

УДК 629.365

Г.О. Котиев¹, И.Ф. Гумеров², А.А. Стадухин¹, Б.Б. Косицин¹**ВЫБОР ЕМКОСТИ БОРТОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ В ИЗНОСОСТОЙКОЙ ТОРМОЗНОЙ
СИСТЕМЕ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН**

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана¹
(национальный исследовательский университет)
ПАО «КАМАЗ»²

Определена необходимая емкость бортового накопителя энергии, позволяющего повысить энергоэффективность транспортного средства за счет обеспечения возможности применения электромашины в износостойкой тормозной системе. Метод выбора необходимой емкости бортового накопителя основывается на определении величины энергии, которая затрачивается машиной для поддержания заданного режима движения. В рамках исследования была принята следующая стратегия управления электромашиной: энергия, запасенная в накопителе после торможения, сразу же будет затрачена при последующем разгоне. В связи с этим, повышение энергоэффективности может быть достигнуто только за счет компенсации высокочастотных колебаний затраченной / накопленной электроэнергии в предполагаемом накопителе так, чтобы уровень заряда не достигал максимального значения при движении машины в среднестатистических условиях. На основании полученных данных емкость накопителя оценивается максимальным размахом функции изменения накопленной / затраченной энергии при движении по заданной трассе.

Предложен метод, позволяющий сформировать требования к характеристикам бортового накопителя электрической энергии, применяемого в составе износостойкой системы торможения, отличающийся использованием статистических данных о дорожно-грунтовых условиях движения машин. Указанный метод дает возможность определить рациональные характеристики накопителя электрической энергии (необходимую емкость), обеспечивающего возможность энергоэффективного движения высокоподвижных колесных машин в среднестатистических условиях эксплуатации.

Ключевые слова: колесная машина, энергоэффективность, затраты энергии, электромашина, накопитель энергии, износостойкая тормозная система.

Введение

В износостойкой тормозной системе высокоподвижных колесных машин (ВКМ) могут быть применены как тормоза-замедлители (моторный тормоз двигателя внутреннего сгорания, гидродинамический и электродинамический ретардеры [1]), так и электромашина (ЭМ), работающая в генераторном режиме [2] совместно с бортовым накопителем энергии. При этом основным преимуществом использования комбинации ЭМ и накопителя в тормозной системе является возможность повышения энергоэффективности ВКМ за счет преобразования кинетической энергии движения машины в электрическую (при рекуперативном торможении) и запасания в бортовом накопителе, с целью последующего использования при разгоне [3-5].

Работа ЭМ в составе износостойкой системы замедления предполагает наличие мощного накопителя электрической энергии (позволяющего реализовать высокие уровни тока разряда / заряда). При этом накопители, позволяющие реализовать высокий уровень электрической мощности и одновременно большую емкость, обладают высокой массой и стоимостью.

В связи с этим, для снижения необходимой емкости накопителя энергии предлагается следующая стратегия управления электромашиной: энергия, запасенная в накопителе после торможения, сразу же будет затрачена при последующем разгоне (замедление электромашиной с применением тормозных резисторов не рассматривается). Таким образом, при эксплуа-

тации ВКМ бортовой накопитель электрической энергии не должен достигать уровня полного заряда при движении в среднестатистических условиях. В случае использования данного режима работы системы будет обеспечена возможность применения молекулярного накопителя энергии («суперконденсатора») для рекуперации энергии торможения ВКМ. Накопители такого типа отличаются малой удельной емкостью, но обладают возможностью реализации большой мощности разряда / заряда, что позволяет не учитывать режимы ограничения потребляемого тока при дальнейших расчетах.

Выбор емкости бортового накопителя энергии, обеспечивающего применение электромашин в износостойкой тормозной системе ВКМ

Для оценки потребной емкости бортового накопителя электрической энергии используется скоростной режим движения машины, приближенный к реальной эксплуатации [6-10]. Предлагаемый режим движения получен аналитически при использовании квазистационарной модели движения ВКМ с учетом ограничений на продольные и боковые ускорения, связанные со сцепными свойствами движителя с опорной поверхностью, возможностями силовой установки и физиологическими возможностями человека воспринимать перегрузки (рис. 1) [11]. Представленный режим движения также основывается на предположении, что уровень замедления, который необходимо обеспечить при движении машины по трассе для реализации рациональной величины средней скорости, составляет не более $a^* = 1 \text{ м/с}^2$ [12, 13].

