



DOI 10.5862/JEST.219.18

УДК 623.438.3-23

*О.А. Усов, М.Н. Гусев,  
А.В. Лойко, А.С. Макаров*

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ ДЛЯ ВОЕННОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

*O.A. Usov, M.N. Gusev,  
A.V. Loyko, A.S. Makarov*

### ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION FOR MILITARY TRACKED VEHICLE WITH HYBRID POWER PLANT

Разработаны кинематическая схема электромеханической трансмиссии и конструкция ее силового блока для военной гусеничной машины массой 54 т и максимальной скоростью 75 км/ч. Определены рациональные значения кинематических и силовых параметров и характеристики трансмиссии и гибридной силовой установки. Выбран вариант управления тепловым двигателем, обеспечивающий минимальный расход топлива при движении машины по тестовой трассе.

**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА; ВОЕННАЯ ГУСЕНИЧНАЯ МАШИНА; ГИБРИДНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА; ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ; МИНИМАЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА.**

The authors developed the kinematic scheme of electromechanical transmission and designed its power block for the military track laying vehicle weighing 54 t and with a maximum speed of 75 km/h; they defined rational values of kinematic and power parameters and characteristics of the transmission and the hybrid power plant; power of the heat engine, generator, power electric motors and electrical drives energy. This paper presents external fuel and power characteristics of a heat engine with coordinates of the minimum specific fuel consumption, when the option of controlling the heat engine which provides minimum fuel consumption at the vehicle movement on the test route is chosen.

**KINEMATIC SCHEME; MILITARY TRACKED VEHICLE; HYBRID POWER PLANT; ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION; MINIMUM FUEL CONSUMPTION.**

Одно из перспективных направлений в развитии шасси военных гусеничных машин (ВГМ) — применение электромеханических трансмиссий (ЭМТ) с гибридными силовыми установками (ГСУ). Этому способствует значительный прогресс в производстве малогабаритных электромашин с высокой удельной мощностью [1–3], электрических и электронных устройств, обеспечивающих преобразование электрического тока и управление электромашинами [4], а также накопителей энергии (НЭ) с большой энергоемкостью, допускающих значительное число перезарядок [5].

В ВНИИТрансмаш в результате инновационных исследований систематизированы воз-

можные схемы ЭМТ по принципу преобразования и передачи энергии к ведущим колесам, разработаны варианты управления тепловым двигателем ГСУ, обеспечивающие существенное повышение экономичности эксплуатации ВГМ, разработана методика определения необходимых кинематических и силовых параметров агрегатов ЭМТ и ГСУ, обеспечивающих современные требования по подвижности ВГМ [6].

Для расчетно-исследовательского сопровождения конструкторских работ разработан метод выбора рационального варианта схемы ЭМТ и управления ГСУ на основе оценки средней скорости движения и путевого расхода топлива по результатам моделирования движения ВГМ

по тестовой трассе [7]. Созданы методики и программы расчета функциональных характеристик ЭМТ с ГСУ, динамических процессов, происходящих в них при переходных режимах работы, показателей нагруженности и долговечности основных механических узлов ЭМТ, а также для определения показателей оперативной подвижности ВГМ в различных условиях эксплуатации [8]. Разработан алгоритм автоматического управления ЭМТ с ГСУ, позволяющий реализовать преимущества ЭМТ по сравнению с современными моторно-трансмиссионными установками (МТУ) ВГМ.

С использованием созданного расчетно-методического аппарата спроектирована ЭМТ для работы в составе шасси перспективного ВГМ и проведен сравнительный анализ характеристик ВГМ с ЭМТ и механической трансмиссией (МТ). В качестве основной цели при выполнении указанной проектной работы ставилось повышение характеристик подвижности и топливной экономичности перспективной ВГМ за счет использования ЭМТ с гибридной силовой установкой. При этом были решены следующие задачи:

поиск рациональной схемы и разработка на ее базе конструкции ЭМТ для перспективной ВГМ;

расчет основных функциональных и динамических характеристик ЭМТ с ГСУ, а также оценка ее долговечности в составе перспективной ВГМ;

сравнительный анализ характеристик подвижности и топливной экономичности перспективной ВГМ с механической и электромеханической трансмиссиями.

