

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_109

Б.Б. Косицын

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ В СОСТАВЕ ИЗНОСОСТОЙКОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Повышение энергоэффективности высокоподвижных колесных машин достигнуто путем применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы. Оценка энергоэффективности проводится с применением комплекса натурно-математического моделирования по результатам виртуальных заездов по совокупности вероятных дорожно-грунтовых условий, имитирующих движение машин в режиме «реального» времени под управлением водителей-операторов. Критерием служит снижение механической энергии, затрачиваемой ДВС в тяговом режиме при движении по трассе, для случаев наличия или отсутствия электромашины в составе износостойкой системы замедления.

Предлагаемый метод позволяет на этапе проектирования оценить эффективность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы высокоподвижных колесных машин в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Доказана рациональность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в износостойкой тормозной системе современных высокоподвижных транспортных средств.

Ключевые слова: энергоэффективность, электромашина, износостойкая тормозная система, комплекс натурно-математического моделирования, колесная машина.

Введение

В настоящее время одними из основных требований, предъявляемых к транспортным машинам, являются низкие затраты энергии на движение и высокая быстроходность. Перспективным подходом для улучшения указанных свойств, помимо увеличения удельной мощности машин, автоматизации трансмиссии, совершенствования системы поддрессоривания и применения систем активной безопасности, выступает увеличение эффективности торможения. Указанный подход связывается не с повышением интенсивности снижения скорости, а с сохранением работоспособности системы торможения при частом служебном замедлении. Таким образом, для современных высокоподвижных транспортных машин актуально применение износостойкой тормозной системы (ИТС), позволяющей снизить нагрузку рабочих тормозных механизмов [1-3]. Кроме того, для повышения энергоэффективности высокоподвижных колесных машин (ВКМ) в составе ИТС рационально применять электромашину, позволяющую рекуперировать часть энергии торможения в бортовой накопитель электрической энергии, которую можно затратить при последующем разгоне [3]. Очевидно, что оценка эффективности применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе ИТС ВКМ невозможна без применения имитационного моделирования. Для решения данной задачи применяется разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана комплекс натурно-математического моделирования [4], позволяющий имитировать движение машины в виртуальном пространстве в режиме «реального» времени под управлением водителя-оператора. Для проведения исследования рассматриваемый комплекс дополняется математической моделью движения ВКМ.

Имитационная модель движения колесной машины

Представленная имитационная модель описывает совместную динамику корпуса, силовой установки и ходовой части ВКМ, а также позволяет исследовать криволинейное дви-

жение машины в комплексе натурно-математического моделирования (рис. 1). Так, в рамках модели ВКМ представляется твердым телом, совершающим плоское движение в горизонтальной плоскости (система уравнений (1), [5-8]). Движение по уклону или косогору моделируется путем введения проекций силы тяжести на продольную и поперечную оси машины.

Для определения величин нормальных реакций, действующих на колеса машины в процессе движения, используется принцип возможных перемещений. Взаимодействие колесного движителя с опорной поверхностью (ОП) описывается согласно подходу, основанному на понятии «эллипса трения» [9]: касательная составляющая реакции в контакте колеса с грунтом направлена противоположно скорости скольжения.

