УДК 629.1.032
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

В.Н. Кузнецова[1], Р.В. Романенко[2]
[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
[2]Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Высокие темпы освоения новых территорий, развития строительного и дорожно-транспортного комплекса, добычи и транспортировки полезных ископаемых невозможно без машин и оборудования. Использование в качестве базового шасси гусеничного движителя имеет как преимущества, так и недостатки. Одной из главных проблем является обеспечение подвижности гусеничной техники. Использование силовых агрегатов и трансмиссий смешанных типов позволяет решить эту научную проблему и обеспечить эффективность выполнения технологических операций при эксплуатации гусеничных машин.*
На современных транспортных машинах применяются трансмиссии самых различных типов, в том числе и электромеханические трансмиссии (ЭМТ). В такой конструкции преобразование крутящего момента и изменение частоты вращения ведущих колес гусеничного движителя осуществляется за счет тяговых электродвигателей (ТЭД). Целью применения в составе гусеничных машин электромеханической трансмиссии является повышение тягово-динамических свойств и топливной экономичности и, как следствие, улучшение свойства подвижности машины. Объединение в составе гусеничной машины (ГМ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрических машин позволяет максимально использовать преимущества последних и скомпенсировать недостатки, присущие каждому из них. Улучшение этих показателей достигается главным образом за счет различных рабочих характеристик тягового электрического двигателя (ТЭД) и накопителя энергии (НЭ).
Методы исследования. *В качестве базовой основы проведенных теоретических исследований служил системый анализ. Разработана математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией. Использовались методы теории алгоритмов.*
Результаты. *Разработана и приведена структурная схема компоновки последовательного типа электромеханической трансмиссии гусеничной машины, защищенная патентом РФ. Разработан алгоритм взаимодействия ее элементов с учетом различных режимов движения машины. Приведены основные математические зависимости, входящие в методику обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией.*
Обсуждение и заключение. *Использование разработанных подходов и методики позволят производить расчет составных элементов электромеханической трансмиссии для обеспечения требуемой подвижности гусеничной машины, оценивать ее топливную экономичность, а также ее максимальную и среднюю скорость движения.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *гусеничная машина, электромеханическая трансмиссия, методика, алгоритм.*

БЛАГОДАРНОСТИ. *Авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.*

Поступила 16.09.20, принята к публикации 23.10.2020.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Основные аспекты методики обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией. *Вестник СибАДИ.* 2020; 17 (5): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583

© Кузнецова В.Н., Романенко Р.В.

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583

BASIC ASPECTS OF METHODOLOGY FOR JUSTIFYING. THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF. A TRACKED MACHINE WITH ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION

V.N. Kuznetsova[1]***, R.V. Romanenko***[2]
[1]*Siberian State Automobile and Highway University,*
Automobile and Highway University (SibADI),
[2]*Omsk Automobile and Armored Engineering Institute*
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *High rates of new territories development, the development of the construction and road-transport complex, mining and transportation of minerals is impossible without machinery and equipment. The use of a caterpillar propeller as a base chassis has both advantages and disadvantages. One of the main problems is ensuring the mobility of tracked vehicles. The use of mixed-type power units and transmissions allows solving this scientific problem and ensuring the efficiency of technological operations during the operation of tracked vehicles. Modern vehicles use a variety of transmission types, including electromechanical transmission (EMT). In such a design, torque conversion and change in the speed of the drive wheels of the caterpillar propulsion device are carried out by means of traction electric motors (TEM). The aim of the use of electromechanical transmission in tracked machines is to increase the tractive-dynamic properties and fuel economy and, as a result, to improve the mobility of the machine. The combination of an internal combustion engine (ICE) and electric machines in a caterpillar machine (CM) makes it possible to maximize the advantages of the latter and compensate for the disadvantages of each. These improvements are achieved mainly through the different performance characteristics of the traction electric engine (TEE) and the energy storage device (ESD).*
Research methods. *A system analysis served as the basis for the theoretical studies. A mathematical model of the motion of a tracked vehicle with an electromechanical transmission has been developed. The methods of the theory of algorithms were used.*
Results. *A structural diagram of the arrangement of a series connection of elements of an electromechanical transmission of a tracked vehicle, protected by a patent of the Russian Federation, has been developed and presented. An algorithm has been developed for the interaction of its elements taking into account the movement of the machine. The main mathematical relationships included in the methodology for substantiating the operational characteristics of a tracked vehicle with an electromechanical transmission are presented.*
Discussion and conclusion. *Using the developed approaches and methodology, it will be possible to calculate the components of the electromechanical transmission in order to ensure the required mobility of the caterpillar machine, to assess its fuel economy, as well as its maximum and average speed.*

KEYWORDS: *tracked vehicle, electromechanical transmission, method, algorithm.*

GRATITUDES. *The authors express their gratitude to the Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial staff and the reviewers of the article.*

Submitted 16.09.20, revised 23.10.2020.
The 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. Basic aspects of the justification procedure performance characteristics tracked machine with electromechanical transmission. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-574-583

© Kuznetsova V.N., Romanenko R.V.

