

Оценка эффективности рекуперации энергии при торможении карьерного самосвала

© Г.А. Арутюнян¹, В.А. Дианов^{1, 2}, И.В. Лобачев¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

² Набережночелнинский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережные Челны, 423812, Республика Татарстан, Российская Федерация

На основе реальных данных телеметрии сформированы типовые маршруты движения карьерного самосвала в условиях действующего угольного разреза. Проведены математическое моделирование перемещения по маршруту и анализ мощностного баланса, позволивший сопоставить затраты энергии на движение с энергией, возвращаемой в процессе рекуперации. Представлена оценка эффективности рекуперации энергии при торможении самосвала во время движения по типовым маршрутам. В результате исследования количественно определена доля рекуперированной энергии и выявлены ключевые ограничения эффективности системы. Сформулированы требования к тяговой аккумуляторной батарее, включая оценку ее необходимой емкости. Проанализирована потребность в использовании дополнительных тормозных резисторов для рассеяния избыточной энергии. Полученные результаты позволяют количественно оценить долю доступной энергии и ограничения, определяющие эффективность системы, а также дают основу для оптимизации систем рекуперации на карьерной технике.

Ключевые слова: карьерный самосвал, электрические трансмиссии, гибридные автомобили, рекуперативное торможение

Введение. Открытая добыча полезных ископаемых остается доминирующим способом извлечения ряда ключевых сырьевых ресурсов. В технологической структуре открытых горных работ транспортирование породы и руды обеспечивает критически важную функцию: в открытых карьерах оно формирует основную долю потребления энергии — по оценкам, до 40 % суммарного энергопотребления разреза приходится на энергию, генерируемую дизельными силовыми установками, для которой самосвалы являются главными потребителями [1, 2].

Операционные затраты, связанные с топливом и обслуживанием дизельных самосвалов, оказывают существенное влияние на себестоимость перевозки: в зависимости от типа руды и региона доля расходов на топливо в операционных расходах на транспортирование может варьироваться в диапазоне от 20 до 60 % [1, 3, 4], например, в угледобыче этот показатель достигает верхних значений диапазона.

Для карьерных самосвалов характерны длительные режимы движения на затяжных спусках, при которых необходимо задействовать

тормозную систему для ограничения их скорости [5]. Для этого на самосвалах с гидромеханической трансмиссией используются много-дисковые тормозные механизмы [6], а на самосвалах с электромеханической трансмиссией — тормозные резисторы, осуществляющие электродинамическое торможение [7]. Кинетическая энергия самосвала при этом преобразуется в теплоту и безвозвратно теряется при рассеивании в атмосфере. Перспективный способ повышения эффективности карьерных самосвалов — задействование систем рекуперации энергии при торможении [8, 9]. Известны работы [10], в которых оценивается теоретическая реализуемость системы рекуперативного торможения.

Реализовать рекуперативное торможение можно на полностью электрических и гибридных автомобилях с электрохимическими батареями [11–13]. Такие способы рекуперации, как применение суперконденсаторов и накопление энергии в пневмоаккумуляторах, не нашли широкого применения ввиду большой массы и малой энергоемкости подобных систем [14, 15].

В отдельных случаях эффективность рекуперативного торможения может достигать 95 % [16], но для этого конфигурация карьера должна предполагать, что груженные самосвалы в нем движутся преимущественно на спуск, а пустые — на подъем. Согласно одному из исследований, экономия топлива на гибридном самосвале может достигать 20...35 % [17, 18].

Для формирования обоснованных требований к системе рекуперативного торможения требуется учитывать реальные эксплуатационные режимы в карьере.

Формулирование проблемы. Для того чтобы практически реализовать рекуперативное торможение, существует ряд вопросов, на которые необходимо ответить. В первую очередь следует определить требуемые емкость батареи и мощность заряда, оценить возможность реализовать рекуперацию на гибридных карьерных самосвалах с ДВС и буферным аккумулятором, а также сформировать мощностной баланс с учетом реальных режимов эксплуатации техники.

Цель работы — повышение энергоэффективности эксплуатации карьерных самосвалов. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

- описать реальные режимы эксплуатации самосвалов в угольном разрезе на основе анализа телеметрии, а также формализовать типовые циклы движения с учетом распределения времени в рабочих режимах;
- восстановить траектории и режимы движения на основе данных телеметрии (GPS, скорость, нагрузка), чтобы обеспечить количественную базу для расчета энергетических потоков;

- определить влияние различий режимов работы самосвалов, предназначенных для перевозки угля и вскрышной породы, и провести соответствующую параметризацию моделей (масса полезной нагрузки, частота циклов, маршрут движения);
- оценить эффективность рекуперативного торможения с учетом как уклонов и перепадов высот карьера, так и того, что на спусках масса самосвала близка к снаряженной, а на подъемах — к полной массе;
- рассчитать необходимую емкость буферной/тяговой батареи для приема рекуперированной энергии с учетом запрета на рекуперацию при достижении полного заряда батарей и связанного с этим использования тормозных резисторов;
- оценить требуемую мощность заряда батареи (пиковых и средних значений), обеспечивающую прием импульсных потоков рекуперации без превышения термических и электрических лимитов аккумулятора и силовой электроники;
- выполнить анализ необходимости применения тормозных резисторов: определить режимы, при которых резистор требуется для рассеивания избыточной энергии, и условия, при которых его можно исключить при наличии адекватных емкости и мощности заряда батареи.