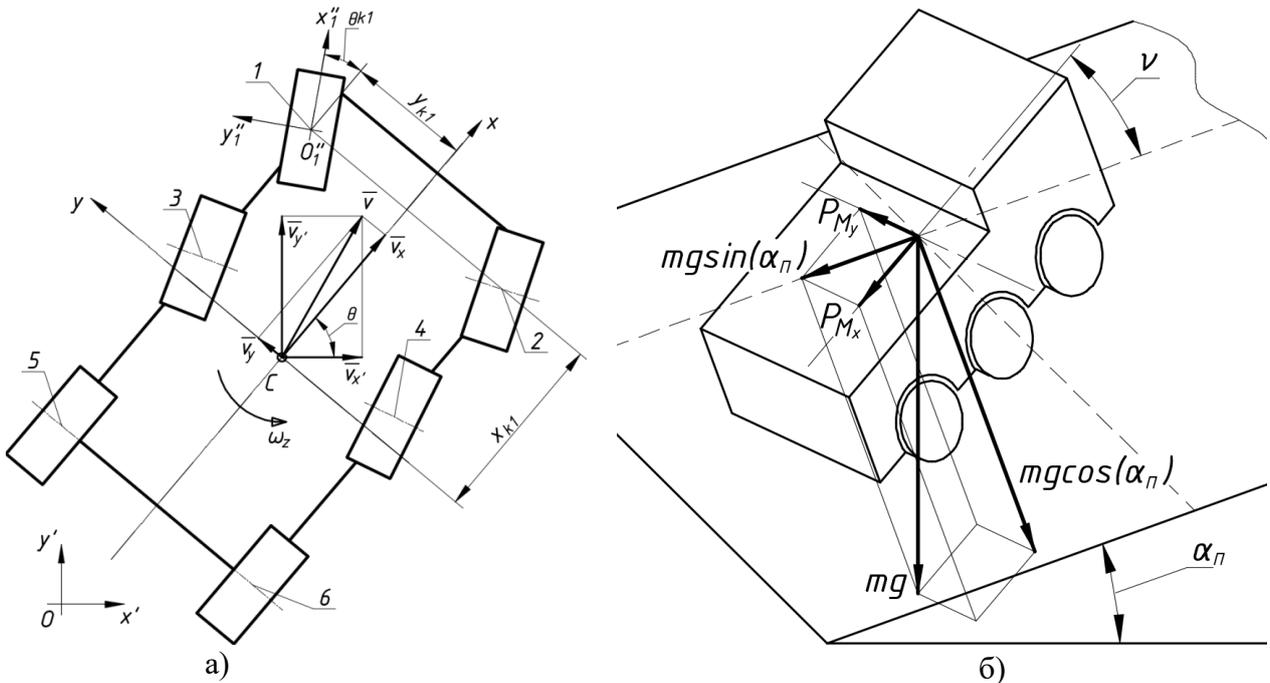


Рис. 1. Расчетная схема движения ВКМ:
а) в горизонтальной плоскости; б) на уклоне/косогоре

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} - \omega_z v_y = \left(\sum_{i=1}^n R_{x_i} - P_w - P_{Mx} \right) / m \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} + \omega_z v_x = \left(\sum_{i=1}^n R_{y_i} - P_{My} \right) / m \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^n M(R_{y_i}) - \sum_{i=1}^n M(R_{x_i}) - \sum_{i=1}^n M_{сп_i} \end{cases}, \quad (1)$$

где: m – масса машины;

J_z, ω_z – момент инерции и угловая скорость поворота машины относительно оси z (вертикальная ось, проходящая через центр масс ВКМ);

a_x, a_y, v_x, v_y – проекции векторов ускорения и скорости центра масс машины на оси системы координат $x - y$;

$dv_x/dt, dv_y/dt$ – относительная производная вектора скорости центра масс машины в проекциях на оси системы координат $x - y$;

R_{x_i}, R_{y_i} – продольная и поперечная составляющие касательной силы взаимодействия, действующей в пятне контакта i -ого колеса с ОП;

P_w – проекция вектора суммарной аэродинамической силы на продольную ось машины;

$M_{сп_i}$ – момент сопротивления повороту i -ого колеса, обусловленный проскальзыванием элементов пятна контакта при его вращении;

P_{Mx}, P_{My} – проекция силы тяжести ВКМ на продольную и поперечную оси машины;
 n – число колес.

Принципиальная схема трансмиссии ВКМ, дополненная электромашинной (позволяющей рекуперировать часть кинетической энергии движения при торможении) и гидродинамическим ретардером, представлена на рис. 2. Приняты следующие обозначения: ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ЭМ – электромашина; КП – коробка передач; РЕТ – гидродинамический ретардер; ГП – главная передача.

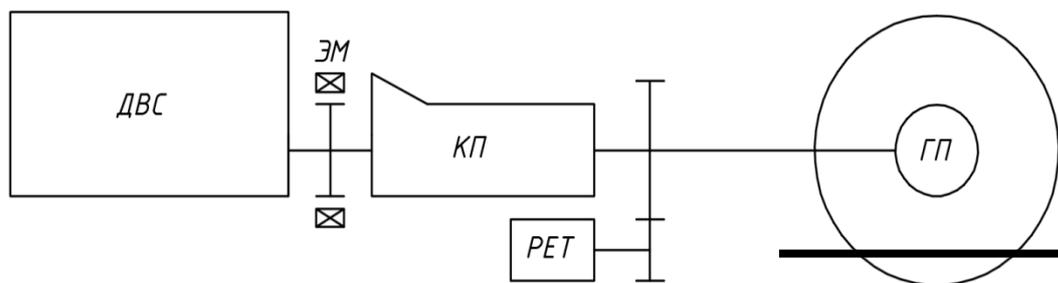


Рис. 2. Принципиальная схема трансмиссии машины

Для оценки эффективности применения электромшины и бортового накопителя электрической энергии в составе износостойкой тормозной системы ВКМ, представленная имитационная модель динамики машины дополнена математическим описанием ряда агрегатов и систем:

- двигатель внутреннего сгорания с возможностью работы, как в тяговом, так и тормозном режимах;
- электромшина;
- бортовой накопитель электрической энергии;
- рабочие тормозные механизмы;
- гидродинамический ретардер;
- система охлаждения ДВС и ретардера;
- рулевое управление;
- система управления распределением тяговых/тормозных усилий по элементам трансмиссии машины.

