

УДК 629.1.032

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

В.Н. Кузнецова¹, Р.В. Романенко²

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»;
²Омский автобронетанковый инженерный институт,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Применение в конструкции гусеничной машины электромеханической трансмиссии позволяет повысить комплексный показатель подвижности, увеличить запас хода, топливную экономичность, максимальную скорость движения, снизить время разгона и др. Повышение показателей подвижности достигается за счет рабочих характеристик дизель-генератора и энергетических характеристик электрических машин. Это позволяет обеспечить функционирование моторно-трансмиссионной установки гусеничной машины таким образом, чтобы избежать неблагоприятных с точки зрения энергетической эффективности режимов работы как дизель-генератора, так и составных элементов электромеханической трансмиссии (генератора, тягового электрического двигателя, накопителя энергии), и реализовать высокую эффективность всей системы.

Методы исследования. Для улучшения подвижности и осуществления алгоритма управления электромеханической трансмиссией, обеспечивающий рациональный расход топлива, необходимо понимать об эффективных режимах работы как дизель-генератора, так и основных элементов электромеханической трансмиссии. В качестве способа решения данной задачи в настоящей работе предлагается посредством разработанной математической модели провести исследование энергетических характеристик основных элементов электромеханической трансмиссии при различных режимах движения гусеничной машины.

Результаты. Моделирование движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией дает возможность помимо определения параметров составных частей трансмиссии (генератор, накопитель энергии, тяговый двигатель) сформировать предварительные требования к ее характеристикам.

Обсуждение и заключение. Для решения данных задач необходимо смоделировать процесс движения гусеничной машины с учетом исходных данных, которые адекватны реальным условиям эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гусеничная машина, электромеханическая трансмиссия, режим движения, моделирование.

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

Поступила 24.01.21, принята к публикации 26.02.21.

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. Исследование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной машины / В.Н. Кузнецова, Р.В. Романенко. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 12–29.

© Кузнецова В.Н., Романенко Р.В., 2021



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION OF TRACKED MACHINE ENERGY CHARACTERISTICS STUDY

Victoria N. Kuznetsova¹, Roman V. Romanenko²

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

²Omsk Automobile and Armored Engineering Institute
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The use of an electromechanical transmission in the design of a tracked vehicle allows an increase in the complex indicator of mobility, an increase in the range, fuel efficiency, maximum speed, a decrease in acceleration time, etc. The improvement of these indicators is achieved mainly due to the different performance characteristics of the internal combustion engine and the energy characteristics of electrical machines. The latter fact makes it possible to ensure the operation of the power plant of the tracked vehicle in such a way as to avoid unfavorable operating modes of both the internal combustion engine and the elements of the electromechanical transmission (a generator, a traction electric motor, an energy storage) from the point of view of energy efficiency, and to realize the high efficiency of the entire system.

Research methods. To improve the mobility and implement a rational strategy for electromechanical transmission control, it is necessary to have an idea of the effective modes of operation of the main elements of the power plant. As a way to solve this problem it is proposed to study the energy characteristics of the main elements of an electromechanical transmission using the developed mathematical model for various modes of movement of a tracked vehicle.

Results. Modeling the motion of a tracked vehicle with an electromechanical transmission makes it possible, in addition to determining the transmission parameters, to formulate preliminary requirements for its characteristics.

Discussion and conclusion. To solve these problems, it is necessary to simulate the process of movement of a tracked vehicle, taking into account the initial data that are adequate to real operating conditions.

KEYWORDS: tracked vehicle, electromechanical transmission, driving mode, simulation.

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

Submitted 21.01.21, revised 26.02.21.

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. Electromechanical transmission of tracked machine energy characteristics study. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):12-29. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>

© Kuznetsova V.N., Romanenko R.V., 2021



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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений совершенствования конструкции шасси не только колесных, но и гусеничных машин является применение электромеханических трансмиссий (ЭМТ) с гибридными силовыми установками^{1,2} [1, 2, 3, 4, 5]. В результате проведенных исследований разработаны различные функциональные схемы электромеханических трансмиссий, способы управления двигателем гибридных силовых установок, методики обоснования, выбора и расчета режимных и эксплуатационных параметров агрегатов гибридных силовых установок и электромеханических трансмиссий, обеспечивающих требования к подвижности машин, их тягово-динамических свойств, увеличения запаса хода и топливной экономичности техники^{3, 4, 5, 6, 7} [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования процесса движения гусеничной машины проводились на основе математической модели, предусматривающей учет магнитных и электрических потерь в электрических машинах, и параметров накопителей энергии⁷ [11]. Моделирование движения проводилось по типовым циклам движения гусеничной машины (ГМ) с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) [9, 11]. При осуществлении моделирования учитывались потери на буксование для получения максимальных значений электрических потерь в электроприводе. Исследования проводились в среде программирования Vissim.

На основе работ, посвященных данной тематике [12, 13], сформулирована математическая модель движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, отличительной особенностью которой является учет электрических, магнитных потерь, возникаю-

щих в тяговых электрических двигателях (ТЭД) при переходных процессах:

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

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

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

$$\dot{\omega}_\Gamma = [M_\Gamma - M_{\Gamma H} k_\Gamma] \frac{1}{J_1}; \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{\text{ТЭД1}} = [M_{\text{ТЭД1}} \cdot k_\Gamma - \frac{P_1 \cdot R_{\text{ВК}}}{i_{\text{бп}}}] \frac{1}{J_2}; \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{\text{ТЭД2}} = [M_{\text{ТЭД2}} \cdot k_\Gamma - \frac{P_1 \cdot R_{\text{ВК}}}{i_{\text{бп}}}] \frac{1}{J_3}. \quad (6)$$

В системе уравнений (1) – (6) использованы следующие обозначения: X_c , Y_c – координаты центра тяжести машины в декартовой системе координат, м; φ – курсовой угол, рад; $\omega_{\Gamma H}$, $\omega_{\text{ЭД1}}$, $\omega_{\text{ЭД2}}$ – 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 передвиганию колёс, Н; R_6 – сила сопротивления боковому перемещению всех колес, определяемая как сумма поперечных составляющих сил трения колес о грунт; J_c , J_1 , J_2 , J_3 – момент инерции корпуса относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести, момент инерции дизель-генератора, бортовых электродвигателей с присоединенными к ним массами, кг; M_c , M_Γ , $M_{\Gamma H}$, $M_{\text{ТЭД1}}$, $M_{\text{ТЭД2}}$ – моменты сопротивления повороту гусеничной машины, двигателя внутреннего сгорания, генератора, электродвигателей соответственно, Н·м; $R_{\text{ВК}}$ – радиус ведущего колеса, м; i_p – передаточные числа в редукторе, k_Γ – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора.