В статье представлены описание конструкции ЭМТ для ВГМ и ее основные параметры, являющиеся результатом решения первой задачи. Статьи по результатам выполнения второй и третьей задач оформляются для публикации.

Исходными данными для проектирования ЭМТ приняты: масса ВГМ  $m_T = 54$  т; максимальная скорость  $V_{max} = 75$  км/ч; радиус ведущего колеса  $R_{BK} = 0,34$  м; база машины  $L = 4,773$  м; колея машины  $B = 2,807$  м; передаточное число бортового редуктора  $i_{БР} = 4,00$ ; максимальная частота вращения вала теплового двигателя  $n_{TD} = 2100$  об/мин.

Приведенные данные соответствуют значениям параметров шасси перспективной ВГМ с механической трансмиссией.

Рациональные значения параметров и характеристики агрегатов ЭМТ и ГСУ зависят от схемы ЭМТ и должны быть согласованы между собой.

При выборе схемы ЭМТ расчет характеристик проведен для трех вариантов схем с последовательными потоками энергии (1 — центральной; 2 — бортовой без дифференциальной связи бортов; 3 — бортовой с дифференциальной связью бортов), а также для одной схемы с комбинированными потоками энергии (4-й вариант).

С учетом имеющегося конструктивного задела по асинхронным электромашинам с постоянными магнитами при расчете принято дополнительно следующее:

максимальная частота вращения вала генератора  $n_{Г max} = 8400$  об/мин;

максимальная частота вращения вала электродвигателя  $n_{ЭД max} = 10000$  об/мин;

номинальная частота вращения вала электродвигателя  $n_{ЭД н} = 3300$  об/мин;

коробка диапазонов (КД) имеет два диапазона.

Результаты расчета рекомендуемых значений параметров основных агрегатов ЭМТ приведены в табл. 1. В ней использованы следующие обозначения:  $f_d(75)$  — удельная сила тяги при максимальной скорости движения;  $N_{TD}$  — максимальная мощность теплового двигателя, необходимая для соответствия техническим требованиям перспективной ВГМ;  $N_{Г}$  — максимальная мощность генератора, соответствующая характеристике теплового двигателя;  $N_{ЭД max}$  — максимальная мощность одного тягового электродвигателя;  $N_{ЭД н}$  — номинальная мощность одного тягового электродвигателя;  $N_{НЭР}$  — максимальная мощность, подводимая к электродвигателям от накопителей энергии;  $N_{НЭТ}$  — средняя мощность, идущая на заряд НЭ;  $N_{VA}$  — максимальная мощность, отбираемая на привод вспомогательных агрегатов;  $i_1$  — передаточное число КД на первом диапазоне ( $i_2 = 1,0$  — передаточное число КД на втором диапазоне одинаково для всех вариантов схемы);  $V_{cp}$  — средняя скорость движения на тестовой трассе;  $G_{100}$  — расход топлива, отнесенный к 100 км пробега в условиях тестовой трассы.

Как видно из таблицы, по ряду показателей комбинированный (4-й) вариант схемы имеет преимущества по сравнению со схемами с последовательными потоками мощности (1–3 варианты). Однако он существенно сложнее по

