

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА КАРЬЕРНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Е. А. Спиридонов¹, М. В. Ярославцев¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Исследована возможность применения бортовых накопителей электрической энергии на тяговых агрегатах карьерного железнодорожного транспорта. Реализована имитационная модель для проведения тягово-энергетических расчетов и определения энергетического баланса поезда. Для условий Качканарского ГОКа установлено, что за 12-часовую смену расход энергии на тягу составляет 14 ГДж (около 3,9 тыс. кВт·ч) с учетом полного использования энергии торможений, при этом объем энергии торможений составляет 8,48 ГДж (около 2,36 тыс. кВт·ч), что составляет около 37% от расхода энергии на тягу поездов. С помощью разработанной модели исследована эффективность использования LTO и LFP-аккумуляторных батарей для накопления и последующего использования энергии электрических торможений. Определено, что наибольший экономический эффект достигается при установке LTO-батареи массой около 4,5 т с мощностью, равной пиковой мощности тягового агрегата, и полезной энергоемкостью около 400 кВт·ч. Показано, что в современных условиях применение накопителей на основе литиевых аккумуляторов на полностью электрифицированных линиях находится на пределе окупаемости, а его целесообразность определяется величиной косвенных эффектов от установки накопителей. Также показано, что использование бортового накопителя позволит реализовать частичный автономный ход 10–20 км при плоском профиле пути, что позволит частично отказаться от монтажа контактной сети при увеличении глубины карьера. Отмечена высокая эффективность замены аккумуляторными батареями дизель-генераторных секций тяговых агрегатов, если режимы движения поезда обеспечивают возможность их применения.

Ключевые слова: имитационная модель, накопитель энергии, карьерный транспорт, тяговый агрегат, LTO-батарея, LFP-батарея, энергосбережение, деградация, экономическая эффективность.

Для цитирования: Спиридонов Е. А., Ярославцев М. В. Оценка эффективности применения накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 241–256. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_241.

Evaluation of the efficiency of energy storage applications in open-pit railway transport

E. A. Spiridonov¹, M. V. Yaroslavtsev¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The paper considers application of energy storage devices at mining locomotives of open-pit railway transport. A simulation model for carrying out traction-energy calculations and determining the energy balance of train is proposed. On the example of the Kachkanar mining plant it was found that for a 12-hour shift the power consumption for traction is 14 GJ (about 3,900 kWh) per train utilizing all braking energy. There the amount of braking energy is 8.48 GJ (about 2,360 kWh), which stands for about 37% of the traction energy consumption. Using the developed model, the efficiency of using LTO and LFP batteries for the accumulation and subsequent use of the energy of electric braking has been investigated. It has been found that the most expedient case is the installation of LTO battery weighing about 4.5 tons with a power equal to the peak power of the locomotive, having a useful energy capacity of about 400 kWh. It is shown that in modern conditions the usage of energy storage devices based on lithium batteries on fully electrified lines is at the payback limit, and its feasibility is determined by indirect effects. It has also been shown that application of an on-board energy storage will make it possible to realize a partial autonomous movement of 10-20 km on a flat track, which will partially eliminate the installation of a traction network with an increase in the depth of the mine. The higher efficiency of batteries application at the locomotives with diesel generator units is noted in the case of driving cycles of the train enabling frequent application of batteries.

Key words: Simulation, model, energy storage, open-pit transport, mining locomotive, LTO battery, LFP battery, energy saving, degradation, economic efficiency

For citation: Spiridonov E. A., Yaroslavtsev M. V. Evaluation of the efficiency of energy storage applications in open-pit railway transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):241–256. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_241.

1. Введение

Как отмечают многие исследователи [1–5], современный этап развития месторождений полезных ископаемых характеризуется открытым способом разработки, при этом значительная доля в себестоимости добычи (до 60–75%) связана с транспортом руды. Отмечается, что эта тенденция характерна не только для России и стран СНГ, но и для всего мира.

На большей части крупнейших горнодобывающих предприятий России, где разработка полезных ископаемых ведется открытым способом, применяется железнодорожная откатка. Ее преимуществами перед автомобильной являются высокая производительность и низкая себестоимость, обусловленная меньшим сопротивлением движению и возможностью использования электрической энергии для тяги поездов.

Характерным ее недостатком является сложность строительства и эксплуатации железнодорожной инфраструк-

туры в условиях карьеров. Помимо устройства путей применение тяговых агрегатов требует также сооружения контактной сети по всей их длине, включая участки погрузки и выгрузки товара. Наличие на них контактной сети значительно затрудняет работу погрузочного оборудования, усложняет конструкцию токоприемников, создает постоянный риск перерыва работ при обрыве контактного провода.

Вместе с тем железнодорожный транспорт обладает и рядом неоспоримых преимуществ:

- Энергетическая эффективность. За счет того, что в процессе движения транспортного средства практически отсутствует деформация колеса при взаимодействии с путевой структурой, сопротивление движению у этого вида транспорта значительно ниже в сравнении с автомобильным. Это приводит к тому, что расход энергии, приведенный к единице транспортной работы, является минимальным [6,7].

- Экологичность. В условиях увеличения глубины разработки открытых месторождений существенно ухудшаются условия проветривания, что негативно сказывается на концентрации вредных примесей в воздухе [4,8]. Электрический транспорт, благодаря отсутствию выхлопных газов, характерных для дизельных автотранспортных средств, не оказывает влияния на качество воздуха в карьере.

- Автоматизация. Автоматизация производственных процессов является основой роста производительности любого предприятия, а транспортная система на основе железнодорожного транспорта может быть автоматизирована на более высоком уровне, вплоть до введения полностью автоматических транспортных единиц (в отличие от автомобильного транспорта, где подобные решения сопряжены с большим количеством трудностей).