Математическое описание ДВС, электромшины и гидродинамического ретардера представляет собой связь крутящего момента, частоты вращения и параметра управления каждого узла согласно их механическим характеристикам. Бортовой накопитель электрической энергии описывается как источник постоянного напряжения неограниченной мощности, обладающий конечным запасом энергии. В рамках модели принимается, что тепловая мощность, выделяемая гидродинамическим ретардером в процессе торможения, передается в охлаждающую жидкость (ОЖ) двигателя и рассеивается в радиаторе. Соответственно, математическая модель системы охлаждения ДВС и ретардера предназначена для оценки температуры ОЖ, которая необходима для управления ограничением ретардера по тормозной мощности в случае ее приближения (температуры ОЖ) критическому значению.

Для описания рулевого управления (обеспечения связи углов поворота управляемых колес с поворотом рулевого колеса) применяется традиционный подход – согласно «геометрии» рулевой трапеции. При описании связи между степенью управления, задаваемой водителем (нажатие на педали «газа» или «тормоза»), и степенями управления каждого из агрегатов используется следующая стратегия. В первую очередь, реализация тяговых/тормозных усилий на ведущих колесах обеспечивается за счет электромшины. В случае недостатка тяговой/тормозной мощности дополнительное усилие на колесах обеспечивается за счет ДВС. Если суммарной тормозной мощности электромшины и ДВС недостаточно, ее увеличение

достигается за счет включения гидродинамического ретардера. В случае экстренного замедления в дополнение к износостойкой тормозной системе активируются рабочие тормозные механизмы (рис. 3).

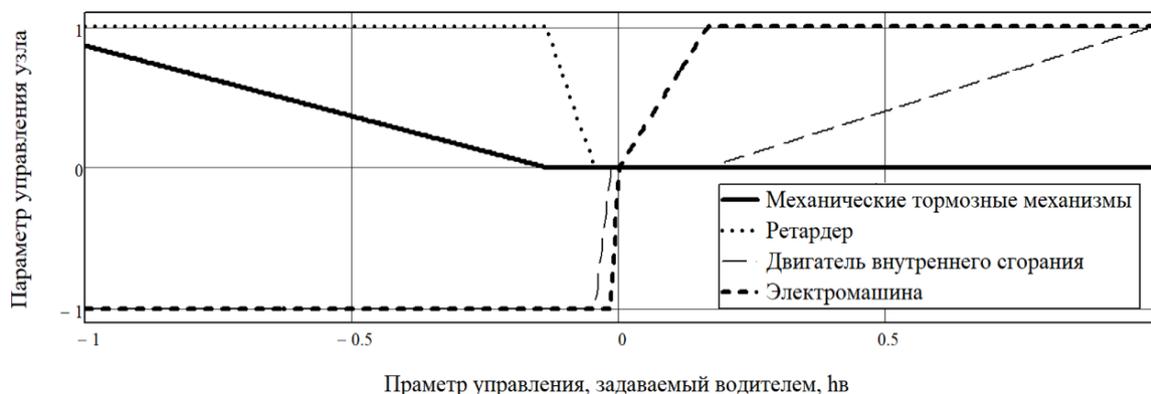


Рис. 3. Срез поверхностей отклика системы распределения тяговых/тормозных усилий

Комплекс натурно-математического моделирования

Используемый в данной работе комплекс натурно-математического моделирования [4] включает следующую аппаратную часть:

- ЭВМ для имитации движения ВКМ в режиме «реального времени», определения траектории движения машины, а также вычисления ее текущих скоростей, ускорений и действующих внешних сил;
- органы управления для обеспечения связи между управляющими воздействиями оператора и системой управления имитационной модели;
- экран для обеспечения зрительной связи водителя с заданной трассой посредством графического интерфейса, позволяющий оператору косвенно оценивать условия движения машины, а также получать информацию о текущих параметрах движения ВКМ.

Общий вид рассматриваемого комплекса представлен на рис. 4 (рабочее место водителя-оператора).



Рис. 4. Общий вид комплекса натурно-математического моделирования (экран и органы управления)

Оценка влияния электромашин и бортового накопителя электрической энергии в ИТС на энергоэффективность ВКМ проводится с применением указанного комплекса натур-

но-математического моделирования путем выполнения многократных виртуальных заездов по статистически заданным трассам. Создание таких трасс происходит методом неканонических представлений по известным корреляционным функциям внешних возмущений, оказывающих влияние на движение машины: кривизна пути, коэффициенты сцепления и сопротивления качению, а также угол наклона опорной поверхности [10]. Общий вид «разыгранной» трассы представлен на рис. 5.