Таблица 1

## Основные показатели характеристики ЭМТ и ее агрегатов при различных вариантах схемы

Показатели	Рекомендуемые значения показателей для четырех вариантов схемы			
	1	2	3	4
$f_d(75)$	0,023			
$N_{TD}$ , кВт	927,6	922,1	927,6	1064,8
$N_{\Gamma}$ , кВт	913,7	908,2	913,7	803,1
$N_{ED_{max}}$ , кВт	956,0	966,7	502,7	335,2
$N_{ED_n}$ , кВт	712,8	814,0	502,7	335,2
$N_{HEP}$ , кВт	313,2	313,2	313,2	313,2
$N_{HET}$ , кВт	244,4	348,0	251,0	295,0
$N_{BA}$ , кВт	171,0	171,0	171,0	171,0
$u_1$	3,559	1,694	3,275	4,125
$V_{cp}$ , км/ч	37,41	37,28	37,40	39,10
$G_{100}$ , кг	354,27	359,21	354,58	323,29

конструкции механической части трансмиссии и по системе автоматического управления. Поэтому при дальнейшей разработке он не рассматривался.

Как наиболее перспективный и простой в реализации принят вариант бортовой схемы ЭМТ с дифференциальной связью бортов [9] (3-й в табл. 1). Требующиеся характеристики теплового двигателя и генератора, а также показатели оперативной подвижности ВГМ с ЭМТ и ГСУ первых трех вариантов схем практически одинаковы. Однако в третьем варианте из-за использования дифференциальной связи бортов требуется существенно меньшая установочная мощность тяговых электродвигателей.

В результате конструктивного поиска разработана схема ЭМТ, приведенная на рис. 1. В этой схеме дифференциальная связь расположена после КД, а коробка объединена с входным редуктором. Для включения обоих диапазонов используются тормоза, что снижает уровень потерь мощности холостого хода в механической части из-за отсутствия вращающихся торцевых уплотнений каналов подвода масла в бустера фрикционных узлов.

Передаточные числа узлов ЭМТ: для редуктора генератора  $u_1 = 4,0$ ; для редуктора электродвигателя (входной редуктор, объединенный с КД) —  $u_{KD1} = 13,841$  (первый диапазон);  $u_{KD2} = 4,260$  (второй диапазон).

На рис. 2 приведена конструкция половины двигательного блока ЭМТ (силовой блок с электродвигателем и дифференциальной связью бортов).

Все зубчатые колеса планетарных рядов ЭМТ выполнены с модулем  $m = 4,0$  мм. Для обеспечения необходимой долговечности зубчатые колеса редуктора генератора выполнены косозубыми с углом наклона зуба  $\beta = 16^\circ$ , остальные планетарные ряды имеют прямозубые колеса. Параметр планетарного ряда дифференциальной связи  $p_{dc} = 2,222$ .

Тормоз 1-го диапазона имеет 16 пар трения, что при давлении в гидросистеме управления  $p_{upr} = 1,8$  МПа обеспечивает коэффициент запаса  $k_{T1} = 1,14$  (при коэффициенте трения на срыв  $\mu = 0,12$ ). Тормоз 2-го диапазона при 8 парах трения обеспечивает коэффициент запаса  $k_{T2} = 1,57$ .

Характеристика потерь мощности в механических узлах ЭМТ, выполненных по методике [10], приведена в табл. 2.