Еще в 1970-е гг. при разработке первых тяговых агрегатов переменного тока ОПЭ1А и ОПЭ1 была предпринята попытка решения этой проблемы путем введения в состав тягового агрегата дизель-генераторных секций. Предполагалось, что они обеспечат возможность автономного движения на неэлектрифицированных участках, что решит перечисленные проблемы и позволит использовать тяговые агрегаты для маневровых передвижений.

Однако практика эксплуатации тяговых агрегатов на ряде горнодобывающих предприятий показала, что введение дизель-генераторных секций является экономически нецелесообразным по причине высокой стоимости топлива, технического обслуживания и ремонта секций, необходимости привлечения дополнительного штата квалифицированных специалистов для эксплуатации дизельных секций. Еще одной проблемой применения дизель-

генераторных секций являлся выброс выхлопных газов, удаление которых из карьеров, расположенных ниже уровня окружающей местности, было отдельной проблемой. Эти причины привели к отказу от эксплуатации дизель-генераторных секций большинством горнодобывающих предприятий, на которые они поступали.

В настоящее время становится возможно и целесообразно повторно рассмотреть вопрос о схемах тяговых агрегатов. С одной стороны, это связано с повышением требований к экономичности и экологичности карьерного транспорта, а с другой стороны — с развитием силовой преобразовательной техники и устройств накопления энергии. Действительно, применение современных силовых преобразователей электрической энергии позволяет повторно использовать значительную часть энергии, теряемой при торможении поезда. Использование накопителей электрической энергии позволит обеспечить автономное передвижение поезда на участках погрузки без сохранения на них контактной сети и выброса продуктов сгорания топлива, а также обеспечить прием энергии торможения независимо от наличия ее потребителей. Важно, что при длительном простое поезда под погрузкой применение электрической тяги не приводит к перерасходу энергии, в то время как эксплуатация дизель-генераторных секций требовала длительной и неэкономичной работы на холостом ходу для поддержания теплового режима и готовности к работе.

Целью исследования является анализ требований к энергетическим и массогабаритным параметрам бортового источника энергии и формулировка критериев оценки эффективности такого технического решения.

Анализ современных тенденций в транспортной сфере и типовых характеристик накопителей энергии позволяет говорить о том, что базовым вариантом для реализации бортового источника энергии является именно электрохимический накопитель [9–11, 14].

В работе [14] дается оценка использования нескольких типов накопителей энергии применительно к условиям карьерного железнодорожного транспорта. В этой работе исследуется контактно-аккумуляторный подвижной состав с автономным ходом, способный заряжать бортовой накопитель как при движении под контактной сетью, так и при рекуперации, а также автономно передвигаться на тех участках, где контактная сеть отсутствует. Авторы работы утверждают, что при размещении непосредственно на тяговых агрегатах необходимо использовать гибридный накопитель, сочетающий электрохимическую батарею и батарею конденсаторов двойного электрического слоя. Также авторы показывают, что основное ограничение, накладываемое на бортовой источник энергии, заключается в реализации требуемой мощности на колесе.

При расчете энергетических параметров тяговой аккумуляторной батареи (АкБ) необходимо рассматривать два основных ограничения:

- мощность батареи. Этот параметр ограничивает максимальную скорость, которую сможет развивать транспортное средство при конкретных параметрах трассы. Также этот показатель ограничивает максимальное ускорение, но для условий карьерного транспорта этот фактор можно не рассматривать, поскольку ускорение лимитируется ограничением тягового агрегата по сцеплению;

- энергоемкость батареи. Этот параметр определяет расстояние, которое

сможет преодолеть транспортное средство в конкретных условиях в автономном режиме. Этот параметр также определяет срок службы АкБ, поскольку при эксплуатации в условиях, отличающихся от проектных, будет меняться глубина разряда батареи [15].

В свою очередь решение поставленных задач требует применения имитационного моделирования при выполнении тягово-энергетических расчетов для тягового агрегата, оборудованного НЭ, и определения условий работы накопителей.

2. Описание имитационной модели

Целью разработки имитационной модели движения электровоза было определение суммарного потребления энергии на тягу, доли возвращаемой в накопитель энергии, определения минимально необходимых энергоемкости и мощности накопительной установки. Для этого требуется получить зависимость потребляемой тяговым приводом мощности от времени.

При моделировании приняты традиционные для тяговых расчетов упрощения: поезд представлен в виде материальной точки, изменения сил сопротивления движению при проследовании переломов профиля, а также при погрузке и выгрузке вагонов приняты мгновенными.

При расчете принято, что движение происходит на звеньевом пути. Повышение сопротивления движению учтено в дополнительном сопротивлении движению при приведении профиля пути.

При моделировании профиль пути принят состоящим из 4 участков, соответствующих наиболее часто выполняемым на Качканарском ГОКе рейсам. Предполагается, что каждый тяговый агрегат совершает в среднем

равное количество рейсов по каждому из маршрутов. Как правило, за сутки совершается 8 рейсов. Поскольку при моделировании учитывалось лишь время нахождения поезда в движении, а длительность погрузки и выгрузки вагонов не учитывалась, то полученное в результате расчетное время хода существенно ниже общего рабочего времени.