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

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в развитии и производстве малогабаритных электрических машин, силовой и управляющей электроники, накопителей энергии с высокой емкостью [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] способствуют совершенствованию и модернизации транспортных машин, оснащенных гибридными силовыми установками и электромеханическими трансмиссиями не только для колесной техники, но и для гусеничной техники гражданского и военного назначения [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. В связи с этим перспективными направлениями исследования являются: определение и обоснование конструктивных параметров агрегатов электромеханической трансмиссии, гибридной силовой установки, различные режимы работы электромеханической трансмиссии при эксплуатации гусеничной машины. Электромеханическая трансмиссия гусеничной машины представляет собой сложный технический объект, в котором организуется совместная работа целого комплекса отдельных устройств. При этом каждое звено такой системы нацелено на решение общей задачи – повышение тягово-динамических свойств, увеличение запаса хода, улучшение топливной эффективности машины. Необходимым условием достижения данной цели является определение рациональных характеристик основных элементов электромеханической трансмиссии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой выполняемых расчетов являются требования к подвижности разрабатываемой гусеничной машины, а также конструктивные параметры и характеристики ее комплектно-тягового силового электрооборудования (гибридная силовая установка, накопители энергии, тяговые электрические двигатели). Для обоснования эксплуатационных характеристик разрабатываемой гусеничной машины (ГМ) с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) необходимо провести расчеты показателей тягово-динамических свойств и топливной экономичности.

Основными этапами методики проведения расчетов являются:

- установление исходных данных (тип машины, ее основные параметры, условия эксплуатации, технические требования к комплексному показателю подвижности и др.);
- разработка базовой структурной схемы электромеханической трансмиссии;
- определение временной зависимости суммарной мощности на ведущие колеса, требуемой для преодоления сил сопротивления при движении машины;
- предварительный выбор основного тягового силового оборудования и установление его расчетных параметров;
- разработка алгоритма работы электромеханической трансмиссии, обеспечивающего минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении;
- расчет энергетических характеристик электромеханической трансмиссии и распределения передаваемой мощности на ведущие колеса для различных участков движения (в том числе уточнение методом последовательных приближений оптимального соотношения мощности к ведущим колесам от гибридной силовой установки и от накопителей энергии);
- расчет топливно-экономических характеристик электромеханической трансмиссии в цикле движении ГМ для вариантов соотношений величин, передаваемой мощности на ведущие колеса по механическому и электромеханическому каналам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации расчета разработана математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией для различных режимов движения (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение) [19]. Математическая модель разработана с учетом структурной схемы компоновки последовательного соединения элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины[1] (рисунок 1). В последовательной схеме тяговое усилие создается только электроприводом. Поскольку гибридная силовая установка (ГСУ), состоящая из двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и генератора, не создает непосредственно тяговое усилие на

[1] Патент на полезную модель RU 196668 Российская Федерация, МПК B62D55/08. Электромеханическая трансмиссия гусеничной машины / Романенко Р.В., Сергеев В.В., Дружинин П.В., Дмитрук А.В.; заявитель и патентообладатель ФГКВОУ ВО «Военная академия МТО им. генерала армии А.В. Хрулева» МО РФ. – № 2019125086; заявл. 06.08.2019; опубл. 11.03.2020, бюл. № 8.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ведущие колеса, то мощность, передаваемая ГСУ, должна быть не меньше, чем средняя мощность, требуемая для движения машины, а развиваемая мощность и момент тягового электродвигателя (ТЭД) должны соответствовать максимальной мощности и максимальной тяговой силе.

Управление работой электромеханической трансмиссии осуществляется блоком управления (БУ), обеспечивающей контроль и управление основными элементами электромеханической трансмиссии [20, 21]. Блок управления электромеханической трансмиссией обрабатывает информацию о текущем состоянии отдельных агрегатов трансмиссии, величинах задающих сигналов и формирует управляющие сигналы:

- по мощности ДВС, передаваемой на ведущие колеса;
- по частоте вращения коленчатого вала ДВС;
- по напряжению, току якоря и току возбуждения генератора;
- по напряжению, току якоря и току возбуждения тяговых электродвигателей;
- по температуре якоря и частоте вращения тяговых электродвигателей;
- по напряжению на клеммах и току нагрузки/зарядки накопителей энергии.

В блок управления ЭМТ поступают также управляющие сигналы от датчиков величин тяговой мощности и тока якоря тяговых электродвигателей в режиме рекуперативного торможения.