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

² Гук М.Э. Синтез оптимального регулятора с переключаемой структурой для управления асинхронным электродвигателем / М.Э. Гук, В.С. Юденков. Минск : БГУИР. 2014. 359 с.

³ Савочкин В.А. Статистическая динамика транспортных и тяговых машин. – Москва: Машиностроение. 1993. 320 с.

⁴ Держанский В.Б. Алгоритмы управления движением транспортной машины. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. 2010. 142 с.

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

⁶ Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. – Челябинск: Челяб. гос. техн. ун-т. 2011. 516 с.

⁷ Исаков П.П. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчёт / П.П. Исаков, П.Н. Иванченко, А.Д. Егоров. Л.; Машиностроение. 1981. 302 с.

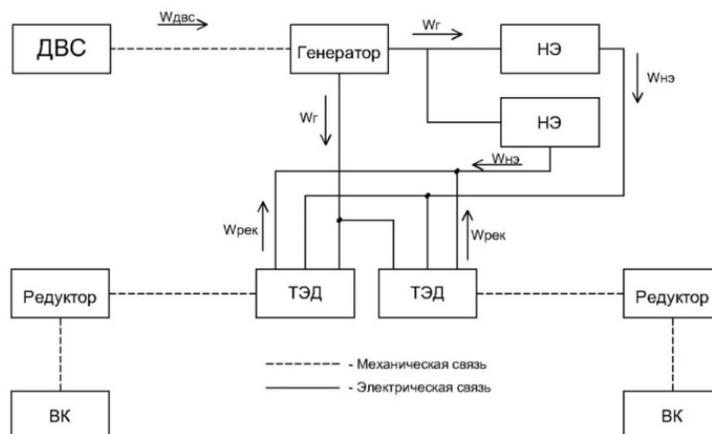


Рисунок 1 – Схема распределения потоков энергии между агрегатами ЭМТ:
 ТЭД – тяговый электрический двигатель, НЭ – накопитель энергии, ВК – ведущие колеса,
 $W_{рек}$ – рекуперативная энергия ТЭД, $W_{двс}$, $W_{Г}$, $W_{нэ}$ – энергия двигателя внутреннего сгорания,
 генератора, накопителя энергии соответственно

Figure 1 – Diagram of the distribution of energy flows between EMT units
 ТЭД – traction electric motor, НЭ – energy storage, ВК – drive wheels,
 $W_{рек}$ – driving wheels traction electric motor, $W_{двс}$, $W_{Г}$, $W_{нэ}$ – internal combustion engine energy,
 generator, energy storage device respectively

Основные допущения, принятые в математической модели:

- сопротивления повороту считаются по формулам Ф.А. Опейко, В.В. Гуськова [11];
- не учтена упругость элементов двигателя и гусениц;
- не рассмотрены частичные характеристики дизельного двигателя;
- не рассмотрены статические характеристики дизельного двигателя;
- при составлении математического описания электрических машин ЭМТ (генератор, тяговые электрические двигатели) приняты допущения, позволяющие построить математическую модель^{8,9} [12, 13] на базе непрерывных динамических уравнений Парка-Горева;
- не учтена индуктивность в ТЭД.

Для проведения имитационного моделирования движения ГМ с ЭМТ необходимо определить рациональный алгоритм управления электромеханической трансмиссией. Главными вопросами в ходе разработки алгорит-

ма управления ЭМТ являются: определение последовательности распределения потоков мощности и условий подключения второго потока мощности от накопителя энергии. Последовательность и условия распределения мощности в ЭМТ должны основываться на условиях движения и обеспечивать выполнение требований к динамике, а также обеспечивать минимальный расход топлива ДВС.

Из приведенной схемы (рисунок 1) следует возможность реализации двух режимов работы ЭМТ:

- 1) раздельная работа генератора (Г) и накопителя (НЭ);
- 2) совместная работа генератора и накопителя.

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.

⁸ Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов. – Челябинск: Челяб. гос. техн. ун-т. 2011. 516 с.

⁹ Закладной А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями / А.Н. Закладной, О.А. Закладной. – Киев: Либра, 2012. 190 с.

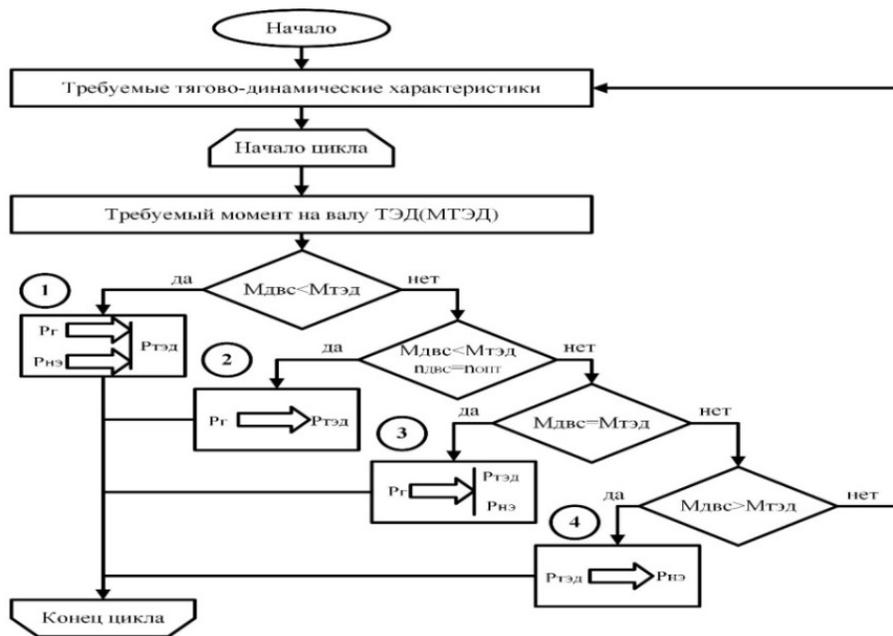


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма управления ЭМТ гусеничной машины:
 $P_{ТЭД}$ – мощность электрического тока тягового электродвигателя; $P_{Г}$ – мощность электрического тока генератора; $P_{НЭ}$ – плотность электрической энергии накопителя энергии; $M_{ДВС}$ – момент дизель-генератора, $M_{ТЭД}$ – момент тягового электродвигателя

Figure 2 – Block diagram of the interaction algorithm of elements electromechanical transmission of a tracked vehicle
 $P_{ТЭД}$ – electric current of traction motor; $P_{Г}$ – electric current of generator; $P_{НЭ}$ – electrical energy density of the energy storage device; $M_{ДВС}$ – diesel generator time, $M_{ТЭД}$ – traction electric motor time

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 ЭМТ последовательного типа, а также на основных мероприятиях по организации эффективной работы ДВС в составе ЭМТ, можно предложить базовый алгоритм управления агрегатов электромеханической трансмиссии и выбора оптимального с точки зрения энергетической эффективности режима работы ЭМТ, представленного на рисунке 2.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели и определения необходимых значений параметров основных элементов электромеханической трансмиссии [12, 13] было проведено имитационное моделирование, основными задачами которого являются:

- исследование энергетических характеристик ЭМТ при прямолинейном движении гусеничной машины по типовым циклам;
- исследование управляемого криволинейного движения гусеничной машины с электромеханической трансмиссией;
- определение количественных значений механических потерь на буксование;
- определение электрических и магнитных потерь, возникающих в тяговом электродвигателе.