Авторами разработана имитационная модель процесса потребления энергии электроприводом тягового агрегата НП1 в среде Simulink. Модель, общая структура которой показана на рис. 1, состоит из следующих основных элементов:

- подсистема Traction calculation, реализующая уравнения движения поезда. Мгновенные значения координаты поезда (L) и мощности привода (P) используются другими блоками модели;

- подсистема Track profile, реализующая зависимость профиля пути i (с учетом приведенного сопротивления движению на кривых участках) от координаты поезда (L), а также задающая моменты погрузки и разгрузки вагонов;

- подсистемы, реализующие определение сил тяги и торможения методом кусочно-линейной интерполяции по характеристикам, заданным в правилах тяговых расчетов на промышленном транспорте (ПТРпром) [15,17]. Расчет выполнен в предположении, что при вождении поезда применяется электрическое торможение с возвратом энергии в бортовой накопитель. Построение тормозных характеристик выполнено на основании тяговых, с поправкой на увеличение тормозной силы на величину потерь энергии в тяговом приводе;

- подсистема расчета основного удельного сопротивления движению.

Его величина определена согласно рекомендациям ПТРпром с учетом веса поезда. Величина дополнительного сопротивления движению определяется исходя из профиля пути [15];

- блок Train driver mode, имитирующий действия машиниста поезда. Управляющее воздействие представлено зависимостью режима движения от времени. В модели выделено 3 режима движения: режим тяги с положительным ускорением, режим поддержания постоянной скорости движения и режим торможения. Поскольку на большей части своей протяженности карьерные пути имеют резко выраженный уклон, при котором скорость за короткое время падает до нуля либо превышает допустимое ограничение, то длительностью нахождения поезда в режиме выбега можно пренебречь;

- блок Energy Storage Control для задания ограничений мощности и емкости батареи и определения режимов ее работы на основе указанных ограничений. Блок ограничивает мощность заряда или разряда батареи на основе анализа ограничений по мощности и текущего состояния заряда (SOC) батареи.

Зависимость задания режима движения от координаты подобрана таким образом, чтобы обеспечить разгон и поддержание максимальной установленной скорости, а также торможение до остановки в местах погрузки, смены направления движения и выгрузки.

В основном поле модели производится построение кривых движения поезда, зависимостей силы тяги локомотива и мощности тягового привода от времени, а также расчет мощности и энергии, передаваемой в накопительное устройство (рис. 2).

Из рис 2, а видно, что максимальная мощность, развиваемая приводом в процессе работы, достигает 6,5 МВт

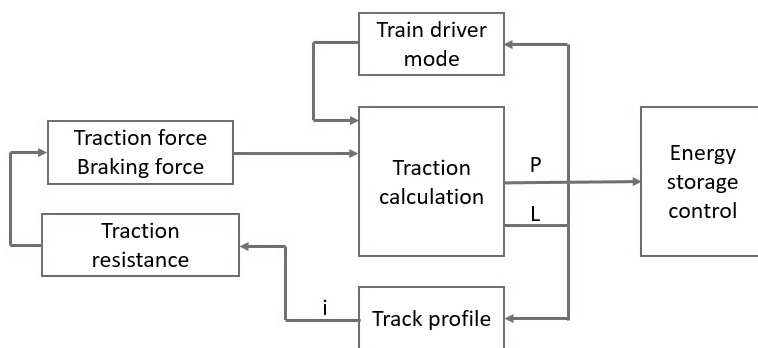


Рис. 1. Общий вид имитационной модели поезда с бортовым накопителем энергии
 Fig. 1. General view of the model of train with on-board energy storage

(как в режиме тяги, так и в режиме торможения). Из рис. 2, б видно, что расход энергии на тягу за смену составляет около 14 ГДж (около 3,9 тыс. кВт·ч) с учетом полного использования энергии торможений (падающие участки кривой, что соответствует отрицательным значениям мощности привода). При этом «чистый» объем энергии торможений составляет 8,48 ГДж (около 2,36 тыс. кВт·ч). Далее будет показано, как параметры бортового накопителя энергии влияют на эффективность использования этого количества энергии торможения.

3. Результаты моделирования и их обсуждение

В ходе исследования рассматривались два класса литий-ионных аккумуляторных батарей: литий-титанатные батареи (LTO) и литий-железофосфатные батареи (LFP). Выбор этих типов обусловлен их широким использованием в транспортной индустрии, кроме того, оба типа батарей имеют свои преимущества и недостатки, влияние которых на эффективность их использования исследуется в данной работе. При достаточно низких показателях удельной емкости LTO-батареи имеют и ряд существенных преимуществ: высокую удельную мощность, способность

эффективно работать при глубине разряда 100%, большое количество циклов перезаряда (до 20–25 тыс.) и стабильность энергетических характеристик при низких температурах (до –40 град. Цельсия) [10, 13, 16]. Основными особенностями LFP батарей являются достаточно низкая стоимость, высокие показатели удельной емкости, низкая удельная мощность и сравнительно низкий ресурс (до 3000 циклов) [12, 18, 19].

Для моделирования были приняты параметры четырех различных АкБ, приведенные в табл. 1. Для исследования выбраны LFP-батареи отечественного производства (компания «Лиотех») и LTO-батареи компании Toshiba (Япония).

Подготовка к моделированию включает последовательное выполнение следующих этапов.