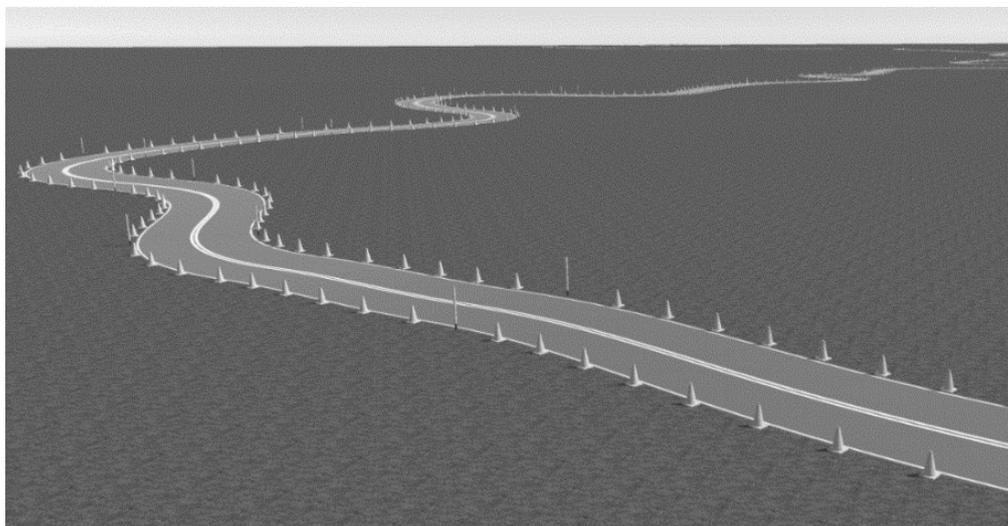


Рис. 5. Общий вид «разыгранной» трассы

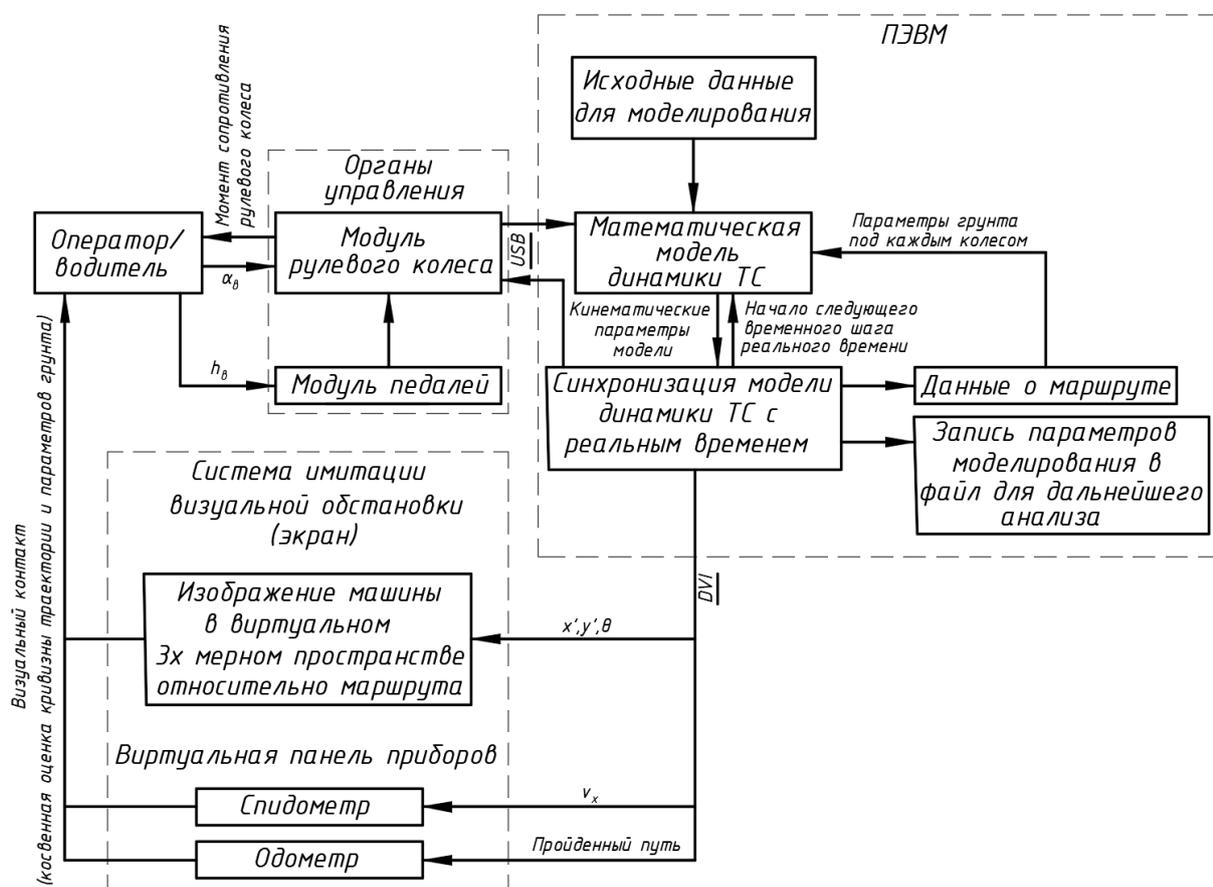


Рис. 6. Структурная схема комплекса натурно-математического моделирования [4]

При создании типового маршрута считается, что ширина дорожного полотна соответствует двухполосной дороге и составляет 7 м. Обочиной служит опорная поверхность типа «дернистый грунт». Структурная схема комплекса натурно-математического моделирования, отражающая связь между его составными элементами и оператором, представлена на рис. 6.