Математические зависимости для описания процессов имитационных моделей приведены в [12].

Для проведения имитационного моделирования за основу была взята структурная схема электромеханической трансмиссии гусеничной машины (рисунок 3), состоящей из дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) «КамаЗ 740.75» мощностью 320 кВт при 2000 об/мин, генератора (Г) с возбуждением от постоянных магнитов (генератор вырабатывает электрическую энергию номинальной мощностью 300 кВт (до 800 В переменного тока при частоте вращения 2000 об/мин), вы-

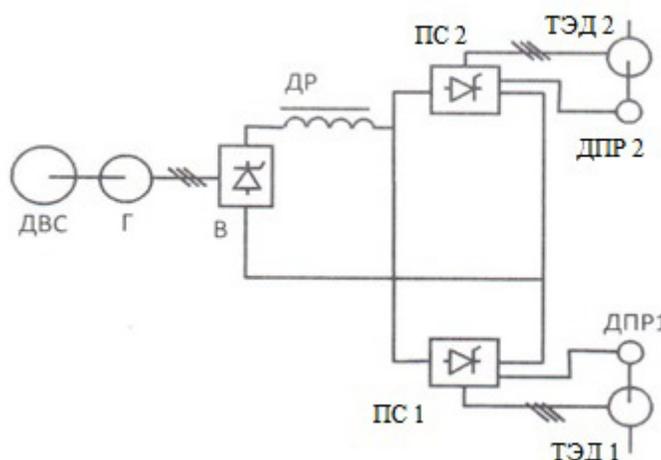


Рисунок 3 – Структурная схема электромеханической трансмиссии ГМ

Figure 3 – Block diagram of GM electromechanical transmission

Таблица
Характеристики типовой трассы и цикла движения

Table
Characteristics of the reference line and cycle

№ 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	0,5–70
			1.2	Постоянная скорость	-	70
			1.3	Поворот	-	60
			1.4	Замедление	-2,0	70–15

прямителя (В), двух тяговых электродвигателей (ТЭД) с датчиками положения ротора (ДПР), установленных по бортовой схеме и снабженных преобразователями силовыми (ПС). ТЭД представляет собой бесконтактную трехфазную электрическую машину с постоянными магнитами на роторе. Тяговые электродвигатели имеют обмотки с выделенными для внешнего подключения выходами с шести витков и с двух витков. Таким образом, при разгоне гусеничного шасси возможно переключение обмоток электродвигателя с 6 витков на 2 витка, обеспечивая тем самым постоянную мощность на электродвигателях во всем диапазоне скоростей гусеничного шасси. Номинальная мощность электродвигателя – 150 кВт, кратковременная мощность – 200 кВт.

Кроме того, для проведения имитационного моделирования были использованы следующие исходные данные:

- тип гусеничной машины – многоцелевой транспортер легкобронированный (МТ-ЛБу): общая масса машины 15 т, в том числе 11 т – собственная масса, 4 т – грузоподъемность;
- скорость движения до 70 км/ч;

- типовая трасса [11]: фрагмент, требующий наибольшего ускорения и поворот $r = 104$ м.

На предлагаемом участке типовой трассы движение должно осуществляться согласно циклу: разгон – движение с постоянной скоростью – поворот – торможение (таблица).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью исследования алгоритма управления электромеханической трансмиссией является проверка работы реле-регулятора и магнитного потока генератора в условиях заряда накопителя энергии при рекуперативном торможении гусеничной машины.

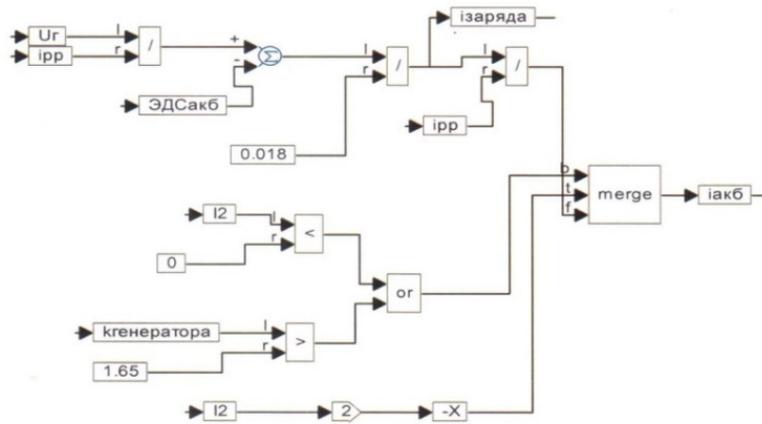


Рисунок 4 – Блок-схема вычисления силы тока накопителя энергии:
 i_{pp} – коэффициент усиления;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 k_g – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора;
 I_2 – ток, поступающий в тяговый электродвигатель левого борта, А;
 r – сопротивление, Ом; t – время, с; f – частота генерации;
 $\text{ЭДС}_{акб}$ – электродвижущая сила накопителя энергии

Figure 4 – Block diagram for calculating the current strength of the energy storage
 i_{pp} – amplification constant;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 k_g – constant determined by the magnetic flow of the generator;
 I_2 – current entering port side traction engine, А;
 r – resistance, Ом; t – generation frequency;
 $\text{ЭДС}_{акб}$ – electromotive power of the energy storage device

Управляющее воздействие на силовых преобразователях обоих бортов начинается в момент времени ($t = 5$ с), коэффициент усиления силового преобразователя изменяется с 1 до 2 за 1,7 с. Это приводит к снижению скорости машины с 65 км/ч до 32 км/ч. На рисунке 4 показана блок-схема вычисления силы тока перед реле-регулятором и силы зарядного тока непосредственно на накопитель энергии.

За счет введения в математическую модель регулирования магнитного потока генерато-

ра удалось при рекуперативном торможении предотвратить противоток в генераторе и направить всю электрическую энергию от тяговых электрических двигателей, работающих в генераторном режиме, только на заряд накопителя энергии (НЭ).

