

Научная статья

УДК 621.355:622.684

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-52-63

Семыкина Ирина Юрьевна*, Завьялов Валерий Михайлович,
Нечипоренко Ярослава Аджайевна, Таран Елена Николаевна, Захарова Алла Геннадьевна

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: arinasemykina@gmail.com

**ОЦЕНКА РЕСУРСА ТЯГОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ ПРИ ПИТАНИИ ОТ БЕСПРОВОДНЫХ
ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ****Информация о статье**

Поступила:

24 февраля 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к печати:

15 июня 2026 г.

Ключевые слова:*электрический карьерный самосвал, тяговый аккумулятор, беспроводная зарядная станция, зарядная инфраструктура, компьютерное моделирование***Аннотация.**

Переход технологического электротранспорта горнодобывающей отрасли на автономную работу обоснован необходимостью снижения затрат и повышения производительности и безопасности труда. В статье проведена оценка скорости истощения ресурса тяговых аккумуляторов полностью электрического карьерного самосвала, заряжающихся от станций беспроводного заряда, при различных сценариях беспроводного заряда и вариантах построения зарядной инфраструктуры. Исследование проводилось на примере литий-железо-фосфатных аккумуляторов и самосвала БелАЗ-7558Е. Цель исследования – определить влияние сценария беспроводного заряда на выработку ресурса тяговых аккумуляторов при условии выполнения карьерным самосвалом технологической задачи. Проведен обзор имеющихся в научной литературе методов оценки ресурса аккумуляторов, применены методы математического и сценарного моделирования. Для математического описания станций беспроводного заряда, тяговых аккумуляторов, силовой установки самосвала и протекающих в них процессов была построена динамическая модель в программе MatLab Simulink. В качестве математической модели для изучения процесса старения аккумулятора в работе принята система уравнений на основании уравнения Аррениуса. Определена потеря емкости тягового аккумулятора для рассматриваемых вариантов зарядной инфраструктуры. Наилучшие показатели демонстрирует сценарий беспроводного заряда при размещении беспроводных зарядных станций на месте погрузки. Результаты моделирования полезны для оценки и прогнозирования деградации тяговых аккумуляторов и для разработки жизненного цикла беспроводной зарядной инфраструктуры автономных электрических карьерных самосвалов на конкретных горнодобывающих предприятиях.

Для цитирования: Семыкина И.Ю., Завьялов В.М., Нечипоренко Я.А., Таран Е.Н., Захарова А.Г. Оценка ресурса тяговых аккумуляторов электрических карьерных самосвалов при питании от беспроводных зарядных станций // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 3 (185). С. 52-63. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-52-63, EDN: YDKRZV

Благодарность: исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Введение и постановка задачи

Открытая добыча полезных ископаемых является доминирующим методом в горнодобывающей промышленности и используется значительно чаще по сравнению с подземной разработкой [1]. На угольных разрезах важную роль в работе экскаваторно-автомобильного комплекса играют большегрузные самосвалы. В настоящее время в машиностроительной отрасли наблюдается тенденция пе-

рехода от двигателей внутреннего сгорания к гибридным и полностью электрическим силовым установкам. Ведущие производители отрасли активно разрабатывают новые модели аккумуляторных самосвалов. Например, полностью электрическая автономная модель 793 Electric¹ от Caterpillar,

¹ Caterpillar successfully demonstrates first battery electric large mining truck and invests in sustainable proving ground

которая благодаря системе рекуперации способна выполнять несколько дополнительных рабочих циклов без дополнительной подзарядки. Hitachi также разработала карьерный электросамосвал-троллейбус [2], который заряжается от сети воздушных линий электропередачи и оснащен системой рекуперативного торможения, что позволяет эксплуатировать несколько единиц техники одновременно на технологической трассе без необходимости их подзарядки в течение рабочего цикла.

В связи с цикличностью задач и маршрутов движения самосвалов в течение рабочей смены, для оптимизации экономических затрат и повышения эффективности, производительности и безопасности на предприятиях, занимающихся открытой добычей полезных ископаемых, требуется повышение уровня автоматизации технологических процессов. В настоящее время ведутся исследования и разработки в области создания для таких предприятий автономного электротранспорта, а именно роботизированных и беспилотных карьерных самосвалов. Caterpillar разработала модели роботизированной техники, которые управляются централизованным компьютером с помощью бортовой инерциальной навигационной системы, а БелАЗ-7513R используют систему спутниковой навигации GPS/Глонасс или беспроводные сети [3]. Беспилотный «КамАЗ» управляется дистанционно и в автоматическом режиме, автономные аналоги Caterpillar имеют непрерывную телеметрию [3].

При объединении этих двух трендов прогрессивным направлением становится использование полностью электрических аккумуляторных карьерных самосвалов, которые для повышения автономности работы заряжаются от беспроводных зарядных станций. В данной статье исследуется вопрос требуемой емкости тяговых аккумуляторов для различных сценариев беспроводного заряда и вариантов построения зарядной инфраструктуры при условии наличия или отсутствия рекуперации энергии при торможении, а также рассматривается влияние сценариев беспроводного заряда на ресурс аккумуляторов. Ресурс аккумуляторов является важным элементом жизненного цикла беспроводной зарядной инфраструктуры, влияющим на эффективность технологического процесса [4]. В связи с этим при выборе вариантов зарядной инфраструктуры и проектировании зарядных станций для беспроводного заряда тяговых аккумуляторов карьерных самосвалов необходимо учитывать относительные потери емкости аккумуляторов в течение рабочего цикла, прогнозировать необходимость их замены в зависимости от степени их деградации.

Задачи исследования включают в себя моделирование, по результатам которого проводится оценка скорости исчерпания ресурса тяговых аккумуляторов при разных сценариях беспроводного

заряда и вариантах реализации беспроводной зарядной инфраструктуры, а также возможность установки аккумуляторов меньшей емкости.

Материалы и методы

Методики оценки ресурса аккумуляторов

Производительность и срок службы аккумуляторов существенно зависят от внешних факторов, таких как температура и влажность окружающей среды, а также от технологических параметров, включая количество циклов заряда-разряда, скорость этих процессов, глубину разряда. Чтобы предотвратить перезаряд, заряд должен прекращаться при максимально допустимом уровне заряда. Быстро восстанавливать заряд позволяет высокий коэффициент кратности зарядного тока, однако это может ускорить старение аккумулятора.

