

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТИЙ-ТИТАНАТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ НА КАРЬЕРНОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Е. А. Спиридонов

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск,
630073, Россия

Аннотация: В работе исследована технико-экономическая эффективность применения ЛТО-аккумуляторов в качестве бортового накопителя энергии для эффективного использования энергии электрических торможений. С помощью имитационной модели получено распределение мощности электрических торможений и объемов энергии, вырабатываемой за один акт торможения. Разработан модуль, учитывающий снижение эффективной емкости батареи в зависимости от глубины разряда и количества циклов. Исследованы три батареи ЛТО-элементов энергоемкостью 352, 282 и 235 кВт·ч и мощностью 6,66, 5,33 и 4,44 МВт соответственно. Показано, что в условиях работы с электрическими нагрузками, характерными для Качканарского ГОКа, батареи деградируют на 7 – 16% в зависимости от их начальной энергоемкости. В этих условиях доля энергии торможений, аккумулированная батареями, снижается с 90% в начале работы до 82% по истечении 5 лет эксплуатации. На основании оценки NPV проведен расчет окупаемости проекта, показано, что за 5 лет положительный денежный поток для батарей 352, 282 и 235 кВт·ч составляет 3,3, 7 и 8,6 млн рублей при остаточной емкости 93, 85 и 83,5% соответственно. Таким образом, можно констатировать технико-экономическую эффективность применения ЛТО-батарей для аккумулирования энергии торможений в условиях работы железнодорожного транспорта Качканарского ГОКа.

Ключевые слова: имитационная модель, накопитель энергии, ЛТО-аккумулятор, карьерный железнодорожный транспорт, тяговый агрегат, деградация, эффективная емкость, окупаемость, дисконтирование.

Для цитирования: Спиридонов Е. А. Технико-экономическая эффективность применения литий-титанатных аккумуляторов на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 214–228. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_214.

Technical and economic efficiency of the application of lithium-titanate batteries in quarry railway transport

E. A. Spiridonov

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Abstract: The paper investigates the technical and economic efficiency of using LTO batteries as an onboard energy storage device for the efficient use of electric braking energy. With the

help of a simulation model, the distribution of the power of electric braking and the amount of energy generated in one act of braking was obtained. A module has been developed that takes into account the decrease in the effective capacity of the battery depending on the depth of discharge and the number of cycles. Three batteries of LTO cells with an energy capacity of 352, 282, and 235 kWh and a power of 6.66, 5.33, and 4.44 MW, respectively, were studied. It is shown that under the conditions of work with electrical loads, typical for the Kachkanar GOK, the batteries degrade by 7–16%, depending on their initial energy capacity. Under these conditions, the part of braking energy stored by the batteries decreases from 90% at the start of operation to 82% after 5 years of operation. Based on the NPV assessment, the project payback was calculated, it is shown that over 5 years the positive cash flow for batteries 352, 282 and 235 kWh is 3.3, 7 and 8.6 million rubles with a residual capacity of 93, 85 and 83, 5% respectively. Thus, it is possible to state the technical and economic efficiency of using LTO batteries for accumulating braking energy in the conditions of operation of the railway transport of the Kachkanar GOK.

Key words: simulation model, energy storage, LTO battery, quarry railway transport, traction unit, degradation, effective capacity, payback, discounting.

For citation: Spiridonov E. A. Technical and economic efficiency of the application of lithium-titanate batteries in quarry railway transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):214–228. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_214.

1. Введение

Современный этап развития горнодобывающей промышленности можно охарактеризовать устойчивой тенденцией роста доли открытого способа разработки [1, 2]. Как отмечают различные исследования, такой способ обеспечивает более высокие технико-экономические показатели добычи полезных ископаемых. При этом затраты на технологический транспорт могут превышать 50% себестоимости добычи. Как отмечают некоторые авторы [3], на современном этапе на многих открытых карьерах основным средством транспорта руды является железнодорожный транспорт. Как и любая транспортная система, железнодорожный транспорт обладает как преимуществами, так и недостатками.

Основным преимуществом железнодорожного транспорта в условиях открытых горных разработок является минимальное, в сравнении с другими видами транспорта, значение удельного расхода энергии на совершение транспортной работы [4]. Несмотря на это,

энергетические затраты, связанные с работой технологического железнодорожного транспорта, достигают 70% [3, 5] от общих энергетических затрат, связанных с работой горно-обогатительных комбинатов (ГОКов).

Вторым важным преимуществом электрифицированного железнодорожного транспорта является отсутствие вредных выбросов при работе. Как показано в работе [6], при использовании автомобильного транспорта с ростом глубины карьера от 50 до 250 м концентрация, например, оксидов углерода увеличивается на 70%, а оксидов азота — на 400%. На фоне роста объемов производства это обстоятельство ставит новые задачи в части соответствия параметров атмосферы требованиям ГОСТ 12.1.005–88 «Воздух рабочей зоны».