Исследуются реальный потенциал рекуперативного торможения карьерного самосвала на типичных маршрутах в карьере, а также требования к аккумуляторным батареям. Исследование проводится на основе маршрутов, построенных на базе GPS-данных реального карьера, что позволяет количественно определить потенциально восстанавливаемую энергию и нагрузку на систему накопления, а кроме того, оценить целесообразность применения буферной батареи, включая ее интеграцию в классические дизель-электрические самосвалы.

Решение поставленных задач позволило сформулировать технические требования к системам накопления энергии и управлению ими, а также дать рекомендации по интеграции буферной батареи как в электрические, так и в дизель-электрические самосвалы с целью снижения расхода топлива.

Разработка математической модели. Для анализа были взяты маршруты из угольного разреза, находящегося в Кузбассе. Площадь карьера составляет более 50 км², протяженность карьерных дорог превышает 170 км, максимальный перепад высот достигает 380 м.

Для анализа энергетических потоков и оценки эффективности рекуперативного торможения разработана имитационная модель продольного движения карьерного самосвала. Основное допущение работы заключается в использовании одномассовой модели самосвала

массой m_{eff} , что позволяет переместить внимание на баланс сил вдоль траектории и динамику изменения скорости. Если пренебречь колебаниями масс и кинематикой подвески, то можно обеспечить высокую скорость расчетов при сохранении достаточной точности оценки энергопотребления и рекуперации [19].

Движение самосвала описывается уравнением динамики, основанным на втором законе Ньютона:

$$m_{eff} \frac{dv}{dt} = F_{net} - F_{resist}, \quad (1)$$

где m_{eff} — эффективная масса самосвала, кг; v — продольная скорость, м/с; t — время движения; F_{net} — результирующая тяговая или тормозная сила, приложенная к колесам, Н; F_{resist} — суммарная сила сопротивления движению, Н.

В связи с относительно низкими скоростями движения и значительным сопротивлением качению обычно пренебрегают аэродинамическим сопротивлением воздуха при моделировании движения карьерных самосвалов [20]. Поскольку в данном исследовании проводится сравнительный анализ разных конфигураций самосвалов в идентичных условиях, учет аэродинамических сил является избыточным: их воздействие на разность итоговых показателей будет минимальным и не повлияет на корректность выводов.

Эффективная масса m_{eff} включает в себя массу транспортного средства, которая может быть снаряженной или полной, и инерцию вращающихся частей — колес, редукторов и роторов электродвигателей:

$$m_{eff} = m_{vehicle} + n_{motors} \left(\frac{I_k}{r_k^2} + I_d \eta \frac{i_{tr}^2}{r_k^2} \right), \quad (2)$$

где $m_{vehicle}$ — масса самосвала; n_{motors} — число мотор-колес; I_k — момент инерции колеса; r_k — радиус колеса, принятый равным статическому радиусу, м; I_d — момент инерции ротора двигателя; η — КПД трансмиссии; i_{tr} — передаточное число редуктора.

Суммарная сила сопротивления F_{resist} определяется силой сопротивления качению и силой сопротивления подъему или спуску от составляющей силы тяжести:

$$F_{resist} = m_{vehicle} g (f_{roll} \cos \alpha + \sin \alpha), \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения; f_{roll} — коэффициент сопротивления качению (принят 0,025); α — угол продольного уклона, рад.

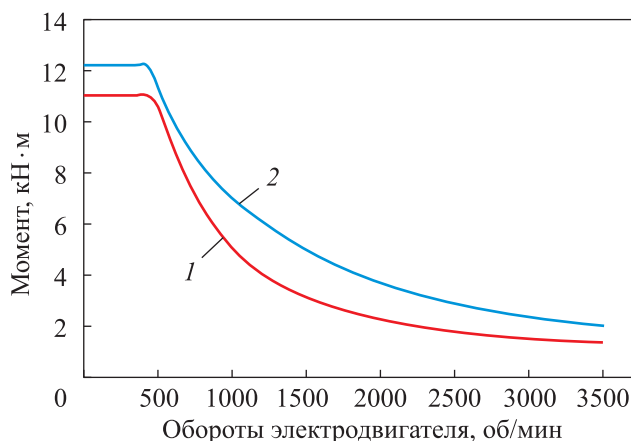


Рис. 1. Тяговая (1) и тормозная (2) характеристики электродвигателей

Тяговая и тормозная характеристики электродвигателя представлены на рис. 1.