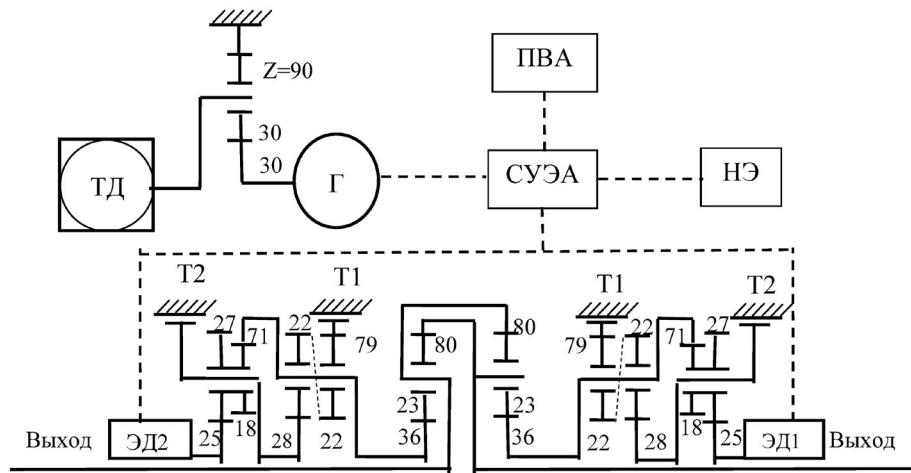


Рис. 1. Кинематическая схема ЭМТ

ТД — тепловой двигатель; Г — генератор; ЭД1, ЭД2 — тяговые электродвигатели; Т1 — тормоз включения 1-го диапазона; Т2 — тормоз включения 2-го диапазона; Выход — выходные валы ЭМП; Z — число зубьев зубчатых колес; ПВА — привод вспомогательных агрегатов; НЭ — накопители энергии; СУЭА — система управления электрическими агрегатами

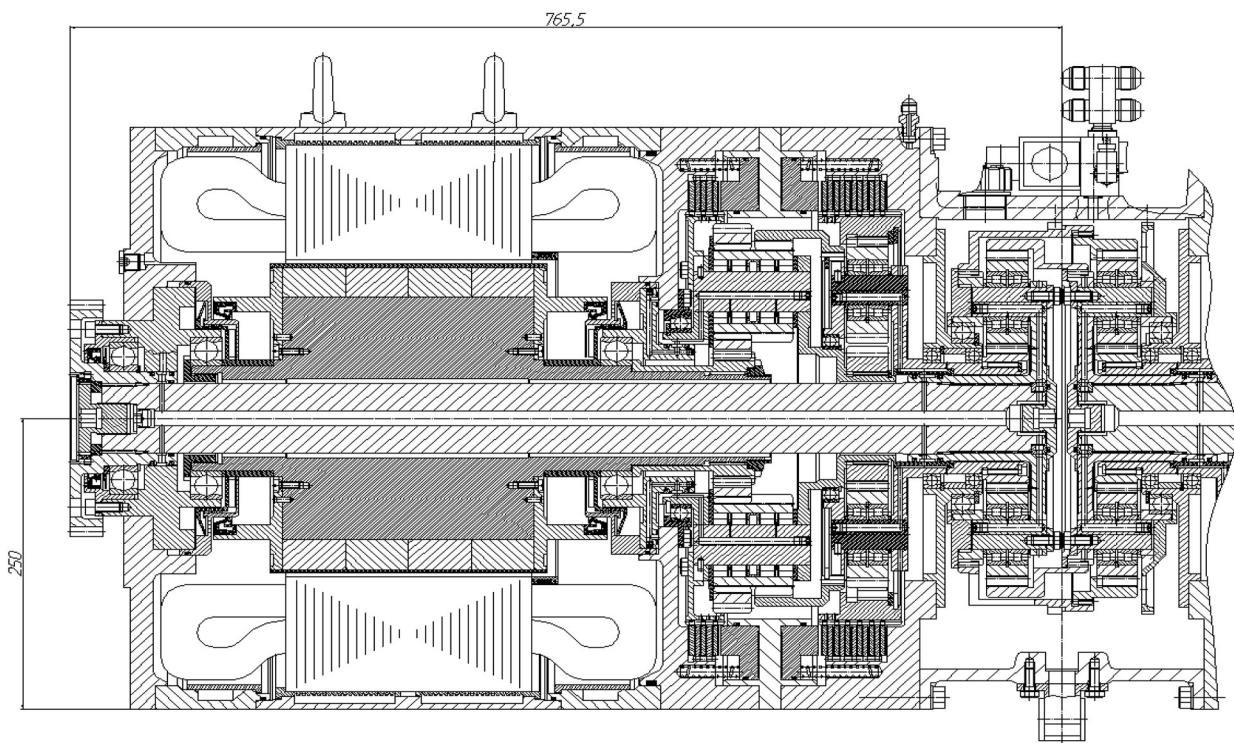


Рис. 2. Конструкция силового блока с электродвигателем, КД и дифференциальной связью бортов



Таблица 2

## Показатели потерь мощности в редукторах ЭМТ

Узел УМТ	$\beta$	$\Delta N_{xx50}$ , кВт	$\Delta N_{xx80}$ , кВт
Редуктор генератора	0,007	0,49	1,03
Редуктор электродвигателя	1-й диапазон	0,037	0,79
	2-й диапазон	0,006	1,02
			2,18

В таблице приняты обозначения:  $\beta$  — коэффициент нагрузочных потерь;  $\Delta N_{xx50}$ ,  $\Delta N_{xx80}$  — значения потерь мощности на холостом ходу при частоте вращения входного вала, равной соответственно 0,5 и 0,8 от максимального значения.

В процессе расчета использовалась расчетная модель теплового двигателя, имеющего следующую внешнюю характеристику:

$n_{\text{Д}}$ , об/мин	$N_{\text{Д}}$ , кВт
1300	715,7
1400	773,5
1500	819,6
1600	855,8
1700	883,4
1800	903,7
1900	917,3
2000	925,2
2100	928,0

Согласно расчетной модели двигателя [11] предполагается, что «ядро» топливно-мощностной характеристики имеет координаты  $n_0 = 1494$  об/мин и  $T_0 = 4,167$  кН·м. При этом мощ-

ность равна  $N_0 = 652$  кВт, а удельный расход топлива  $211$  г/(кВт·ч). На внешней характеристике минимальный удельный расход составляет  $g_{e\min} = 214$  г/(кВт·ч), а на режиме максимальной мощности —  $g_{e\max} = 234$  г/(кВт·ч). Максимальная тормозная мощность теплового двигателя —  $N_{\text{ТДт}} = 185,6$  кВт.

Отсутствие жесткой механической связи теплового двигателя с ведущими колесами позволяет организовать два режима автоматического управления двигателем — экономичный (основной) и форсированный (для интенсивного разгона).

На экономичном режиме система управления удерживает работу двигателя на заданной рабочей моментной характеристике, которая представляется как зависимость крутящего момента  $T_d$  на валу двигателя от частоты вращения его вала  $n_d$ . В результате моделирования движения машины по тестовой трассе при различных вариантах управления тепловым двигателем предлагается вариант, представленный на рис. 3. Для работы

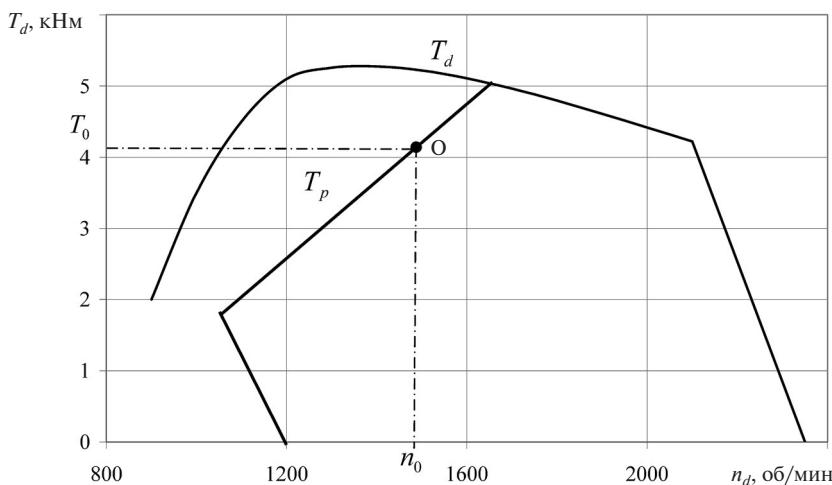


Рис. 3. Характеристика двигателя для ЭМТ перспективного танка с вариантом рабочей моментной характеристики  $T_p$ ; О — «ядро» топливно-мощностной характеристики

двигателя по выбранной моментной характеристике  $T_p$  во всем рабочем скоростном диапазоне требуемая мощность реализуется при минимальном расходе топлива. В табл. 1 величина  $G_{100}$  определена для данного варианта управления.