Возвращаясь к энергетическим аспектам функционирования транспортных систем карьеров, важно также отметить тот факт, что электрифицированные транспортные системы обладают возможностью снижения

энергопотребления за счет возврата и повторного использования энергии в тормозных режимах. Подобные режимы называют рекуперативным (в отечественной литературе в основном применительно к контактному транспорту) или регенеративным (в иностранной литературе и в отечественной литературе применительно к автономным электротранспортным средствам) торможением. Доля энергии торможения в общем энергетическом балансе железнодорожного транспорта существенно зависит от режимов движения, но в среднем оценивается специалистами на уровне 25 — 35% [7 — 9], однако эффективность использования этого энергетического потенциала в значительной степени различна.

На сегодняшний день в мире накоплен не только теоретический, но и практический опыт использования накопителей энергии на железнодорожном транспорте для максимально полного использования энергии рекуперации. Так, в Японии с 2014 года компания J-TREC эксплуатирует поезд «EV-E301» с бортовым ЛМО-аккумулятором [10], в Великобритании компания Bombardier с 2015 года запустила поезд «Electrostar» для тяговой сети переменного тока 25 кВ с бортовым LFP-накопителем емкостью 500 кВт·ч [11]. В Германии с 2018 года компанией Bombardier запущен поезд «Talent 3» для тяговой сети переменного тока 15 кВ с бортовым NMC-накопителем емкостью 300 кВт·ч [12], а компания Siemens использовала ЛТО-аккумуляторы общей емкостью 528 кВт·ч в качестве бортового накопителя энергии для поезда «Cityjet Eco» для железной дороги Австрии с тяговой сетью переменного тока 15/25 кВ [13].

Теоретические исследования, связанные с применением накопителей энергии, также проводятся применительно к карьерному железнодорож-

ному транспорту. В этой части можно выделить серию публикаций В. П. Степаненко (МГИ НИТУ «МИСиС»), которые посвящены применению суперконденсаторных накопителей энергии (СКНЭ), а также обсуждению вопросов использования комбинированных накопительных установок на основе конденсаторов двойного электрического слоя и аккумуляторов. В работе [14], например, дается оценка потребности в энергоемкости СКНЭ в масштабах всего горного локомотивного транспорта. В серии публикаций группы украинских ученых, например, в [15], дается оценка требований к мощности и емкости бортового накопителя энергии. В работе рассматриваются несколько режимов работы накопителя совместно с питающей сетью и обосновываются следующие требования к накопительному устройству: мощность 3,5 МВт и энергоемкость 63,5 кВт·ч. При таких параметрах накопитель энергии обеспечивает снижение энергопотребления на 10%, но в работе не показаны условия, при которых эта экономия достигается, а также не содержится оценка того, насколько полно использован потенциал рекуперации, т.е. какая доля энергии, вырабатываемой в режиме торможения, была аккумулирована накопителем.

Целью настоящего исследования является оценка технико-экономической эффективности аккумулирования энергии рекуперации бортовыми накопительными устройствами с учетом их деградации.

2. Обзор современных накопителей энергии

Несмотря на многообразие технологий накопления энергии, на практике в электрическом транспорте наибольшее распространение получили электрохимические накопители, выполнен-

ные на основе литиевых аккумуляторов, и накопители на основе конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС), которые в некоторых российских источниках информации также называют суперконденсаторами. Каждый из этих типов накопителей энергии (НЭ) обладает своими преимуществами и недостатками: КДЭС характеризуются высокими показателями удельной мощности (кВт/кг) и большим сроком службы, в то время как литиевые аккумуляторы обладают значительно более высокими показателями удельной энергии (Вт·ч/кг), но имеют существенно меньший ресурс по количеству циклов перезаряда. Также следует отметить, что подавляющее большинство литиевых аккумуляторов не способны работать при отрицательных температурах.

Усредненные параметры различных типов Li-ion-аккумуляторов сведены в табл. 1. Необходимо отметить, что в некоторых случаях характеристики, приводимые производителями коммерческих батарей, могут отличаться от приведенных средних значений. Из таблицы видно, что по многим параметрам характеристики батарей идентичны, что обусловлено их общей природой, особенно это касается среднего количества циклов заряда/разряда и диапазона рабочих температур. При этом можно выделить, например, литий-титанатные аккумуляторы, характеризующиеся возможностью работы при низких температурах, отли-

чающиеся более длительным ресурсом, а также значительно более высокой разрядной мощностью. Вместе с тем этот тип аккумуляторов характеризуется наименьшим значением удельной энергии среди представленных типов Li-ion-аккумуляторов.