В технической литературе представлены различные методики оценки ресурса аккумулятора и степени его деградации. В [5] исследуются механизмы и режимы деградации календарного и циклического старения. Предлагается методика оценки состояния батареи, основанная на определении степени работоспособности *SOH* (англ. State of Health) и глубины разряда *DOD* (англ. Depth of Discharge). Для диагностики и прогнозирования процесса деградации проводится анализ дифференциального напряжения и инкрементного изменения емкости. В исследовании подчеркивается, что ухудшение эксплуатационных характеристик аккумуляторных батарей обусловлено степенью их старения, уровнем заряда, интенсивностью зарядного и разрядного токов, глубиной разряда, средним значением зарядного тока, а также внешними факторами, такими как температура и влажность. Резкие изменения и повышенные значения параметров приводят к значительному ухудшению работы батарей.

В [6] также рассмотрена деградация через определение *SOH* в зависимости от числа циклов заряда-разряда N , а в качестве второго варианта – через напряжения V_{dis} при полном разряде и внутреннее сопротивление R в качестве параметров старения. Авторы отмечают, что использование параметров V_{dis} и R демонстрирует более высокую прогностическую способность для оценки деградации, что подтверждается коэффициентом детерминации и среднеквадратичной погрешностью. Для полиномиальных моделей более предпочтительным является параметр N , в то время как для экспоненциальных моделей – параметры V_{dis} и R . Исправное состояние аккумулятора определяется соотношением номинальной (начальной) разрядной емкости и фактической разрядной емкости, отражающей его реальную зарядную способность.

Авторы [7] для оценки деградации литий-железо-фосфатных аккумуляторов использовали нейронную сеть с механизмом обратного распространения ошибки. Оценка деградации также осуществлялась через *SOH*, под которым понималось отношение текущей емкости аккумулятора при полном заряде к его номинальной емкости.

Разработанная авторами модель демонстрирует удовлетворительную точность и способна реагировать на изменения температуры и величины раз-

[Электронный ресурс] URL: <https://www.caterpillar.com/en/news/corporate-press-releases/h/caterpillar-successfully-demonstrates-first-battery-electric-large-mining-truck.html> (дата обращения: 04.09.2025).

рядного тока. Недостатком *SOH* является то, что этому параметру не соответствует напрямую никакая физическая величина и не существует общепринятого метода определения *SOH*. Этот недостаток особенно проявляется в смешанных циклах заряда-разряда, характерных для аккумуляторов электротранспорта с рекуперацией энергии торможения.

В работе [8] исследуются макроциклы циклического старения аккумуляторов, которые состоят из микроциклов, включающих фазы заряда и разряда. Изменения условий старения фиксировались по контрольным значениям характеристик пульсаций, а мониторинг деградации аккумуляторов осуществлялся через анализ динамического отклика напряжения в зависимости от входного тока и температуры. Для выявления пиков напряжения, вызванных пульсациями тока, применялся метод расчета омических сопротивлений на основе временных интервалов резкого изменения заряда или разряда. При моделировании учитывалось напряжение разомкнутой цепи, явление перенапряжения, а также процессы переноса заряда, диффузии и омического рассеяния. Перенапряжение определялось как разность между мгновенным измеренным значением напряжения и его установившимся уровнем, что учитывается при расчете устойчивого сопротивления диффузии. Однако данная модель не обеспечивает достаточной точности прогнозирования при низких температурах окружающей среды.

В [9] авторы после углубленного анализа существующих методов расчета процесса деградации аккумуляторов пришли к выводу, что наилучшим путем решения этого вопроса являются методы оценки ресурса через текущий уровень заряда *SOC* (англ. State of Charge). Упомянут малоточный (кулоновский) метод подсчета ампер-часов, при котором расчет остаточного заряда производится интегрированием тока заряда или разряда. Расчет с помощью напряжения разомкнутой цепи требует опытов при различной температуре окружающей среды и сроках службы аккумуляторов. Более точные результаты возможны при создании электрохимической модели или модели эквивалентной цепи, в частности математических гистерезисных моделей. Одними из наиболее точных и надежных методов оценки с помощью адаптивной фильтрации являются модифицированные фильтры Калмана. Распространенным является гибридный алгоритм, основанный на модели эквивалентной цепи и применении нескольких фильтров Калмана. Основными факторами деградации аккумуляторов авторы называют снижение внутреннего сопротивления, емкости, остаточной мощности. Методы на основе определения *SOC* обладают погрешностями из-за динамических изменений гистерезиса аккумуляторов, саморазряда, изменений температуры и емкости, старения, разбалансировки компонентов зарядной системы питания. Требуется разработка базы данных и специализированного инструмента моделирования для проектирования жизненного цикла моделей различных типоразмеров, при-

ближенных к реальным аккумуляторам, а также для оценки их состояния.

В исследовании [10], посвященном сравнению методов оценки ресурса аккумуляторов на основе *SOC*, авторами были выбраны для анализа методы замкнутого цикла, основанные на моделях аккумуляторов. В частности, были рассмотрены адаптивный ансамблевый фильтр Калмана без сглаживания и адаптивный скользящий наблюдатель. Эти методы были выбраны за их способность к саморегулированию и допустимый диапазон погрешностей при динамической оценке уровня заряда. Неадаптивный (упрощенный) фильтр Калмана является более простым и точным по сравнению с расширенным фильтром, однако в данном контексте он решает проблему ковариаций параметров процесса и шума измерений. Классический метод скользящего наблюдателя требует выбора между величиной «дребезга» и скоростью сходимости параметров при оценке уровня заряда. Однако адаптивный вариант этого метода более точен, так как регулирует коэффициент усиления и обеспечивает скользящий режим. Авторы исследования выявили, что адаптивный ансамблевый фильтр Калмана демонстрирует лучшую сходимость в начальных значениях *SOC* и меньшую среднюю абсолютную погрешность, но его точность существенно зависит от колебаний омического сопротивления. Адаптивный скользящий наблюдатель, в свою очередь, требует меньших вычислительных ресурсов и менее чувствителен к погрешности соотношения напряжения разомкнутой цепи и текущего уровня заряда, что делает его более надежным при неточных параметрах модели аккумулятора.