На рисунках 5 и 6 приведены блок-схемы вычисления ЭДС накопителя энергии (НЭ) в зависимости от степени заряженности НЭ и заряда накопителя энергии в процессе рекуперативного торможения.

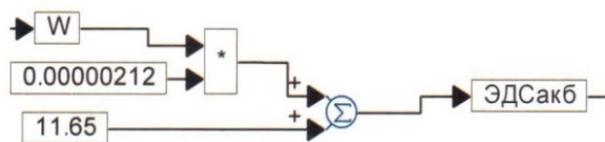


Рисунок 5 – Блок-схема вычисления ЭДС накопителя энергии:
 W – энергия заряда, Вт/ч

Figure 5 – Block diagram for calculating the EMF of the energy storage
 W -charge energy, W/h

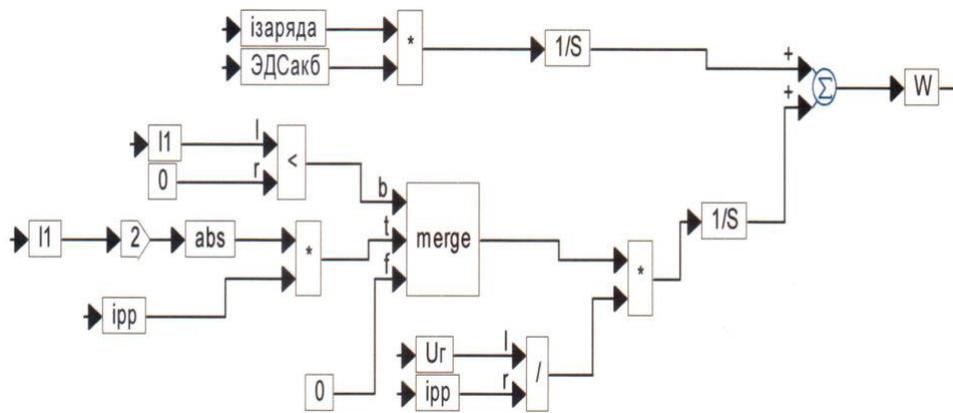


Рисунок 6 – Блок-схема вычисления заряда накопителя энергии:

i_{pp} – коэффициент усиления;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 $ЭДС_{акб}$ – электродвижущая сила накопителя энергии;
 I_1 – ток тягового электродвигателя правого борта, А;
 $i_{заряда}$ – ток заряда

Figure 6 – Block diagram for calculating the charge of the energy storage

i_{pp} – amplification constant;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 $ЭДС_{акб}$ – electromotive power of the energy storage device;
 I_1 – starboard traction motor current, А;
 $i_{заряда}$ – current charge

Интерес представляют зависимости ЭДС в процессе совместной работы генератора и НЭ на тяговые электродвигатели (рисунок 7). В интервале времени $t = 4,5 \dots 13,6$ с энергетическая установка работает в «гибридном

режиме». ЭДС генератора почти совпадает с ЭДС накопителя энергии, а они выше ЭДС тяговых электродвигателей, что соответствует физическому смыслу процесса.

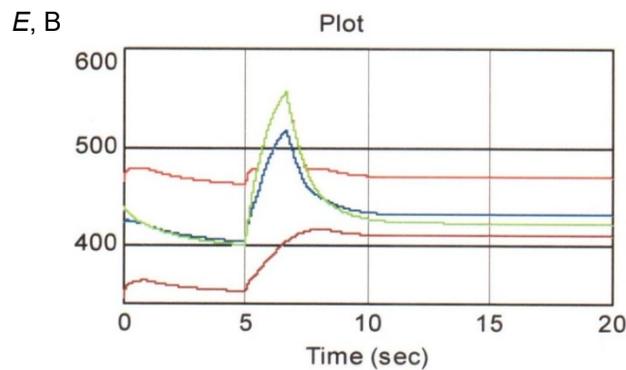


Рисунок 7 – Изменение ЭДС генератора, накопителя энергии и тягового электрического двигателя при совместной работе:

– ЭДС левого и правого тяговых электродвигателей;
 – ЭДС генератора;
 – ЭДС накопителя энергии

Figure 7 – Modification of the EMF of the generator, the energy storage device and the traction electric motor in joiny work

– EMF of the left and right traction electric motors;
 – EMF of the generator;
 – EMF of the energy accumulator

На рисунке 8 приведен график изменения коэффициента усиления реле-регулятора, а на рисунке 9 график изменения момента дизель-генератора во времени. Момент дизель-генератора ограничен корректурной характеристикой, что и заложено в алгоритме управления реле-регулятора в «гибридном режиме».

На рисунке 10 представлен график заряда накопителя энергии. При подключении второго потока мощности тратится почти 100 кДж, которые постепенно восполняются при достаточно равномерном движении (до 5 с и после 14 с).