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.

Из приведенной структурной схемы (см. рисунок 1) следует возможность реализации двух 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.

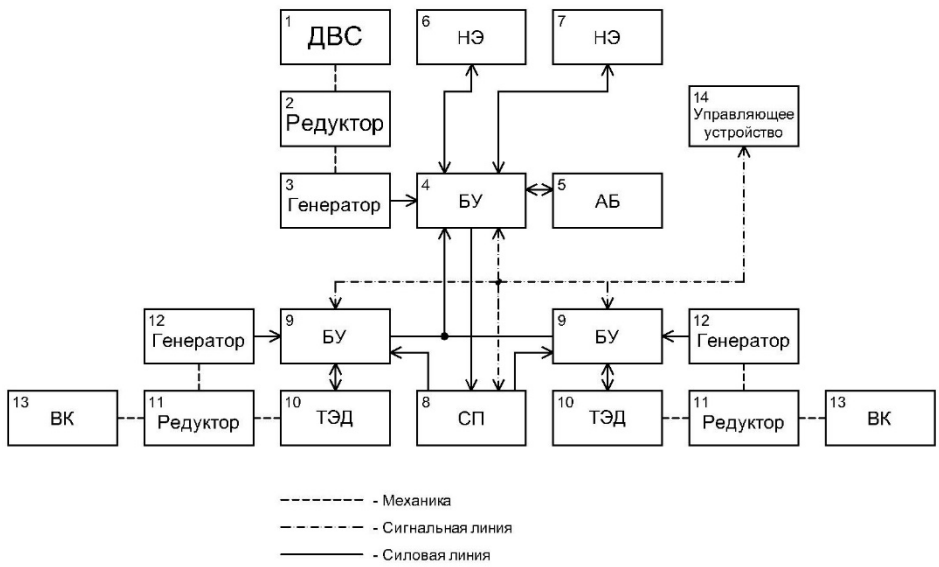

Рисунок 1 – Структурная схема компоновки последовательного соединения элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; НЭ – накопитель энергии; АБ – аккумуляторная батарея; ТЭД – тяговый электродвигатель; ВК – ведущие колеса; БУ – блок управления; СП – силовой преобразователь

Figure 1 – Block diagram of the serial connection layout elements of electromechanical transmission of a tracked vehicle ICE – internal combustion engine; ES – energy storage; SB – storage battery; TM – traction motor; DW – driving wheels; CU – control unit; PC – power converter

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

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

- требуемые значения момента для обеспечения движения в заданных условиях;
- степень заряженности НЭ;
- оптимальные (по условиям минимизации удельного расхода топлива) значения момента и частоты вращения вала ДВС.

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 2.

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 осуществляются по схеме: ДВС – Г – И – ТЭД – БР – ВК (Г – генератор, И – инвертор, БР – бортовой редуктор). 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, $\mathrm{M}_{\text{тэд}} > \mathrm{M}_{\text{двс}}$, 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, $\mathrm{M}_{\text{тэд}} = \mathrm{M}_{\text{двс}}$. 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 Мдвс, $\mathrm{M}_{\text{тэд}} < \mathrm{M}_{\text{двс}}$. 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 и $\mathrm{M}_{\text{двс}}$ и $n_{\text{двс}}$, при которых достигаются минимальные значения удельного расхода топлива g для данной мощности ДВС.

Особенностью предложенного алгоритма управления ЭМТ является то, что определено условие подключения второго потока мощности от накопителя энергии, которым является перегрузка ДВС по моменту, а в качестве органа управления движением ГМ рассматривается силовой преобразователь (ПС), параметры которого можно изменять во времени для изменения режимов движения (разгон, поворот, движение с постоянной скоростью, торможение). В силовом преобразователе изменение параметров обеспечивает «коэффициент трансформации», характеризующий кратность уменьшения напряжения после ПС, на входе ТЭД. До силового преобразователя потенциал равен напряжению генератора, а после равен напряжению генератора, деленному на коэффициент трансформации. Такая схема работы электромеханической трансмиссии обеспечивает минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении.

Блок-схема алгоритма работы электромеханической трансмиссии разработана с учетом различных режимов движения гусеничной машины (разгон, криволинейное движение (поворот), торможение) [22], что обеспечивает минимальный удельный расход топлива первичного источника энергии и максимальное использование энергии рекуперации при криволинейном движении и торможении (рисунок 2) [23, 24].

Сила тяги на ведущих колесах ГМ выражается через электромеханические характеристики ТЭД.