В [11] предлагается рассматривать работу аккумуляторов в режимах истощения и поддержания заряда, а параметр *SOC* – как доступную емкость относительно номинальной. Разряд происходит с максимального значения *SOC* до определенного минимального значения. При заряде поддерживается некоторый его уровень со средним значением, соответствующим допустимому минимальному значению заряда. На практике используется постоянный ток до конкретного максимального уровня напряжения аккумулятора, а после – постоянное напряжение до тех пор, пока ток не уменьшится до установленной величины. Чем больше соотношение доли времени истощения заряда к продолжительности суммарного времени заряда, тем выше скорость истощения мощности аккумулятора. В режиме поддержания заряда скорость истощения емкости минимальна. При увеличении минимально допустимого значения текущего уровня заряда растет расход емкости и увеличивается внутреннее сопротивление. С увеличением скорости заряда емкость аккумулятора падает, а внутреннее сопротивление увеличивается. Также скорость его роста увеличивается при повышении рабочей температуры. Данный метод простой и точный, применим для прогнозирования и оценки старения. В [12] также рассмотрены режимы истощения и поддержания заряда тягового аккумулятора для оценки его ресурса.

В данной статье выбрана методика [13] как наиболее применимая для рассматриваемых условий, поскольку позволяет учитывать смешанный цикл заряда-разряда. В ней вводится условный критерий сохраняемости заряда, представляющий собой долю остаточной емкости аккумулятора относительно первоначальной. Как и в [11, 12], ресурс аккумулятора оценивается с помощью соотношения длительности работы аккумулятора в режимах истощения и поддержания заряда:

$$Ratio = \frac{t_{CD}}{t_{CD} + t_{CS}}, \quad (1)$$

где t_{CD} – время истощения заряда, с; t_{CS} – время поддержания заряда, с, а в качестве математической модели для описания процесса старения используется система уравнений на основе уравнения Аррениуса [12, 13]:

$$\begin{cases} Q_{loss}(Ah) = a(SOC_{min}, Ratio) \cdot e^{-E_{ac}/(R \cdot T)} Ah^z; \\ a = a_c + \beta_c \cdot Ratio^\beta + \gamma_c (SOC_{min} - SOC_0)^C, \end{cases} \quad (2)$$

где $Q_{loss}(Ah)$ – расчетная потеря емкости, А·с; Ah – уровень заряда аккумулятора, А·с; a – фактор, который зависит от степени заряда и соотношения времени заряда и времени разряда, безразмерн.; SOC_{min} – минимальное значение текущего уровня заряда, о.е.; SOC_0 – начальное состояние заряда, о.е.; E_{ac} – энергия активации реакции старения, Дж/моль, принимаемая равной 225,018 Дж/моль; R – газовая постоянная, равная 8,314 Дж/К·моль; T – абсолютная температура, К, принимаемая в расчетах 293 К; $z, a_c, \beta_c, \gamma_c, \beta, C$ – эмпирические коэффициенты, безразмерн., принятые количественно равными указанным в [13]. Величина Ah определяется по выражению:

$$Ah = \int |I| dt, \quad (3)$$

где I – действующее значение зарядного тока в момент времени t , А.

Сценарии беспроводного заряда

Описанная методика требует знания SOC , в то же время этот параметр непрерывно изменяется в процессе выполнения самосвалом технологической задачи и существенно зависит от параметров трассы, параметров технологического цикла и сценариев беспроводного заряда, обусловленных вариантами реализации беспроводной зарядной инфраструктуры. Таким образом, возникает необходимость анализа данных факторов.

Технологическая задача и маршрут движения самосвала в течение рабочей смены определяются технологией ведения горных работ и этапом производственного процесса. На первом этапе после предварительной подготовки горных пород выполняются выемочно-погрузочные операции, в ходе которых осуществляется извлечение породы и ее одновременная погрузка в карьерные самосвалы и перевозка вскрышной породы. Эти процессы также включают транспортировку и складирование горной массы. Для выполнения данных операций задействуются самосвалы, экскаваторы, буровые установки, погрузчики, оборудование для беззрывной выемки, бульдозеры, скреперы [14].

На следующем этапе осуществляется непосредственно добыча полезного ископаемого. Этот этап включает комплекс процессов по отделению полезного ископаемого от массива, его выемке и последующей транспортировке до мест складирования или первичной переработки. Основными видами транспорта при этом являются железнодорожный, автомобильно-конвейерный (дробильно-конвейерные комплексы, дробильно-перегрузочные установки) и карьерный автомобильный [15]. В ходе добычных работ выполняется послойное удаление полезного ископаемого и далее экскаваторы (как правило, мехлопаты) производят черпание горной массы из забоя. Одновременно с извлечением осуществляется погрузка добытого сырья в карьерные самосвалы или на конвейерные линии. Транспортировка полезного ископаемого ведется по временным или стационарным дорогам на склады или в перегрузочные пункты. Для поддержания рабочих площадок, зачистки кровли полезного ископаемого от остатков вскрыши и планировки отвалов также задействуются бульдозеры и скреперы. На некоторых карьерах на этом этапе применяются дробильные установки (передвижные или стационарные) для первичного дробления непосредственно в карьере.

В рамках данной статьи будем рассматривать этап непосредственной добычи, предполагая, что используются горнотранспортные комплексы с дистанционным управлением, а карьерные самосвалы оснащены полностью или частично роботизированным управлением [16, 17]. В этом случае снижается продолжительность и число рейсов, потери времени от простоев, число машин, одновременно находящихся на маршруте, себестоимость, увеличивается производительность работы [18]. Исходя из условия, что карьерные самосвалы, используемые в технологическом процессе, полностью электрические, сценарии беспроводного заряда их аккумуляторов должны исходить из предпосылки максимально возможного совмещения операции заряда с реализуемыми технологическими операциями. Таким образом, рассматриваются следующие сценарии заряда:

1. Беспроводный заряд совмещается с операцией погрузки.

При данном сценарии используются статические зарядные станции, а зарядная инфраструктура представлена несколькими зарядными площадками, которые находятся на пунктах погрузки самосвалов и перемещаются вместе с экскаваторами соответственно этапам технологического процесса по мере разработки забоя. Время заряда определяется продолжительностью погрузки, время разряда – рабочим циклом. Беспроводный заряд производится при условии снижения SOC ниже нижнего порогового значения и прекращается при превышении верхнего, например, реализуется цикл заряда 80-20. Преимуществом данного сценария является минимизация простоев самосвалов на заряд аккумуляторов и малая единичная мощность зарядной станции, недостатком – необходимость передвижения зарядных площадок.