Технические и конструктивные характеристики самосвала приведены ниже:

Снаряженная масса, т	165
Полная масса, т	405
Передаточное число редуктора	27,6
Радиус колеса, м	1,617
КПД трансмиссии	0,97
КПД электродвигателя при рекуперативном торможении	0,9
Максимальная мощность тормозного резистора, кВт	2400
Номинальная мощность, кВт:	
тягового электродвигателя	610
тягового генератора	800

На низких оборотах КПД электродвигателя в тяговом и в тормозном режиме сильно снижается, зачастую рекуперация на таких скоростях вообще отключена и работают только механические тормоза. Для рассматриваемого самосвала это соответствует скорости ниже 10 км/ч. При скоростях движения более 10 км/ч КПД электродвигателя в режиме рекуперации для расчетов принят постоянным, что незначительно влияет на сравнительные результаты оценки эффективности рекуперации энергии при торможении.

В качестве исходных данных для маршрутов движения используются реальные маршруты карьера, реконструированные по дискретным данным GPS-телеметрии [21]. Профиль трассы задается массивом данных, включающих широту, долготу и высоту. На их основе вычисляются параметры ездового цикла: пройденный путь, угол уклона и радиус кривизны траектории. Критические значения уклонов ограничены значениями в 12 %, или 6,84°.

Для анализа были выбраны наиболее часто встречающиеся маршруты движения самосвалов, перевозящих полезные ископаемые и вскрышную породу. Для самосвалов каждого типа было выбрано по три маршрута движения, характеризующихся разной протяженностью, перепадом высот и кривизной траектории. На карте карьера (рис. 2) показаны наиболее популярные маршруты движения самосвала. Из рисунка видно, что эти маршруты составляют около половины всех дорог в карьере.

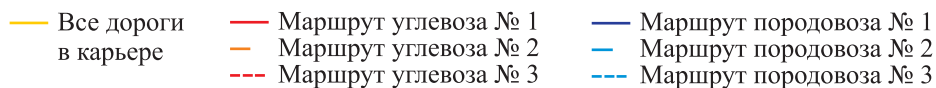


Рис. 2. Маршруты движения самосвала на карте карьера

Управление самосвалом моделируется двухконтурной системой: внешний контур определяет максимально возможную скорость из соображений безопасности движения (целевую), а внутренний — формирует требуемое тяговое или тормозное усилие посредством ПИД-регулятора. Целевая скорость v_{target} на каждом шаге интегрирования определяется минимальным значением из четырех лимитов, обеспечивающих безопасность и минимизацию потерь энергии:

$$v_{target} = \min(v_{max}, v_{curve}, v_{desc}, v_{lookahead}); \quad (4)$$

1. Максимально разрешенная скорость на карьере $v_{max} = 40$ км/ч.
2. Скорость в повороте v_{curve} , ограничивающаяся для обеспечения безопасности на участках с малым радиусом кривизны ($R < 150$ м) [22].

По центробежному ускорению принято ограничение $a_{centr} = 0,05g$, откуда следует

$$v_{curve} = \sqrt{a_{centr} R}. \quad (5)$$

3. Скорость движения на спуске v_{desc} ограничивается максимальной поглощающей способностью электрической системы. Это гарантирует, что вся потенциальная энергия спуска может быть либо рекуперирована, либо рассеяна на резисторе без необходимости активации механических тормозов:

$$v_{desc} = \frac{P_{absorb\ avail}}{(m_{vehicle} g \sin \alpha - f_{roll} m_{vehicle} g \cos \alpha) \eta_{br} \eta_{regen\ eff}}, \quad (6)$$

где $P_{absorb\ avail} = P_{charge\ limit} + P_{resistor\ max}$ — доступная мощность, равная сумме допустимой мощности заряда батареи $P_{charge\ limit}$, Вт, и мощности резистора $P_{resistor\ max}$, Вт; η_{br} — КПД торможения; $\eta_{regen\ eff}$ — КПД инвертора.

4. Реализован алгоритм предиктивного анализа дорожной обстановки, основанный на методе анализа профиля маршрута с применением линейного буфера предварительного просмотра. На каждом шаге моделирования выполняется динамическое определение дистанции сканирования, которая принимается равной минимальной между расчетным тормозным путем с текущей скоростью движения и фиксированным значением 100 м. Из общего массива данных о траектории выделяется подмассив данных, соответствующий интервалу пути от текущего положения до предстоящего положения на длину дистанции сканирования. Сформированный буфер содержит информацию о радиусах кривизны траектории на горизонте сканирования, что позволяет заранее снижать скорость $v_{lookahead}$ перед обнаруженными участками, на которых требуется торможение.

В первую очередь применяется рекуперация, если она невозможна, то задействуется тормозной резистор. Если мощности тормозного резистора недостаточно или скорость ниже 10 км/ч, задействуются механические тормозные механизмы. Если энергия рекуперации превышает возможности приема энергии батареей, то излишки рассеиваются на тормозном резисторе. Когда батарея полностью заряжена, энергия при торможении рассеивается на тормозных резисторах.