Объекты исследования

Для примера, в качестве объектов исследования используются следующие транспортные средства (рис. 7, 8) с удельной мощностью: ВКМ 6х6 – 12,5 кВт/т, ВКМ 8х8 – 16,5 кВт/т.

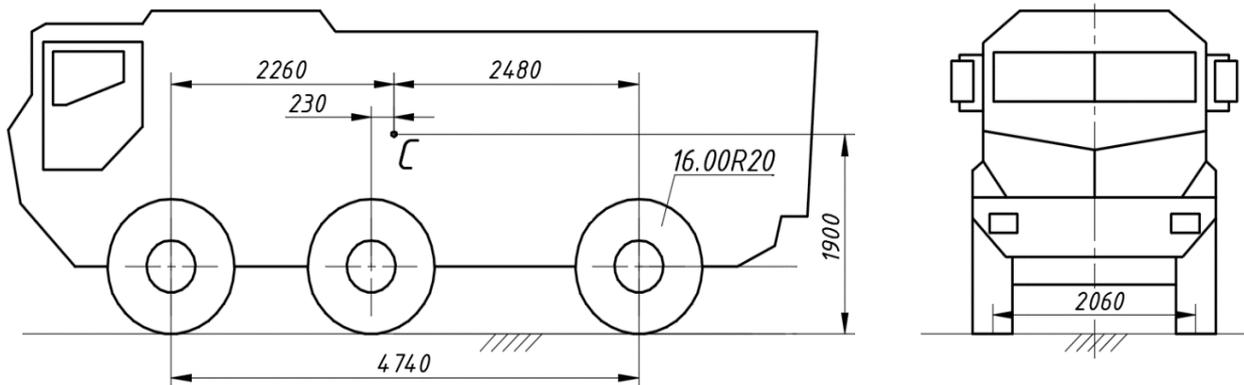


Рис. 7. Геометрические параметры ВКМ 6х6

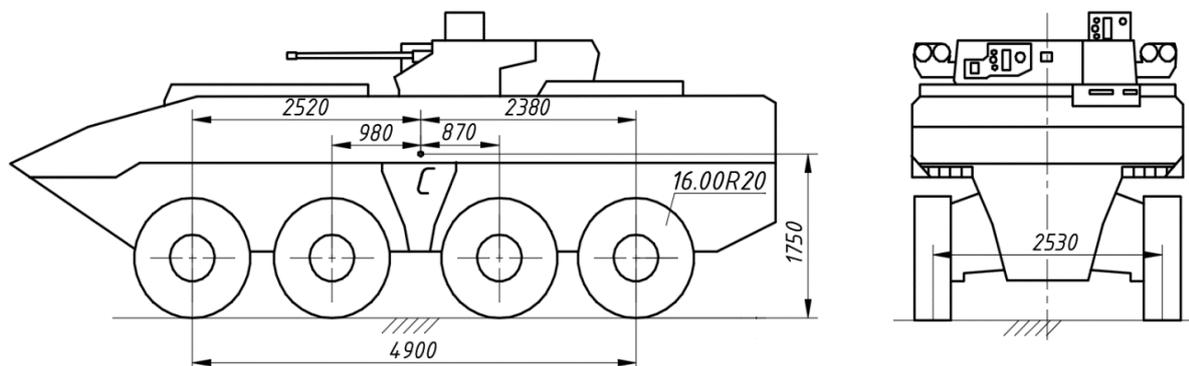


Рис. 8. Геометрические параметры ВКМ 8х8

В рамках виртуального эксперимента в динамической модели используются механические характеристики агрегатов ВКМ (электромашина, гидродинамический ретардер, накопитель электрической энергии), полученные согласно методике [1-3] (табл. 1).

Таблица 1

Требуемые характеристики агрегатов ИТС ВКМ

ВКМ	Мощность электромашин, кВт	Емкость накопителя энергии, кВт·ч	Коэффициент момента гидротормоза
ВКМ 6х6 (без электромашин)	-	-	0,176
ВКМ 6х6	75	0,31	0,0575
ВКМ 8х8 (без электромашин)	-	-	0,0774
ВКМ 8х8	100	0,4	0,0366

Результаты виртуальных заездов

Оценка энергоэффективности применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в ИТС при движении по совокупности наиболее вероятных дорожно-грунтовых условий (ДГУ) проводится по результатам виртуальных заездов, имитирующих движение машин по типовым трассам в режиме «реального» времени под управлением водителей-операторов с применением комплекса натурно-математического моделирования.