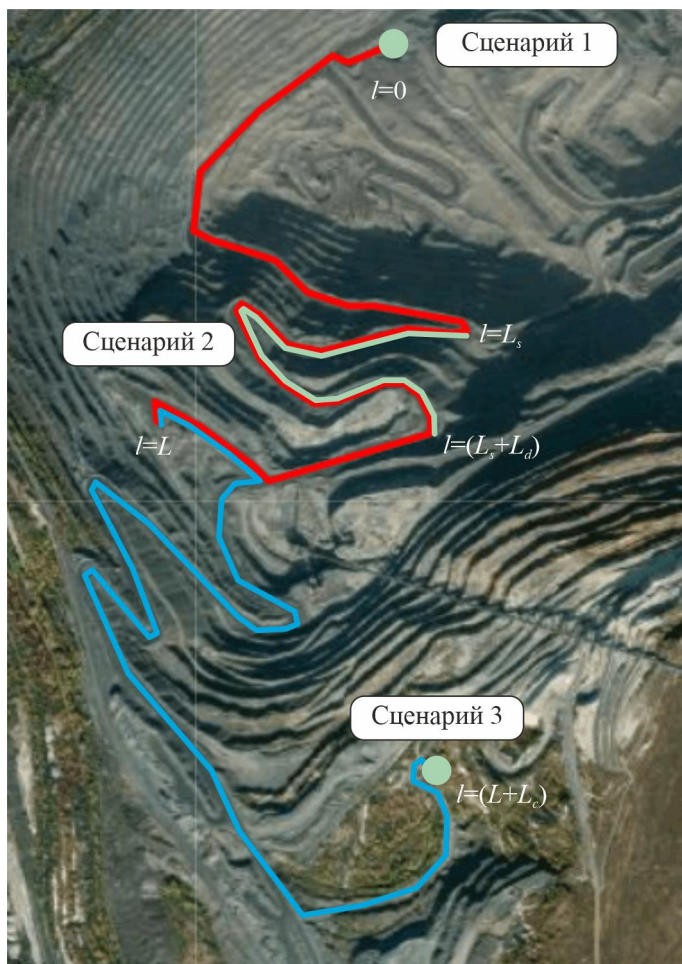


Рис. 1. Расположение зарядных станций для рассматриваемых сценариев заряда
 Fig. 1. Charging station locations for the charging scenarios under consideration

2. Беспроводный заряд совмещается с операцией транспортирования (движением самосвала по технологической трассе).

Для реализации данного сценария необходимо использование динамической зарядной станции, а значит, требуется соответствующим образом оборудовать участок дороги протяженностью L_d , расположенный на расстоянии L_s от пункта погрузки. Динамические зарядные станции наиболее сложны для проектирования и эксплуатации и обладают относительно низким коэффициентом полезного действия, в то же время просты в работе самосвалов на заряд аккумуляторов полностью исключаются, а динамическая зарядная станция может одновременно заряжать несколько самосвалов, находящихся на оборудованном участке.

Число одновременно заряжаемых карьерных самосвалов в конкретный момент времени определяется принципом наложения технологических маршрутов, а также условием наличия максимум одного карьерного самосвала на пункте погрузки. Время заряда определяется продолжительностью движения по оборудованному беспроводной зарядной инфраструктурой участку трассы, а также текущим SOC (по аналогии с предыдущим сценарием, например, цикл 80-20), время эксплуатации – также рабочий цикл. Для реализации данного сце-

нария требуется наименьшая емкость тягового аккумулятора.

Основным недостатком данного сценария являются большие капитальные затраты и высокая требуемая мощность динамической зарядной станции.

3. Беспроводный заряд аккумулятора производится по завершению заданного числа технологических циклов.

Для реализации сценария требуется статическая зарядная станция, размещаемая за пределами технологических трасс на расстоянии L_c от пункта разгрузки, где происходит одновременный заряд нескольких карьерных самосвалов, завершивших заданное число погрузочно-разгрузочных циклов. Заряд аккумулятора начинается по факту въезда самосвала на зарядную площадку беспроводной зарядной станции независимо от начального SOC и производится до полного заряда аккумулятора.

Время заряда определяется величиной зарядного тока и не должно быть выше заданного значения, время эксплуатации – суммарной длительностью заданного числа технологических циклов, а также длительностью заряда и временем в пути от пункта разгрузки до зарядной станции и обратно. Этот сценарий требует наибольшей емкости тяговых аккумуляторов самосвала, высокой мощности зарядной станции при относительно низком коэффициенте ее использования.

Каждый из этих сценариев требует реализации своего варианта зарядной инфраструктуры. Возможное расположение зарядных станций для рассматриваемых сценариев заряда приведено на Рис. 1. Выбрав конкретное расположение, в совокупности с параметрами технологической трассы, используя модель инфраструктуры беспроводного заряда [19], можно проводить исследование работы самосвала.

Моделирование взаимодействия самосвала с зарядной инфраструктурой

Для проведения исследования была использована модель в среде MATLAB Simulink, представленная на Рис. 2. Ее основные компоненты моделируют параметры трассы, по которой движется самосвал, его силовую установку и тяговый аккумулятор, а также беспроводную зарядную инфраструктуру. При моделировании самосвала использовались параметры трансмиссии, соответствующие БЕЛАЗ-7558Е [20], аккумулятор предполагался литий-железо-фосфатный, а параметры трассы (протяженность, уклон и кривизна маршрута) основаны на характеристиках одной из трасс угольного разреза Лебединского горно-обогатительного комбината. Количественные значения параметров модели приведены в [19].

В модели предполагается, что движение груженого самосвала к пункту разгрузки производится на подъем, а к пункту погрузки самосвал идет порожним на спуск. Заряд аккумуляторов производится в соответствии с выбранным сценарием, величина