Общий КПД электродвигателя η_{Σ} при рекуперативном торможении складывается из КПД торможения η_{br} и КПД инвертора $\eta_{regen\ eff}$:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{br} \eta_{regen\ eff}. \quad (7)$$

Оценка эффективности рекуперации на основе математической модели. Расчеты показали, что наибольшее количество энергии, рекуperiруемое за маршрут № 1, составляет 93 кВт · ч (рис. 3), что значительно меньше емкости тяговой батареи (рис. 4). Применение буферной батареи небольшой емкости позволяет реализовать рекуперативное торможение на самосвалах с двигателем внутреннего сгорания и электромеханической трансмиссией.

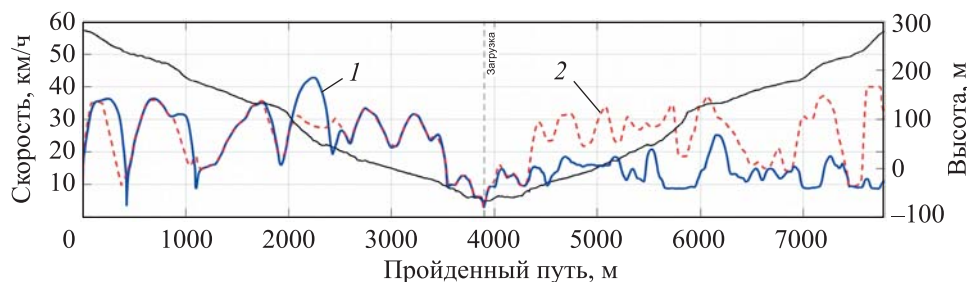


Рис. 3. Зависимость действительной (1) и целевой (2) скорости от продолжительности пройденного пути и профиля дороги при движении математической модели породовоза № 3 по маршруту от обогатительной фабрики до отвала

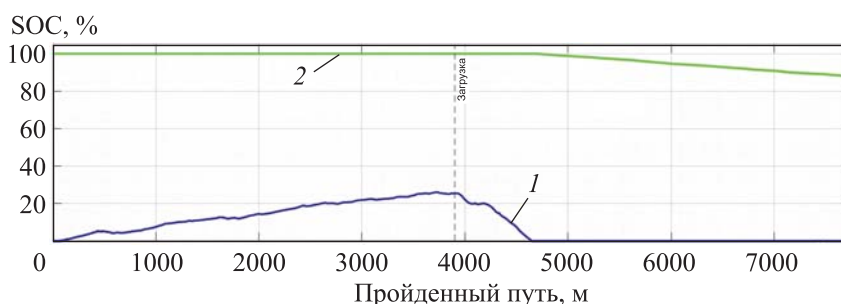


Рис. 4. Зависимость уровня заряда буферной (1) и тяговой (2) аккумуляторной батареи (SOC) от продолжительности пройденного пути при движении математической модели породовоза № 3 от обогатительной фабрики до отвала

Рассмотрено пять вариантов исполнения: стандартная компоновка без буферной батареи, где вся мощность рассеивается на тормозных резисторах; два варианта с буферной батареей разных типов и с тормозным резистором уменьшенной мощности; два варианта, где вместо тормозных резисторов используются буферные батареи разного типа и увеличенной емкости. Рассмотренные варианты приведены в табл. 1.

В данной работе оценивалась эффективность рекуперации энергии при торможении без моделирования работы системы управления батареями (от англ. Battery Management System — BMS), которая поддерживает степень заряда батарей в зоне безопасной эксплуатации по уровню заряда. Таким образом, в математической модели допускается полная зарядка и разрядка буферной и основной батареи.

Варианты исполнения емкости батарей для самосвала

№ варианта	Емкость	Тип аккумуляторной батареи
1	Только резистор	Не используется
2	250 кВт·ч и резистор	NMC (ток заряда 2С)
3	650 кВт·ч	NMC (ток заряда 2С)
4	100 кВт·ч и резистор	LTO (ток заряда 5С)
5	260 кВт·ч	LTO (ток заряда 5С)

Необходимые емкости батарей определены с помощью серии предварительных расчетов. По результатам моделирования были построены графики изменения скорости при движении (рис. 5), а также графики изменения тяговых и тормозных сил (рис. 6) для самосвала с батареей LTO емкостью 100 кВт·ч и тормозным резистором по маршруту породовоза № 1.

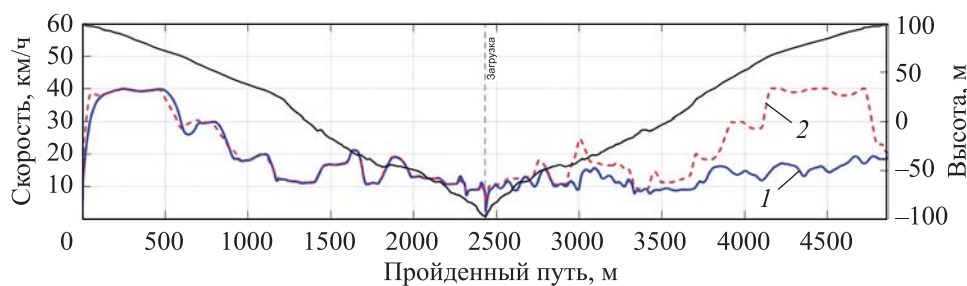


Рис. 5. Зависимость действительной (1) и целевой (2) скорости от продолжительности пройденного пути и профиля дороги при движении по маршруту породовоза № 1 от места горной выработки до отвала

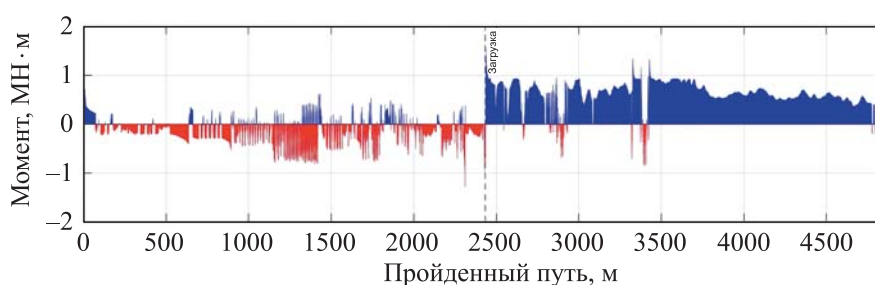


Рис. 6. Графики изменения тяговых и тормозных моментов при движении по маршруту породовоза № 1 от места горной выработки до отвала

Математическое моделирование проводилось для каждого исполнения самосвала по всем шести маршрутам движения. Результаты моделирования для разных исполнений самосвала представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметр	Только резистор	Резистор и NMC	NMC	Резистор и LTO	LTO
Емкость буферной батареи, кВт·ч	0 (нет)	250	650	100	260
Рекуперация, %	0 (нет)	12,4	24,5	12,4	24,5
Удельная энергия, кВт·ч/кг	—	0,25		0,11	
Масса, кг	1320	1660	2600	1569	2364
Плотность энергии по объему, кВт·ч/м ³	—	700		180	
Объем, м ³	3,02	1,87	0,93	2,07	1,44
Относительная стоимость	1,0	1,9	3,5	2,3	4,7
<i>Примечание:</i> NMC — ячейка литиевой батареи; LTO — литий-титанатный аккумулятор.					

Анализ шести типовых маршрутов показал, что средняя доля рекуперации при использовании только буферной батареи составляет 24,5 % всей затраченной на движение по маршруту энергии, а на отдельных трассах она достигает 36 %. Это подтверждает высокий потенциал возврата энергии при наличии протяженных спусков. Потери на тормозных резисторах равны нулю, что свидетельствует о достаточной способности аккумулятора принимать пиковую мощность рекуперации. Среднее число циклов до снижения уровня заряда до 20 % составило 7,2, что отражает интенсивность использования аккумуляторной системы в ходе типичного рабочего цикла.

Если применять компоновки с уменьшенным тормозным резистором и буферной батареей малой емкости, то средняя доля рекуперации составляет 12,4 % от всей затраченной на движение по маршруту энергии, а на отдельных трассах достигает 14,2 %. Потери на тормозных резисторах равны 12,2 %. Таким образом, вся энергия рекуперации поровну идет на зарядку буферной батареи и рассеивается на тормозных резисторах. Среднее число циклов до снижения уровня заряда до 20 % составило 6,1, что несколько меньше, чем при использовании буферной батареи без резисторов. Средние скорости движения во всех вариантах исполнения равны 23,2 км/ч в снаряженном состоянии и 16,2 км/ч в груженом, что соответствует характерным условиям эксплуатации в карьерах.

Наибольший диапазон работы буферной батареи за один цикл составил от 0 до 36 %, основной батареи — от 100 до 72 %. Зона безопасной эксплуатации батареи по уровню заряда ограничивается

значениями от 20 до 80 %. Амплитуды степени зарядов батарей составляют 36 и 28 % соответственно. Амплитуда степени зарядов батареи в зоне безопасной эксплуатации по уровню заряда достигает 60 %. Следовательно, при выборе в качестве исходного уровня заряда буферной батареи в 20 %, а основной батареи — в 80 % с добавлением системы управления батареями, которая будет поддерживать степень заряда батарей в зонах безопасной эксплуатации, результаты оценки эффективности рекуперации энергии при торможении не изменятся.

Расчеты требований к системе накопления энергии показали, что для самосвала грузоподъемностью 240 т достаточно буферная литий-титанатная батарея емкостью около 260 кВт·ч с допустимым током заряда 5С, масса которой оценивается примерно в 2,4 т, или никель-марганец-кобальтовая батарея емкостью около 650 кВт·ч с допустимым током заряда 2С, масса которой оценивается примерно в 2,6 т. Обе батареи по массе являются приемлемыми для интеграции в существующую дизель-электрическую силовую установку, поскольку превышают массу стандартного исполнения с тормозными резисторами чуть более чем на 1 т. Установка одной из указанных батарей позволяет полностью принять энергию рекуперативного торможения и исключить необходимость применения тормозных резисторов, что снижает потери энергии и упрощает конструкцию тормозной системы.

Следует также отметить, что установленные батареи хотя и утяжеляют конструкцию, но занимают меньше места за счет большой плотности энергии. Объем отдельных батарейных модулей меньше, чем объем тормозных резисторов, поэтому при их интегрировании в конструкцию самосвала не должно возникнуть проблем.

Полученные результаты подтверждают, что внедрение рекуперативного торможения способно вернуть около четверти энергии, затрачиваемой на движение карьерного самосвала, а в благоприятных условиях и значительно больше. Использование буферной батареи делает возможным реализацию системы рекуперации даже в машинах с классической силовой установкой, обеспечивая экономию топлива и снижение тепловой нагрузки на тормозные элементы.

Заключение. Выполнена количественная оценка потенциала рекуперативного торможения карьерного самосвала на основе моделирования движения по реальным маршрутам, проведено сравнение при использовании разных типов батарей. Математическое моделирование проводилось для батарей типа NMC с током заряда 2С и типа LTO с током заряда 5С. Получены следующие основные результаты.

При использовании только буферной батареи для рекуперации средняя доля возвращаемой энергии составила 24,5 %, а на отдельных маршрутах достигала 36 %, что подтверждает высокий потенциал использования рекуперации в условиях протяженных спусков. При

использовании буферной батареи меньшей емкости совместно с тормозным резистором средняя доля возвращаемой энергии составляет 12,4 %, на отдельных трассах достигает 14,2 %. Потери на тормозных резисторах равны доле возвращаемой энергии. Для самосвала грузоподъемностью 240 т рациональной является буферная ЛТО-батарея емкостью ≈ 260 кВт · ч с предельным током заряда 5С или NMC-батарея емкостью ≈ 650 кВт · ч с предельным током заряда 2С. Масса этих батарей составляет около 2,5 т при меньшем объеме, что делает их пригодными для интеграции без существенного усложнения конструкции. Оценивая эксплуатационные показатели, следует отметить, что средние скорости движения самосвала составили 23,2 км/ч (порожный) и 16,2 км/ч (груженный). Среднее число циклов до тех пор, пока заряд не снизится до 20 %, будет равно 7,2 без использования тормозных резисторов и 6,1 с совместным применением тормозных резисторов и буферной батареи, что характеризует интенсивность использования накопителя энергии в типичном рабочем цикле.

Применение буферных батарей удорожает конструкцию тормозной системы более чем в 2 раза в зависимости от варианта исполнения, но позволяет эффективнее расходовать топливо. При среднем пробеге самосвала 80 тыс. км в год и средней эффективности рекуперации 24,5 % экономия затрат на топливо за год работы самосвала превысит стоимость батарейного блока.

Полученные данные демонстрируют, что рекуперативное торможение способно обеспечить значимый энергетический и экономический эффект, снижая расход топлива и уменьшая тепловую нагрузку на тормозные механизмы. Срок окупаемости использования буферной батареи составляет около 1 года при эксплуатации самосвала. Использование отдельной буферной батареи позволяет реализовать рекуперацию даже в традиционных дизель-электрических самосвалах, обеспечивая высокую степень потребления энергии торможения и предлагая практическое направление модернизации карьерного автотранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Soofastaei A., Karimpour E., Knights P., Kizil M. Energy-efficient loading and hauling operations. In: *Energy Efficiency in the Minerals Industry*. Cham, Springer International Publishing, 2018, pp. 121–146.
- [2] Nessim W., Zhang F.J., Zhao C.L., Zhu Z.X. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management. *Adv. Mat. Res.*, 2013, vol. 813, pp. 273–277.
- [3] Wang Q., Zhang R., Lv S., Wang Y. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2021, vol. 43, no. 100977, p. 100977.
- [4] Ibañez Noriega I., Sagastume Gutiérrez A., Cabello Eras J.J. Energy and exergy assessment of heavy-duty mining trucks. Discussion of saving opportunities. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 3, p. e25358.