Критерием оценки энергоэффективности применения электромашины служит снижение механической энергии, затрачиваемой ДВС в тяговом режиме при движении по трассе, при наличии или отсутствии электромашины в ИТС. На рис. 9 представлены зависимости механической энергии, затраченной ДВС для обоих составов ИТС ВКМ (представлены результаты заездов по опорной поверхности типа «дорога с твердым покрытием» в случае «равнинного» типа рельефа: максимальный коэффициент взаимодействия с ОП 0,7...0,8, коэффициент сопротивления качению 0,012...0,02). По полученным данным можно сделать вывод, что в рассматриваемом случае применение электромашины в ИТС позволяет снизить энергозатраты ДВС ВКМ 6х6 до 10,9 %, а ВКМ 8х8 до 6,4 %.

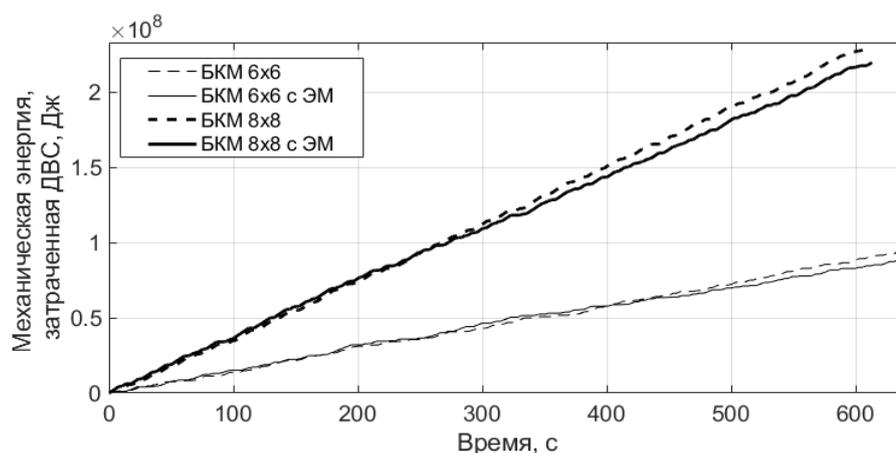


Рис. 9. Сравнение энергии, затраченной ДВС ВКМ во время виртуального заезда при наличии и отсутствии электромашины в ИТС

Полученные величины не достигают расчетных 30 % [3] в связи с тем, что при движении по трассе водитель-оператор стремился обеспечить высокую среднюю скорость ВКМ, при этом прибегая к экстремному торможению и выполняя маневры поворота с боковыми ускорениями близкими к предельным по заносу / опрокидыванию (рис. 10, 11, в качестве примера представлены результаты заезда ВКМ 6х6).

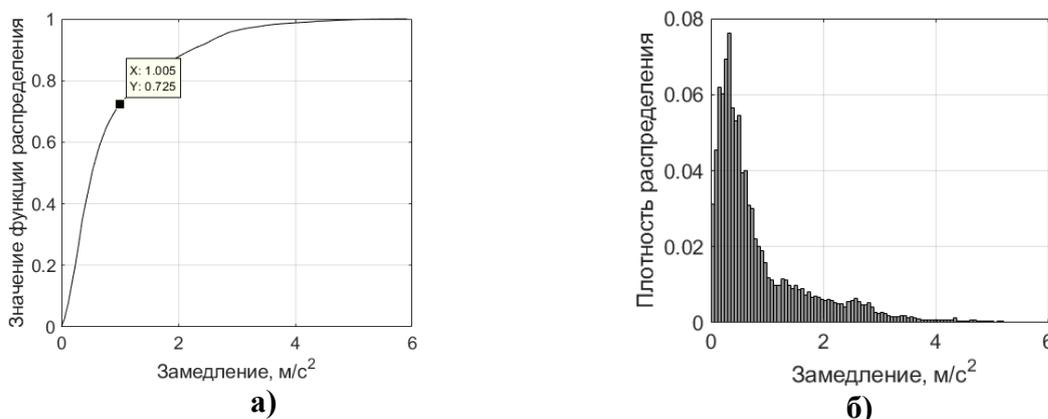
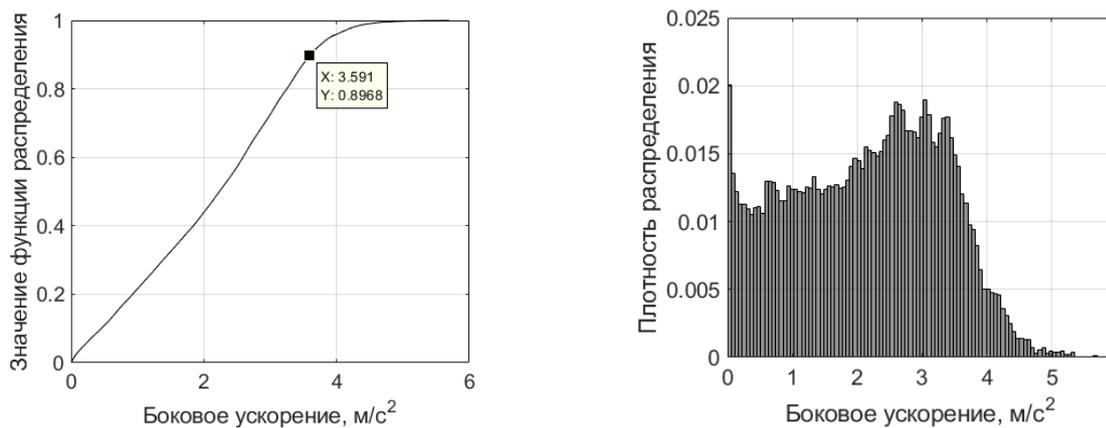