К электромеханическим характеристикам относятся зависимости следующих величин от тока электродвигателя $I_{\text{тэд}}(I_{\text{я}})$:

- число оборотов якоря электродвигателя (скорость вращения) $n_{\text{д}}$;
- вращающий момент на валу электродвигателя М;
- коэффициент полезного действия электродвигателя $\eta_{\text{д}}$.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

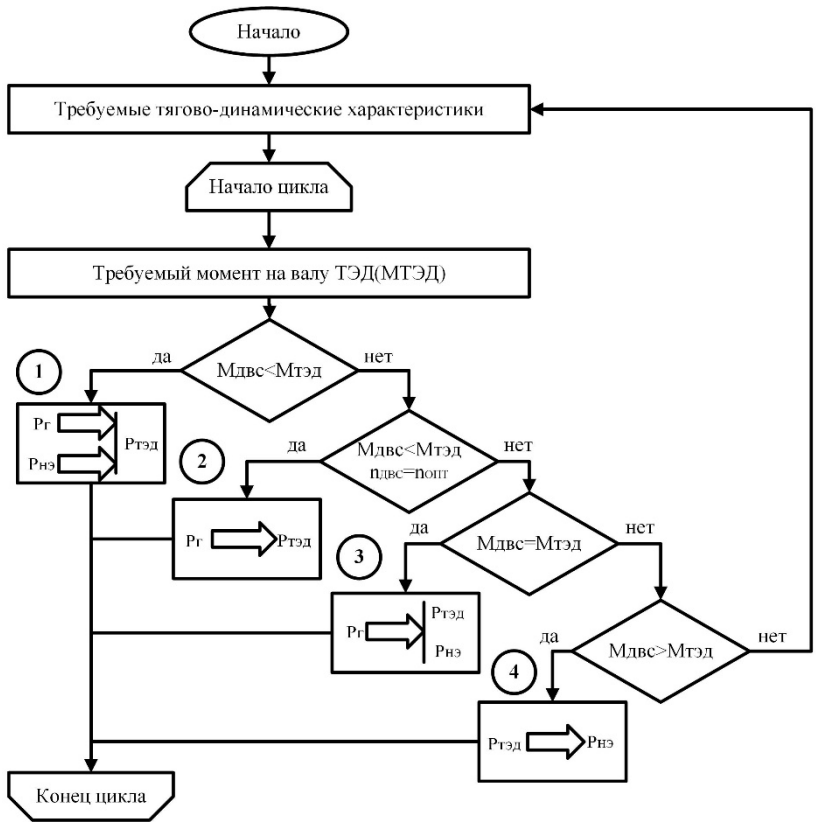

Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма взаимодействия элементов электромеханической трансмиссии гусеничной машины: Ртэд – мощность электрического тока тягового электродвигателя; Рг – мощность электрического тока генератора; Рнэ – плотность электрической энергии накопителя энергии; Мдвс – момент дизель-генератора, Мтэд – момент тягового электрического двигателя

Figure 2 – Block diagram of the interaction algorithm of elements electromechanical transmission of a tracked vehicle: Ртэд – traction motor electric current; Рг – generator electric current; Рнэ – energy storage device electrical energy density; Мдвс – diesel generator moment; Мтэд – traction engine moment

Характеристика $M_{тэд}$ ($I_{тэд}$) определяется путем пересчета с использованием характеристик $\eta_{тэд}(I_{тэд})$ по формуле

$$M_{тэд} = \frac{U_{тэд} \cdot I_{тэд} \cdot \eta_{тэд}}{\omega}, \quad (1)$$

где $M_{тэд}$ – вращающий момент на валу тягового электродвигателя, Н·м; $U_{тэд}$ – напряжение на тяговом электродвигателе, В; $\eta_{тэд}$ – коэффициент полезного действия тягового электродвигателя; ω – угловая скорость якоря электродвигателя.

На основе работ, посвящённых данной тематике [25] – [28], усовершенствована математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, отличительной особенностью которой является учет электрических, магнитных потерь, возникающих в тяговых электрических двигателях:

$$\ddot{X}_C = \frac{1}{m}\left[\left(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}\right) \cdot \cos\varphi + S_T \sin\varphi\right]; \quad (2)$$

$$Y_C = \frac{1}{m}\left[\left(P_2 + P_1 - P_{f1} - P_{f2}\right) \cdot \sin\varphi + S_T \cos\varphi\right]; \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J_C}\left[\left(P_2 - P_1 + P_{f1} - P_{f2}\right) \cdot \frac{B}{2} + \mathrm{sign}\dot{\varphi} \cdot M_C\right]; \quad (4)$$

$$\ddot{\omega}_{ТЭД1} = \left[M_{ТЭД1} \cdot i_P \cdot \eta_P - \frac{M_{K1}}{\eta_{ГД}} + \frac{P_1 \cdot r_{BK}}{\eta_{ГД}} - M_{T1}\right] \cdot \frac{1}{J_1}; \quad (5)$$

$$\ddot{\omega}_{ТЭД2} = \left[M_{ТЭД2} \cdot i_P \cdot \eta_P - \frac{M_{K2}}{\eta_{ГД}} + \frac{P_2 \cdot r_{BK}}{\eta_{ГД}} - M_{T2}\right] \cdot \frac{1}{J_2}; \quad (6)$$