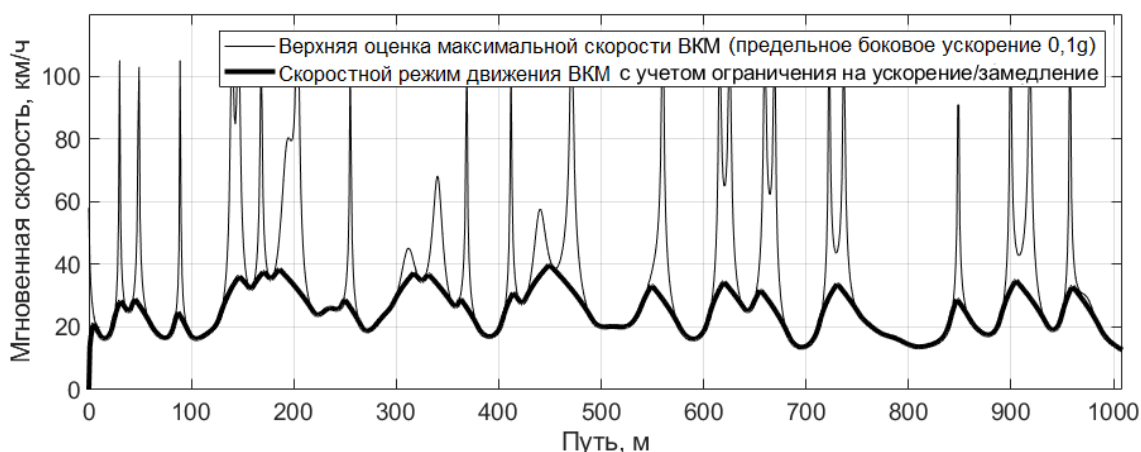


Рис. 1. Скоростной режим движения ВКМ

Таким образом, будем считать, что в случае разгона / торможения с мощностью менее $N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}$ ($N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}$ — максимальная мощность электромашин) реализация закона движения происходит только за счет тягового/генераторного режима электромашин, в противном случае недостаток мощности компенсируется двигателем внутреннего сгорания (ДВС), ретардером или рабочей тормозной системой (рис. 2) [14-16].

$$N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМмех}} = \begin{cases} N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, & \text{если } N_{\text{треб } i} \geq N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} \\ N_{\text{треб } i}, & \text{если } -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} < N_{\text{треб } i} < N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, \\ -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}}, & \text{если } N_{\text{треб } i} \leq -N_{\text{ЭМ}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

где $N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМмех}}$ — мощность, реализуемая электромашинной на выходном валу КП для поддержания заданного режима движения.

Тогда зависимость электрической мощности электромашин $N_{\text{треб } i}^{\text{ЭМ}}$, необходимой для поддержания заданного режима движения, определяется согласно системе (2):

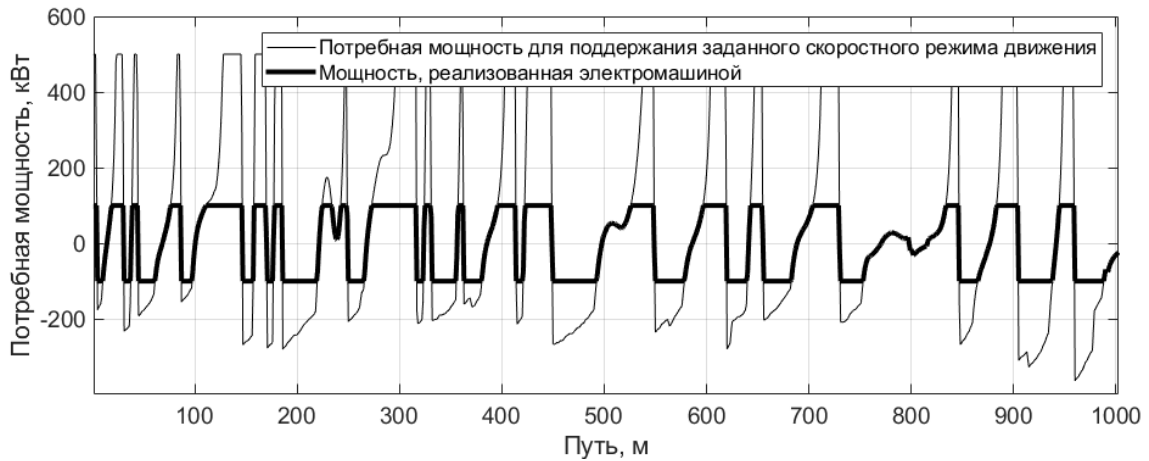


Рис. 2. Зависимость мощности на выходном валу коробки передач от пройденного пути, необходимой для поддержания заданного скоростного режима движения ВКМ