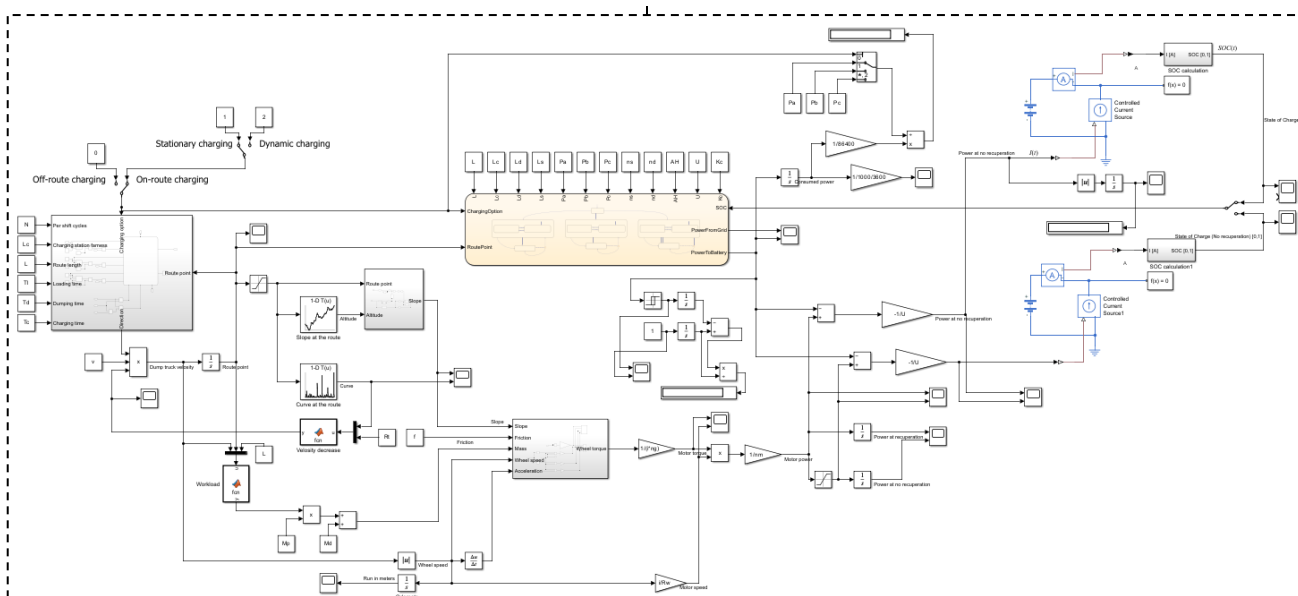


Рис. 2. Модель взаимодействия инфраструктуры беспроводного заряда и электрического карьерного самосвала в MATLAB Simulink
 Fig. 2. The interaction model of wireless charging infrastructure and electric dump truck in MATLAB Simulink

зарядного тока определяется емкостью аккумулятора и коэффициентом кратности зарядного тока. Учен вариант силовой схемы с наличием рекуперации при торможении самосвала и без. В таком случае заряд восполняется от станций беспроводного заряда, если текущий SOC соответствует условиям включения беспроводного заряда.

В качестве начальных условий принято, что самосвал находится в точке погрузки с некоторым начальным уровнем заряда аккумулятора SOC_0 . Осуществляется циклическое моделирование движения самосвала по технологической трассе, в результате которого формируется распределение потоков мощности силовой установки самосвала между нагрузкой и тяговым аккумулятором. По завершению моделирования производится визуализация результатов, включая зарядно-разрядные характеристики аккумулятора, такие как протекающий через него ток I и текущий уровень заряда (например, см. Рис. 3), мощность, потребляемая инфраструктурой беспроводного заряда, и т. п. Полученные графики позволяют анализировать соот-

ветствие элементов системы по мощности и выявлять эксплуатационные характеристики системы, в частности электропотребление зарядных станций, интенсивность износа тяговых аккумуляторов и др.

Для проведения оценки скорости истощения ресурса тяговых аккумуляторов при разных сценариях беспроводного заряда, а также необходимой величины емкости тягового аккумулятора была проведена серия экспериментов. В ней для каждого сценария беспроводного заряда один и тот же самосвал в течение суток выполняет одну и ту же технологическую задачу, но с разной величиной установленной емкости тягового аккумулятора AH , $A \cdot ч$, и при разной величине кратности зарядного тока Kc , $ч^{-1}$. За единицу установленной емкости тягового аккумулятора 1 о.е. принята емкость 412 $A \cdot ч$, соответствующая установленной емкости серийного электробуса [21], а за единицу кратности зарядного тока 1 о.е. принята кратность 1 $ч^{-1}$, при которой аккумулятор за время $t = 1$ ч зарядится с $SOC = 0$ о.е. до $SOC = 1$ о.е. Величина AH варьировалась от 1/6 до 6 о.е., а Kc – от 1/5 до 5 о.е. Для

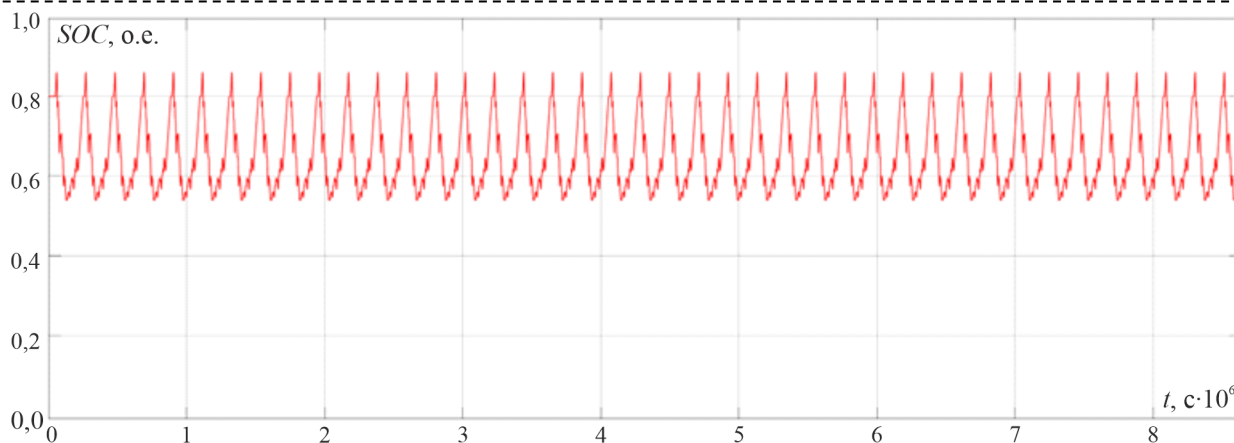


Рис. 3. График $SOC(t)$ при емкости аккумулятора $AH = 412 A \cdot ч$ и кратности зарядного тока $Kc = 2 ч^{-1}$
 Fig. 3. $SOC(t)$ graph for battery capacity of $AH = 412 A \cdot h$ and charging current ratio $Kc = 2 h^{-1}$

каждого эксперимента проводился анализ $SOC(t)$ за период длительностью в одни сутки, где выделялись минимальные SOC_{min} , максимальные SOC_{max} и средние $SOC_{ср.зн.}$ значения уровня заряда.

Результаты исследования и выводы

Результаты проведенных экспериментов оценивались по двум критериям: выполнение технологической задачи и интенсивность истощения ресурса аккумулятора.

1. Критерий выполнения технологической задачи оценивает, достаточно ли установленной емкости аккумулятора для выполнения рабочего цикла в течение длительного времени. Количественная оценка критерия производится по величине SOC_{min} за сутки, который должен быть строго больше нуля. По результатам моделирования для каждого сценария были построены трехмерные зависимости $SOC_{min}(AH, Kc)$, примеры которых приведены на Рис. 4, где красной линией показана область, в пределах которой технологическая задача не выполняется, т. е. $SOC_{min} = 0$ о.е. Результаты показывают,

что сценарий 1 и сценарий 2 имеют сопоставимые диапазоны AH и Kc , при которых технологическая задача выполняется. Рассматривая случаи с рекуперацией энергии торможения, наименьшая AH при наименьшем Kc будет обеспечиваться для сценария 2, а отсутствие рекуперации снижает диапазон допустимых условий работы более чем вдвое. При этом для сценария 3 диапазон допустимых условий работы весьма узок не только относительно AH , что ожидаемо исходя из заложенных в него принципов работы, но и относительно Kc , т. е. в этом сценарии можно ожидать более интенсивного истощения ресурса аккумулятора при его более высокой емкости.

2. Критерий интенсивности истощения ресурса аккумулятора определялся по приведенной выше методике. Анализ динамики $SOC(t)$ использовался для определения $Ratio$ на основе (1) с учетом смешанных циклов заряда-разряда при рекуперации энергии во время движения на спуск. Величины $I(t)$, SOC_{max} и SOC_0 использовались для определения

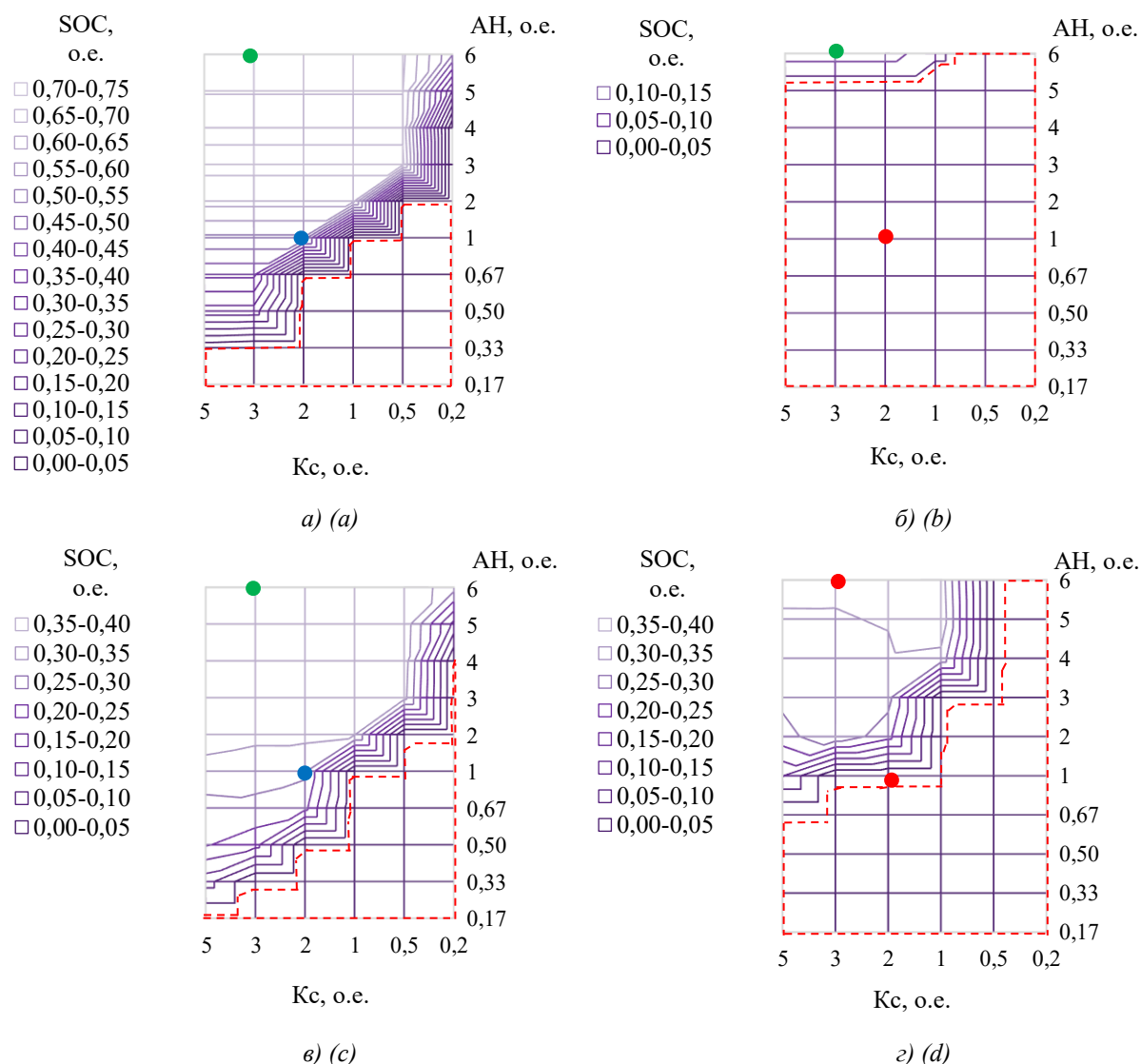


Рис. 4. Зависимость $SOC_{min}(AH, Kc)$: а) сценарий 1 с рекуперацией; б) сценарий 3 с рекуперацией; в) сценарий 2 с рекуперацией; г) сценарий 2 без рекуперации
 Fig. 4. Dependence $SOC_{min}(AH, Kc)$: а) scenario 1 with recuperation; б) scenario 3 with recuperation; в) scenario 2 with recuperation; г) scenario 2 without recuperation

Q_{loss} по (2) и (3).

Поскольку динамика $SOC(t)$ для разных сценариев существенно различается, для корректности сопоставления отобраны условия работы с равными AH и Kc , которые показаны на Рис. 4 зелеными и синими точками. Условия, в которых при рассматриваемых значениях AH и Kc сопоставление не производится в силу невыполнения технологической задачи или неэффективности режима работы, показаны на Рис. 4 красными точками.