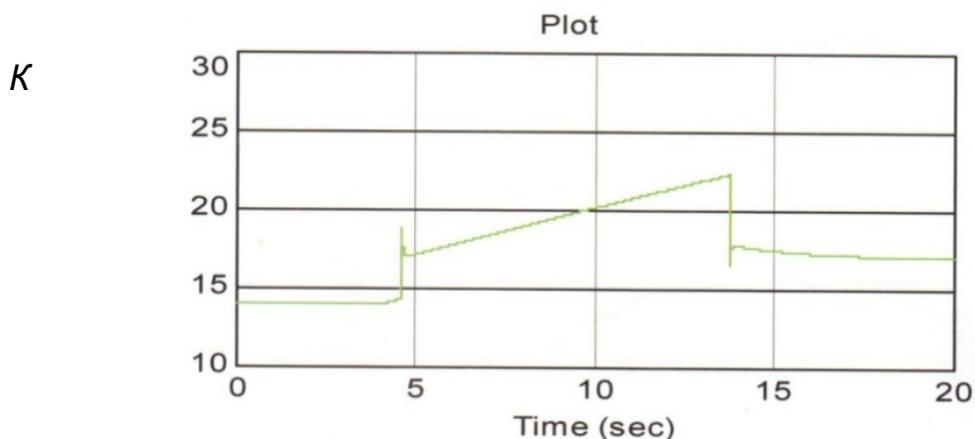


Рисунок 8 – Изменение коэффициента усиления реле-регулятора во времени

Figure 8 – Change of the relay controller gain over time

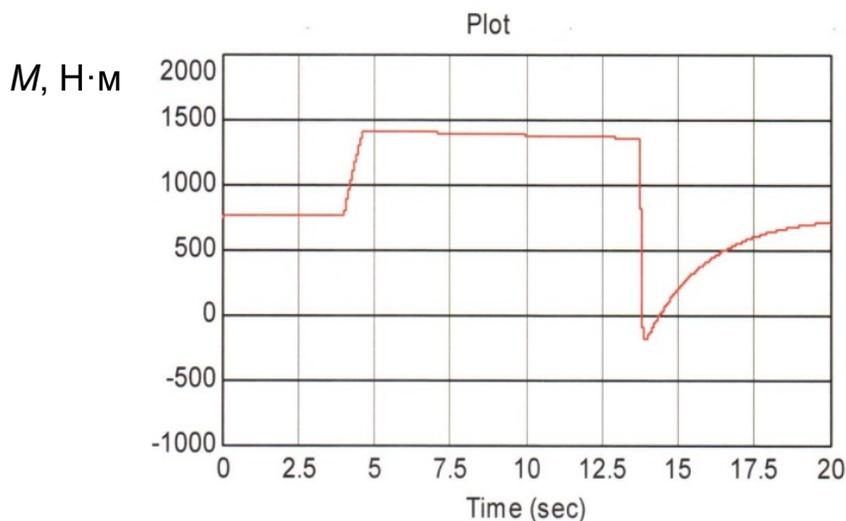


Рисунок 9 – Изменение момента дизель-генератора во времени

Figure 9 – Diesel generator torque change over time

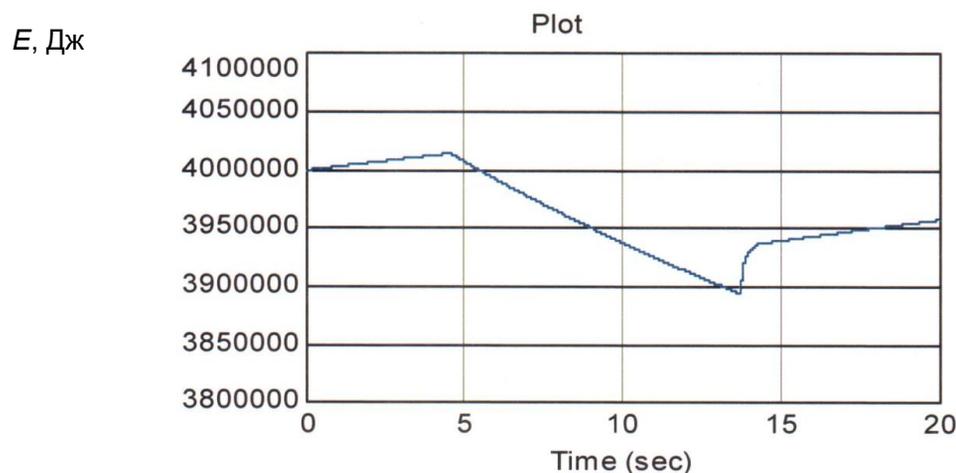


Рисунок 10 – Изменение заряда накопителя энергии во времени

Figure 10 – Changing the charge of the energy storage unit over time

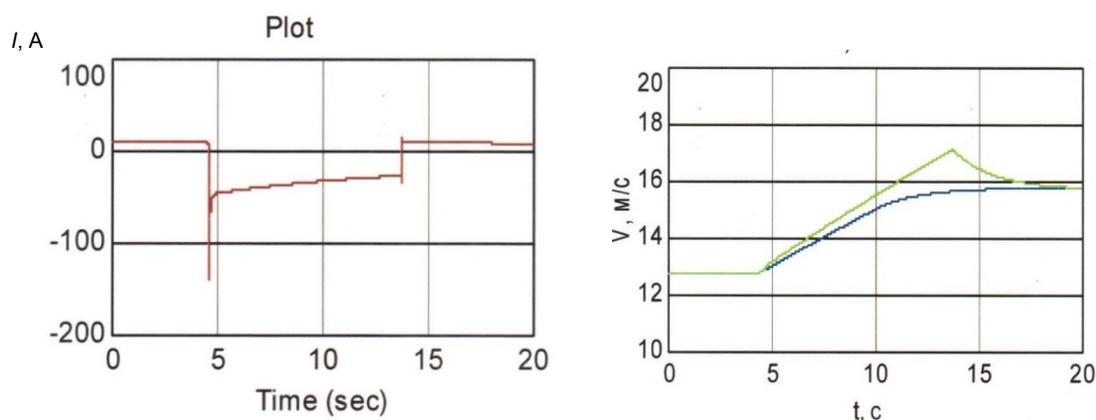


Рисунок 11 – Изменение тока разряда накопителя энергии и изменение скорости движения гусеничной машины во времени

Figure 11 – Changing the discharge current of the energy storage device and changing the speed of the tracked vehicle unit over time

На рисунке 11 приведены графики тока разряда НЭ и скорости гусеничной машины. Для сравнения на графике скорости гусеничной машины дана 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%.

Особый интерес представляет криволинейное движение гусеничной машины с электромеханической трансмиссией, так как поворот может осуществляться за счет торможения отстающего борта замыканием тягового электродвигателя (ТЭД) на активное сопротивление. Как результат, можно получить определенное количество рекуперативной электрической энергии.

Для перевода в режим рекуперации тягового электродвигателя необходимо, чтобы его частота вращения стала выше частоты вращения идеального холостого хода. Данное условие реализовано с помощью силового преобразователя, изменяющего соотношения тока и напряжения (рисунок 12).

Поворот гусеничной машины происходит за счет снижения тока правого тягового электродвигателя до нуля. Торможение тяговых электродвигателей происходило за счет работы силовых преобразователей.

В программе реализовано переключение коэффициента трансформации $i_{тр}$ в момент времени ($t = 5$ с) и дальнейший вход машины в поворот ($r = 9$ м). Заданы следующие условия дороги: коэффициент передвижения $\Psi_{мин} = 0,12$ как на правой гусенице, так и на левой; коэффициент сцепления суммарный $\varphi_{max} = 0,65$; коэффициент сопротивления повороту $\mu_{max} = 0,7$. Тяговые электродвигатели работают в режиме небольших скоростей при $k = 2,95$,

где коэффициент k является произведением $C_e \cdot \Phi_{эд}$ (C_e – постоянная величина для данного типа электродвигателя, $\Phi_{эд}$ – магнитный поток электродвигателя). Поворот осуществляется на скорости движения в 4 м/с.

При положительном токе I_2 ТЭД питается от дизель-генератора, а при отрицательном I_1 – при рекуперативном торможении возвращает энергию в сеть. Отличие в данном способе управления тяговыми электродвигателями зависит от направления тока тягового электродвигателя отстающего борта.

Энергия, которая возвращается от тяговых электродвигателей, заряжает накопитель энергии. Дизель-генератор в свою очередь переходит на режим экономичного расхода топлива.

На рисунке 13 приведены результаты изменения коэффициента трансформации во времени, полученные в результате имитационного моделирования криволинейного движения гусеничной машины.