$$N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} = \begin{cases} N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} / \eta_{\text{эм}}, & \text{если } N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} \geq 0 \\ N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} \cdot \eta_{\text{эм}}, & \text{если } N_{\text{треб}_i}^{\text{эм мех}} < 0' \end{cases} \quad (2)$$

где $\eta_{\text{эм}}$ – коэффициент полезного действия электромашины (в рамках проектировочного расчета принят постоянным ($\eta_{\text{эм}} = 0,9$)).

На основе полученных данных определяется величина электрической энергии $E_{\text{эл}}$, затраченной при движении по трассе, от времени (3):

$$E_{\text{эл}_{i+1}} = E_{\text{эл}_i} + N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} \Delta t_i = E_{\text{эл}_i} + N_{\text{треб}_i}^{\text{эм}} \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}_i}}, \quad t_i = t_{i-1} + \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}_i}} \quad (3)$$

где Δt_i – время преодоления участка разбиения трассы между $i-1$ -й и i -ой путевой координатой; Δs_i – приращение по пути между $i-1$ -й и i -ой путевой координатой трассы; t_i – время достижения i -ой путевой координаты трассы.

Зависимость $E_{\text{эл}}$ от времени движения по трассе t представлена на рис. 3. Как видно из графика, энергобаланс системы отрицательный (величина затраченной электрической энергии с течением времени увеличивается), т.е., для представленного на рис. 2 режима использования электромашины необходим дополнительный источник энергии.

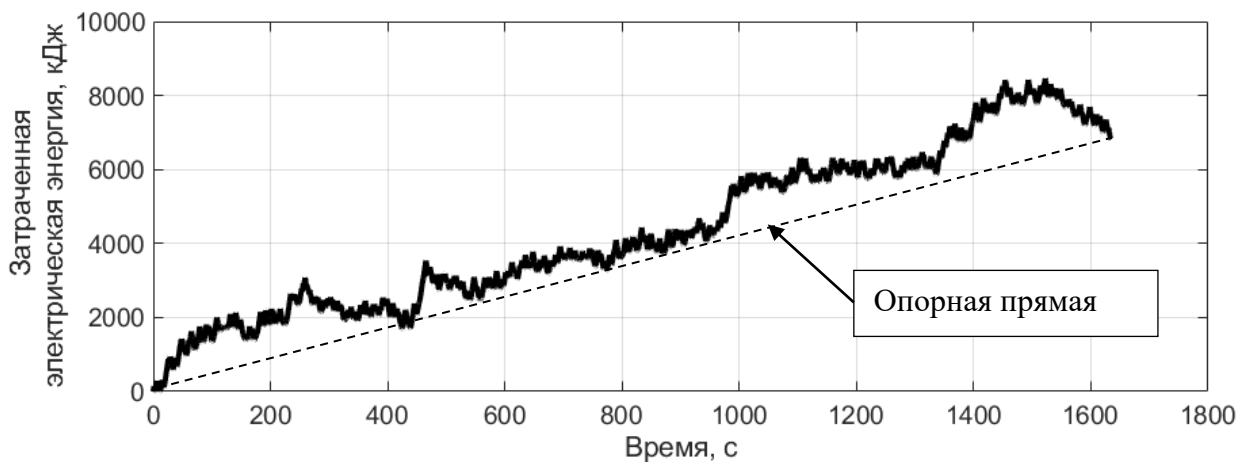


Рис. 3. Зависимость затраченной электрической энергии от времени при движении по трассе

Рассматриваемый подход к применению электромашины в износостойкой тормозной системе не предполагает наличия таких дополнительных устройств, в связи с этим повышение энергоэффективности ВКМ может быть достигнуто только за счет компенсации колебаний затраченной / накопленной электроэнергии относительно опорной прямой (рис. 3). Таким образом, для оценки потребной емкости бортового накопителя при вычислении затраченной/накопленной энергии (3) из величины $N_{\text{треб}i}^{\text{эм}}$ необходимо вычесть такую мощность, которая бы обеспечила нейтральный энергобаланс системы (рис. 4):

$$E_{\text{нак}i+1} = E_{\text{нак}i} + \left(N_{\text{треб}i}^{\text{эм}} - E_{\text{эл}n_s} / t_{n_s} \right) \frac{\Delta s_i}{v_{\text{ср}i}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{нак}}$ – электрическая энергия, затраченная/накопленная из бортового накопителя;
 n_s – количество участков пути, на которые разбита трасса.