В зеленых точках $AH = 2472$ А·ч, а $Kc = 3$ ч⁻¹, т. е. AH и Kc близки по своему значению к параметрам тягового аккумулятора БеЛА3-7558Е. Здесь имеется возможность сопоставить все три сценария беспроводного заряда. Графики потери емкости за неделю эксплуатации приведены на Рис. 5. Как и ожидалось, сценарий 3 имеет более высокую скорость истощения ресурса, при этом наименьшая скорость истощения ресурса выявлена у сценария 1.

В синих точках $AH = 412$ А·ч, а $Kc = 2$ ч⁻¹. Графики потери емкости за неделю эксплуатации для этих условий приведены на Рис. 5. Следует отметить, что технологическая задача выполняется только для сценариев 1 и 2, но условия отобраны для сравнения по принципу наименьшего Kc при

единичной емкости тягового аккумулятора, т. е. величина AH здесь в 6 раз ниже, чем при условиях, обозначенных зелеными точками. Так же, как и на Рис. 5, скорость истощения ресурса у сценария 1 оказывается меньше, чем у сценария 2, что, вероятно, объясняется более высокой долей смешанных циклов заряда-разряда в сценарии 2 и требует дальнейших исследований. Кроме того, обращает на себя внимание, что в относительных величинах Q_{loss} для меньшей емкости тягового аккумулятора оказывается выше.

При анализе результатов моделирования были выявлены следующие закономерности:

1. Увеличение $SOC_{средн}$ происходит при постоянной емкости аккумулятора с ростом кратности зарядного тока либо при неизменной кратности зарядного тока с увеличением емкости аккумулятора. Рост $SOC_{средн}$ носит линейный характер.

2. Независимо от сценария беспроводного заряда и типа зарядной станции, $SOC_{средн}$ возрастает при увеличении емкости и кратности зарядного тока, однако скорость этого процесса для разных сценариев различна: наиболее интенсивный рост характерен для сценария 3, наиболее плавное и равномерное увеличение $SOC_{средн}$ характерно для сценария 2, а для сценария 1 наблюдается нелинейный рост $SOC_{средн}$, что требует проведения дополнительных исследований.

3. Варианты силовых установок электрических самосвалов, в которых не обеспечивается рекуперация энергии торможения, хоть и могут быть работоспособными в сопоставимых условиях, имеюткратно меньшую эффективность работы системы.

Что касается остаточного ресурса тяговых аккумуляторов, наилучшим сценарием беспроводного заряда является сценарий 1, предполагающий размещение беспроводных зарядных станций стационарного типа на местах погрузки.

Полученные результаты могут быть использованы для описания и прогнозирования процесса деградации исследуемых тяговых аккумуляторов на более длительные периоды, а также будут полезны при оценке технико-экономических показателей жизненного цикла беспроводной зарядной инфраструктуры автономных электрических карьерных самосвалов на конкретных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрекалов С. В. Сравнительный анализ влияния открытого и подземного способов добычи угля на экологические и социально-экономические аспекты в угледобывающих регионах // Евразийский союз ученых. 2015. № 11–4(20). С. 112–115.

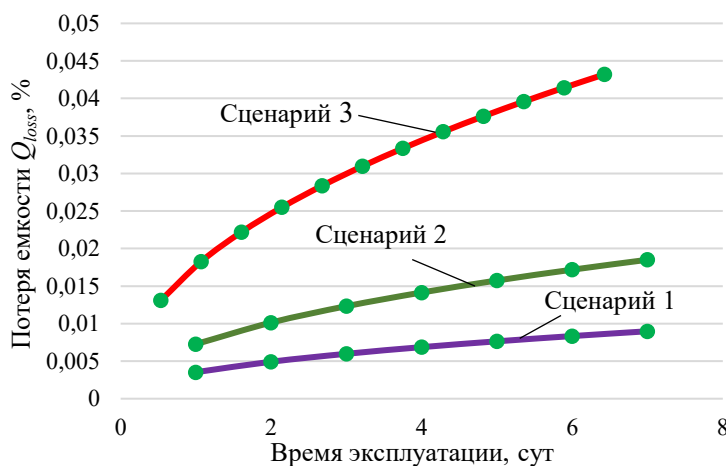


Рис. 5. Потеря емкости аккумулятора при $AH = 6$ о.е. и $Kc = 3$ о.е.
Fig. 5. Battery capacity loss at $AH = 6$ p.u. and $Kc = 3$ p.u.

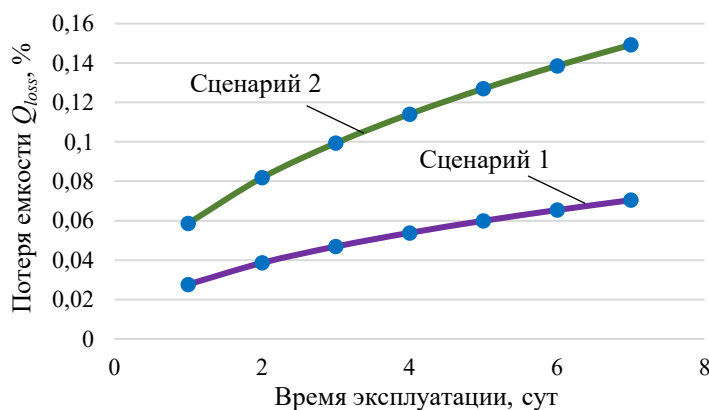


Рис. 6. Потеря емкости аккумулятора при $AH = 1$ о.е. и $Kc = 2$ о.е.
Fig. 6. Battery capacity loss at $AH = 1$ p.u. and $Kc = 2$ p.u.