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

В системе уравнений (2) – (6) использованы следующие обозначения: T – текущее время, с; X_C, Y_C– координаты центра тяжести машины, м; φ – курсовой угол, рад; $\omega_{ТЭД1}$, $\omega_{ТЭД2}$ – частоты вращения генератора и тяговых электродвигателей, рад/с; m – масса машины, кг; P_1, P_2 – силы тяги на ведущих колесах, Н; P_{f1}, P_{f2}– сопротивление передвижению колёс, Н; S_T – сила сопротивления боковому перемещению всех колес, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колес о грунт; J_C, J_1, J_2– момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести и бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг; M_C, $M_{ТЭД1}$, $M_{ТЭД2}$, M_{T1}, M_{T2}, M_{K1}, M_{K2} – моменты сопротивления боковому перемещению генератора, электродвигателей, механических тормозов и на ведущих колесах соответственно, Нм; $r_{ВК}$ – радиус ведущего колеса, м; i_p– передаточные числа в редукторе; η_p, $\eta_{ГД}$ – КПД редуктора и гусеничного движителя.

Мощность ведущих колес машины $N_{ВК}$ с электромеханической трансмиссией последовательного типа определяется зависимостью [25]:

$$N_{ВК}(t) = N_{ГСУ}(t) \cdot \eta_Г \cdot \eta_И \cdot \eta_{ТЭД} + \\ + N(t)_{НЭ} \cdot \eta_И \cdot \eta_{ТЭД}\,, \quad (7)$$

где $N_{ГСУ}$,$N_{НЭ}$ – мощность гибридной силовой установки и накопителя энергии соответственно; $\eta_Г$, $\eta_И$, $\eta_{ТЭД}$ – коэффициент полезного действия генератора, инвертора, тягового электродвигателя соответственно.

Следует отметить, что величина мощности ГСУ образца с электромеханической трансмиссией последовательного типа в процессе разгона $N^{Р}_{ГСУ_{пос}}$ как правило постоянна и должна соответствовать средней мощности, требуемой для ее движения. Мощность тягового электродвигателя и, соответственно, мощность накопителей энергии $N^{Р}_{НЭ}$ выбираются из условия необходимости обеспечения требуемой максимальной мощности и тягового усилия на разгоне.

Суммарная энергия $A^{Р}_{ГСУ}$ на этапе разгона определяется по формуле

$$A^{Р}_{ГСУ_{пос}} = N^{Р}_{ГСУ_{пос}} \cdot t_р + N^{p}_{нэ} + t^{НЭ}_{Р}, \quad (8)$$

где $t_р$ – время разгона образца, $N^{p}_{нэ}$, $N^{Р}_{ГСУ_{пос}}$ – мощность гибридной силовой установки и накопителя энергии соответственно; $t^{НЭ}_{Р}$ – время, в течение которого в процессе разгона поступает энергия от НЭ к ТЭД, с.

Мгновенный расход топлива определяется по формуле

$$G^{мг}_{m} = \left(\frac{(c \cdot k_{3i} + d) \cdot n^{i} + p \cdot k_{3i} + \mu}{113}\right) \cdot G_{mN}\,, \quad (9)$$

где $G^{мг}_{m}$ – мгновенный расход топлива на i-м интервале, кг/час; c, d, p, μ – коэффициенты аппроксимации для двигателей внутреннего сгорания ($c = 3{,}125 \cdot 10^{-4}$ кг/ч/об/мин , $d = 1{,}25 \cdot 10^{-2}$ кг/ч/об/мин , $p = 0{,}3917$ кг/ч , $\mu = -13{,}67$ кг/ч); k_{3i} – загрузки двигателя на i-м интервале, %; n – частота вращения коленчатого вала двигателя на i-м интервале; G_{mN} – расход топлива в режиме максимальной мощности, кг/ч.

Суммарная потребная мощность ГСУ $N^{\Sigma nc}_{ГСУпос}$ определяется из выражения

$$N^{\Sigma nc}_{ГСУпос} = N^{дв}_{ГСУпос} + N^{зар}_{ГСУпос}\,, \quad (10)$$

где $N^{дв}_{ГСУпос}$ – потребная объектовая мощность ГСУ для движения с постоянной заданной скоростью, Вт; $N^{зар}_{ГСУпос}$ – мощность ГСУ, расходуемая на заряд накопителей энергии электромеханической трансмиссии последовательного типа, Вт.