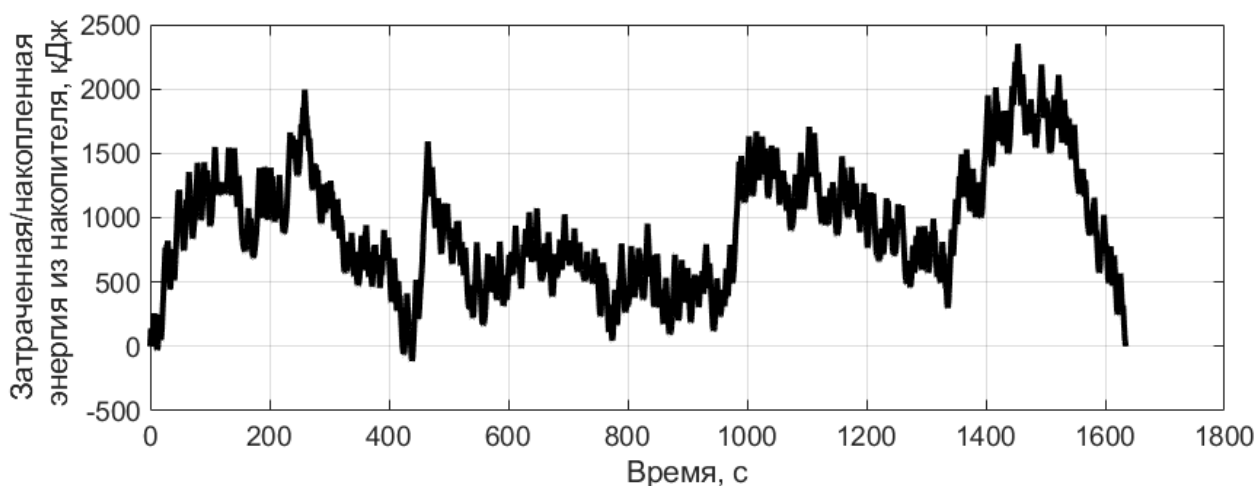


Рис. 4. Зависимость затраченной электрической энергии из накопителя

Полученная зависимость имеет явно выраженные низкочастотные колебания, обладающие большой амплитудой и, соответственно, подразумевает необходимость запасание большого количества энергии. Предложенная стратегия управления и использование молекулярного накопителя энергии не предполагают длительного хранения заряда с целью снижения его потребной емкости (предполагается скорейшее опорожнение накопителя после рекуперативного торможения). В связи с этим, для выбора емкости накопителя энергии из полученной зависимости $E_{\text{нак}}(t)$ целесообразно «исключить» низкие частоты. Исследования показали, что частотой среза эффективно выбрать величину 0,005 Гц (гармоники с периодом колебаний более 200 с будут отброшены). Фильтрация может быть проведена, например, фильтром Баттерворта 1-го порядка. Зависимость затраченной / накопленной энергии накопителя после «фильтрации» представлена на рис. 5.

Далее, согласно полученной зависимости (рис. 5), потребная емкость накопителя энергии оценивается максимальным размахом функции:

$$E_{\text{кон}}^{\text{max}} = \max(E_{\text{нак}}^{\phi}(t)) - \min(E_{\text{нак}}^{\phi}(t)), \quad (5)$$

где $E_{\text{кон}}^{\text{max}}$ – потребная емкость накопителя энергии;

$E_{\text{нак}}^{\phi}(t)$ – зависимость затраченной/накопленной энергии накопителя от времени после «фильтрации».

Таким образом, указанный метод позволяет определить потребную емкость бортового накопителя энергии, который обеспечит работу электромашины с выбранной стратегией управления так, чтобы уровень заряда не достигал максимального значения при движении ВКМ в среднестатистических условиях.

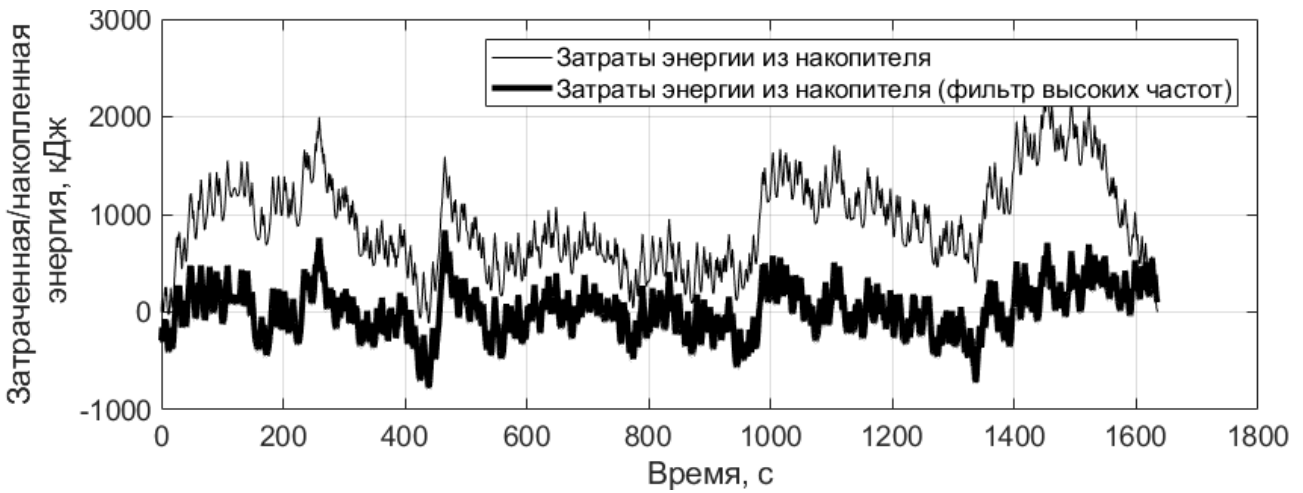


Рис. 5. Зависимость электрической энергии, затраченной из накопителя

Анализ энергоэффективности применения электромашин в износостойкой тормозной системе ВКМ

Важнейшей задачей при анализе эксплуатационных свойств машин, оснащенных электромашинной в составе износостойкой тормозной системы, является оценка повышения энергоэффективности. Она может быть проведена путем сравнения механической энергии, затраченной двигателем внутреннего сгорания на реализацию заданного скоростного режима движения, в случае наличия и отсутствия электромашин в износостойкой системе замедления.

Торможение при помощи ДВС, рабочей тормозной системы и ретардера не предполагает возможности рекуперации энергии. Поэтому в случае отсутствия электромашин во вспомогательной системе замедления считается, что механическая энергия двигателя затрачивается во всех случаях, если потребная на реализацию закона движения мощность $N_{\text{треб}}$ больше 0 (ВКМ движется в тяговом режиме).

$$E_{\text{двс}_{i+1}} = E_{\text{двс}_i} + \max(N_{\text{треб}_i}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, \quad (6)$$

где $E_{\text{двс}}$ – механическая энергия, затраченная двигателем, без учета электромашин.

В случае наличия электромашин в износостойкой системе торможения считается, что механическая энергия двигателя затрачивается при опустошении молекулярного накопителя или недостатке тяговой мощности для реализации заданного закона движения (при недостатке тормозной мощности электромашин механическая энергия двигателя не затрачивается).

$$E_{\text{кон}_{i+1}} = \begin{cases} E_{\text{кон}_i} - \min(N_{\text{треб}_i}, N_{\text{эм}}^{\text{max}}) \cdot \Delta s_i / (v^{\text{cp}}_i \cdot \eta_{\text{эм}}), & \text{если } N_{\text{треб}_i} \geq 0 \\ E_{\text{кон}_i} - \max(N_{\text{треб}_i}, -N_{\text{эм}}^{\text{max}}) \cdot \Delta s_i \eta_{\text{эм}} / v^{\text{cp}}_i, & \text{если } N_{\text{треб}_i} < 0, \\ 0, & \text{если } E_{\text{кон}_{i+1}} < 0 \\ E_{\text{кон}}^{\text{max}}, & \text{если } E_{\text{кон}_{i+1}} > E_{\text{кон}}^{\text{max}} \end{cases}, \quad (7)$$