На первом этапе задаемся желаемой мощностью бортовой АкБ. На основе этого показателя определяется формула батареи, состоящей из отдельных ячеек:

- число последовательно соединенных элементов (S_s) определяется отношением рабочего напряжения тягового агрегата к номинальному напряжению одного элемента;
- число параллельных ветвей батареи (P_p) определяется током батареи

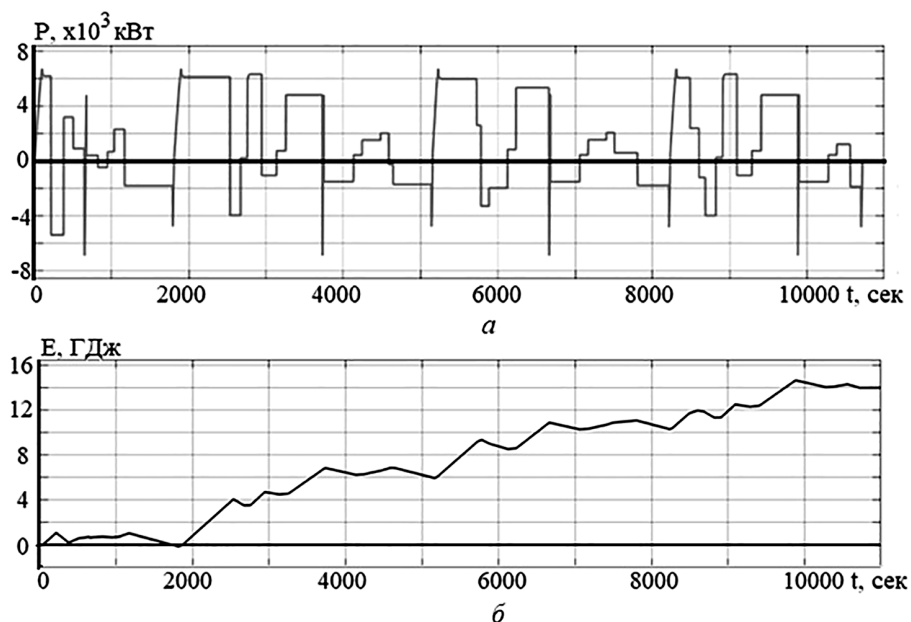


Рис. 2. Примеры реализации модельного эксперимента:
a – зависимость мощности от времени; *б* – зависимость энергии привода от времени
 Fig. 1. Examples of the model realization:
a – power vs. time; *b* – drive energy vs. time

Таблица 1
Параметры аккумуляторных батарей для модели
Parameters of batteries used in the model

Базовый элемент	Емкость, А·ч	Мощность, Вт	Максимальный зарядный/разрядный ток, А	Номинальное напряжение, В	Масса, кг
Toshiba SCiB 23 Ah cell	23	1000	–/–	2,3	0,55
Toshiba SCiB 10 Ah cell	10	1800	–/–	2,4	0,55
Лиотех LT-LFP 72	72	–	1C/2C	3,2	1,8
Лиотех LT-LFP 65	65	–	1C/3C	3,2	1,8

(I_{Cell}) и зависит от ограничений, связанных с определенным типом батареи, с округлением до большего целого (величина тока элемента определяется по технической документации).

На втором этапе по известной формуле батареи ($SsPp$) и массе одного элемента определяется масса батареи,

уточняются ее энергоемкость и мощность, а также их удельные показатели, приведенные к единице массы.

Режим работы батарей определялся целью буферизации максимально возможного объема энергии электрических торможений. Такой режим предполагает заряд накопителя энергии при

торможении с последующей отдачей этой энергии в режиме тяги. Результаты одной из реализаций модели (для батареи LFP) приведены на рис. 3.

На рис. 3 видно влияние ограничения по мощности батареи: в моменты времени, когда мощность привода превышает мощность батареи, лишь часть энергии торможения аккумулируется для последующего использования. Разница энергии торможения, вырабатываемой приводом, и энергии торможения, запасаемой батареями, обусловлена потерями при заряде и ограничением мощностями при заряде и ограничением мощностями и SOC батареи (если батарея полностью заряжена, она перестает принимать энергию торможения). В итоге одним из результатов моделирования является интегральный показатель (определяемый за смену) энергии торможения, действительно использованной АКБ, определяемый как отношение энергии торможения, запасаемой батареями, к энергии торможения,

вырабатываемой приводом. Результаты серии модельных экспериментов приведены в табл. 2.

Количество циклов в год определялось из условия двух 12-часовых смен в сутки и 365 рабочих суток в году. Срок службы батареи определялся как отношение нормативного количества циклов (для LTO-батарей — 20 000 циклов, для LFP-батарей — 3 000 циклов) к годовому количеству циклов.

По результатам моделирования можно построить зависимости использования энергии торможения ($E_{\text{ТОР}}$, %) от мощности и емкости батареи (рис. 4). По графикам видно (рис. 4, а), что во всем диапазоне мощностей батареи LTO более эффективно запасают энергию торможения. Это связано с тем, что LFP-элементы имеют существенное ограничение зарядной мощности (для рассмотренных элементов максимальный ток заряда составляет 1С), а на графиках представлена раз-



Рис. 3. Объем энергии в батарее и динамика изменения мощности
Fig. 3. Battery energy and power