Конденсаторы двойного электрического слоя (КДЭС, EDLC) также находят свое применение в транспортных системах в качестве бортовых и буферных накопителей энергии [7, 18]. Основным направлением их использования является аккумулирование энергии рекуперации с последующей отдачей в режиме тяги, т.н. «буферный режим». В качестве источника энергии для автономного движения КДЭС, как правило, не используют, поскольку они обладают существенно более низким значением удельной энергоемкости, в сравнении с Li-ion-аккумуляторами [18, 19]. Также к особенностям КДЭС следует отнести снижение выходного напряжения по мере разряда, поскольку, как и у классических конденсаторов, энергия, запасенная в КДЭС, пропорциональна квадрату его напряжения. Эта особенность требует применения дополнительных преобразователей для согласования выходных характеристик НЭ и тягового привода транспортного средства. Вместе с тем КДЭС отличаются на порядок более высокими показателями удельной мощности, значительно большим (до 10^6) количеством зарядно/разрядных циклов и более

Таблица 1

Усредненные характеристики Li-ion-аккумуляторов [16, 17]
Average characteristics of Li-ion batteries [16, 17]

Параметр	NMC	LFP	LTO
Удельная энергия, Вт·ч /кг	140–220	90–140	70–85
Ток заряда (в пересчете к емкости)	0,7–1 С	1 С	5 С
Ток разряда (в пересчете к емкости)	1 С	1 С	10 С
Количество циклов заряда/разряда	1000–2000	1000–2000	3000–7000
Диапазон рабочих температур, °С	0... 55	0... 55	-40... 55

широким диапазоном рабочих температур.

Массогабаритные размеры аккумулятора на транспортном средстве, в первую очередь будут определяться емкостью и мощностью и зависеть от функционального назначения батареи. Например, если НЭ устанавливается с целью обеспечения автономного хода транспортного средства, то важную роль будет играть параметр удельной емкости аккумулятора. При работе НЭ в буферном режиме (аккумулятор накапливает энергию торможения с последующей немедленной отдачей в тяговом режиме) требуется гораздо меньшая емкость, но повышаются требования к удельной мощности, поскольку в режиме торможения вырабатываемая электрическая мощность может превышать часовую мощность тяговых электродвигателей.

Экономическая целесообразность применения НЭ будет во многом определяться такими параметрами, как стоимость батареи, скорость деградации и диапазон рабочих температур, поскольку эксплуатация транспортного средства при отрицательных температурах потребует разработки дополнительных мер, направленных на поддержание температуры самой батареи в требуемых диапазонах.

Энергетические параметры бортового накопителя энергии определяются исходя из энергетического баланса поезда, который целесообразно составлять с использованием имитационного моделирования. В ходе моделирования определяется мгновенная электрическая мощность как в режиме тяги, так и в режиме торможения, а также потребляемая и генерируемая энергия. Исходными данными для моделирования являются: профиль пути (включая радиусы кривых рельсового

пути), тип и масса подвижного состава (порожного и груженого), ограничения скоростного режима на участках, характеристики тяговых двигателей подвижного состава.

3. Описание имитационной модели

В данном исследовании используется имитационная модель, описанная в [20]. Модель построена по модульному принципу и включает следующие основные модули:

- модуль «подвижной состав». В основе этого модуля заложены характеристики тягового агрегата НП1: тяговая и тормозная характеристика, масса порожнего и груженого состава, основное сопротивление движению;

- модуль «путь». В этом модуле заложены профили пути, характерные для Качканарского ГОКа, на основе которых определяется дополнительное сопротивление движению от уклонов и кривых рельсового пути;

- модуль «накопитель энергии». Этот модуль учитывает ограничения по мощности и емкости НЭ, что позволяет оценить долю энергии торможения, которую может запасти накопитель и в последующем передать в тяговый привод. В ходе настоящего исследования в этом модуле был добавлен функционал для учета деградации бортового НЭ и ее влияния на эффективность аккумуляции энергии торможений.

Моделирование проводится в несколько этапов. На первом этапе проводится серия модельных экспериментов с целью получения информации о режимах движения карьерного транспорта в заданных условиях и определения энергетического баланса поезда. На втором этапе проводится серия экспериментов с различными накопителями энергии (задаются масса, удельная емкость и удельная мощность НЭ

для режима заряда и режима разряда) с целью определения нового энергобаланса поезда с учетом аккумуляирования и использования энергии рекуперативных торможений.

На рис. 1 показана одна из реализаций, отражающая изменение во времени мгновенной мощности тягового привода карьерного локомотива (отрицательные значения мощности соответствуют режиму торможения). Реализация соответствует поездной работе, выполняемой поездом за одну рабочую смену. При этом предполагается, что в течение смены совершается 4 рейса по различным характерным для Качканарского ГОКа перегонам. Также следует отметить, что в модели не учитывается время простоя поезда, связанное, например, с погрузкой и выгрузкой.

Интегрирование мощности с учетом КПД всех элементов тягового привода позволяет получить энергетический баланс поезда: расход энергии на тягу и значение энергии, выработанной в режиме торможения. Для приведенной реализации получены следующие значения: общий расход энергии на тягу поезда за смену составил 22,49 ГДж (6 247 кВт·ч), энергия торможений составила 8,48 ГДж (2 355 кВт·ч). На рис. 2 представлены результаты статистической обработки значений мощности для режима торможения. Видно, что 81% времени в режиме торможения мощность находится в диапазоне

значений от 1 до 2 МВт, а реализация полной мощности привода занимает не более 0,2% времени.