Моментная характеристика  $T_p$  получена теоретически [12]. Она проходит через точки касания эллипсоидных кривых, соответствующих постоянным удельным расходам топлива  $g_e$ , и гиперболических кривых крутящих моментов, соответствующих постоянной мощности. Точка пересечения характеристики  $T_p$  с внешней характеристикой данного двигателя имеет координаты  $n_b = 1639$  об/мин и  $T_b = 5,01$  кН·м. Слева характеристика  $T_p$  ограничена регуляторной характеристикой с частотой вращения на холостом ходу  $n_{xx} = 1200$  об/мин. Результаты моде-

лирования движения машины по тестовой трассе подтвердили, что это наиболее экономичный режим автоматического управления двигателем.

## Выводы

Разработаны кинематическая схема ЭМТ и конструкция ее силового блока для ВГМ массой 54 т и максимальной скоростью 75 км/ч.

Для разработанной конструкции ЭМТ определены рациональные значения кинематических и силовых параметров и характеристики ЭМТ и ГСУ, обеспечивающие современные технические требования к ВГМ.

Выбран вариант управления тепловым двигателем, при котором движение по тестовой трассе обеспечивается при минимальном расходе топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергатомиздат, 1988. 280 с.
2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
3. Борисов Г.А. Использование постоянных магнитов в электрических машинах. Учебн. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2002. 75 с.
4. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под ред. д.т.н. проф. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.
5. Дидманидзе О.Н. Иванов С.А. Использование суперконденсаторов в комбинированных энергоустановках тяготранспортных средств. М.: УМЦ «ТРИАДА», 2004.
6. Усов О.А., Белоутов Г.С., Гусев, М.Н. [и др.]. Основные варианты схемы электромеханической трансмиссии гибридного типа и методика определения параметров ее агрегатов для военных гусеничных машин. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды семнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2014 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение, М.: РАРАН, 2014. С. 111–122.
7. Усов О.А., Корольков Р.Н. Метод расчета средней скорости и расхода топлива при движении ВГМ по тестовой трассе. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды шестнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3-6 апреля 2012 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2012. С. 197–202.
8. Программа расчета показателей функционирования и долговечности узлов электромеханических передач №035.08 ПП / ВНИИТРАНСМАШ. 2014 г.
9. Гусев М.Н., Белоутов Г.С., Корольков Р.Н., Ширшов Ю.И. Трансмиссия транспортной машины // Патент РФ №2521158. Приоритет 06.11.2012.
10. Усов О.А., Белоутов Г.С., Гусев М.Н. [и др.]. Программа расчета показателей потерь мощности в трансмиссиях транспортных машин.// Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2008 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2008. С. 201–204.
11. Усов О.А., Лойко А.В., Белоутов Г.С. [и др.]. Математическая модель дизельного двигателя для расчета электромеханической трансмиссии транспортной машины.// Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды семнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2014 г.) Т.3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2014. С. 122–130.
12. Белоутов Г.С., Корольков Р.Н., Усов О.А. Модель расчета расхода топлива дизельного двигателя на произвольном режиме. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды пятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3-6 апреля 2012 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2012. С. 197–202.