КПД электромеханического канала $\eta^{зс}_{ЭМ}$ определяется из зависимости

$$\eta^{зс}_{ЭМ} = \eta^{зс}_{г} \cdot \eta^{зс}_{нэ} \cdot \eta^{зс}_{ТЭД}\,, \quad (11)$$

где $\eta^{зс}_{г}$, $\eta^{зс}_{нэ}$, $\eta^{зс}_{ТЭД}$, – КПД соответственно тягового генератора, накопителя, тягового электродвигателя.

Суммарная величина требуемой энергии дизель-генератора с ЭМТ последовательного типа за цикл движения образца $A^{ц}_{ГСУпос}$ составляет

$$A^{ц}_{ГСУпос} = A^{p}_{ГСУпос} + A^{пс}_{ГСУпос}\,, \quad (12)$$

где $A^{p}_{ГСУпос}$ – энергия, затраченная на движение на участках трассы при разгоне гибридной силовой установки с электромеханической трансмиссией последовательного типа, $A^{пс}_{ГСУпос}$ – энергия, затраченная на движение на участках трассы при постоянной скорости.

Средняя величина требуемой мощности ГСУ с электромеханической трансмиссией последовательного типа за цикл движения машины составит

$$N^{ц}_{ГСУпос} = A^{ц}_{ГСУпос} / t_ц\,, \quad (13)$$

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

где $t_{ц}$ – суммарное время движения по участку типовой трассы, с, $A^{ц}_{ГСУпос}$ – суммарная величина требуемой энергии дизель-генератора с ЭМТ последовательного типа за цикл движения образца.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные значения мощности при заданных параметрах гусеничной машины позволят провести предварительный выбор его основного тягового оборудования – ДВС и генератора (ГСУ), тяговых электрических машин и накопителей энергии. Основные эксплуатационные параметры накопителей энергии (плотность энергоемкости, плотность электроэнергии, время заряда и разряда, внутреннее сопротивление) определяются исходя из заданных и расчетных массовых, эксплуатационных и энергетических параметров.

Последующий анализ полученных расчетных характеристик электромеханической трансмиссии позволят провести:

- оптимизацию области рабочих режимов и состава тягового оборудования;
- оптимизацию алгоритма работы с заданными фактическими характеристиками агрегатов в режимах движения.

Реализация методики позволяет производить расчет составных элементов электромеханической трансмиссии для обеспечения требуемой подвижности гусеничной машины, оценивать ее топливную экономичность, а также ее максимальную и среднюю скорость движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дидманидзе О.Н., Иванов С.А., Пуляев Н.Н. Эффективность тягово-транспортных средств при использовании накопителей энергии. Москва, Мегапринт, 2018. 189 с.
2. Гук М.Э., Юденков В.С. Синтез оптимального регулятора с переключаемой структурой для управления асинхронным электродвигателем: материалы конф. Минск, БГУИР, 2014. 359-362 с.
3. Gai J., Huang Sh., Zhou G., LI Sh. Design method of power coupling mechansism scheme for double side motors coupling drive transmission // China Mechanical Engineering. 2014. 25(13)· С. 1739-1743. DOI.org/10.1016/j.egypro.2017.03.707.
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. Pp. 463-469.
5. 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. Pp. 221-227.
6. 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. 78-82.
7. 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. Pp. 73-81.
8. Тышкевич С.А. Перспективы развития автомобилей с гибридной силовой установкой // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплекс: проблемы, перспективы, инновации». Омск, СибАДИ, 2019. С. 148-151.
9. Лепешкин А.В. Критерии оценки энергоэффективности многоприводных колесных машин. Москва, Автомобильная промышленность, 2010. № 10. С. 19-23.
10. Кулаков Н.А., Лепешкин А.В., Черанев С.В. Разработка и исследование математической модели полноприводного четырехосного автомобиля с электротрансмиссией. Москва, Известия МГТУ «МАМИ», 2011. № 2 (12). С. 95-105.
11. Robert William T. Drive configuration for skid steering vehicles. USA. US2010/0184550 A1[P]. 2010. 7. 22 p.
12. 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.
13. Савинкин В.В., Кузнецова В.Н. Разработка конструкции гибридного привода поворотной платформы землеройной машины для выполнения строительных работ // Вестник СибАДИ. 2015. № 1 (41). С. 17-24.
14. Коротких Ю.С. Современное состояние машинно-тракторного парка Российской Федерации: основные тенденции и перспективы развития / Ю. С. Коротких, Ю. В. Чутчева // Международный технико-экономический журнал. 2016. № 6. 25-29.
15. Исаков П.П. Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчёт. Ленинград, Машиностроение, 1981. 302 с.
16. 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.
17. Walentynowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011. Vol.18, № 1. 471-478.
18. 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.
19. Романенко Р.В., Дружинин П.В., Сергеев В.В. Реализуемая схема комбинированной силовой установки с электромеханической трансмиссией наземного робототехнического комплекса, выполняющего задачи материально-технического обеспечения // Наука и военная безопасность. Омск, ОАБИИ. 2018. № 12. С. 21-26.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

20. Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. Москва, Машиностроение, 1993. 320 с.