На рис. 3 показаны результаты статистической обработки значений энергии, вырабатываемой за один акт торможения. Из представленных графиков видно, что 29% всех тормозных режимов сопровождались выработкой энергии в диапазоне от 0 до 50 кВт·ч, в 23% от всех тормозных режимов энергия торможения составляла от 150 до 200 кВт·ч.

На рис. 4 показана одна из реализаций модели с бортовым накопителем энергии. В указанной реализации использован бортовой НЭ на базе NMC-элементов E63 от компании LG Chem (техническая документация: <https://xebike.com/wp-content/uploads/2019/12/lg-e63datasheet.pdf>) со следующими параметрами: удельная мощность заряда/разряда 232 Вт/кг, удельная энергоемкость 240 Вт·ч/кг, масса накопителя 2 500 кг, общая энергоемкость батареи 600 кВт·ч. В результате моделирования установлено, что такой накопитель позволяет эффективно использовать лишь 26,5% энергии торможений (при общем объеме энергии торможений 8,48 ГДж, НЭ аккумуляировал 2,24 ГДж). Такой результат обусловлен недостаточной мощностью батареи в режиме заряда, что наглядно видно на рис. 4. Результатом нехватки мощности НЭ становится перенаправление значительной части энергии

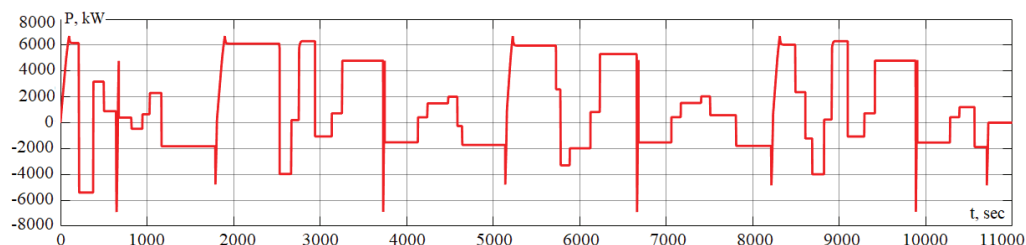
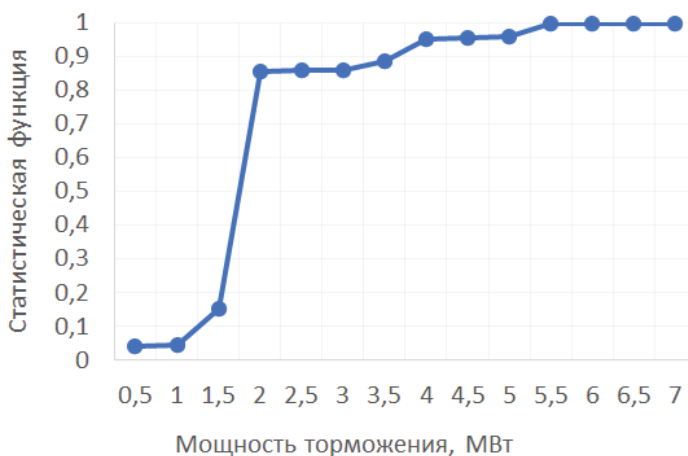


Рис. 1. Зависимость мощности тягового привода от времени

Fig. 1. Dependence of traction drive power on time



а



б

Рис. 2. Статистическая обработка мощности в режиме торможения: а – распределение вероятности; б – статистическая функция

Fig. 2. Statistical processing of power in braking mode: a – probability distribution; b – statistical function

торможения в тормозные реостаты во избежание токовой перегрузки батареи.

На рис. 5 показана реализация другого модельного эксперимента, где в качестве НЭ использована батарея LTO-элементов от компании Toshiba (технические данные: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell.html>): удельная мощность заряда/разряда 1818 Вт/кг,

удельная энергоёмкость 96 Вт·ч/кг, масса батареи 3 437 кг, общая энергоёмкость батареи 330 кВт·ч. Видно, что в данной реализации практически отсутствуют области, в которых мощность НЭ ниже мощности тягового привода, что обеспечило эффективность аккумулирования энергии торможения на уровне 90% (с учетом среднего КПД накопителя). Таким образом, подтверж-



а



б

Рис. 3. Статистическая обработка значений энергии за один акт торможения: а – распределение вероятности; б – статистическая функция
 Fig. 3. Statistical processing of braking energy: a – probability distribution; b – statistical function

дается тезис о том, что мощность НЭ является фактором, в большей степени ограничивающим эффективность аккумулирования энергии торможений.

4. Обсуждение результатов моделирования

В работе [20] было показано, что для условий карьерного железнодорожного

транспорта наиболее целесообразным с экономической точки зрения является применение ЛТО-аккумуляторов (срок возврата инвестиций меньше срока службы батареи), но этот вывод был сделан без учета процессов деградации аккумуляторов. В данном исследовании имитационная модель была доработана для учета деградации НЭ в процессе работы.

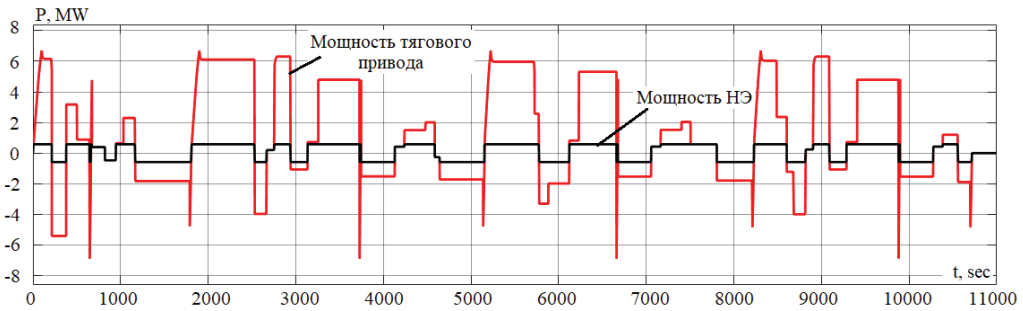


Рис. 4. Зависимость мощности тягового привода и NMC-накопителя энергии от времени
 Fig. 4. Dependence of traction drive power and energy storage power on time

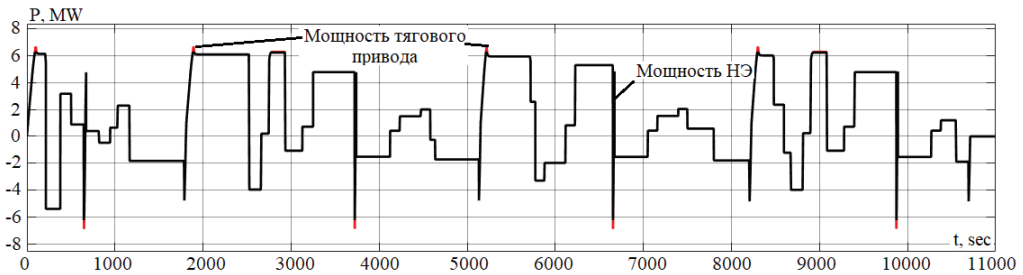


Рис. 5. Зависимость мощности тягового привода и LTO-накопителя энергии от времени
 Fig. 5. Dependence of traction drive power and energy storage power on time

Модель позволяет оценить количество зарядно/разрядных циклов батареи и их глубину (DoD) за одну рабочую смену. Далее, на основе результатов исследований [21, 22], определялась остаточная емкость батареи. Следующим шагом было определение эффективности использования энергии торможений как отношение всего объема энергии, выработанной в режимах торможения, к энергии, аккумулированной НЭ с учетом эффективной емкости. Для расчетов выбраны несколько вариантов тяговой аккумуляторной батареи, построенной на базе ячеек Toshiba SCiB емкостью 23 А·ч. Параметры батарей представлены в табл. 2.

На рис. 6 показаны результаты расчетов эффективности использования энергии торможений (как отношение аккумулированной энергии торможений

к общему объему выработанной энергии) и изменение эффективной емкости LTO-батареи с учетом деградации.

Моделирование показало, что вариант батареи 1 (352 кВт·ч), несмотря на незначительную деградацию (снижение емкости до 93% при 20 000 циклов), обеспечивает полный прием энергии рекуперации с учетом среднего КПД. Такой результат стал следствием того, что батарея работает с относительно низким DoD: зафиксирован лишь один зарядно/разрядный цикл с глубиной более 70%). Батареи 2 и 3 в силу меньшей емкости подвергаются большему количеству глубоких зарядно/разрядных циклов, что приводит к повышению скорости деградации их характеристик и снижению эффективности использования энергии торможений.

Таблица 2
Параметры LTO-аккумуляторных батарей
LTO battery parameters

Номер варианта	Количество ячеек	Масса батареи, т	Мощность батареи, кВт	Энергоемкость батареи, кВт·ч
1	6 600	3,663	6 600	352
2	5 328	2,930	5 328	281,9
3	4 440	2,442	4 440	234,9

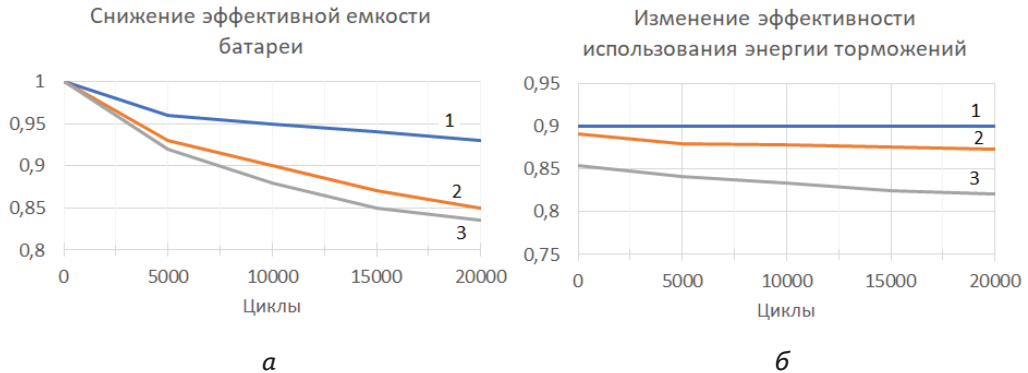


Рис. 6. Изменение характеристик LTO-батарей с учетом старения: а — снижение емкости; б — снижение эффективности использования энергии торможений