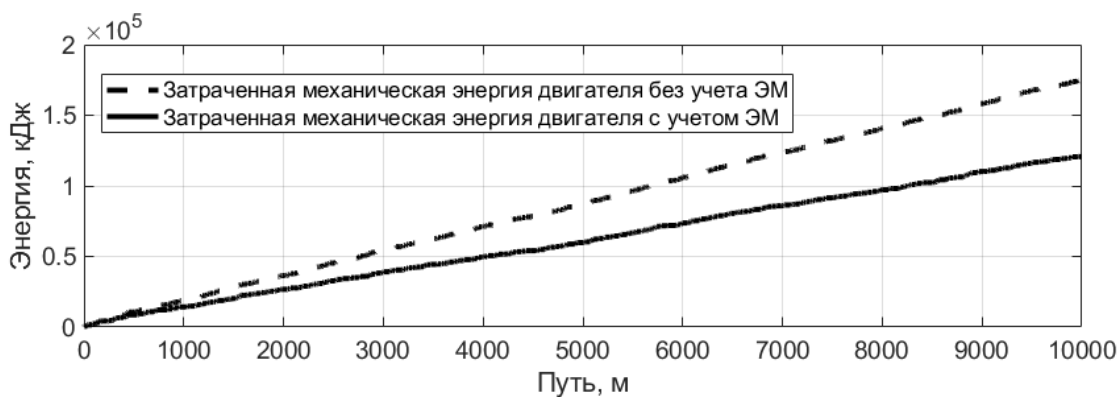
$$E_{\text{двс}_{i+1}}^{\text{эм}} = \begin{cases} E_{\text{двс}_i}^{\text{эм}} + \max(N_{\text{треб}_i}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, & \text{если } E_{\text{кон}_i} = 0 \\ E_{\text{двс}_i}^{\text{эм}} + \max(N_{\text{треб}_i} - N_{\text{эм}}^{\text{max}}, 0) \cdot \Delta s_i / v^{\text{cp}}_i, & \text{в др. случаях} \end{cases}$$

где $E_{\text{кон}}$ – текущий запас энергии в накопителе;

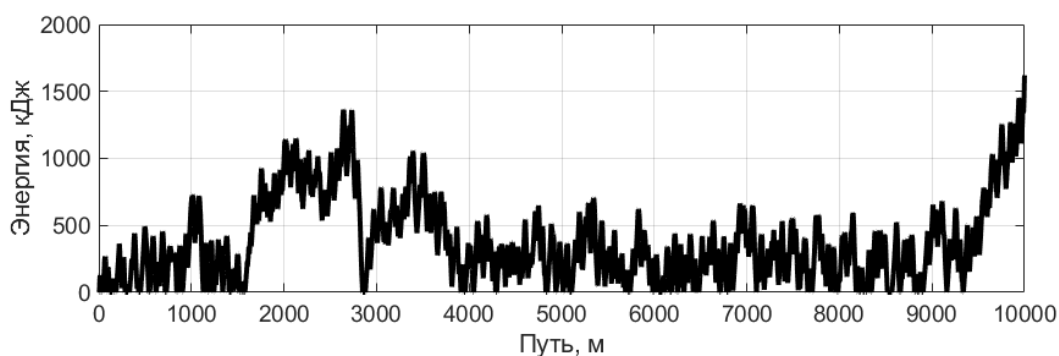
$E_{\text{двс}}^{\text{эм}}$ – механическая энергия, затраченная двигателем, с учетом электромашин.

Результаты численного эксперимента, проведенного с учетом описанного поведения системы при нулевом начальном запасе энергии в накопителе, представлены на рис. 6. В качестве примера используется ВКМ со следующими характеристиками: полная масса 34 т, удельная мощность ДВС в тяговом режиме 15 кВт/т, удельная мощность ДВС в тормозном

режиме 6 кВт/т, мощность электромашины в износостойкой системе замедления 100 кВт (3 кВт/т), емкость бортового накопителя энергии 0,45 кВт · ч.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость затраченной механической энергии двигателя с учетом и без учета электромашины (а); изменение количества энергии, запасенной в накопителе (б)

Оценка снижение затрат механической энергии ДВС η_{eff} при использовании электромашины проводится по формуле (рис.7):

$$\eta_{eff_i} = 100\% \cdot (E_{двс_i} - E_{двс_i}^{ЭМ}) / E_{двс_i} \quad (8)$$