Таблица 2
Результаты модельных экспериментов
Simulation results

Масса АкБ, т	Ем-кость АкБ, кВт·ч	Мощ-ность АкБ, кВт	Фор-мула АкБ	Объем исполь-зованной энергии торможения, %	Мини-мальный SOC, %	Циклов за сме-ну (ниже 50% SOC)	Циклов в год	Срок служ-бы, лет
Базовый элемент: LTO Toshiba 23Ah 2,3V 1000W								
4,306	414,2	7800	1305s6p	90,00	29	4	2920	6,85
3,589	345,2	6500	1305s5p	89,99	14	5	3650	5,48
2,871	276,1	5200	1305s4p	88,73	0	10	7300	2,74
2,153	207,1	3900	1305s3p	82,13	0	10	7300	2,74
Базовый элемент: LTO Toshiba 10Ah 2,4V 1800W								
4,452	210	16600	1250s7p	85,06	0	10	7300	2,74
3,82	180	13400	1250s6p	79,63	0	10	7300	2,74
3,188	150	11200	1250s5p	72,82	0	11	8030	2,49
2,55	120	9000	1250s4p	60,85	0	11	8030	2,49
1,91	90	6700	1250s3p	48,13	0	13	9490	2,11
Базовый элемент: LFP Лиотех 65Ah 3,2V 416W*								
20,26	2341	7000	938s12p	78,46	87	0,25	182,5	16,44
18,57	2146	6400	938s10p	76,10	87	0,25	182,5	16,44
10,13	1171	3500	938s6p	52,30	84	0,25	182,5	16,44
6,75	780	2300	938s4p	35,41	84	0,25	182,5	16,44
3,377	390	1150	938s2p	18,01	84	0,25	182,5	16,44
1,688	195	585	938s1p	9,04	84	0,25	182,5	16,44
Базовый элемент: LFP Лиотех 72Ah 3,2V 690W*								
16,884	2160	6470	938s10p	76,16	85	0,25	182,5	16,44
10,13	1296	3890	938s6p	57,10	82	0,25	182,5	16,44
6,754	864	2580	938s4p	39,02	82	0,25	182,5	16,44
5,065	648	1900	938s3p	29,47	82	0,25	182,5	16,44
3,377	432	1290	938s2p	19,86	82	0,25	182,5	16,44
1,688	216	645	938s1p	9,98	82	0,25	182,5	16,44

* Для LFP-батарей указана разрядная мощность, определенная из условия тока разряда 2С (3С). Зарядная мощность для этих батарей определяется максимальным током 1С.

рядная мощность. На практике можно превысить это ограничение, но это приведет к существенному увеличению скорости деградации батареи и нарушению ее тепловых режимов [19]. Также

можно увидеть, что для LTO-батарей эффективность аккумулирования энергии различная: для батареи на основе высокомоощных элементов LTO Toshiba 10Ah 1800W проявляется нехватка

емкости. Влияние мощности батареи также видно на рис. 4, б: при сопоставимой емкости батареи эффективность использования энергии торможения значительно выше у LTO-батареи.

Следует отметить, что увеличение мощности LTO-батареи с 3,9 до 7,8 МВт дает увеличение энергосберегающего потенциала лишь на 8% (с 82 до 90%), но, с учетом количества циклов перезаряда, эта мера обеспечивает практически двукратное увеличение срока службы батареи.

Оценку экономической эффективности предлагаемого решения можно провести с помощью оценки чистой текущей стоимости (NPV). Для расчета определяется стоимость аккумуляторной батареи (за основу берется среднее значение стоимости ячеек на российском рынке по состоянию на ноябрь 2021 года), ставка дисконтирования (на уровне официальной инфляции в РФ — 8,4%) и несколько значений стоимости электрической энергии (без учета изменения ее стоимости в будущем). Результаты расчетов срока окупаемости представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при стоимости электрической энергии свыше 4 руб./1 кВт·ч начальные инвестиции в бортовой накопитель могут окупиться раньше гарантийного срока эксплуатации батареи. Однако такой вывод можно сделать лишь для LTO-батареи. Расчет показал, что LFP-батареи при значительных начальных инвестициях не окупают себя даже в среднесрочной перспективе.

Таким образом, можно заключить, что бортовая аккумуляторная батарея на основе LTO-элементов с повышенной энергоемкостью является наилучшей не только с технической (приемлемое значение массы при максимальной эффективности использования энергии торможения), но и с экономической точки зрения (окупаемость в пределах срока эксплуатации при определенных ценах на электроэнергию).

В качестве альтернативы LTO-батареем можно рассмотреть применение конденсаторов с двойным электрическим слоем (суперконденсаторов, КДЭС). Характерной их особенностью является высокая удельная мощность и большое количество допустимых циклов заряда–

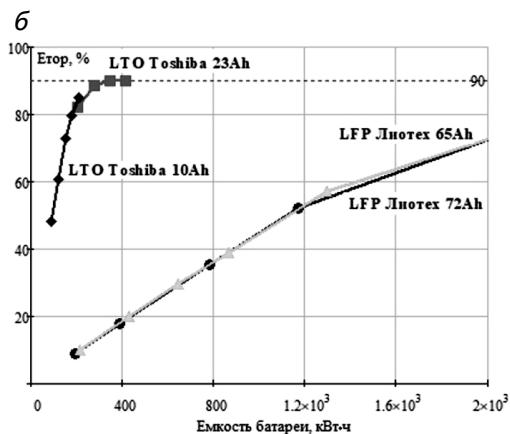
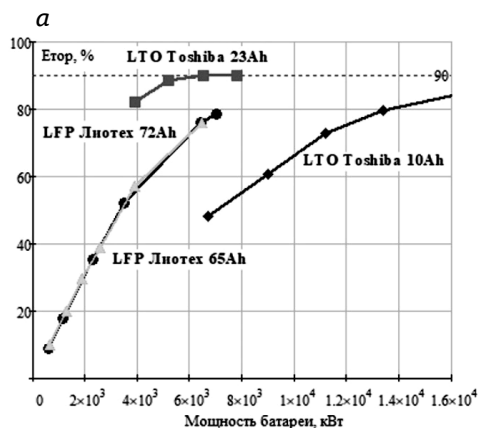


Рис. 4. Зависимость доли аккумулированной энергии торможения (E_{top} , %): а — от мощности батареи; б — от емкости батареи

Fig. 4. Dependence of a part of stored braking energy: а — from battery power; б — from battery capacity

Таблица 3

Расчет срока окупаемости буферной аккумуляторной батареи
Calculation of the payback period of the buffering battery

