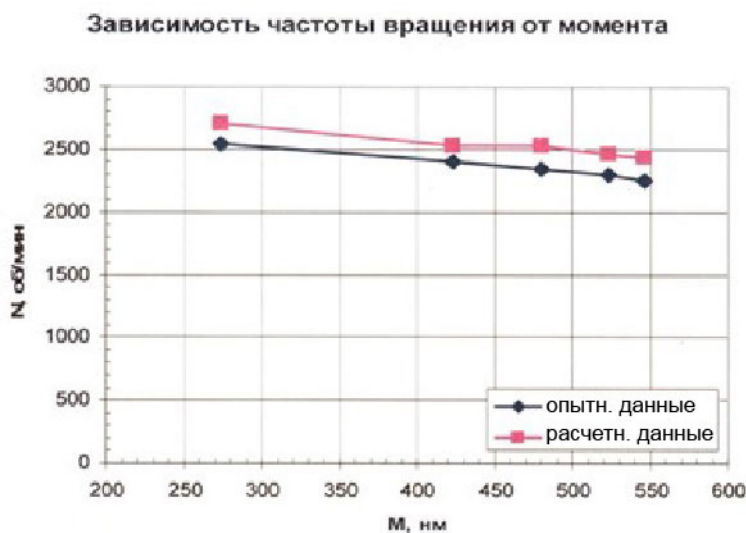


Рисунок 11 – Сравнение момента на валу ТЭД
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Comparison of torque on the TDP shaft
Source: compiled by the authors.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований получены количественные оценки влияния мощности дизель-генератора и заряда накопителя энергии на динамические показатели машины с электромеханической трансмиссией. Установлено, что в рассматриваемом случае для выполнения заданных требований по динамике разгона и запасу хода рационально использовать мощность штатного ДВС с накопителем энергии мощностью 2,5 кВт/час. Мощность каждого тягового электродвигателя должна составлять не менее 170 кВт. При последовательной реализации электромеханической трансмиссии мощность тяговых электродвигателей должна составлять не менее 80% от мощности первичного источника энергии (ДВС).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кондаков С.В., Павловская О.О., Горяев Н.К. Исследование поворота энергоэффективной быстроходной гусеничной машины с интеллектуальной электрической трансмиссией // Вестник машиностроения. 2014. № 11. С. 51–55.
2. Ксеневиц И.П., Изосимов Д.Б. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники. Часть 1 // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 1. С. 17–21.
3. Ксеневиц И.П., Изосимов Д.Б. Идеология проектирования электромеханических систем для гибридной мобильной техники. Часть 2 // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2007. № 2. С. 12–45.
4. Aspal M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2012. Vol. 1. pp. 463–469.
5. Коротких Ю.С., Чутчева Ю.В. Современное состояние машинно-тракторного парка Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития // Международный технико-экономический журнал. 2016. № 6. С. 25–29.
6. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks // International Journal of Heavy Vehicle Systems 19 (03). 256–280. doi. 10.1504/IJHVS.2012.047916.
7. Walentyrowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011. vol.18, no 1. pp. 471–478.
8. Colyer Ron E. The use of electric and hybrid-electric drives in military combat vehicles. Journal of Battlefield Technology. 2003. vol. 6. no 3. 11–15.
9. Gai J., Huang Sh., Zhou G., Li Sh. Design method of power coupling mechanism scheme for double side motors coupling drive transmission // China Mechanical Engineering. 2014. 25(13). 1739–1743. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.
10. Aspal M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2012. Vol. 1. 463–469.
11. Rachana G., Priya M., Parmod K., Rohit G. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply // Journal of Automation and Control Engineering. 2014. Vol. 2. № 3. 221–227.
12. Кулаков Н.А., Селифонов В.В., Черанёв С.В. Выбор оптимальной конструкции механической части электрической трансмиссии специального колесного шасси 8х8 // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1. С. 78–82.
13. Gomberg B.N., Kondakov S.V., Nosenko L.S. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission // Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series. 2012. Issue 18. No.37. 73–81.
14. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанев С.В. Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2 (12). С. 95–105.
15. Polak F., Walentyrowicz J., Simulation of the hybrid propulsion system for the small unmanned vehicle // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011 Vol. 18. No.1. 471–478.
16. Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Исследование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной машины // Вестник СибАДИ. 2021. 18(1):12–29. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>.
17. Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Основные аспекты методики обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Вестник СибАДИ. 2020; 17(5):574–583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>.
18. Держанский В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины: монография. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. 2010. 142 с.
19. Типовые циклы движения гусеничных образцов бронетанкового вооружения и техники / А.Н. Щербо, А.Н. Наумов, Е.В. Щербо, А.И. Макоклюев // Наука и военная безопасность. 2017. № 1 (8). С. 64–68.