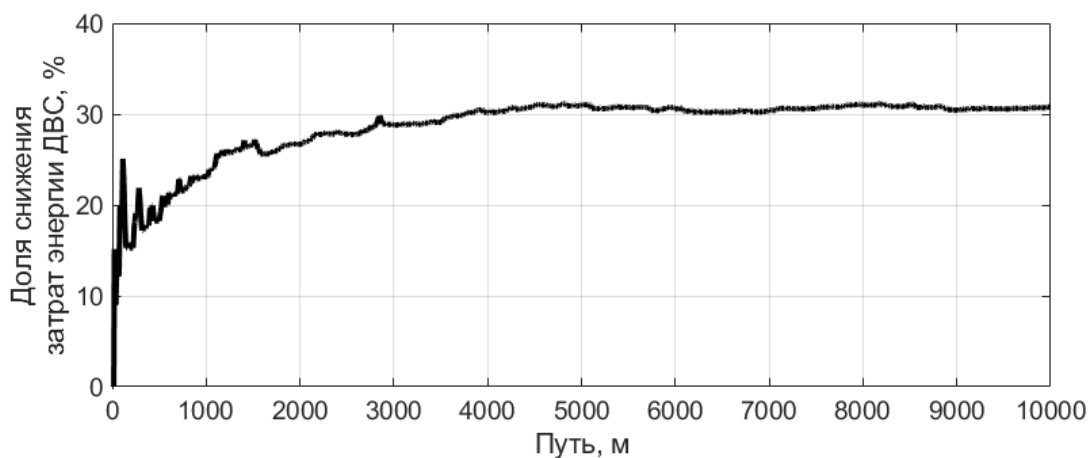


Рис. 7. Доля снижение затрат механической энергии ДВС при использовании электромашины

Полученные данные позволяют сделать вывод, что применение электромашины в износостойкой системе замедления для рассматриваемого режима движения (рис. 1) позволит снизить затраты механической энергии ДВС на 30,8 %.

Для оценки влияния интенсивности режима движения (влияния накладываемого ограничения на боковые и продольные ускорения) на снижение затрат энергии двигателя ВКМ за счет применения электромашины в износостойкой тормозной системе, необходимо провести выбор бортового накопителя энергии и оценку эффективности применения ЭМ для различных скоростных режимов движения согласно предложенному методу (полученных с различными комбинациями ограничений на замедление и боковое ускорение):

- без ограничения на боковое ускорение, с ограничением на уровень замедления – снижение энергозатрат 15 %;
- с ограничением на боковое ускорение, без ограничения на уровень замедления – снижение энергозатрат 13,5 %;
- без ограничения на боковое ускорение и на уровень замедления – снижение энергозатрат 4,3 %.

Таким образом, применение электромашины и бортового накопителя энергии в износостойкой системе торможения, рассматриваемой ВКМ (масса машины 34 т) теоретически позволит снизить затраты энергии до 30 %.

Выводы

Применение электромашины в износостойкой тормозной системе позволит снизить затраты энергии ДВС ВКМ до 30 %. При этом величина снижения энергозатрат связана со скоростным режимом движения машины: чем интенсивнее режим (отсутствуют ограничения на продольные и боковые ускорения), тем ниже эффективность применения электромашины. Данная особенность связана с тем, что при интенсивном замедлении ВКМ большая часть энергии движения не запасается в накопитель, а рассеивается посредством тормозной системы.

Библиографический список

1. **Heinz, Heisler** Advanced Vehicle Technology / Heisler Heinz. London: Butterworth-Heinemann. 2002. – 656 p. doi: 10.1016/B978-0-7506-5131-8.X5000-3.
2. Torque Control of Switched Reluctance Drive in Generating Mode / Alexander Krasovsky, Elena Gorbunova, Mikhail Bychkov, Artem Fedorenko // 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Russia. Jan 31-Feb 02, 2018.
3. Анализ и проектирование гибридных трансмиссий транспортных средств на основе планетарных механизмов. / С.А. Харитонов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 92 с.
4. **Косицын, Б.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
5. Electric Drive Study: Technical report (final): / U.S. Army Tank-Automotive Command Research, Development & Engineering Center; General Dynamics Land Systems Division. – Warren, Michigan, 1987. – 396 p.
6. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. / T.J. Barlow [et al.]. TRL limited. 2009. – 276 p.
7. **Штанг, А.А.** определение основных характеристик комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта / А.А. Штанг, М.В. Ярославцев // Доклады Академии Наук Высшей Школы Российской Федерации. 2016. №4.
8. **Ярославцев, М.В.** Определение параметров энергоустановки гибридного автомобиля моделированием процесса потребления энергии / М.В. Ярославцев // Электротехника. – 2014. – №12. – С.17-21.
9. Methods for road microprofile statistical data transformation / Evgeniy Sarach, George Kotiev and Sergey Beketov // MATEC Web of Conferences – 2018. V224. article № 04009.