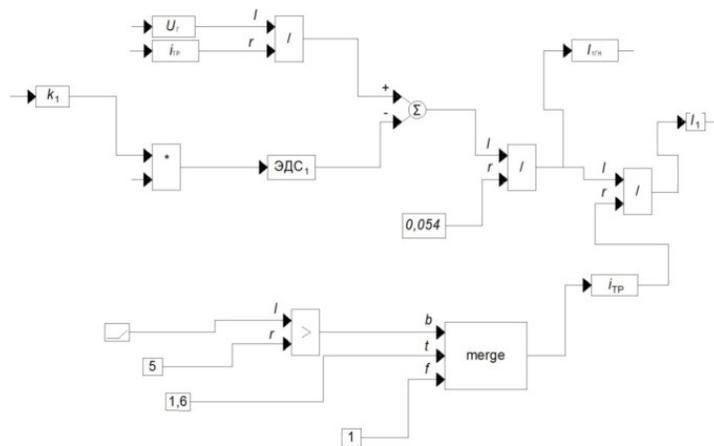


Рисунок 12 – Блок-схема системы управления поворотом гусеничной машины:

$i_{тр}$ – коэффициент трансформации;
 U_r – напряжение на клеммах генератора, В;
 k_r – коэффициент, определяемый магнитным потоком генератора;
 $I_{1ГН}$ – ток, поступающий в ТЭД 1, работающий в генераторном режиме, А;
 I_1 – ток, поступающий в тяговый электродвигатель правого борта, А;
 r – сопротивление, Ом; t – время, с; f – частота генерации;
 $ЭДС_1$ – электродвижущая сила генератора

Figure 12 – Block diagram of a tracked vehicle steering control system

$i_{тр}$ – transformation ratio;
 U_r – voltage on generator terminals, В;
 k_r – constant determined by the magnetic flow of the generator;
 $I_{1ГН}$ – current entering the TEM 1, working in a generating mode, А;
 I_1 – current entering starboard traction engine, А;
 r – resistance, Ом; t – time, с; f – generation frequency;
 TEM_1 – generator electromotive force

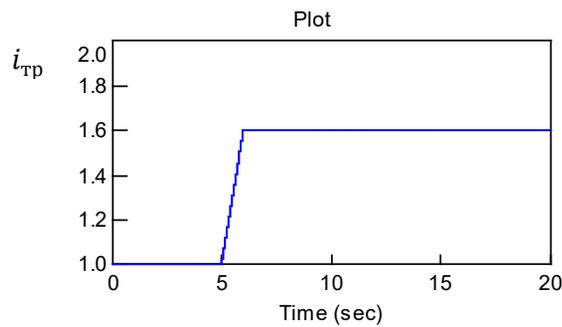


Рисунок 13 – Изменение коэффициента трансформации во времени

Figure 13 – Change in the transformation ratio over time

Изменение коэффициента трансформации привело к изменению величин токов I_1 и I_2 (рисунок 14).

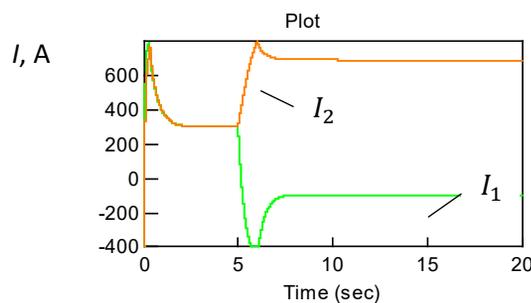


Рисунок 14 – Изменение токов тяговых электродвигателей во времени

Figure 14 – Changes in the currents of traction motors over time

По энергетическим же показателям, то есть по затратам мощности на поворот, рекуперативное торможение характеризуется зависимостями, приведенными на рисунке 15.

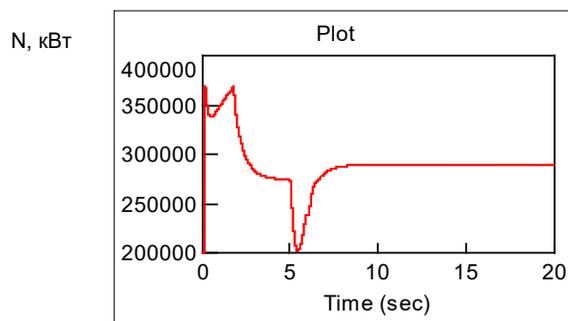


Рисунок 15 – Изменение мощности дизель-генератора при рекуперативном торможении

Figure 15 – Change in the power of the diesel generator with regenerative braking

Интерес представляет мощность рекуперации при движении гусеничной машины с большой скоростью и малой кривизной (минимальный радиус – 104 м, скорость на прямолинейном участке – 18 м/с, скорость при повороте – 17,4 м/с) (рисунок 16) и работе тяговых электродвигателей при режиме больших скоростей (при $k = 0,98$; $R = 0,018$ Ом).

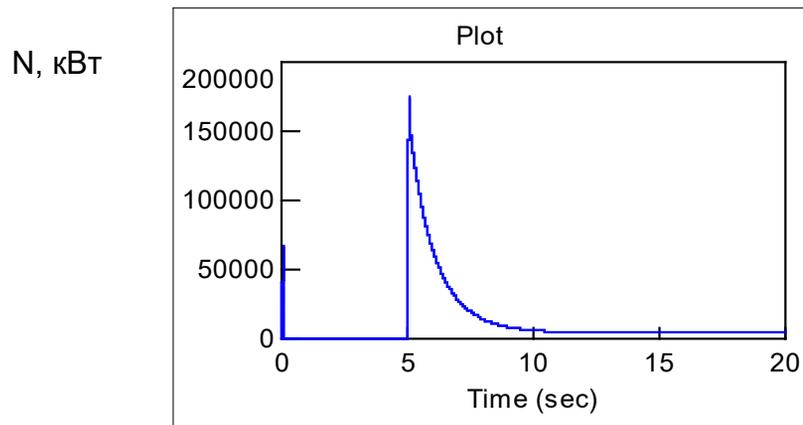


Рисунок 16 – Изменение мощности рекуперации при движении гусеничной машины со скоростью 18 м/с

Figure 16 – Change in recuperation power driving tracked vehicle with a speed of 18 m / s

Мощность, передаваемая тяговым электродвигателем забегающего борта при скорости машины, равной 18 м/с в установившемся радиусе поворота $r = 104$ м, составляет 170 кВт. В процессе входа в поворот рекуперативная мощность, как видно из рисунка 16, составляет 150 кВт, в установившемся повороте – 5 кВт.

Целью проведения имитационного моделирования буксования гусеничной машины являлось получение количественных значений механических потерь на буксование, а также электрических и магнитных потерь, возникающих в тяговых электрических двигателях.

На рисунках 17 и 18 даны блок-схемы определения коэффициента буксования и силы тяги по бортам.

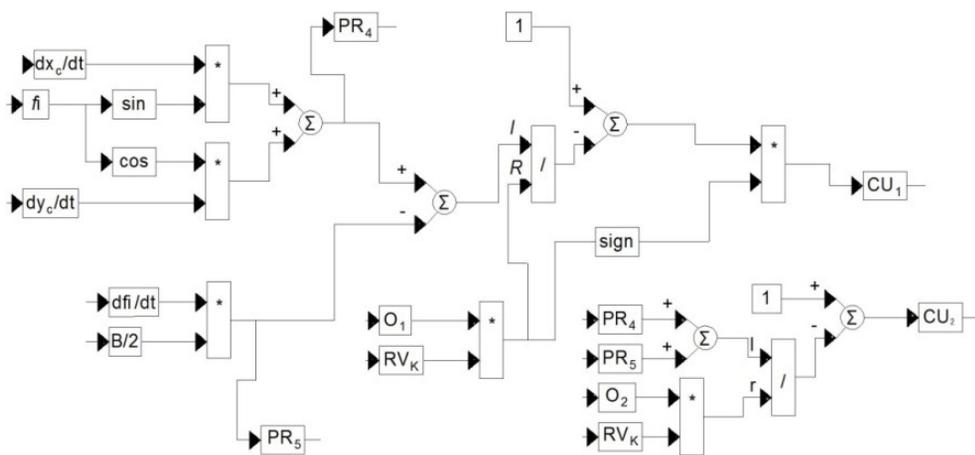


Рисунок 17 – Блок-схема определения коэффициента буксования:

PR_4 – боковая сила инерции правого борта, Н;
 PR_5 – боковая сила инерции левого борта, Н;
 RV_k – радиус ведущего колеса, м;
 CU_1 – буксование гусениц правого борта;
 CU_2 – буксование гусениц левого борта

Figure 17 – Block diagram for determining the slip coefficient

PR_4 – starboard lateral inertia, Н;
 PR_5 – lateral force of port inertia, Н;
 RV_k – drive wheel radius, m;
 CU_1 – starboard tumbling;
 CU_2 – port side tug

Потери на буксование в период разгона составляют более 20 кВт (см. рисунок 20).

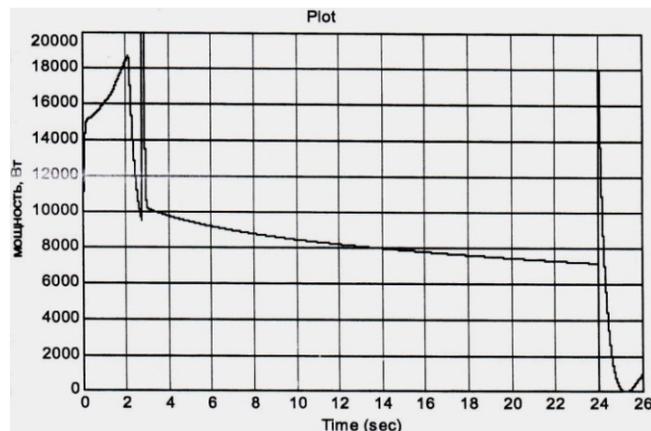


Рисунок 20 – Изменение мощности потерь на буксование

Figure 20 – Change in power slip losses

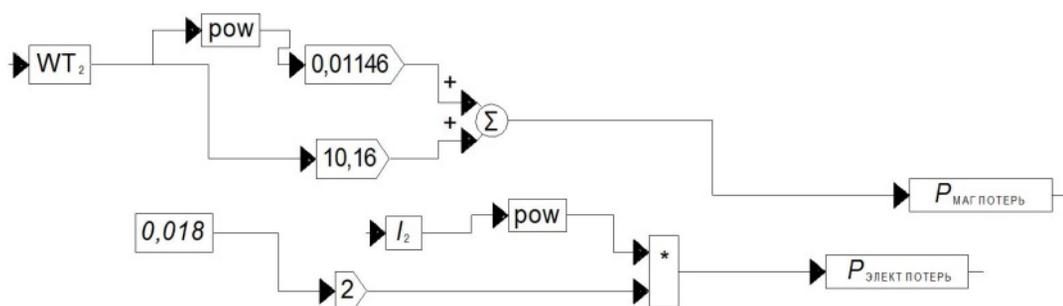


Рисунок 21 – Блок-схема определения магнитных и электрических потерь в тяговых электродвигателях:

WT_2 – энергия тягового электродвигателя левого борта при торможении, Вт/кг;
 I_2 – сила тока тягового электродвигателя левого борта, А;
 $P_{\text{МАГ. ПОТЕРЬ}}$ – мощность магнитных потерь ТЭД, Вт/кг;
 $P_{\text{ЭЛЕКТ. ПОТЕРЬ}}$ – мощность электрических потерь ТЭД, Вт

Figure 21 – Block diagram of the determination of magnetic and electrical losses in traction motors
 WT_2 – energy of left-hand drive electric motor during braking, W/kg;
 I_2 – port side traction motor current, A;
 $P_{\text{МАГ. ПОТЕРЬ}}$ – TEM magnetic loss rate, W/kg;
 $P_{\text{ЭЛЕКТ. ПОТЕРЬ}}$ – TEM electrical loss power, W

Таким образом, потери на буксование являются весомой величиной. В заданных условиях по динамическим требованиям к гусеничной машине, участках разгона с «тяжелым грунтом» составляют 20 кВт при заданной мощности тяговых электродвигателей 150 кВт.

На рисунке 21 приведена блок-схема определения магнитных и электрических потерь.

На рисунке 22 даны количественные значения магнитных и электрических потерь в тяго-

вом электродвигателе при движении машины в различных режимах (разгон, движение с постоянной скоростью, торможение).

Как видно из рисунка 22, магнитные и электрические потери достигают максимальных значений в процессе разгона и торможения машины: до 20 кВт. При установившемся движении магнитные и электрические потери достигают значений 10 кВт в каждом тяговом электродвигателе.

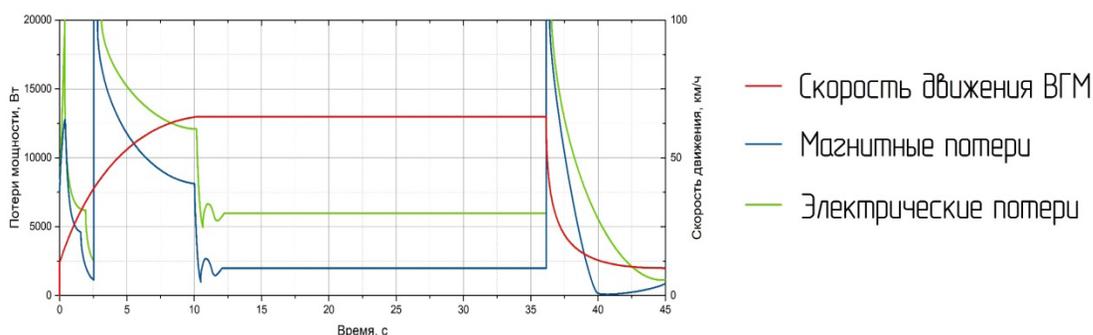


Рисунок 22 – Магнитные и электрические потери в тяговых электродвигателях при движении машины в различных режимах

Figure 22 – Magnetic and electrical losses in traction motors when the car is moving in various modes

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведения имитационного моделирования было установлено, что потери на буксование в переходных процессах достигают до 15% от мощности тяговых электродвигателей. Это подтверждает необходимость учета указанных потерь при расчете энергетических показателей тяговых электродвигателей.

2. Имитационное моделирование показало, что магнитные и электрические потери в тяговых электродвигателях в установившемся режиме движения составляют 7% мощности каждого тягового электродвигателя, а в переходных режимах достигают 14% мощности каждого тягового электродвигателя. Соответственно необходимо учитывать их при расчете энергетических характеристик тяговых электромашин.

3. В ходе проведения имитационного моделирования было установлено, что применение разработанного алгоритма управления электромеханической трансмиссией позволяет дизель-генератору работать по экономической характеристике, что обеспечивает минимальный расход топлива в заданных режимах движения.

4. В результате проведенного имитационного моделирования был исследован алгоритм управления электромеханической трансмиссией. Сформулировано условие подключения второго потока мощности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 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.
- Кулаков Н.А., Селифонов В.В., Черанев С.В. Выбор оптимальной конструкции механической части электрической трансмиссии специального колесного шасси 8x8 // Известия МГТУ «МАМИ». 2010. № 1. С. 78–82.
- Гомберг Б.Н., Кондаков С.В., Носенко Л.С. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с электрической трансмиссией // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2012. 18 (37). С. 73–81.
- Лепешкин А.В. Критерии оценки энергоэффективности многоприводных колесных машин // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 19–23.
- 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.
- 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.
- 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.

8. Романенко Р.В., Сергеев В.В. Моделирование криволинейного движения роботизированной военной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Робототехника и техническая кибернетика. 2020. 8.(1). С. 34–40.

9. 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. 2018. № 12. С. 21–26.

10. Романенко Р.В., Дружинин П.В. Обоснование типовых циклов движения военных гусеничных машин с электромеханической трансмиссией // Актуальные вопросы перспективных направлений применения ВВСТ. 2019. С. 113–117.

11. Кузнецова В.Н., Романенко Р.В. Основные аспекты методики обоснования эксплуатационных характеристик гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Вестник СибАДИ. 2020. 17 (5). С. 574–584.

12. Кондаков С.В., Павловская О.О. Исследование поворота энергоэффективной быстроходной гусеничной машины с интеллектуальной электрической трансмиссией // Вестник машиностроения. 2014. №11. С. 51–55.

REFERENCES

1. 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.

2. Kulakov N.A., Selifonov V.V., Cheranyov S.V. Vybór optimal'noj konstrukcii mekhanicheskoy chasti elektricheskoy 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)

3. Gomberg B.N. Imitating modelling of the movement of a fast-moving tracked vehicle fitted with electrical transmission / B.N. Gomberg, S.V. Kondakov, L.S. Nosenko // *Bulletin of South Ural State University. Power Engineering series*. 2012; 18(37): 73-81.

4. Lepeshkin A.V. Kriterii ocenki energoeffektivnosti mnogoprivodnykh kolesnykh mashin [Criteria for evaluating the energy efficiency of multi-drive wheeled vehicles]. *Automotive industry*. 2010; 10: 19-23. (In Russian)

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

6. Savinkin V.V. Razrabotka konstrukcii gibridnogo privoda povorotnoj platformy zemlerojnoj mashiny dlya vypolneniya stroitel'nykh rabot [Development of

the design of a hybrid drive of a rotary platform of an earthmoving machine for performing construction work] / V.V. Savinkin, V.N. Kuznetsova // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2015; 1 (41): 17-24. (In Russian)

7. Isakov P.P. Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov. Teoriya i raschyot [Electromechanical transmissions of tracked tractors. Theory and calculation] / P.P. Isakov, P.N. Ivanchenko, A.D. Egorov. L. : *Mechanical engineering*. 1981.302 p. (In Russian)

8. 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.

9. Romanenko R.V. Modelirovanie krivoliniynogo dvizheniya robotizirovannoy voennoj gusenichnoj mashiny s elektromekhanicheskoy transmissiej [Modeling curvilinear movement of a robotic military tracked vehicle with electromechanical transmission] / R.V. Romanenko, V.V. Sergeev // *Robotics and technical cybernetics*. Volume 8. No. 1. SPb. : TsNII RTK. 2020: 34-40. (In Russian)

10. Romanenko R.V. Obosnovanie tipovykh ciklov dvizheniya voennykh gusenichnykh mashin s elektromekhanicheskoy transmissiej [Substantiation of typical movement cycles of military tracked vehicles with electromechanical transmission] // *Aktual'nye voprosy perspektivnykh napravlenij primeneniya VVST*. 2019: 113-117. (In Russian)

11. Kuznetsova V.N. The main aspects of the methodology for substantiating the operational characteristics of a tracked vehicle with an electromechanical transmission / V.N. Kuznetsova, R.V. Romanenko // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17(5): 574-584.

12. Kondakov S.V. Investigation of the turn of an energy-efficient high-speed tracked vehicle with an intelligent electric transmission / S.V. Kondakov, O.O. Pavlovskaya // *Bulletin of mechanical engineering № 11*. - Chelyabinsk: YuGU, 2014: 51-55.

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

Victoria N. Kuznetsova, the research problem formulation, the area of the subject of research formulation, the theme development process guideline, the choice of research methodology and methods (50%).

Roman V. Romanenko, the review of the results of previous studies, research tasks statement, the algorithm for analytical studies formulation, the results and conclusions (50%) formulation.

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, Омск, Военный 14-й городок, 119, roman82enko@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victoria N.Kuznetsova, Dr. of Sci., Professor, of the Operation and service of transport-technological machines and complexes in construction Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Scopus Author ID 8671569200(644080, Omsk, Mira ave., 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).

Roman V.Romanenko, Senior lecturer of the 7th repair of armored and automobile equipment department, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute, a branch of General of the Army A.V. Khrulev Military Academy of Logistics (VA MTO) (644098, Omsk, Military 14th town, 119, roman82enko@mail.ru).