## REFERENCES

1. **Balagurov V.A., Galteyev F.F.** Elektricheskiye generatory s postoyan-nymi magnitami [Electric generators with permanent magnets]. M.: Energoatomizdat, 1988. 280 s. (rus.)
2. **Ledovskiy A.N.** Elektricheskiye mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. M.: Energoatomizdat, 1985. 168 s. (rus.)
3. **Borisov G.A.** Ispolzovaniye postoyannykh magniton v elektricheskikh mashinakh [The use of permanent magnets in electric machines]: Uchebn. posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGETU, 2002. 75 s. (rus.)
4. **Efimov A.A., Shreyner R.T.** Aktivnyye preobrazovateli v reguliruyemykh elektroprivodakh peremennogo toka. [Active converters controlled AC drives] / Pod red. d.t.n., prof. R.T. Shreynera — Novouralsk: Izd-vo NGTI, 2001. (rus.)
5. **Didmanidze O.N. Ivanov S.A.** Ispolzovaniye superkondensatorov v kombinirovannykh energoustanovkakh tyagovotransportnykh sredstv [The use of supercapacitors in combined power plants tyagovotransportnyh funds]. M.: UMTs «TRIADA», 2004 g. (rus.)
6. **Usov O.A., Beloutov G.S., Gusev, M.N. [i dr.]** Osnovnyye varianty skhemy elektromekhanicheskoy transmissii gibridnogo tipa i metodika opredeleniya parametrov yeye agregatov dlya voyennykh gusenichnykh mashin [The main options schemes hybrid electromechanical transmission type and method of determining the parameters of its units for military tracked vehicles]. // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy semnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2014 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M.: RARAN, 2014. S. 111–122. (rus.)
7. **Usov O.A., Korolkov R.N.** Metod rascheta sredney skorosti i raskhoda topliva pri dvizhenii VGM po testovoy trasse. [Method of calculating the average speed and fuel consumption when driving a military tracked vehicle on the test track] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy shestdnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (3-6 aprelya 2012 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2012. S. 197–202. (rus.)
8. **Programma rascheta pokazateley funktsionirovaniya i dolgovechnosti uzlov elektromekhanicheskikh perevodach.** [Program for calculating performance indicators and durability electromechanical assemblies gear]. №035.08 PP / VNIITRansmash. 2014. (rus.)
9. **Gusev M.N., Beloutov G.S., Korol'kov R.N., Shirshov Y.I.** Transmissiya transportnoy mashiny. [Patent for the vehicle transmission] Patent RF, No.2521158. Prioritet 06.11.2012. (rus.)
10. **Usov O.A., Beloutov G.S., Gusev M.N. [i dr.]** Programma rascheta pokazateley poter moshchnosti v transmissiyakh transportnykh mashin. [The program of calculating power losses in the transmission of transport vehicles.] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy odinnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2008 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., SPb: RARAN, 2008. S. 201–204. (rus.)
11. **Usov O.A., Loyko A.V., Beloutov G.S. [i dr.]** Matematicheskaya model dizelnogo dvigatelya dlya rascheta elektromekhanicheskoy transmissii transportnoy mashiny [A mathematical model of the diesel engine to calculate the electromechanical transmission transport vehicle]. // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy semnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2014 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2014. S. 122–130. (rus.)
12. **Beloutov G.S., Korolkov R.N., Usov O.A.** Model rascheta raskhoda topliva dizelnogo dvigatelya na proizvolnom rezhime [Model to calculate the fuel consumption of the diesel engine on an arbitrary mode.] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy pyatnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (3-6 aprelya 2012 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2012. S. 197–202. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**УСОВ Олег Александрович** — кандидат технических наук генеральный директор ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: usov496@mail.ru

**ГУСЕВ Михаил Николаевич** — начальник НТЦ-35 ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: M.Gusev@vniittransmash.ru

**ЛОЙКО Александр Владимирович** — инженер ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: aleksandr.loyko@inbox.ru

**МАКАРОВ Алексей Сергеевич** — инженер ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: gorodoshnik@bk.ru

**AUTHORS**

**USOV Oleg U.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: usov496@mail.ru

**GUSEV Mikhail N.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: M.Gusev@vniittransmash.ru

**LOYKO Aleksandr L.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: aleksandr.loyko@inbox.ru

**MAKAROV Aleksei S.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: gorodoshnik@bk.ru