10. Estimating operation modes for the individual wheel electric drive of the all-wheel drive vehicle with the use of the driving simulator / Kotiev G.O., Miroshnichenko A.V., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534 (2019) 012004 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 534 (2019) 012004.
11. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
12. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля / В.П. Тарасик. – СПб. БВХ-Петербург, 2006. – 478 с.
13. **Кравец, В.Н.** Теория движения автомобиля / В.Н. Кравец. – Нижний Новгород, 2014. – 696 с.
14. Study of Friction and Wear Characteristics of the Friction Pair of Centrifugal Brake Rollers / A.L. Nosko, E.V. Safronov, V.A. Soloviev // Journal of Friction and Wear, 2018, Vol. 39, No.2, – P. 145-151.
15. Generalized dynamic model of 'dry' friction units / Gekker, F.R. // Trenie i Iznos, Volume 19, Issue 2, March 1998, Pages 165-170.
16. Improvement of quality and tribological performance of transmission parts by electrochemical polishing / Yudin, E.G., Vartanyan, V.A., Vasilieva, E.I. // Journal of Friction and Wear. V. 19. I. 2. 1998. Pp. 81-86.

*Дата поступления
в редакцию: 01.12.2019*

G.O. Kotiev¹, I.F. Gumerov², A. A. Stadukhin¹, B.B. Kositsyn¹

CHOOSING THE CAPACITY OF THE ON-BOARD ENERGY STORAGE WHEN USING AN ELECTRIC MOTOR IN THE WEAR-RESISTANT BRAKING SYSTEM OF HIGH-MOBILITY WHEELED VEHICLES

Bauman Moscow State Technical University¹
Open Joint Stock Company KAMAZ²

Introduction: The use of a wear-resistant brake system becomes more relevant since the average speed of wheeled vehicles is increasing. The application of such systems is aimed at increasing mobility (by improving the braking properties), as well as reducing the thermal loads of the primary brake system. It is reasonable to use an electric motor that operates in generator mode in a wear-resistant braking system. That provides the ability to recover braking energy in order to increase the energy efficiency of the considered high-mobility wheeled vehicles. The energy storage device must be able to implement high electrical power (it is assumed that molecular energy storage devices are used) to apply energy recovery when the car is braking. The question of choosing a rational capacity becomes relevant in this regard.

Subject of research: The article is dedicated to determining the required capacity of the on-board energy storage device, that allows to increase the energy efficiency of the vehicle. Increasing of energy efficiency is achieved by enabling the use of an electric motor in a wear-resistant brake system.

Methodology and methods: The method of selecting the required capacity of the onboard storage is based on determining the amount of energy that is spent by the vehicle to maintain a given driving mode. In this study, the following strategy was accepted for controlling an electric motor: the energy stored in the storage device after braking will be spent during the subsequent acceleration. In this regard, energy efficiency can only be achieved by compensating for high-frequency fluctuations in the consumed/stored electricity in the storage unit. However the charge level should not reach the maximum when the car is moving in average conditions. The storage capacity is estimated by the maximum range of the function for changing the amount of energy stored/consumed on the basis of the data obtained while driving along a given route.

Results and scientific novelty: The proposed method makes it possible to form requirements for the characteristics of an on-board energy storage device that used as part of a wear-resistant braking system. The distinctive feature of the method is the use of statistical data on road and ground conditions of the car.

Practical significance: This method makes it possible to determine the rational characteristics of the electric energy storage (required capacity), that provides the possibility of energy-efficient movement of high-mobility wheeled vehicles in average operating conditions.

Key words: wheeled vehicle, energy efficiency, energy consumption, electric machine, energy storage unit, auxiliary brake system.