REFERENCES

1. Kondakov S.V., Pavlovskaya O.O., Goryev N.K. Research of pivot of energy-efficient high-speed tracked vehicle with intellectual electric transmission. *Vestnik mashinostroeniya*. 2014; 11: 51–55. (in Russ.)
2. Ksenevich I.P., Izosimov D.B. Design ideology of electromechanical systems for hybrid mobile technology. Part 1. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*. 2007; 1: 17–21. (in Russ.)
3. Ksenevich I.P., Izosimov D.B. Design ideology of electromechanical systems for hybrid mobile

technology. Part 2 *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*. 2007; 2: 12–45. (in Russ.)

4. Aspalli M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012; Vol. 1: 463–469.

5. Korotkikh Yu.S., Chutcheva Yu.V. Current state of the machine and tractor fleet of the Russian Federation: main trends and development prospects. *Mezhdunarodnyj tekhniko-jekonomicheskij zhurnal*. 2016; 6: 25–29. (in Russ.)

6. Galvagno E., Velardocchia M., Rondinelli E. Electro-Mechanical Transmission modelling for series-hybrid tracked tanks. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 19 (03). 256–280. doi. 10.1504/IJHVS.2012.047916.

7. Walentynowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011; 18, № 1: 471–478.

8. Colyer Ron E. The use of electric and hybrid-electric drives in military combat vehicles. *Journal of Battlefield Technology*. 2003; vol. 6. 3: 11–15.

9. Gai J., Huang Sh., Zhou G., LI Sh. Design method of power coupling mechanism scheme for double side motors coupling drive transmission. *China Mechanical Engineering*. 2014; 25(13): 1739–1743. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.

10. Aspalli M.S., Asha R., Hunagund P.V. Three phase induction motor drive using IGBTs and constant V/F method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012; Vol. 1: 463–469.

11. Rachana G., Priya M., Parmod K., Rohit G. Design of unity power factor controller for three-phase induction motor drive fed from single phase supply. *Journal of Automation and Control Engineering*. 2014; Vol. 2. no 3: 221–227.

12. Kulakov N.A., Selifonov V.V., Cheranyov S.V. The choice of the optimal design of the mechanical part of the electric transmission of the special wheeled chassis 8x8. *Izvestiya MGTU «MAM»*. 2010; no. 1: 78–82. (in Russ.)

13. Gomberg B.N., Kondakov S.V., Nosenko L.S. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission. *Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series*. 2012; Issue 18. No. 37: 73–81.

14. Kulakov N.A., Lepeshkin A.V., Cheranov S.V. Development and research of a mathematical model of an all-wheel drive four-axle vehicle with electric transmission. *Izvestiya MGTU «MAM»*. 2011; 2 (12): 95–105. (in Russ.)

15. Polak F., Walentynowics J., Simulation of the hybrid propulsion system for the small unmanned vehicle. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011; Vol. 18. No.1: 471–478.

16. Kuznetsova V.N., Romanenko R.V. Electromechanical transmission of tracked machine energy characteristics study. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18(1): 12–29.

(In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

17. Kuznetsova V.N., Romanenko R.V. Basic aspects of methodology for justifying the performance characteristics of a tracked machine with electromechanical transmission. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(5): 574–583. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583>

18. Derzhansky V.B., Taratorkin I.A. *Algorithms for controlling the movement of a transport vehicle*: monograph. Kurgan: Publishing house of the Kurgan state. un-that. 2010: 142.

19. Shcherbo A.N., Naumov A.N., Shcherbo E.V., Makoklyuev A.I. Typical cycles of movement of tracked samples of armored weapons and equipment. *Nauka i voennaja bezopasnost'*. 2017; no 1 (8): 64–68. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы исследований. Формулировка направления и темы исследования. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (50%).

Романенко Р.В. Обзор результатов предыдущих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Victoria N. Kuznetsova. Research problem statement. The area and the subject of the research statement. A guide to the theme development process. Choice of research methodology and methods (50%).

Roman V. Romanenko. Review of the results of previous studies. Statement of research tasks. Designation of the algorithm for analytical studies. Formulation of results and conclusions (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф.; проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, 5), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, **Scopus ID**: 8671569200, **SPIN-код**: 1039-7546, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

Романенко Роман Владимирович – канд. техн. наук, старший преподаватель седьмой кафедры ремонта бронетанковой и автомобильной техники, Омский автобронетанковый инженерный институт, филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева (ВА МТО) (644098, Омск, Военный 14-й городок, 119), **ORCID**: <https://orcid.org/0000-0007-2817-014X>, **SPIN-код**: 3282-2794, roman82enko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, the Operation and Service of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, the Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5644050, Omsk, Mira ave.5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, **Scopus ID:** 8671569200, **SPIN-код:** 1039-7546, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru*

*Roman V. Romanenko – Cand. of Sci., lecturer, the 7th department of Repair of Armored and Automobile Equipment, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute, a branch of the General of the Army A.V. Khrulev Military Academy of Logistics (VA MTO) (Omsk, Military 14th town, 119, 644098), **SPIN-код:** 3282-2794, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0007-2817-014X>, e-mail: roman82enko@mail.ru*