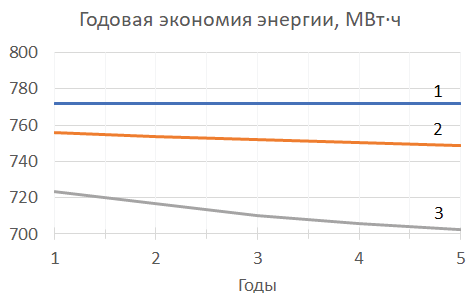
Fig. 6. Changing the characteristics of an LTO battery with aging: a — capacity reduction; b — decrease of the efficiency of braking energy utilization

С учетом расчетного объема энергии торможений и деградации характеристик аккумуляторов построены зависимости экономии энергии в течение срока эксплуатации батареи. Расчет проводился для следующих условий: одна 12-часовая смена в сутки, количество рабочих смен в году — 365, годовой объем энергии электрических торможений — 857,4 тыс. кВт·ч.

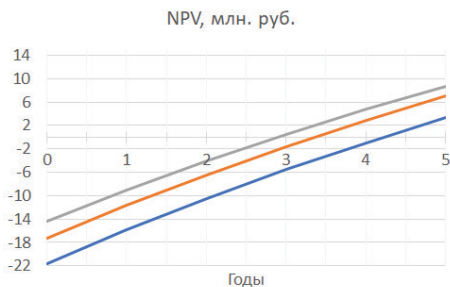
Исходя из полученных данных, можно оценить срок окупаемости инвестиций, связанных с приобретением и размещением на тяговом агрегате НП-1 аккумуляторной батареи. При расчете принималась во внимание средняя стоимость ячейки Toshiba SCIB емкостью 23 А·ч на рынке РФ по состоянию на апрель 2023 года. При расчете начальных инвестиций также учитывалась стоимость системы управления

батарей (BMS), которая принималась равной 30% от суммарной стоимости ячеек. Ставка дисконтирования принималась равной ключевой ставке ЦБ РФ 7,25% по состоянию на 1 апреля 2023 года. Стоимость электроэнергии для Свердловской области (Качканарский ГОК) на 1 февраля 2023 г. составляет от 7,83 до 8,63 руб./кВт·ч, в зависимости от поставщика (в расчетах принимается 8 руб./кВт·ч). Расчет окупаемости проводился по методу определения чистой приведенной стоимости (NPV), поскольку метод позволяет учесть дисконтирование, т.е. изменение ценности денежных потоков. Результаты расчетов показаны на рис. 7.

Расчеты показали, что при начальных инвестициях около 22 млн руб. для LTO батареи энергоемкостью 352 кВт·ч положительный денежный поток начи-



а



б

Рис. 7. Техничко-экономические показатели батареи с учетом деградации: а – динамика изменения годовой экономии энергии; б – график NPV

Fig. 7. Technical and economic indicators of the battery, taking into account degradation: а – dynamics of changes in annual energy savings; б – NPV chart

нается уже через 4,3 года, а за 5 лет эксплуатации системы за счет использования энергии торможений можно получить экономии порядка 3 млн руб., при этом остаточная емкость батареи будет на уровне 93%. Для батареи меньшей энергоемкости (235 кВт·ч) при начальных инвестициях 14,4 млн руб. за тот же период экономия может составить 8,6 млн руб., но при этом остаточная емкость батареи будет уже на уровне 82%.

В дополнение к аккумулярованию энергии электрических торможений бортовой накопитель энергии решает задачу автономного перемещения транспорта без питания от тяговой сети, что также может представлять интерес в условиях карьерного транспорта. Бортовой накопитель позволит отказаться от возведения опорных конструкций и контактной сети при продлении маршрута железнодорожного состава в связи с увеличением глубины карьеров. Согласно укрупненным нормативам цен строительства ЦНС 81-02-07-2017 (утвержденных Приказом Минстроя РФ №839/пр от 01.07.2017), стоимость электрификации 1 км железнодорожного пути составляет от 38,8 до 50,6 млн руб. для однопутных линий

и от 64,1 до 85,8 млн руб. для двухпутных линий в ценах 2017 года. Однако оценка экономического эффекта такого технического решения требует более глубокого анализа.

5. Выводы

В статье дан анализ характеристик нескольких типов Li-ion-аккумуляторов и показано, что в условиях движения карьерного железнодорожного транспорта следует отдавать предпочтение литий-титанатным (LTO) аккумуляторам, благодаря значительно большему времени жизни (количеству циклов заряда/разряда) и более высоким показателям удельной мощности. Для условий работы железнодорожного транспорта Качканарского ГОКа проведена оценка параметров бортовой аккумуляторной батареи на основе элементов Toshiba SC1B емкостью 23 А·ч., предложено несколько вариантов такой батареи энергоемкостью 352, 282 и 235 кВт·ч.

Доработана имитационная модель тягового привода с накопителем энергии, позволяющая учитывать снижение емкости батареи вследствие деградации в зависимости от глубины зарядно-разрядных циклов (DoD). Показано,

что для батареи большей емкости даже за 20 000 циклов заряд/разряд эффективная емкость снижается до уровня 93% от начальной, что не сказывается на эффективности использования энергии электрических торможений на уровне 90%. Для батарей меньшей емкости наблюдается более высокая скорость деградации, что обусловлено увеличением количества циклов с DoD более 70%.

На основе определения чистой приведенной стоимости (NPV) рассчитан срок окупаемости инвестиций с учетом затрат на батарею и систему BMS. Показано, что начальные инвестиции около 22 млн руб. в течение 5 лет могут

дать экономию 5 млн руб., при том что остаточная емкость батареи составит 93%, т.е. можно прогнозировать еще несколько лет работы системы.

В заключение можно сформулировать следующую мысль: проведенные расчеты показали экономическую эффективность установки бортового накопителя энергии на карьерный железнодорожный транспорт. В перспективе необходимо проведение НИОКР с целью учета большего количества факторов, влияющих на технико-экономические показатели применения буферных накопителей энергии в условиях карьерного железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хазин М. Л., Тарасов А. П.* Эколого-экономическая оценка карьерных троллейбусов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2018. — Т. 17. — № 2. — С.166–180. DOI: 10.15593/2224–9923/2018.2.6.
2. *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.
3. *Бахтурин Ю. А.* Актуальные вопросы железнодорожного транспорта карьеров // Проблемы недропользования. — 2014. — № 3(3). — С. 145–153.
4. *Тарасов П. И., Хазин М. Л., Зырянов И. В., Неволин Д. Г.* Горные работы при строительстве транспортных коридоров // Горная промышленность. — 2020. — № 5. — С. 91–96. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-91-96.
5. *Бурмистров К. В., Осинцев Н. А.* Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 4. — С. 179–195. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606.
6. *Хазин М. Л., Тарасов П. И., Фурзиков В. В., Тарасов А. П.* Эколого-экономическая оценка использования карьерных самосвалов // Известия вузов. Горный журнал. — 2018. — № 7. — С. 85–94. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-85-94.
7. *Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A.* Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments // IET Electrical Systems in Transportation. 2021, vol. 11, iss. 4, pp. 279–309. DOI: 10.1049/els2.12026.
8. *Wu C., Lu S., Xue F., Jiang L., Chen M.* Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2020, vol. 6, iss. 3, pp. 1301–1311. DOI: 10.1109/TTE.2020.2996362.

9. Popescu M., Bitoleanu A. A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems // *Energies*. 2019, vol. 12, iss. 6, art. 1092. DOI: 10.3390/en12061092.

10. Kono Y., Shiraki N., Yokoyama H., Furuta R. Catenary and storage battery hybrid system for electric railcar series EV-E301 // 2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima-ECCE Asia 2014, 18-21 May 2014, Hiroshima, Japan. 2014, pp. 2120–2125. DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869881.

11. Murray-Smith D. A Review of Developments in Electrical Battery. Fuel Cell and Energy Recovery Systems for Railway Applications // Report for the Scottish Association of Public Transport. 2019, pp. 1–32. DOI: 10.13140/RG.2.2.16555.67362.

12. Laperrière Y. Realize your vision with Bombardier TALENT3 BEMU // APTA 2019 Rail Conference, 23-26 June 2019, Toronto ON, Canada. 2019. https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lapierre.pdf.

13. Siemens A. G. Desiro ML ÖBB Cityjet. 2019. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b26911b1-2b0e-48b4-b593-81adbf032d75/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-e.pdf>.

14. Степаненко В. П. Пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9. — С. 128–137.

15. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov I., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power // *Archives of Transport*. 2023, vol. 65, iss. 1, pp. 119–135. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2631.

16. Porzio J., Scown C. D. Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials // *Advanced Energy Materials*. 2021, vol. 11, iss. 3, art. 2100771. DOI: 10.1002/aenm.202100771.


17. Zhang R., Xia B., Li B., Cao L., Lai Y., Zheng W., Wang H., Wang W. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles // *Energies*. 2018, vol. 11, art. 1820. DOI: 10.3390/en11071820.

18. Sharma P., Bhatti T. S. A review on electrochemical double-layer capacitors // *Energy Conversion and Management*. 2010, vol. 51(12), pp. 2901–2912. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.031.

19. He X., Zhang X. A comprehensive review of supercapacitors: Properties, electrodes, electrolytes and thermal management systems based on phase change materials // *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 56, part C, art. 106023. DOI: 10.1016/j.est.2022.106023.

20. 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.

21. Bank T., Feldmann J., Klamor S., Bihn S., Sauer D. Extensive aging analysis of high-power lithium titanate oxide batteries: Impact of the passive electrode effect // *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 473, art. 228566. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228566.

22. Bank T., Alsheimer L., Löffler N., Sauer D. State of charge dependent degradation effects of lithium titanate oxide batteries at elevated temperatures: An in-situ and ex-situ analysis // *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 51, art. 104201. DOI: 10.1016/j.est.2022.104201. 

REFERENCES

1. Khazin M. L., Tarasov A. P. Ecological and economic assessment of quarry trolley cars. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2018, vol. 17, no. 2. pp. 166–180. [In Russ]. DOI: 10.15593/2224–9923/2018.2.6.
2. 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.
3. Bakhturin Y. A. Actual issues of railway transport in open pits. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014, no. 3(3), pp. 145–153. [In Russ].
4. 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. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-91–96.
5. Burmistrov K. V., Osintsev N. A. Principles of sustainable development of mining systems in transition periods. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020. vol. 331. iss. 4, pp. 179–195. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2606.
6. Khazin M. L., Tarasov A. P., Furzikov V. V., Tarasov A. P. Ecological and economic evaluation of open pit dump trucks use. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2018. vol. 7, pp. 85–94. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-7-85–94.
7. Fedele E., Iannuzzi D., Del Pizzo A. Onboard energy storage in rail transport: Review of real applications and techno-economic assessments. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2021, vol. 11, iss. 4, pp. 279–309. DOI: 10.1049/els2.12026.
8. Wu C., Lu S., Xue F., Jiang L., Chen M. Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020, vol. 6, iss. 3, pp. 1301–1311. DOI: 10.1109/TTE.2020.2996362.
9. Popescu M., Bitoleanu A. A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems. *Energies*. 2019, vol. 12, iss. 6, art. 1092. DOI: 10.3390/en12061092.
10. Kono Y., Shiraki N., Yokoyama H. Furuta R. Catenary and storage battery hybrid system for electric railcar series EV-E301. *2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima-ECCE Asia 2014, 18-21 May 2014, Hiroshima, Japan*. 2014, pp. 2120–2125. DOI: 10.1109/IPEC.2014.6869881.
11. Murray-Smith D. A Review of Developments in Electrical Battery. Fuel Cell and Energy Recovery Systems for Railway Applications. *Report for the Scottish Association of Public Transport*. 2019, pp. 1–32. DOI: 10.13140/RG.2.2.16555.67362.
12. Laperrière Y. Realize your vision with Bombardier TALENT3 BEMU. *APTA 2019 Rail Conference, 23-26 June 2019, Toronto ON, Canada*. 2019. https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lappierre.pdf.
13. Siemens, A. G. Desiro ML ÖBB Cityjet. 2019. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b26911b1–2b0e-48b4-b593–81adb032d75/db-desiro-ml-oebb-cityjet-eco-e.pdf>.
14. Stepanenko V. P. Ways to improve energy efficiency and resource saving mining locomotive transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 9, pp. 128–137. [In Russ].
15. Kondratieva L., Bogdanovs A., Overianova L., Riabov I., Goolak S. Determination of the working energy capacity of the on-board energy storage system of an electric locomotive

for quarry railway transport during working with a limitation of consumed power. *Archives of Transport*. 2023, vol. 65, iss. 1, pp. 119–135. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2631.

16. Porzio J., Scown C. D. Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. *Advanced Energy Materials*. 2021, vol. 11, iss. 3, art. 2100771. DOI: 10.1002/aenm.202100771.

17. Zhang R., Xia B., Li B., Cao L., Lai Y., Zheng W., Wang H., Wang W. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. *Energies*. 2018, vol. 11, art. 1820. DOI: 10.3390/en11071820.

18. Sharma P., Bhatti T. S. A review on electrochemical double-layer capacitors. *Energy Conversion and Management*. 2010, vol. 51(12), pp. 2901–2912. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.031.

19. He X., Zhang X. A comprehensive review of supercapacitors: Properties, electrodes, electrolytes and thermal management systems based on phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 56, part C, art. 106023. DOI: 10.1016/j.est.2022.106023.

20. Spiridonov E. A., Yaroslavtsev M. V. Evaluation of economic efficiency and service life of lithium traction batteries in the conditions of mining railway transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12–2, pp. 241–256. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_241.

21. Bank T., Feldmann J., Klamor S., Bihn S., Sauer D. Extensive aging analysis of high-power lithium titanate oxide batteries: Impact of the passive electrode effect. *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 473, 228566. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228566.

22. Bank T., Alsheimer L., Löffler N., Sauer D. State of charge dependent degradation effects of lithium titanate oxide batteries at elevated temperatures: An in-situ and ex-situ analysis. *Journal of Energy Storage*. 2022, vol. 51, 104201. DOI: 10.1016/j.est.2022.104201.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Спиридонов Егор Александрович*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электро-технических комплексов, ORCID: 0000-0002-7229-0954, e-mail: spiridonov@corp.nstu.ru, Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

Контактное лицо: *Спиридонов Е. А.*, 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, Novosibirsk State Technical University, Russia, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Avenue, 20.

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

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 04.07.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 04.07.2023; accepted for printing 10.10.2023.