21. Держанский В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины. Курган, Изд-во Курганского гос. ун-та. 2010. 142 с.

22. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. Москва, Машиностроение, 1970. 176 с.

23. Романенко Р.В. Сергеев В.В. Моделирование криволинейного движения роботизированной военной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 8. № 1. Санкт-Петербург, ЦНИИ РТК. 2020. 34-40.

24. Щербо А.Н., Наумов А.Н., Щербо Е.В., Макоклюев А.И. Типовые циклы движения гусеничных образцов бронетанкового вооружения и техники // Наука и военная безопасность. 2017. № 1 (8). 64-68.

25. Носов Н.А., Галышев В.Д., Волков Ю.И., Харченко А.И. Расчёт и конструирование гусеничных машин / Н.А. Носов, В.Д. Галышев, Ю.И. Волков, А.И. Харченко. Ленинград, Машиностроение, 1972. 360 с.

26. Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 12.

27. Горелов В.А., Котиев Г.О., Мирошниченко А.В. Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины // Известия вузов. 2012. №1. С. 49–59.

28. Горелов В.А. Математическое моделирование многозвенных колесных транспортных комплексов с учетом особенностей конструкций сцепных устройств // Наука и образование. 2012. № 2.

REFERENCES

1. Didmanidze O.N., Ivanov S.A., Pulyaev N.N. Effektivnost' tyagovo-transportnyh sredstv pri ispol'zovanii nakopitelej energii [Efficiency of traction vehicles when using energy storage devices]. Moscow: Megaprint. 2018. 189. (in Russian)

2. Guk M.E., Yudenkov V.S. Sintez optimal'nogo regulyatora s pereklyuchaemoj strukturoj dlya upravleniya asinhronnym elektrodvigatelem [Synthesis of an optimal regulator with a switchable structure for controlling an asynchronous electric motor: materials conf.]. Minsk, BSUIR. 2014.359 -362. (in Russian)

3. Gai J., Huang Sh., Zhou G., LI Sh. Design method of power coupling mechansism 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.

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; 1: 463-469.

5. 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; 2(3): 221-227.

6. Kulakov N.A., Selifonov V.V., Cheranyov S.V. Vybor optimal'noj konstrukcii mekhanicheskoj chasti elektricheskoj transmissii special'nogo kolesnogo shassi 8x8 [The choice of the optimal design of the mechanical part of the electric transmission of the special wheeled chassis 8x8]. *Izvestiya MGTU "MAMI".* 2010; 1: 78-82. (in Russian)

7. 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; 18(37): 73-81.

8. Tyshkevich S.A. Perspektivy razvitiya avtomobilej s gibridnoj silovoj ustanovkoj [Prospects for the development of vehicles with a hybrid power plant]. *Collection of materials of the III International scientific and practical conference «Architectural and construction and road transport complex: problems, prospects, innovations».* 2019. 148-151. (in Russian)

9. Lepeshkin A. V. Kriterii ocenki energoeffektivnosti mnogoprivodnyh kolesnyh mashin [Criteria for evaluating the energy efficiency of multi-drive wheeled vehicles]. Moscow, Automotive industry. 2010; 10: 19-23. (in Russian)

10. Kulakov N.A., Lepeshkin A.V., Cheranev S.V. Razrabotka i issledovanie matematicheskoj modeli polnoprivodnogo chetyrekhosnogo avtomobilya s elektrotransmissiej [Development and research of a mathematical model of an all-wheel drive four-axle vehicle with electric transmission]. *Izvestiya MSTU «MAMI».* 2011; 2 (12): 95-105.

11. Robert William T. Drive configuration for skid steering vehicles. US2010/0184550 A1[P]. 2010-7-22.

12. Polak F., Walentynowics J., Simulation of the hybrid propulsion system for the small unmanned vehicle // Journal of KONES Powertrain and Transport. 2011; 18(1): 471-478.

13. Savinkin V.V., Kuznetsova V.N. Razrabotka konstrukcii gibridnogo privoda povorotnoj platformy zemlerojnoj mashiny dlya vypolneniya stroitel'nyh rabot [Development of the design of a hybrid drive of a rotary platform of an earthmoving machine for performing construction work]. *Bulletin of SibADI*. 2015; 1 (41): 17-24. (in Russian)

14. Korotkikh Yu.S., Chutcheva Yu.V. Sovremennoe sostoyanie mashinno-traktornogo parka Rossijskoj Federacii: osnovnye tendencii i perspektivy razvitiya [Current state of the machine and tractor fleet of the Russian Federation: main trends and development prospects]. *International technical and economic journal*. 2016; 6: 25-29. (in Russian)

15. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnyh traktorov. Teoriya i raschyot [Electromechanical transmissions of tracked tractors. Theory and calculation]. *Mechanical engineering.* 1981.302 p. (in Russian)

16. 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.