- [5] Сергиенко В.П., Целуев М.Ю., Бухаров С.Н. Prediction of Thermal Conditions for Multidisc Oil-Cooled Brake of a Mining Truck. *SAE Technical Paper*, 2010, 2010-01-1713. DOI: 10.4271/2010-01-1713
- [6] Koellner W.G., Brown G.M., Rodriguez J., Pontt J., Cortes P., Miranda H. Recent advances in mining haul trucks. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2004, vol. 51, no. 2, pp. 321–329.
- [7] Yu Y., Wang Y., Li Q., Jiao B. A predictive energy management strategies for mining dump trucks. *Energy Eng.*, 2024, vol. 121, no. 3, pp. 769–788.
- [8] Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining. *IET Intell. Transp. Syst.*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 201–208.
- [9] Lobachev I., Khlobystov I., Potashnikov M., Buzunov N., Kartashov A. Statistical evaluation of regenerative braking of trucks with energy efficient mechatronic transmission. *E3S Web Conf.*, 2024, vol. 592, p. 07007.
- [10] Zhang W., Yang J., Zhang W., Ma F. Research on regenerative braking of pure electric mining dump truck. *World Electric Veh. J.*, 2019, vol. 10, no. 2, p. 39.
- [11] Gorelov V., Kartashov A., Shkarupelov E. Selection of a rational layout of an electromechanical transmission for a mining dump truck using mathematical simulation. *AIP Conference Proceedings*, 2025, vol. 3347, issue 1, Art. no. 020095. DOI: 10.1063/5.0290351
- [12] Buzunov N.V., Emelyanov M.A., Gazizullin R.L., Kartashov A.B., Murashov M.V. Sampling of a driving cycle for e-trucks with a mechatronic transmission. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 431, art. no 08003. DOI: 10.1051/e3sconf/202343108003
- [13] Yang Y., Liu Q., Han Y., Wang Y., Yang W., Luo D. Investigation of regenerative braking for the electric mining truck based on fuzzy control. *Int. J. Veh. Perform.*, 2023, vol. 1, no. 1.
- [14] Rashid Khan H., Latif Ahmad A. Supercapacitors: Overcoming current limitations and charting the course for next-generation energy storage. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2025, vol. 141, pp. 46–66.
- [15] Puddu P., Paderi M. Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability. *Energy (Oxf.)*, 2013, vol. 57, pp. 326–335.
- [16] Shishkin P.V. et al. Optimization of energy balance and powertrain for electric mining dump trucks in Coal Mine reclamation operations. *World Electric Veh. J.*, 2025, vol. 16, no. 11, p. 601.
- [17] Хлобыстов И.Д., Бузунов Н.В., Карташов А.Б., Соснин А.А. Исследование алгоритмов управления комбинированной энергетической установкой карьерного автосамосвала. *Электротехнические комплексы и системы: сборник материалов III Всероссийской конференции по электрическим машинам*. Екатеринбург, Изд-во УМЦ УПИ, 2025, с. 176–185.
- [18] Han T., Zeng B., Tong Y. Theoretical study on energy recovery rate of regenerative braking for hybrid mining trucks with different parameters. *J. Energy Storage*, 2021, vol. 42, no. 103127, p. 103127.
- [19] Kotiev G.O., Butarovich D.O., Kositsyn B.B. Energy efficient motion control of the electric bus on route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 315, art. no. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012014
- [20] Pryalukhin A.F. et al. Simulation modeling of energy efficiency of electric dump truck use depending on the operating cycle. *World Electric Veh. J.*, 2025, vol. 16, no. 4, p. 217.

- [21] Бокарев А.И., Дианов В.А., Карташов А.Б. [и др.] Типовые циклы эксплуатации карьерных самосвалов грузоподъемностью 220 тонн. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2024, № 5 (165), с. 98–107. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-98-107
- [22] Kartashov A., Kositsyn B., Kotiev G., Nazarenko S., Dubinkin D. Ensuring energy efficiency and safety of the cyclic operation of the mining dump truck. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 174, p. 03009.

Статья поступила в редакцию 06.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Арутюнян Г.А., Дианов В.А., Лобачев И.В. Оценка эффективности рекуперации энергии при торможении карьерного самосвала. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 7. EDN KNOMPK

Арутюнян Георгий Артурович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: georgy.arut@bmstu.ru

Дианов Вадим Андреевич — конструктор Научно-образовательного центра «КАМАЗ — МГТУ им. Н.Э. Баумана». e-mail: vadianov@bmstu.ru

Лобачев Иван Витальевич — старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: lobivit@bmstu.ru

Evaluation of the Efficiency of Regenerative Braking of a Quarry Dump Truck

© G.A. Arutyunyan¹, V.A. Dianov^{1, 2}, I.V. Lobachev¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Kazan (Volga Region) Federal University”, Naberezhnye Chelny, 423812, Republic of Tatarstan, Russian Federation

An assessment of the efficiency of regenerative braking in a mining dump truck operating on typical routes within an active open-pit coal mine is presented. Typical driving cycles were formulated based on real-world telemetry data collected from trucks in operation. Mathematical modeling of the vehicle's movement along the route was conducted, accompanied by an analysis of the power balance. This analysis enabled a comparison between the energy consumed for propulsion and the energy recovered through regenerative braking. The study results in a quantitative determination of the share of recoverable energy and identifies the key limitations on the system's efficiency. Requirements for the traction battery are formulated, including an assessment of its necessary capacity. The need for employing additional braking resistors to dissipate excess energy is analyzed. The obtained results allow for a quantitative evaluation of the proportion of available energy and the constraints defining the system's efficiency. Furthermore, they provide a foundation for optimizing regenerative braking systems on mining equipment.

Keywords: mining truck, electric transmissions, hybrid vehicles, regenerative braking, mining

REFERENCES

- [1] Soofastaei A., Karimpour E., Knights P., Kizil M. Energy-efficient loading and hauling operations. In: *Energy Efficiency in the Minerals Industry*. Cham, Springer International Publishing, 2018, pp. 121–146.
- [2] Nessim W., Zhang F.J., Zhao C.L., Zhu Z.X. Optimizing operational performance of diesel mining truck using thermal management. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 813, pp. 273–277.
- [3] Wang Q., Zhang R., Lv S., Wang Y. Open-pit mine truck fuel consumption pattern and application based on multi-dimensional features and XGBoost. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 43, art. 100977.
- [4] Ibañez Noriega I., Sagastume Gutiérrez A., Cabello Eras J.J. Energy and exergy assessment of heavy-duty mining trucks: discussion of saving opportunities. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 3, art. e25358.
- [5] Sergienko V.P., Tseluev M.Yu., Bukharov S.N. Prediction of Thermal Conditions for Multidisc Oil-Cooled Brake of a Mining Truck. *SAE Technical Paper*, 2010, 2010-01-1713. DOI: 10.4271/2010-01-1713
- [6] Koellner W.G., Brown G.M., Rodriguez J., Pontt J., Cortes P., Miranda H. Recent advances in mining haul trucks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, no. 2, pp. 321–329.
- [7] Yu Y., Wang Y., Li Q., Jiao B. A predictive energy management strategies for mining dump trucks. *Energy Engineering*, 2024, vol. 121, no. 3, pp. 769–788.
- [8] Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 201–208.

- [9] Lobachev I., Khlobystov I., Potashnikov M., Buzunov N., Kartashov A. Statistical evaluation of regenerative braking of trucks with energy efficient mechatronic transmission. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 592, art. 07007.
- [10] Zhang W., Yang J., Zhang W., Ma F. Research on regenerative braking of pure electric mining dump truck. *World Electric Vehicle Journal*, 2019, vol. 10, no. 2, art. 39.
- [11] Gorelov V., Kartashov A., Shkarupelov E. Selection of a rational layout of an electromechanical transmission for a mining dump truck using mathematical simulation. *AIP Conference Proceedings*, 2025, vol. 3347, no. 1, art. 020095. DOI: 10.1063/5.0290351.
- [12] Buzunov N.V., Emelyanov M.A., Gazizullin R.L., Kartashov A.B., Murashov M.V. Sampling of a driving cycle for e-trucks with a mechatronic transmission. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 431, art. 08003. DOI: 10.1051/e3sconf/202343108003
- [13] Yang Y., Liu Q., Han Y., Wang Y., Yang W., Luo D. Investigation of regenerative braking for the electric mining truck based on fuzzy control. *International Journal of Vehicle Performance*, 2023, vol. 1, no. 1.
- [14] Rashid Khan H., Latif Ahmad A. Supercapacitors: Overcoming current limitations and charting the course for next-generation energy storage. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2025, vol. 141, pp. 46–66.
- [15] Puddu P., Paderi M. Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability. *Energy*, 2013, vol. 57, pp. 326–335.
- [16] Shishkin P.V. et al. Optimization of energy balance and powertrain for electric mining dump trucks in coal mine reclamation operations. *World Electric Vehicle Journal*, 2025, vol. 16, no. 11, art. 601.
- [17] Khlobystov I.D., Buzunov N.V., Kartashov A.B., Sosnin A.A. Issledovanie algoritmov upravleniya kombinirovannoy energeticheskoy ustanovkoy kar'yernogo avtosamosvala [Investigation of control algorithms for a hybrid power plant of a mining dump truck]. In: *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: sbornik materialov III Vserossiyskoy konferentsii po elektricheskim mashinam* [Electrical Complexes and Systems: Proceedings of the III All-Russian Conference on Electrical Machines]. Yekaterinburg, UMTS UPI Publ., 2025, pp. 176–185.
- [18] Han T., Zeng B., Tong Y. Theoretical study on energy recovery rate of regenerative braking for hybrid mining trucks with different parameters. *Journal of Energy Storage*, 2021, vol. 42, art. 103127.
- [19] Kotiev G.O., Butarovich D.O., Kositsyn B.B. Energy efficient motion control of the electric bus on route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 315, art. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012014.
- [20] Pryalukhin A.F., [other authors]. Simulation modeling of energy efficiency of electric dump truck use depending on the operating cycle. *World Electric Vehicle Journal*, 2025, vol. 16, no. 4, art. 217.
- [21] Bokarev A.I., Dianov V.A., Kartashov A.B., et al. Tipovye tsikly ekspluatatsii kar'ernykh samosvalov gruzopod'emnost'yu 220 tonn [Typical operating cycles of 220-ton payload mining dump trucks]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2024, no. 5 (165), pp. 98–107. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-5-98-107.
- [22] Kartashov A., Kositsyn B., Kotiev G., Nazarenko S., Dubinkin D. Ensuring energy efficiency and safety of the cyclic operation of the mining dump truck. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 174, art. 03009.

Arutyunyan G.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: georgy.arut@bmstu.ru

Dianov V.A., Design Engineer, KAMAZ–Bauman Moscow State Technical University Research and Educational Center. e-mail: vadianov@bmstu.ru

Lobachev I.V., Senior Lecturer, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: lobivit@bmstu.ru