Масса АкБ, т	Емкость АкБ, кВт·ч	Стоимость АкБ, млн руб.	Годовая экономия энергии, млн кВт·ч	Срок службы АкБ, лет	Срок окупаемости при различной стоимости электроэнергии (Сэ за 1), лет		
					3 руб./1 кВт·ч	4 руб./1 кВт·ч	5 руб./1 кВт·ч
Базовый элемент: LTO Toshiba 23Ah 2,3V 1000W							
4,306	414,2	27,014	1,548	6,85	8,3	5,7	4,3
3,589	345,2	22,511	1,547	5,48	6,5	4,6	3,5
2,871	276,1	18,009	1,525	2,74	5,0	3,6	2,7
Базовый элемент: LTO Toshiba 10Ah 2,4V 1800W							
4,452	210	15,750	1,462	2,74	4,5	3,2	2,4
3,82	180	13,500	1,369	2,74	4,0	2,9	2,3
3,188	150	11,250	1,252	2,49	3,6	2,6	2,1
2,55	120	9,000	1,046	2,49	3,4	2,5	1,9
Базовый элемент: LFP Лиотех 65Ah 3,2V 416W							
20,26	2341	92,862	1,349	16,44	— *	— *	— *
1,688	195	7,739	0,155	16,44	— *	— *	14,9
Базовый элемент: LFP Лиотех 72Ah 3,2V 690W							
16,884	2160	86,296	1,310	16,44	— *	— *	— *
1,688	216	8,630	0,172	16,44	— *	— *	15,1

* Знак «—» означает, что с учетом дисконтирования затраты никогда не окупаются (кривая NPV не выходит из области отрицательных значений).

разряда ($10^6 - 10^7$ циклов). Необходимое количество КДЭС определяется главным образом их удельной энергоемкостью, которая составляет около 3 Вт·ч/кг, что значительно ниже энергоемкости аккумуляторов [11, 12].

Как следует из результатов моделирования, максимальная энергии торможения поезда достигает 200–300 кВт·ч, в большинстве случаев она находится в пределах 150 кВт·ч. На основании характеристик выпускаемых в настоящее время КДЭС авторами оценены возможные параметры накопительного модуля. Модуль весом около 50 т и энер-

гоемкостью около 150 кВт·ч может быть размещен в кузове специальной секции тягового агрегата. При колебании уровня напряжения модуля со 100 до 50%, что допустимо по условиям работы тяговых преобразователей, может быть использовано до 75% накопленной энергии. Это позволит сократить потребление энергии из контактной сети на 1 млн кВт·ч в течение года при сроке службы накопителя не менее срока службы тягового агрегата. Тем не менее, стоимость модуля, достигающая 500 млн руб., делает его применение экономически нецелесообразным.

Экономические показатели работы батареи могут существенно измениться в большую сторону с повышением стоимости выработки энергии на тягу, например, в случае эксплуатации на карьерных путях тепловозов либо тяговых агрегатов с дизель-генераторными секциями. Так, удельный расход топлива дизелями типа Д49, установленными на тяговых агрегатах ОПЭ1А и ОПЭ1Б, составляет 204 г/кВт·ч [20] на полной мощности. Это соответствует стоимости выработки 11,0 руб./кВт·ч в случае оптовой закупки топлива по цене 54 руб./кг, принятой в конкурсах, проводимых ОАО «РЖД».

В таком случае становится эффективной замена дизель-генераторных секций аккумуляторными при большой протяженности участков автономного движения, а при малой их протяженности — замена их моторными думпками с установкой на последних аккумуляторных модулей массой 5–10 т и энергоемкостью 200–400 кВт·ч, достаточной для обеспечения дальности хода 10–20 км на площадке либо 1–2 км на подъеме 35% при массе поезда 2100 т.

На основании выполненного выше тягового расчета можно оценить экономический эффект замены автономного хода аккумуляторной тягой. При указанной стоимости топлива стоимость сэкономленной энергии в 3,5 раза превосходит стоимость аккумуляторов в составе батареи.

Полученные результаты не учитывают повышенного расхода топлива дизель-генераторной секцией при работе с частичной нагрузкой и прогреве, а также возможности повысить отдаваемую аккумулятором мощность и, следовательно, скорость движения на руководящем уклоне в режиме автономного хода. Кроме того, при замене дизель-генератора аккумуляторной

батареей значительно сокращается трудоемкость и стоимость технического обслуживания локомотива.

4. Выводы

В статье описана имитационная модель в среде MatLAB Simulink, позволяющая исследовать энергетические потоки в процессе работы карьерного железнодорожного транспорта на примере поезда массой 2100 т с тяговым агрегатом НП1. Модель является универсальной и может быть использована для любого подвижного состава, функционирующего на любом заранее известном профиле пути. На примере Качканарского ГОКа установлено, что за 12-часовую смену расход энергии на тягу составляет 14 ГДж (около 3,9 тыс. кВт·ч) с учетом полного использования энергии торможений, при этом объем энергии торможений составляет 8,48 ГДж (около 2,36 тыс. кВт·ч), что составляет около 37% от расхода энергии на тягу поездов.

С помощью разработанной модели исследованы режимы работы буферного бортового накопителя энергии, задачей которого является прием энергии торможения и последующая ее передача в тяговый привод. Установлено, что наиболее целесообразна установка ЛТО-батареи массой около 4,5 т с мощностью, равной пиковой мощности тягового агрегата, и полезной энергоемкостью около 400 кВт·ч. (90% всей энергии торможений аккумулируется и передается в тяговый привод батареей массой 4,3 т и емкостью 414 кВт·ч.) Показано, что LFP-батареи, несмотря на более высокие значения емкости, не могут эффективно работать в силу ограничения мощности, особенно в режиме заряда. При этом высокоомощные ячейки ЛТО-батарей также не являются эффективным решением в силу недостаточной емкости,

что приводит к большому количеству циклов перезаряда и малому расчетному сроку службы батареи.

Принимая во внимание высокое количество циклов, допустимую глубину разряда в 100%, а также возможность работать при температурах до -40° Цельсия, можно считать ЛТО-батареи наилучшим решением для применения на карьерном железнодорожном транспорте в качестве основной меры, направленной на реализацию энергосберегающих мероприятий. Проведенная экономическая оценка срока окупаемости с учетом дисконтирования денежных потоков показала, что при стоимости электрической энергии более 4 руб./кВт·ч данное техническое решение становится экономически оправданным (срок окупаемости становится меньше расчетного срока эксплуатации батареи).

Таким образом, в современных условиях применение накопителей на основе литиевых аккумуляторов на полностью электрифицированных линиях находится на пределе окупаемости, а его целесообразность определяется величиной косвенных эффектов от установки накопителей. Тем не менее их применение может стать оправданным с ростом стоимости электроэнергии и сокращением цен на литиевые аккумуляторы, прогнозируемым в текущем десятилетии. Поэтому при проектировании тяговых агрегатов уже в настоящее время целесообразно предусматривать возможность регенерации энергии и размещения тяговых батарей.

Также показано, что использование батареи с указанными технико-экономическими параметрами поможет реализовать частично автономный ход до 20 км, например в зоне погрузки. Такое решение позволит дополнительно снизить затраты, связанные с переносом или продлением контактной сети при увеличении глубины карьера.

Наиболее значительный экономический эффект, делающий целесообразным применение аккумуляторных накопителей в настоящее время, может быть получен при обеспечении ими автономного хода на участках, обслуживаемых тяговыми агрегатами с дизель-генераторными секциями. Однако поскольку характеристики рекомендуемых параметров накопителя значительно зависят от протяженности автономного хода, их расчет и определение эффекта требуют выполнения расчета применительно к условиям эксплуатации конкретного предприятия.

В дальнейшем представляет интерес разработка модели, учитывающей постепенную деградацию батареи в процессе эксплуатации. Указанная задача представляется особенно интересной, поскольку такой учет позволит более точно определить изменение общей экономии энергии с учетом скорости деградации батареи и оценить предельные энергетические показатели, при которых необходимо заменять батарею. Решение такой задачи позволит более точно оценить экономическую эффективность от внедрения буферных накопителей энергии для снижения транспортной составляющей затрат горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галанина Т. В., Баумгартэн М. И., Королева Т. Г. Эколого-экономическое моделирование техногенного воздействия горнодобывающего региона на окружающую среду и человека // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 88–97. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-88-97.

2. Тимофеев И. П., Большунов А. В., Столярова М. С., Авдеев А. М. Особенности работы тягового устройства на криволинейных участках рельсового пути // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 171–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.

3. Журавлев А. Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3–1. – С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

4. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, iss. 6, pp. 1065–1071. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.09.015.

5. Belisha E. Railway transport as an important factor in the sustainable development of mining // International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Albena, BULGARIA. 2016, pp. 705–709. DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S03.092.

6. Tarasov P. I., Khazin M. L., Zyryanov I. V., Nevolin D. G. Mining operations in construction of main transport routes // Gornaya Promyshlennost. 2020, no.5, pp. 91–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-91-96.

7. Potryasaev Y. A., Pinykh A. A., Brezshnev I. V. Organizing of the Rock transportation by Railway Transport // Gornyi Zhurnal. 2017, no. 5, pp.36–37. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.07.

8. Asif Z., Chen Z., Han Y. Air quality modeling for effective environmental management in the mining region // Journal of the Air and Waste Management Association. 2018, vol. 68(9), pp. 1001–1014. DOI: 10.1080/10962247.2018.1463301.

9. Göhlich D., Fay T.-A., Park S. Conceptual Design of Urban E-Bus Systems with Special Focus on Battery Technology // Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Delft, The Netherlands. 2019. DOI:10.1017/dsi.2019.289.

10. Nemeth T. Schröer P., Kuipers M., Sauer D. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations // Journal of Energy Storage. 2020, vol. 31, 101656. DOI: 10.1016/j.est.2020.101656.

11. Burke A., Zhao J. Development, Performance, and Vehicle Applications of High Energy Density Electrochemical Capacitors // Applied Sciences (Switzerland). 2022, vol. 12(3), art. 1726. DOI: 10.3390/app12031726.

12. Kimura R., Kondo K., Aiso K., Kobayashi H., Sakamoto S., Okada A., Sasaki K., Kato T. A Method to Design A Power Flow and Energy Management Controller for Battery and EDLC Hybrid Electric Vehicle // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2021. DOI: 10.1109/ISIE45552.2021.9576437

13. Xu B., Oudalov A., Ulbig A., Andersson G., Kirschen D. S. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment // IEEE Transactions on Smart Grid. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. DOI: 10.1109/TSG.2016.2578950.

14. Степаненко В. П., Белозеров В. И., Сорин Л. Н. Перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 317–322.

15. Keropyan A., Kantovich L., Voronin B., Kuziev D., Zotov V. Influence of uneven distribution of coupling mass on locomotive wheel pairs, its tractive power, straight and curved sections of industrial rail tracks // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, no 87, art. 062005. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062005.

16. Yu W., Zhengyu C., Xuning F., Xuebing H., Languang L., Jianqiu L., Minggao O. Overcharge durability of Li4Ti5O12 based lithium-ion batteries at low temperature // Journal of energy storage. 2018, vol.19, pp. 302–310. DOI: 10.1016/j.est.2018.08.012.

17. Бахтурин Ю. А. Актуальные вопросы железнодорожного транспорта карьеров // Проблемы недропользования. – 2014. – № 3(3). – С.145–153.

18. Nikolaidis P. Chatzis S. Poullikkas A. Life cycle cost analysis of electricity storage facilities in flexible power systems // *International journal of sustainable energy*. 2019, vol. 38, iss. 8, pp. 752–772. DOI: 10.1080/14786451.2019.1579815.
19. Zhang X., Peng H., Wang H., Ouyang M. Hybrid Lithium Iron Phosphate Battery and Lithium Titanate Battery Systems for Electric Buses // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018, vol. 67 (2), pp. 956–965. DOI: 10.1109/TVT.2017.2749882.
20. Овчаренко С. М., Минаков В. А., Ведрученко В. Р. Совершенствование технологического процесса ремонта дизелей типа Д-49 // *Известия Транссиба*. — 2019. — № 2(38). — С. 2–8. **ТЯБ**

REFERENCES

1. Galanina T. V., Baumgarten M. I., Koroleva T. G. Ecological-and-economic modeling of anthropogenic impact on the environment and health in mining regions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, vol. 4, pp. 88–97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-88-97.
2. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stolyarova M. S., Avdeev A. M. Features of pulling equipment operation in curved railroad. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, vol. 1, pp. 171–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.
3. Zhuravlev A. G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, vol. 3-1, pp. 583–601. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
4. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, iss. 6, pp. 1065–1071. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.09.015.
5. Belisha E. Railway transport as an important factor in the sustainable development of mining. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*. Albena, BULGARIA. 2016, pp. 705–709. DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S03.092.
6. Tarasov P. I., Khazin M. L., Zyryanov I. V., Nevolin D. G. Mining operations in construction of main transport routes. *Gornaya Promyshlennost*. 2020, vol. 5, pp. 91–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-91-96.
7. Potryasaev Y. A., Pinykh A. A., Brezhnev I. V. Organizing of the Rock transportation by Railway Transport. *Gornyi Zhurnal*. 2017, vol. 5, pp. 36–37. DOI: 10.17580/gzh.2017.05.07.
8. Asif Z., Chen Z., Han Y. Air quality modeling for effective environmental management in the mining region. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 2018, vol. 68(9), pp. 1001–1014. DOI: 10.1080/10962247.2018.1463301.
9. Göhlich D., Fay T.-A., Park S. Conceptual Design of Urban E-Bus Systems with Special Focus on Battery Technology. *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, The Netherlands. 2019. DOI:10.1017/dsi.2019.289.
10. Nemeth T., Schröer P., Kuipers M., Sauer D. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications — Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage*. 2020, vol. 31,101656. DOI: 10.1016/j.est.2020.101656.
11. Burke A., Zhao J. Development, Performance, and Vehicle Applications of High Energy Density Electrochemical Capacitors. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12(3). art. 1726. DOI: 10.3390/app12031726.
12. Kimura R., Kondo K., Aiso K., Kobayashi H., Sakamoto S., Okada A., Sasaki K., Kato T. A Method to Design A Power Flow and Energy Management Controller for Battery and EDLC Hybrid Electric Vehicle. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2021. DOI: 10.1109/ISIE45552.2021.9576437.
13. Xu B., Oudalov A., Ulbig A., Andersson G., Kirschen D. S. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140. DOI: 10.1109/TSG.2016.2578950.

14. Stepanenko V. P., Belozyerov V. I., Sorin L. N. Prospects for the use of combined energy storage devices in open-pit railway transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 5, pp. 317–322. [In Russ].
15. Keropyan A., Kantovich L., Voronin B., Kuziev D., Zotov V. Influence of uneven distribution of coupling mass on locomotive wheel pairs, its tractive power, straight and curved sections of industrial rail tracks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, no 87, art. 062005. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062005.
16. Yu W., Zhengyu C., Xuning F., Xuebing H., Languang L., Jianqiu L., Minggao O. Overcharge durability of Li4Ti5O12 based lithium-ion batteries at low temperature. *Journal of energy storage*. 2018, vol.19, pp. 302–310. DOI: 10.1016/j.est.2018.08.012.
17. Bakhturin Y. A. Actual issues of railway transport in open pits. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014, no. 3(3), pp. 145–153. [In Russ].
18. Nikolaidis P. Chatzis S. Poullikkas A. Life cycle cost analysis of electricity storage facilities in flexible power systems. *International journal of sustainable energy*. 2019, vol. 38, iss. 8, pp. 752–772. DOI: 10.1080/14786451.2019.1579815.
19. Zhang X., Peng H., Wang H., Ouyang M. Hybrid Lithium Iron Phosphate Battery and Lithium Titanate Battery Systems for Electric Buses. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018, vol. 67 (2), pp. 956–965. DOI: 10.1109/TVT.2017.2749882.
20. Ovcharenko S. M., Minakov V. A., Vedruchenko V. P. Improving the technological process of repairing of diesel engines of the D-49 type. *Izvestiya Transsiba*. 2019, no 2(38), pp. 2–8. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Спиридонов Егор Александрович*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов, НГТУ, ORCID: 0000-0002-7229-0954, spiridonov@corp.nstu.ru; *Ярославцев Михаил Викторович*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов, НГТУ, ORCID: 0000-0002-1440-2065, yaroslavcev@corp.nstu.ru.

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

Контактное лицо: *Спиридонов Егор Александрович*, spiridonov@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Spiridonov E. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrotechnical Complexes, NSTU, ORCID: 0000-0002-7229-0954, e-mail: spiridonov@corp.nstu.ru;

*Yaroslavtsev M. V.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrotechnical Complexes, NSTU, ORCID: 0000-0002-1440-2065, e-mail: yaroslavcev@corp.nstu.ru.

¹ Novosibirsk State Technical University, Russia, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20.

Contact person: *Spiridonov E. A.*, spiridonov@corp.nstu.ru

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