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

17. Walentynowicz Je. Hybrid and electric power drive combat vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2011; 18(1): 471-478.

18. Colyer Ron E. The use of electric and hybrid-electric drives in military combat vehicles. Journal of Battlefield Technology. 2003; 6 (3): 11-15.

19. Romanenko R.V., Druzhinin P.V., Sergeev V.V. Realizuemaya skhema kombinirovannoj silovoj ustanovki s elektromekhanicheskoj transmissiej nazemnogo robototekhnicheskogo kompleksa, vypolnyayushchego zadachi material'no-tekhnicheskogo obespecheniya [The implemented scheme of a combined power plant with an electromechanical transmission of a ground-based robotic complex, performing the tasks of material and technical support]. *Science and military security: Scientific and practical journal.* 2018; 12: 21-26. (in Russian)

20. Savochkin V.A. Statisticheskaya dinamika transportnyh i tyagovyh mashin [Statistical dynamics of transport and traction machines]. Moscow, Mechanical engineering. 1993. 320 p. (in Russian)

21. Derzhansky V.B., Taratorkin I.A. Algoritmy upravleniya dvizheniem transportnoj mashiny [Algorithms for controlling the movement of a transport vehicle: monograph]. Kurgan, Publishing house of the Kurgan state un-that. 2010.142 p.

22. Farobin Ya.E. Teoriya povorota transportnyh mashin [The theory of rotation of transport vehicles]. Moscow, Mechanical Engineering, 1970.176 p. (in Russian)

23. Romanenko R.V., Sergeev V.V. Modelirovanie krivolinejnogo dvizheniya robotizirovannoj voennoj gusenichnoj mashiny s elektromekhanicheskoj transmissiej [Modeling curvilinear movement of a robotic military tracked vehicle with electromechanical transmission]. *Robotics and technical cybernetics.* 2020; 8(1): 34-40. (in Russian)

24. Shcherbo A.N., Naumov A.N., Shcherbo E.V., Makoklyuev A.I. Tipovye cikly dvizheniya gusenichnyh obrazcov bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki [Typical cycles of movement of tracked samples of armored weapons and equipment]. *Science and military security.* 2017; 1 (8): 64-68. (in Russian)

25. Nosov N.A., Galyshev V.D., Volkov Yu.I., Kharchenko A.I. Raschyot i konstruirovanie gusenichnyh mashin [Calculation and design of tracked vehicles]. Leningrad, Mashinostroenie, 1972. 360 p. (in Russian).

26. Kotiev G.O., Gorelov V.A., Miroshnichenko A.V. Sintez sistemy upravleniya tyagovymi elektrodvigatelyami dlya individual'nogo privoda vedushchih koles avtomobilya [Synthesis of a traction motor control system for an individual drive of the driving wheels of a car]. *Science and Education: Electronic Scientific and Technical Edition.* 2011; 12. (in Russian)

27. Gorelov V.A., Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V. Razrabotka zakona upravleniya individual'nym privodom dvizhitelej mnogoosnoj kolesnoj mashiny [Development of a control law for the individual drive of propellers of a multi-axle wheeled vehicle]. *Proceedings of universities. Mechanical engineering*. 2012; 1: 49-59. (in Russian)

28. Gorelov V.A. Matematicheskoe modelirovanie mnogozvennyh kolesnyh transportnyh kompleksov s uchetom osobennostej konstrukcij scepnyh ustrojstv [Mathematical modeling of multi-link wheeled transport systems taking into account the design features of coupling devices]. *Science and Education*. 2012; 2. (in Russian)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

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 предшествующих исследований. Постановка задач исследования. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Формулировка результатов и выводов (50%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

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

Roman R. Romanenko. A review of the results of the previous studies. A research tasks statement. A designation of the algorithm for analytical studies. A results and conclusions statement (50%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Романенко Роман Владимирович – старший преподаватель 7-й 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, г. Омск, Военный 14-й городок, 119, roman82enko@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Scopus Author ID 8671569200, Maintenance and Operation of Transport and Technological Machines and Complexes in Construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), (644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Romanenko Roman Vladimirovich – Senior lecturer, the 7th Repair of Armored and Automobile Equipment Department, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute, a branch of the A.V. Khrulev Military Academy of Logistics (VA MTO) (644098, Omsk, 14th Military town, 119, roman82enko@mail.ru).

© 2004–2020 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal