

Частичная оценка целесообразности применения электрической трансмиссии быстроходных гусеничных машин

© О.А. Наказной¹, С.А. Харитонов¹, В.А. Никитин²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²Научно-исследовательский институт двигателей, Москва, 127055, Россия

Одно из преимуществ применения электромеханических передач в трансмиссиях транспортных машин заключается в возможности рекуперации кинетической энергии. Цель исследования — оценка возможности рекуперации кинетической энергии в быстроходных гусеничных машинах для ее последующего преобразования в движение. Предметом исследования является работа внешних и внутренних сил сопротивления, на преодоление которых затрачивается эффективная мощность двигателя при движении гусеничной машины. Выполнены расчеты рекуперированной энергии для конкретных условий и с учетом совокупности дорожно-грунтовых условий.

Ключевые слова: транспортная машина, электромеханическая передача, гусеничная машина.

К числу преимуществ применения электромеханических передач в трансмиссиях транспортных машин относится возможность рекуперации кинетической энергии. Нашли практическое воплощение системы, построенные на основе электромеханических трансмиссий для автомобилей, у которых предусмотрена возможность рекуперации энергии торможения. Эти системы получили название гибридов, или комбинированных энергетических установок. Однако оценка возможностей быстроходных гусеничных машин рекуперировать кинетическую энергию в целях ее последующего преобразования для движения не проводилась. Существуют различные, даже диаметрально противоположные, точки зрения об эффективности такой рекуперации, поэтому данный вопрос остается открытым.

Основным предметом исследования являются внешние и внутренние силы сопротивления, на преодоление которых затрачивается эффективная мощность двигателя при движении гусеничной машины. К внешним силам относится сила сопротивления грунта, которая связана с работой, затраченной на его деформирование. Под внутренними силами сопротивления подразумеваются потери мощности в силовой цепи: гусеничном движителе и затраты мощности на преодоление сил сопротивления в механизмах и агрегатах трансмиссии.

Сопротивление грунта зависит от конструктивных параметров гусеничного движителя, свойств грунта и скорости машины. На ос-

новании экспериментальных данных можно считать, что сила сопротивления грунта $R_{гр}$ пропорциональна нормальной реакции N :

$$R_{гр} = f_{гр} N,$$

где $f_{гр}$ — коэффициент сопротивления грунта.

Ниже приведены экспериментальные значения $f_{гр}$ для грунтов различных типов:

Асфальт.....	0,03 – 0,05
Грунтовая дорога:	
сухая.....	0,06 – 0,07
грязная	0,12 – 0,15
Луговина.....	0,08 – 0,10
Песок.....	0,15 – 0,20
Снег.....	0,10 – 0,25

Для оценки работы, затрачиваемой на преодоление внутренних потерь в гусеничном движителе, необходимо определить силы сопротивления движителя. Затраты мощности в гусеничном движителе зависят от различных конструктивных параметров, а также от скорости и веса машины, тягового усилия на ведущих колесах и ряда других факторов, учесть которые весьма трудно. Поэтому при выполнении расчетов применяют эмпирические зависимости. Однако для дальнейших исследований необходимо получить аналитическую зависимость.

Определим силу сопротивления $R_{г.д}$ гусеничного движителя, исходя из понятия удельных потерь $f_{г.д}$ в гусеничном движителе по аналогии с понятием удельной силы тяги:

$$f_{г.д} = R_{г.д} / G,$$

где G — вес гусеничной машины.

Тогда силу сопротивления в гусеничном движителе можно представить в виде

$$R_{г.д} = f_{г.д} G.$$

В основу оценки возможности рекуперации энергии в быстроходных гусеничных машинах положен физический смысл работы всех сил сопротивления как потерь энергии, которые не будут рекуперированы.

Энергия, затрачиваемая на преодоление сил сопротивления, в физическом смысле равна работе, совершаемой силами сопротивления по отношению к объекту.

Тогда, согласно принципу Даламбера, энергия ΔE , оставшаяся в системе после воздействия на машину внешних сил сопротивления $R_{\text{сопр}}$, равна разности между полной кинетической энергией системы $E_{\text{кин}}$ и работой $A_{\text{сопр}}$, совершаемой силами сопротивления. Примем допущение, что всю оставшуюся энергию в системе можно рекуперировать. Тогда

$$\Delta E = E_{\text{кин}} - A_{\text{сопр}}. \quad (1)$$

В свою очередь,

$$A_{\text{сопр}} = R_{\text{сопр}} S, \quad (2)$$

где S — путь, на котором совершается работа.

В основу данного исследования положим принцип, заключающийся в сравнении полученных значений ΔE и $E_{\text{кин}}$.

Оценка возможности рекуперации энергии в гусеничных машинах осуществлялась с использованием двух подходов: детерминистического и статистического.

Детерминистический подход основан на анализе движения машины в конкретных дорожно-грунтовых условиях на заданных режимах.

Так, было принято, что машина массой 50 т движется со скоростью 36 км/ч. Возможность рекуперации оценивали для грунтов трех типов: асфальт, суглинок и снег. Каждый тип грунта характеризуется определенным значением коэффициента сопротивления. Естественно, наибольшее значение рекуперированной энергии реализуется при движении машины в хороших дорожно-грунтовых условиях — по твердому покрытию (бетон, асфальт), поскольку в таких условиях сопротивление грунта движению будет минимальным, при этом основные потери будут в ходовой части и в силовой цепи от двигателя к ведущим колесам.

Статистический подход основывается на применении графоаналитического метода для определения средней технической скорости быстроходной гусеничной машины.

Возможность рекуперации энергии зависит от следующих факторов:

- закон управления движением;
- внешние условия движения;
- конструкция ходовой части машины;
- конструкция силовой цепи от двигателя до ведущих колес.

Можно выделить три закона управления движением:

1) остановка с рекуперацией энергии. Допустим, что накопленная машиной кинетическая энергия полностью рекуперирована, пройденный до остановки путь равен нулю. Следовательно, в этом случае всю кинетическую энергию машины можно рекуперировать:

$$\Delta E = E_{\text{кин}};$$

2) движение машины по инерции. Остановка машины достигается отключением главного фрикциона или ведущих колес от трансмиссии. Запас кинетической энергии машины, определяемый ее скоростью в момент выключения фрикциона, будет израсходован на преодоление сил сопротивления на всем пути до полной остановки машины;

3) замедление движения с использованием остановочных тормозов. Фрикционные элементы в тормозном устройстве пробуксовывают.

Наряду с законом управления возможность рекуперации определяется и внешними дорожно-грунтовыми условиями. Чем ниже коэффициент сопротивления грунта, тем меньше силы сопротивления при движении машины, а значит, больше энергия ΔE .

Конструкция ходовой части машины также влияет на рекуперацию кинетической энергии машины.

Запас кинетической энергии. Кинетическая энергия гусеничной машины

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2},$$

где $m = 50\,000$ кг — масса машины; $v = 36$ км/ч = 10 м/с — скорость машины.

Для заданных условий

$$E_{\text{кин}} = \frac{50\,000 \cdot 10^2}{2} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Анализ внешних и внутренних потерь на преодоление сопротивления движению. Рассмотрим дифференциальное уравнение движения гусеничной машины в общем виде для горизонтальной поверхности:

$$m\ddot{x} = \sum_{i=1}^n F_i,$$

где F_i — сила, действующая на машину.

В данном случае действующие силы: P_T — сила тяги; $R_{гр}$ — сила сопротивления грунта; $R_{г.д}$ — сила сопротивления гусеничного движителя.

Тогда

$$m\ddot{x} = P_T - R_{гр} - R_{г.д}.$$

Поскольку рассматривается равнозамедленное движение машины, ведущие колеса отключены от трансмиссии, машина идет накатом, то

$$P_T = 0.$$

В свою очередь, по результатам исследований можно принять

$$f_{г.д} = A + Bf_{в.к} + Cv^2. \quad (3)$$

Здесь $A \approx 0,025$; $B \approx 0,05$; $C \approx 0,000003$ — эмпирические коэффициенты; $f_{в.к}$ — удельная сила тяги, развиваемая двигателем на ведущих колесах машины:

$$f_{в.к} = \frac{f_{гр}}{2\eta_{гус}}, \quad (4)$$

где $\eta_{гус}$ — КПД гусеницы.

На рис. 1 представлена зависимость удельного сопротивления $f_{г.д}$ гусеничных движителей от скорости v машины.

Для приближенных расчетов применяют зависимость КПД гусеницы от скорости:

$$\eta_{гус} = 0,95 - 0,05v.$$

На рис. 2 дана зависимость удельного сопротивления $f_{г.д}$ гусеничного движителя от скорости машины.

Расчет рекуперированной энергии при движении в конкретных дорожно-грунтовых условиях. Рассмотрим три типа грунтов: 1) асфальт; 2) суглинок; 3) снег. Выполним расчет рекуперированной энергии.

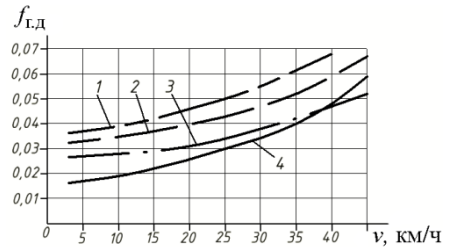


Рис. 1. Удельные потери в движителях различных гусеничных машин [1]:

1 — ГМ1; 2 — ГМ2; 3 — ГМ3; 4 — ГМ4

Исходные данные:

- $f_{гр}$ для конкретных дорожно-грунтовых условий;
- $G = 490\,500\text{ Н}$;
- $v = 36\text{ км/ч} = 10\text{ м/с}$;
- $\eta_{гус} = 0,77$.

1. Движение по асфальту. Для этих условий $f_{гр} = 0,03$.

Внешние и внутренние силы сопротивления

$$R_{сопр} = R_{гр} + R_{г.д} = (f_{гр} + f_{г.д})G. \quad (5)$$

Удельная сила тяги по формуле (4)

$$f_{в.к} = \frac{0,03}{2 \cdot 0,77} = 0,019.$$

Тогда удельные потери в гусеничном движителе по формуле (3)

$$f_{г.д} = 0,025 + 0,05 \cdot 0,019 + 0,000003 \cdot 36^2 = 0,03.$$

Подставим полученные значения в формулу (5):

$$R_{сопр} = (0,03 + 0,03) \cdot 490\,500 = 29\,430\text{ Н}.$$

Рассчитаем время движения машины до остановки.

В рассматриваемом случае дифференциальное уравнение движения машины

$$m\ddot{x} = R_{сопр}; \quad mdv = R_{сопр}dt;$$

$$\int_{v_0}^{v_k} \frac{mdv}{R_{сопр}} = \int_{t_0}^{t_k} dt.$$

Тогда время до остановки

$$\Delta t = \frac{m}{R_{сопр}}(v_n - v_k), \quad (6)$$

где v_n, v_k — начальная и конечная скорости машины.

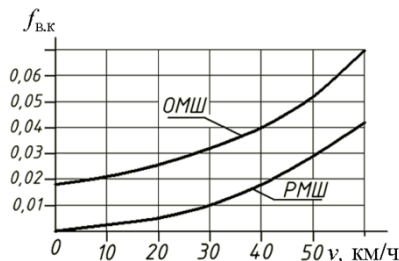


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления в ходовой части от скорости гусеничной машины [1]: ОМШ — открытый металлический шарнир; РМШ — резинометаллический шарнир

При $v_n = 10$ м/с, $v_k = 0$

$$\Delta t = \frac{50\,000}{29\,430} \cdot 10 = 17 \text{ с.}$$

Путь, пройденный машиной до остановки,

$$S = \frac{at^2}{2}, \quad (7)$$

где $a = -f_{гр}g$ — ускорение замедления машины, при $f_{гр} = 0,3$

$$a = -0,03 \cdot 9,81 = -0,3 \text{ м/с}^2.$$

Тогда

$$S = \frac{0,3 \cdot 17^2}{2} = 43 \text{ м.}$$

Работа, совершенная силами сопротивления на пройденном пути, на формуле (2)

$$A_{сопр} = 29\,430 \cdot 43 = 1,26 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Изменение кинетической энергии согласно формуле (1)

$$\Delta E = 2,5 \cdot 10^6 - 1,26 \cdot 10^6 = 1,24 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

2. Движение по суглинку. Для этих условий $f_{гр} = 0,08$.

Удельная сила тяги по формуле (4)

$$f_{в.к} = \frac{0,08}{2 \cdot 0,77} = 0,052.$$

Тогда удельные потери в гусеничном движителе в соответствии с формулой (3)

$$f_{г.д} = 0,025 + 0,05 \cdot 0,052 + 0,000003 \cdot 36^2 = 0,031.$$

С учетом вычисленных значений $f_{в.к}$ и $f_{г.д}$ силы внешнего и внутреннего сопротивления

$$R_{сопр} = (0,080 + 0,031) \cdot 490\,500 = 54\,450 \text{ Н.}$$

Время движения машины до остановки по формуле (6)

$$\Delta t = \frac{50\,000}{54\,450} \cdot 10 = 9 \text{ с.}$$

Согласно формуле (7), путь, пройденный машиной до остановки, при $a = -0,08 \cdot 9,81 = -0,8 \text{ м/с}^2$

$$S = \frac{0,8 \cdot 9^2}{2} = 32 \text{ м.}$$

Работа по формуле (2)

$$A_{\text{сопр}} = 54\,450 \cdot 32 = 1,74 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Изменение кинетической энергии в соответствии с формулой (1)

$$\Delta E = 2,5 \cdot 10^6 - 1,74 \cdot 10^6 = 7,6 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

3. *Движение по снегу.* Для этих условий $f_{\text{гр}} = 0,15$.

Удельная сила тяги по формуле (4)

$$f_{\text{в.к}} = \frac{0,15}{2 \cdot 0,77} = 0,097.$$

Тогда удельные потери в гусеничном движителе в соответствии с формулой (3)

$$f_{\text{г.д}} = 0,025 + 0,05 \cdot 0,097 + 0,000003 \cdot 36^2 = 0,034.$$

После подстановки рассчитанных значений $f_{\text{в.к}}$ и $f_{\text{г.д}}$ получим по формуле (5):

$$R_{\text{сопр}} = (0,15 + 0,03) \cdot 490\,500 = 90\,250 \text{ Н.}$$

Время движения машины до остановки согласно формуле (6)

$$\Delta t = \frac{50\,000}{90\,250} \cdot 10 = 6 \text{ с.}$$

В соответствии с формулой (7) путь, пройденный машиной до остановки, при $a = -0,15 \cdot 9,81 = -1,5 \text{ м/с}^2$

$$S = \frac{0,15 \cdot 6^2}{2} = 27 \text{ м.}$$

По формуле (2)

$$A_{\text{сопр}} = 90\,250 \cdot 27 = 2,44 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Изменение кинетической энергии согласно формуле (1)

$$\Delta E = 2,5 \cdot 10^6 - 2,44 \cdot 10^6 = 6 \cdot 10^4 \text{ Дж.}$$

Результаты вычислений и отношение $\Delta E / E_{\text{кин}}$ для рассмотренных дорожно-грунтовых условий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица результатов исследования

Грунт	$E_{\text{кин}}$, Дж	$R_{\text{сопр}}$, Н	$f_{\text{г.д}}$	S , м	$A_{\text{сопр}}$, Дж	ΔE , Дж	$\Delta E / E_{\text{кин}}$
Асфальт	$2,5 \cdot 10^6$	29 430	0,030	43	$1,26 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^6$	0,49
Суглинок	$2,5 \cdot 10^6$	54 450	0,031	32	$1,74 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^6$	0,30
Снег	$2,5 \cdot 10^6$	90 250	0,034	27	$2,44 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	0,02

При проведении исследования затраты мощности на преодоление сил сопротивления в механизмах и агрегатах трансмиссии не учитывались. Если ввести КПД трансмиссии

$$\eta_{\text{тр}} = \eta_{\text{б.п}} \eta_{\text{с.п.р}} \eta_{\text{ген}} = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,97 = 0,93,$$

где $\eta_{\text{б.п}}$, $\eta_{\text{с.п.р}}$, $\eta_{\text{ген}}$ — КПД соответственно бортовой передачи, суммирующего планетарного ряда и генератора, то значение рекуперированной энергии $E_{\text{рек}} = \Delta E \eta_{\text{тр}}$ окажется меньше (табл. 2).

Таблица 2

Результаты исследования с учетом $\eta_{\text{тр}}$

Грунт	ΔE , Дж	$\eta_{\text{тр}}$	$E_{\text{рек}}$, Дж	$E_{\text{рек}} / E_{\text{кин}}$
Асфальт	$1,24 \cdot 10^6$	0,93	$1,15 \cdot 10^6$	0,46
Суглинок	$7,6 \cdot 10^5$	0,93	$7,1 \cdot 10^5$	0,28
Снег	$6 \cdot 10^4$	0,93	$5,6 \cdot 10^4$	0,02

Диаграмма, приведенная на рис. 3, отображает соотношение рекуперированной энергии гусеничной машины с запасенной кинетической энергией для различных типов дорожно-грунтовых условий.

Расчет рекуперированной энергии по совокупности дорожно-грунтовых условий. В реальности гусеничная машина движется не по одному типу грунта, а по их совокупности. Каждая из групп дорожно-грунтовых условий характеризуется определенным значением математического ожидания сопротивлений движению и своими функциями распределения сопротивления на пути, полученными на основе обработки статистических данных. Анализируя частоту дорог с различными покрытиями, относящихся к разным группам дорожно-грунтовых условий с соответствующими значениями $f_{гр}$, можно получить функцию распределения для движения с учетом совокупности дорожно-грунтовых условий (рис. 4):

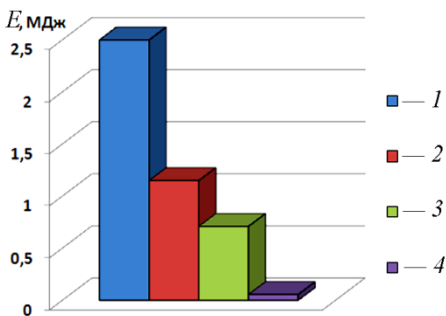


Рис. 3. Сравнение полной кинетической энергии (1) с рекуперированной энергией гусеничной машины при движении по асфальту (2), суглинку (3) и снегу (4)

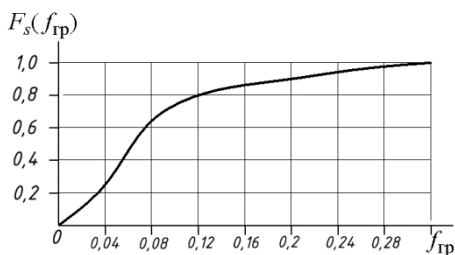


Рис. 4. Функция распределения коэффициента сопротивления грунта [2]

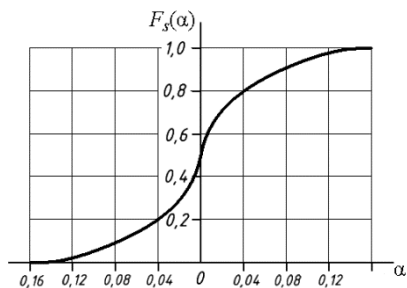


Рис. 5. Функция распределения углов подъема и спуска [2]

где φ_s — плотность распределения углов подъема и спуска.

При движении по местности или дорогам машина встречает также сопротивления, обусловленные углами подъемов и спусков. Суммарный коэффициент сопротивления движению

$$f_{гр} = f \cos \alpha + \sin \alpha.$$

Интегральный закон распределения углов α (рис. 5):

$$F_s(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} \varphi_s(\alpha) d\alpha.$$

Приняв, что $f_{гр}$ и α являются величинами независимыми, т. е. на местности с данными значениями $f_{гр}$ будут встречаться углы наклона α во всем диапазоне их возможных значений, можно определить функцию распределения суммар-

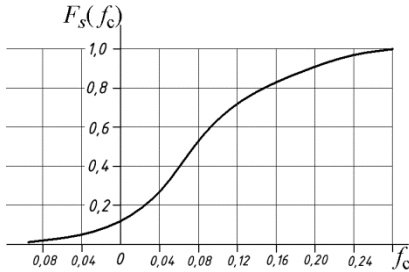


Рис. 6. Функция распределения суммарного коэффициента сопротивления грунта [2]

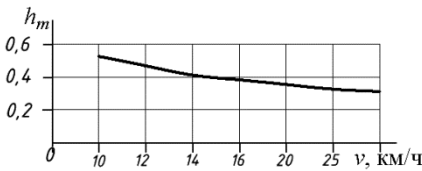


Рис. 7. Скоростная характеристика системы поддрессоривания гусеничной машины

висимость максимального значения высоты неровности h_m гармонического профиля местности от скорости при движении машины без жестких ударов балансиров катков в упоры при самых неблагоприятных скоростных режимах.

Наиболее просто скоростную характеристику получить при натурных испытаниях, по экспериментальным данным (рис. 7).

Построены функция распределения высот неровностей (рис. 8) и функция быстроходности гусеничной машины по заносу (рис. 9).

При определении средней технической скорости гусеничной машины графоаналитическим методом использованы данные, приведенные в табл. 3 и далее.

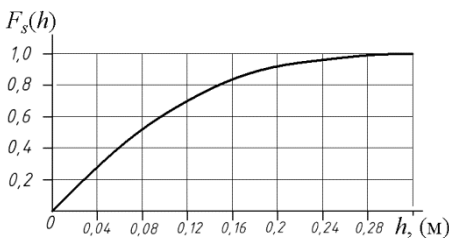


Рис. 8. Функция распределения высот неровностей [2]

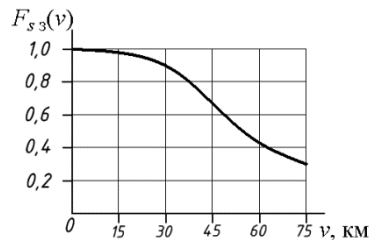


Рис. 9. Функция быстроходности гусеничной машины

Тяговая характеристика гусеничной машины на ведущих колесах

Передача	I			II			III			IV			V		
v , км/ч	3,8	5,3	7,8	8,1	11,4	16,3	11,3	17,0	22,7	16,0	25,5	31,9	25,0	40,0	50,0
$f_{в.к}$	0,53	0,49	0,37	0,25	0,23	0,17	0,18	0,16	0,12	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,055

При расчетах были учтены также удельные потери $f_{х.ч}$ в ходовой части:

v , км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70
$f_{х.ч}$	0,027	0,028	0,033	0,041	0,054	0,07	0,09	0,12

В качестве исследуемого образца принята машина с однопоточной схемой электромеханической трансмиссии.

Характеристики гусеничной машины приведены на рис. 10 и 11.

Для идеальной тяговой характеристики данной машины

$$f_d = \frac{N}{Gv}$$

построена функция быстроходности по всем ограничениям. На основании этого определено математическое ожидание условного коэффициента сопротивления грунта (рис. 12).

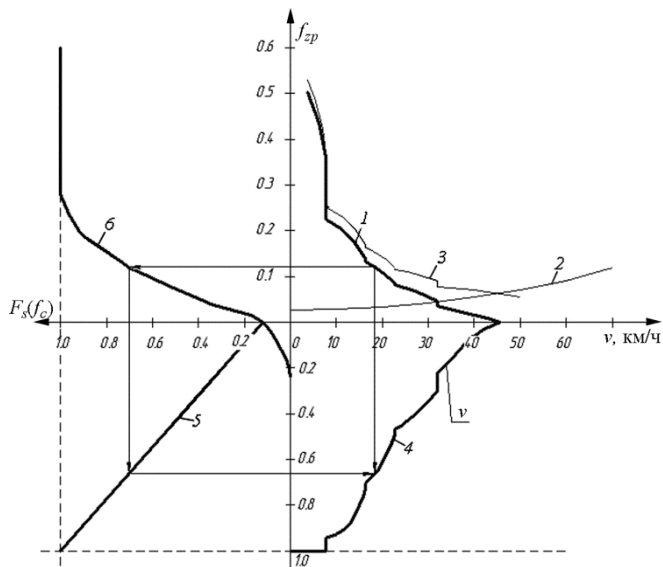


Рис. 10. Характеристики гусеничной машины:

- 1 — тяговая характеристика гусеничной машины на грунте;
- 2 — удельная сила тяги, развиваемая двигателем на ведущих колесах;
- 3 — удельные потери в гусеничном движителе;
- 4 — функция быстроходности по тяговым возможностям;
- 5 — вспомогательная линия;
- 6 — функция распределения суммарного коэффициента сопротивления грунта

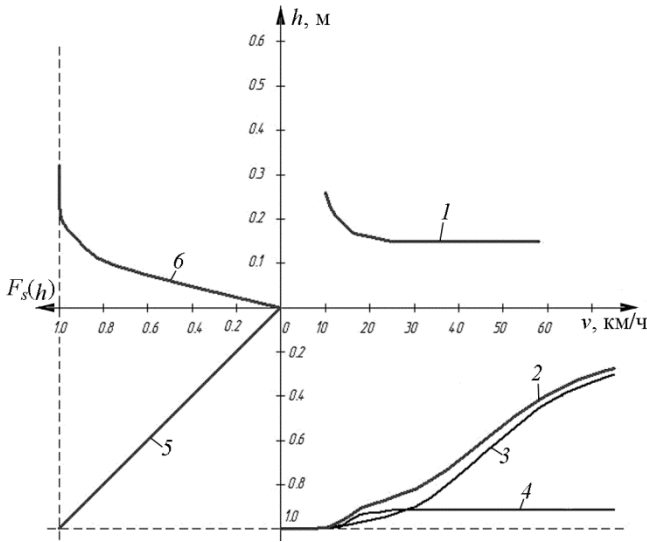


Рис. 11. Скоростная характеристика системы подрессоривания (1), функция быстроходности по прямым ограничениям (2), функция быстроходности по управляемости (3), функция быстроходности по плавности хода (4), вспомогательная линия (5), функция распределения высот неровностей (6)

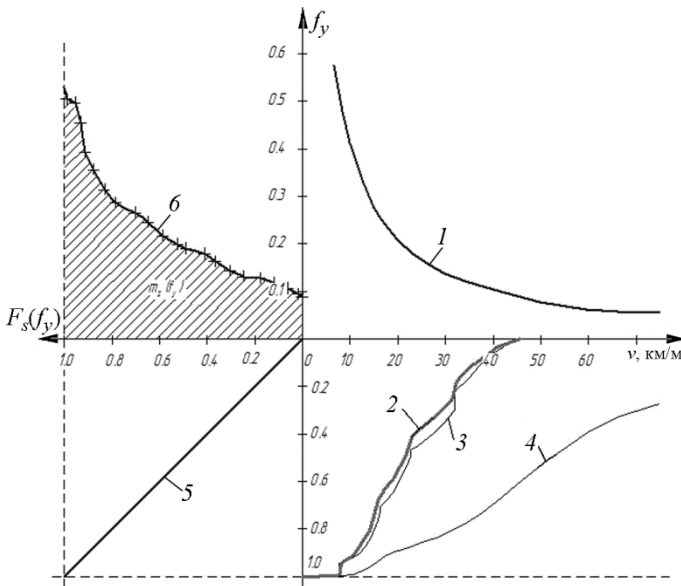


Рис. 12. Идеальная тяговая характеристика (1), функции быстроходности по тяге для реальной (2) и эквивалентной ей идеальной (3) трансмиссии, функция быстроходности по прямым ограничениям (4), вспомогательная линия (5), функция распределения условного коэффициента сопротивления грунта (6)

Математическое ожидание $m_s(f_y) = 0,284$.

Среднюю скорость вычислим по формуле А.А. Дмитриева:

$$v_{\text{ср}} = \frac{N_{\text{уд.гр}}}{m_s(f_y)},$$

где $N_{\text{уд.гр}} = N/G$.

При $N = 440$ кВт, $G = 490,5$ кН

$$v_{\text{ср}} = \frac{440 / 490,5 \cdot 3,6}{0,284} = 11,4 \text{ км/ч} \approx 3 \text{ м/с.}$$

Перейдем к расчету рекуперированной энергии при движении по совокупности грунтов.

Кинетическая энергия гусеничной машины массой 50 000 кг, движущейся со средней скоростью $v_{\text{ср}} = 3$ м/с,

$$E_{\text{кин}} = \frac{50\,000 \cdot 3^2}{2} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Внешние и внутренние силы сопротивления на основе формулы (5)

$$R_{\text{сопр}} = R_{\text{гр}} + R_{\text{г.д}} = (m(f_{\text{гр}}) + m(f_{\text{г.д}}))G,$$

где $m(f_{\text{гр}}) = 0,104$ — математическое ожидание коэффициента сопротивления грунта движению машины; $m(f_{\text{г.д}}) = 0,075$ — математическое ожидание удельных потерь в гусеничном движителе.

Подставив соответствующие значения в это выражение, получим

$$R_{\text{сопр}} = (0,104 + 0,075) \cdot 490\,500 = 87\,800 \text{ Н.}$$

Время движения машины до остановки по формуле (6)

$$\Delta t = \frac{50\,000}{87\,800} \cdot 3 = 1,7 \text{ с.}$$

В соответствии с формулой (6) путь, пройденный машиной до остановки, при ускорении замедления машины $a = -0,104 \cdot 9,81 = -1,0 \text{ м/с}^{-2}$

$$S = \frac{1,0 \cdot 1,7^2}{2} = 1,4 \text{ м.}$$

Работа, совершенная силами сопротивления на пройденном пути, по формуле (2)

$$A_{\text{сопр}} = 87\,800 \cdot 1,47 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Изменение кинетической энергии согласно формуле (1)

$$\Delta E = 2,25 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5 = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Дж;}$$

$$\Delta E = E_{\text{рек}} = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Дж.}$$

Средняя скорость машины значительно ниже максимальной, следовательно, уровень кинетической энергии машины, которая впоследствии рекуперирруется, невысок.

Как показал расчет, при движении по совокупности грунтов в действительности удастся рекуперировать около 5 % полной кинетической энергии машины.

Следует отметить, что расчет был выполнен для движения одиночной машины. При движении машины в колонне ее средняя скорость будет еще ниже, а следовательно, значение рекуперлируемой энергии уменьшится.

В результате применения статистического метода для оценки возможности рекуперации кинетической энергии гусеничной машины было установлено, что реальная скорость машины при движении по совокупности грунтов составляет 10...12 км/ч. При этом внешние и внутренние потери следует рассчитывать с учетом математического ожидания коэффициента сопротивления грунта $m(f_{\text{гр}}) = 0,104$ и математического ожидания удельных потерь в гусеничном двигателе $m(f_{\text{г.д}}) = 0,075$.

Определение потребной емкости накопителей энергии. В комбинированных силовых установках и электрических трансмиссиях необходимой составной частью силовой цепи является накопитель энергии. В накопитель поступает рекуперлируемая энергия для дальнейшего использования — питания как основных, так и вспомогательных агрегатов трансмиссии.

Важной задачей при исследовании накопителей энергии является определение их потребной мощности и массогабаритных показателей. Рассмотрим накопители двух типов:

- 1) аккумуляторная батарея;
- 2) конденсаторный накопитель (суперконденсатор).

1. Прототипом исследуемой химической батареи служит свинцово-кислотная аккумуляторная батарея 6СТЭН-140М.

Характеристика батареи:

- число аккумуляторов в батарее 6;
- емкость $C_{\text{ак.б}} = 140 \text{ А} \cdot \text{ч}$;

- напряжение $U = 12$ В;
- масса с электролитом $m = 62$ кг.

Потребная емкость аккумулятора

$$C_{\text{потр}} = E_{\text{рек}}^{\text{max}} U = 1,05 \cdot 10^5 \cdot 12 = 1,26 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{ч} = 0,35 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Накапливаемая энергия батареи $E_{\text{ак.б}} = C_{\text{ак.б}} U = 140 \cdot 12 = 1,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$

Для накопления энергии требуется

$$\frac{C_{\text{потр}}}{C_{\text{ак.б}}} \cdot 100 \% = 21 \%$$

общей емкости аккумуляторной батареи 6СТЭН-140М.

2. Для исследования потребной мощности энергии конденсаторного накопителя возьмем в качестве прототипа суперконденсатор фирмы «Технокор» (Россия).

Характеристика суперконденсатора:

- емкость $C_{\text{ск}} = 25$ Ф;
- напряжение $U = 27$ В;
- масса $m_{\text{ск}} = 2$ кг.

Запасаемая энергия суперконденсатора

$$E_{\text{ск}} = \frac{C_{\text{ск}} U^2}{2}.$$

Потребная емкость суперконденсатора

$$C_{\text{потр}} = \frac{E_{\text{рек}}^{\text{max}} \cdot 2}{U^2} = \frac{1,05 \cdot 10^5 \cdot 2}{27^2} = 288 \text{ Ф}.$$

Для накопления рекуперированной энергии потребуется n конденсаторов:

$$n = \frac{C_{\text{потр}}}{C_{\text{ск}}} = \frac{288}{25} = 11.$$

Оценка возможности применения рекуперированной энергии.

Как уже отмечалось, рекуперированная кинетическая энергия гусеничной машины аккумулируется в накопителях энергии, а затем поступает в систему для питания основных или дополнительных агрегатов трансмиссии.

Прежде чем дать качественную оценку возможности применения рекуперированной энергии, определим расстояние, которое машина пройдет с постоянной скоростью на запасенной энергии.

Энергия, запасенная в накопителе, будет расходоваться на преодоление сил сопротивления движению на соответствующем пути:

$$E_{\text{рек}} = mg(m(f_{\text{гр}}) + m(f_{\text{г.д}}))S.$$

Отсюда путь, пройденный на накопленной энергии,

$$S = \frac{E_{\text{рек}}}{mg(m(f_{\text{гр}}) + m(f_{\text{г.д}}))}.$$

При $E_{\text{рек}} = 1,05 \cdot 10^5$ Дж

$$S = \frac{1,05 \cdot 10^5}{50\,000 \cdot 9,81 \cdot 0,179} = 1,2 \text{ м.}$$

Выводы. Проведенные исследования показали, что в среднем по совокупности дорожно-грунтовых условий можно рекуперировать энергию $\approx 0,1$ МДж. Полученные значения рекуперированной кинетической энергии машины пренебрежимо малы. Следовательно, рекуперация кинетической энергии в гусеничных машинах для ее последующего преобразования в движение нецелесообразна. Однако при этом не исключается использование рекуперированной энергии в других целях. Основной причиной низкой степени рекуперации являются потери в гусеничном движителе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чобиток В.А. *Теория движения*. Москва, Воениздат, 1981, 257 с.
- [2] Дмитриев А.А., Савочкин В.А. Оценка быстроходности транспортных и тяговых гусеничных машин. Москва, Машиностроение, 1993, 405 с.

Статья поступила в редакцию 10.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наказной О.А., Харитонов С.А., Никитин В.А. Частичная оценка целесообразности применения электрической трансмиссии быстроходных гусеничных машин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/974.html>

Наказной Олег Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 публикаций в области теории движения многоцелевых гусеничных машин. e-mail: nakaznoi@gmail.com

Харитонов Сергей Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sintespkp@yandex.ru

Никитин Вадим Андреевич родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт двигателей». Автор публикаций в области теории движения многоцелевых гусеничных машин. e-mail: vadiss90@bk.ru