Рис. 10. Функция (а) и плотность (б) распределения замедления ВКМ 6х6



а)

б)

Рис. 11. Функция (а) и плотность (б) распределения бокового ускорения ВКМ 6х6 при движении по трассе

Для оценки адекватности определения емкости бортового накопителя энергии, полученной с применением методики [3], рассмотрим зависимость его уровня заряда (процент энергии, запасенной в накопителе от максимально возможного уровня) в процессе движения по трассе (рис. 12, для примера показаны результаты заезда ВКМ 6х6).

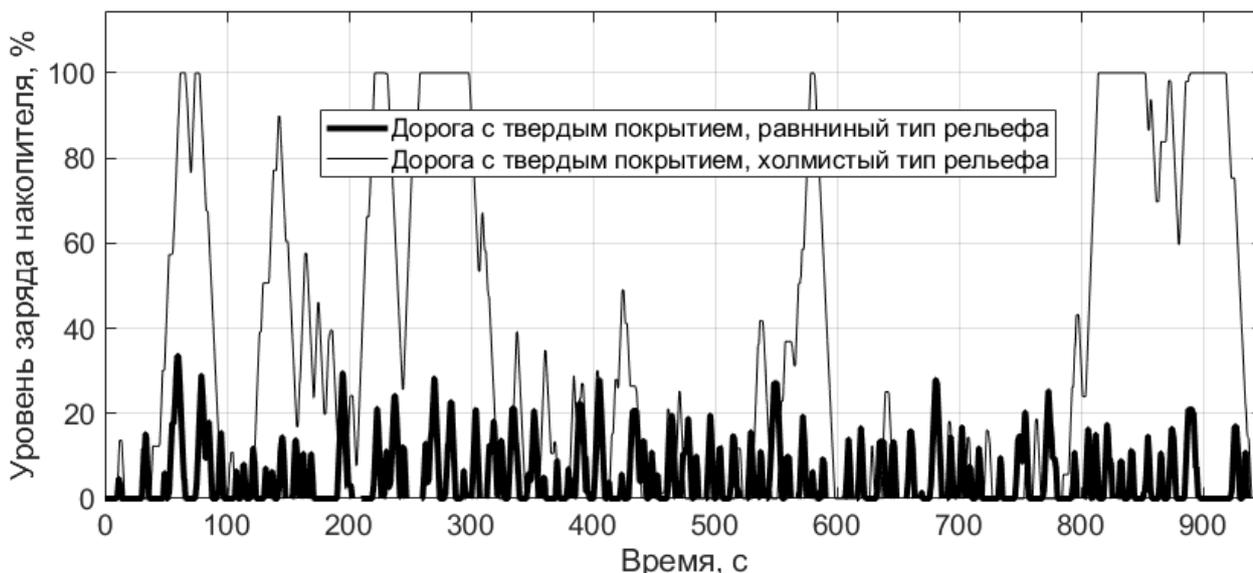


Рис. 12. Изменение уровня заряда накопителя ВКМ 6х6 при движении по трассе

Видно, что при движении по «равнинному» типу рельефа степень заряда накопителя не превышает 30-40 %, а в случае «холмистого» типа рельефа уровень заряда достигает максимальной величины в ~5 % случаев. Можно заключить, что бортового накопителя электрической энергии с выбранной емкостью достаточно для обеспечения энергоэффективного движения рассматриваемой ВКМ по совокупности ДГУ. Результаты виртуальных заездов по оценке снижения энергозатрат для различных дорожных условий и типов рельефа в случае ВКМ 6х6 и ВКМ 8х8 представлены в табл. 2. Тип дорожно-грунтовых условий обозначается как А / В, где А – тип ОП (1 – «дорога с твердым покрытием»; 2 – «булыжная / гравийная / щебеночная дорога»; 3 – «грунтовая дорога в удовлетворительном состоянии»), В – тип рельефа (1 – «равнинный»; 2 – «холмистый»).

Таблица 2

Снижение затрат механической энергии ДВС

ДГУ	Снижение затрат энергии ДВС, %	
	ВКМ 6x6	ВКМ 8x8
1/1	8,6	6,4
2/1	14,6	5
3/1	13,7	11,2
1/2	12,7	4
2/2	4,1	4,5
3/2	5	4,2

Заключение

В случае интенсивного режима движения применение электромашины в ИТС позволит снизить энергозатраты ДВС: в случае ВКМ 6x6 до 14,6 %, в случае ВКМ 8x8 до 11,2 %. При этом представленные величины согласуются с результатами, полученными в рамках использования квазистационарной модели ВКМ [3]. Указанное обстоятельство подтверждает состоятельность выводов, полученных в работе [3], и актуальность применения электромашины и бортового накопителя электрической энергии в составе ИТС современных высокоподвижных транспортных средств. Методика [3] позволяет определить рациональную емкость бортового накопителя электроэнергии, обеспечивающую энергоэффективное движение машины по совокупности ДГУ.

Библиографический список

1. **Котиев, Г.О.** Определение потребного уровня замедления высокоподвижных колесных машин при использовании износостойкой тормозной системы / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №4 (127). – С. 146-157.
2. **Котиев, Г.О.** Определение механических характеристик узлов износостойкой тормозной системы высокоподвижных колесных машин / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – №1 (128). – С. 131-141.
3. **Котиев, Г.О.** Выбор емкости бортового накопителя энергии при использовании электромашины в износостойкой тормозной системе высокоподвижных колесных машин / Г.О. Котиев, И.Ф. Гумеров, А.А. Стадухин, Б.Б. Косицын // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2020. – №2 (129). – С. 126-133.
4. **Косицын, Б.Б.** Определение характеристик трансмиссий колёсных и гусеничных машин с индивидуальным электроприводом ведущих колес / Б.Б. Косицын, Г.О. Котиев, А.В. Мирошниченко, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НАМИ. – 2019. – № 3 (278). – С. 22-35.
5. **Котиев, Г.О.** Математическая модель криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 8x8 при различных способах управления поворотом / Г.О. Котиев, Н.В. Чернышев, В.А. Горелов // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – №2. – С. 34-39.
6. **Kotiev, G.** Selection of the combat vehicle individual wheel drive operation modes under required mobility criteria / G. Kotiev, B. Padalkin, A. Miroshnichenko, A. Stadukhin, B. Kositsyn // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 820 (2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 820 (2020), Moscow; Russian Federation doi:10.1088/1757-899X/820/1/012006
7. **Котиев, Г.О.** Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 49-59.
8. **Котиев, Г.О.** Математическая модель движения вездеходного транспортного средства / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.А. Бекетов // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – №1. – С. 50-54.
9. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. – 1982. – № 390. – С. 56-64.

10. **Косицын, Б.Б.** Моделирование реализаций случайных функций характеристик дорожно-грунтовых условий при исследовании динамики колесных и гусеничных машин на этапе проектирования / Б.Б. Косицын, А.В. Мирошниченко, А.А. Стадухин // Известия МГТУ «МАМИ». – М., 2019. Вып. №3 (41). – С. 36-46 DOI: 10.31992/2074-0530-2019-41-3-36-46

*Дата поступления
в редакцию: 21.09.2020*

B.B. Kositsyn

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AN ELECTRIC MOTOR AS PART
OF AN AUXILIARY BRAKE SYSTEM ON THE ENERGY EFFICIENCY
OF HIGH-MOBILITY WHEELED VEHICLES**

Bauman Moscow State Technical University

Introduction. In the modern world, one of the main requirements for transport vehicles is low energy consumption and high speed. To improve these properties, a promising approach is to increase the braking efficiency. Moreover, in this case, we are talking about maintaining the performance of the braking system with frequent service deceleration in various road conditions. Thus, for modern high-mobility transport vehicles, it is reasonable to use an auxiliary wear-resistant brake system, which would reduce the load on the service brake gear and prevent its failure in heavy operation modes. At the same time, to improve the energy efficiency of the vehicles under consideration, it is rational to use an electric motor as a part of the auxiliary brake system, which recovers a portion of the braking energy and stores it in the on-board electric energy storage device.

Subject of research. The purpose of this study is to increase the energy efficiency of high-mobility wheeled vehicles by using an electric motor and an on-board electric energy storage device as part of an auxiliary wear-resistant brake system.

Methodology and methods. To assess the effectiveness of an electric motor and an on-board electric energy storage device as a part of the wear-resistant auxiliary brake system of modern high-mobility vehicles, a real-time driving simulator is used. Thus, the energy efficiency assessment is based on the results of real time virtual driving along a set of routes with stochastic road and ground conditions under the control of driver operators. The criterion for evaluating energy efficiency is a reduction in the mechanical energy consumed by the internal combustion engine in traction mode on the route, with and without an electric motor as a part of the wear-resistant auxiliary brake system.

Results and scientific novelty. The method presented in this paper allows evaluating the effectiveness of an electric motor and an on-board electric energy storage device as a part of the auxiliary brake system for high-mobility wheeled vehicles in the conditions close to real operation ones at the design stage.

Practical significance. As a part of the work, the efficiency of using an electric motor and an on-board electric energy storage device in the auxiliary brake system of modern high-mobility vehicles has been proved.

Key words: energy efficiency, electric motor, auxiliary brake system, real-time driving simulator, wheeled vehicle.