2. Hitachi Construction Machinery: добывающие предприятия делают ставку на троллейбусы // Горная промышленность. 2021. Вып. 2. С. 24–25. ISSN 1609-9192.
3. Хазин М. Л. Роботизированные карьерные самосвалы // Известия УГГУ. 2020. Вып. 3(59). С. 123–130. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.
4. Семькина И. Ю., Завьялов В. М., Нечипоренко Я. А. Оценка влияния типа беспроводной зарядной станции на технические характеристики тяговых аккумуляторов электрических карьерных самосвалов // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2025: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 15-18 сентября 2025 г. Севастопольский государственный университет; под ред. Козыря Д. А., Кучерик Г. В., Омельчук Ю. А. Севастополь : СевГУ, 2025. С. 231–234.
5. Enrico D. S., Vanessa P., Massimiliano L., Antonello R. Degradation Mechanisms and Differential Curve Modeling for Non-invasive Diagnostics of Lithium Cells: An Overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 211. Art. 115349. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115349.
6. Tseng K.-H., Liang J.-W., Chang W., Huang S.-C. Regression models using fully discharged voltage and internal resistance for state of health estimation of lithium-ion batteries // Energies. 2015. № 8. Pp. 2889–2907.
7. Kuo T. J., Lee K. Y., Chiang M. H. Development of a neural network model for SOH of LiFePO4 batteries under different aging conditions // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. № 486. Art. 012083.
8. Hafsaoui J., Sellier F. Electrochemical model and its parameters identification tool for the follow-up of battery aging // World Electric. Veh. J. 2010. № 4. Pp. 386–395.
9. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations // J. Comput. Phys. 2019. № 378. Pp. 686–707.
10. Tian Y., Xia B., Wang M., Sun W., Xu Z. Comparison study on two model-based adaptive algorithms for SOC estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles // Energies. 2014. № 7. Pp. 8446–8464.
11. Cordoba A. Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes // J. Power Sources. 2015. № 278. Pp. 473–483.
12. Oparina T. A., Sevryugina N. S., Gozbenko V. E., Kondratiev V. V. Determination of the Performance Characteristics of a Traction Battery in an Electric Vehicle // World Electr. Veh. J. 2024. № 15. Art. 64.
13. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Demin A. Y. [et al.] Modeling the Reliability of an Electric Car Battery While Changing Its Charging and Discharge Characteristics // Mathematics. 2025. Vol. 13. Iss. 11. Art.1832. 24 p.
14. Дубинкин Д. М., Садовец В. Ю., Котиев Г. О., Карташов А. Б. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах // Техника и технология горного дела. 2019. № 4(7). С. 50–66. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-4-50-66.
15. Черепанов В. А., Журавлев А. Г. Современные технологические и конструктивные решения в карьерном транспорте // Проблемы недропользования. 2022. № 4(35). С. 75–93. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.075.
16. Журавлев А. Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин // Проблемы недропользования. 2014. № 3(3). С. 164–175.
17. Шевченко А. Н., Храмовских В. А. О перспективах применения автоматизированных способов добычи полезных ископаемых // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2019. Т. 42. № 1 (66). С. 104–111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.
18. Стенин Д. В. Перспективы развития производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6 (146). С. 3–8. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-3-8.
19. Семькина И. Ю., Завьялов В. М., Нечипоренко Я. А., Таран Е. Н. Модель инфраструктуры беспроводного заряда для электротранспорта предприятий открытой добычи полезных ископаемых // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 56–69.
20. Грачев А. И. Абсолютно «зеленый» БелАЗ-7558Е // Горная промышленность. 2022. Вып. 2. С. 30–32. ISSN 1609-9192.
21. Гурский А. С. Анализ параметров высоковольтных аккумуляторных батарей электробусов с целью создания алгоритмов их общего и поэлементного диагностирования с применением телематических систем // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2022. Вып. 4. С. 12–20.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Семькина Ирина Юрьевна, старший научный сотрудник, лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени

Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6874-1735>, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Завьялов Валерий Михайлович, профессор, кафедра электропривода и автоматизации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, доцент, ORCID: 0000-0001-8485-9864, e-mail: vmzavyalov@mail.sevsu.ru

Нечипоренко Ярослава Аджайевна, аспирант, техник, лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: ja.ne4iporenko2017@yandex.ru

Таран Елена Николаевна, научный сотрудник, лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), канд. техн. наук, ORCID: 0009-0005-9656-9457, e-mail: taranelena23@yandex.ru

Захарова Алла Геннадьевна, профессор, кафедра электропривода и автоматизации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), д.т.н, профессор, ORCID: 0000-0002-0046-7976, e-mail: zaharovaag@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Семыкина Ирина Юрьевна – постановка исследовательской задачи, выводы.

Завьялов Валерий Михайлович – концептуализация исследования, научный менеджмент.

Нечипоренко Ярослава Аджайевна – сбор и анализ данных (моделирование), написание текста.

Таран Елена Николаевна – обзор соответствующей литературы.

Захарова Алла Геннадьевна – сбор и анализ данных (оценка связей).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-3-52-63

Irina Yu. Semykina*, **Valery M. Zavyalov**, **Yaroslava A. Nechiporenko**, **Elena N. Taran**,
Alla G. Zakharova

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: arinasemykina@gmail.com

THE LIFETIME ASSESSMENT OF TRACTION BATTERIES IN ELECTRIC MINING DUMP TRUCKS POWERED BY WIRELESS CHARGING STATIONS



Article info

Received:

24 February 2026

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

15 June 2026

Keywords: electric mining dump truck, traction battery, wireless charging station, charging infrastructure, computer simulation

Abstract.

The shift to autonomous electric transport in mining is essential for reducing costs, enhancing productivity, and improving labour safety. The paper assesses the rate of traction battery fade in an electric mining dump truck charged using wireless charging stations under different scenarios and charging infrastructure options. The research was conducted using lithium iron phosphate batteries and the BelAZ-7558E dump truck as a case study. A review of battery lifetime assessment methods was conducted, and mathematical and scenario modeling methods were applied. To mathematically represent wireless charging stations, traction batteries, the powertrain of dump trucks, and the processes that occur within them, a dynamic model was developed using MatLab Simulink. To study the battery fade process, the mathematical model based on the Arrhenius equation was used. The capacity loss of the traction battery was determined for the considered charging infrastructure options. The wireless charging scenario delivers optimal results when charging stations are placed at the loading points. The simulation results are useful for estimating and predicting the fade of traction batteries. They also aid in designing the lifecycle of wireless charging infrastructure for autonomous electric dump trucks at specific mining enterprises.

For citation: Semykina I.Y., Zavyalov V.M., Nechiporenko Y.A, Taran E.N., Zakharova A.G. The lifetime assessment of electric mining dump trucks' traction batteries powered from wireless charging stations. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 3(185):52-63 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-

Acknowledgment: The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-03-2024-082-2).

REFERENCES

1. Strekalov S. V. Sravnitel'nyj analiz vliyaniya otkrytogo i podzemnogo sposobov dobychi uglja na ekologicheskie i social'no-ekonomicheskie aspekty v ugledobyvayushchih regionah. *Evrazijskij soyuz uchenyh*. 2015; 11–4 (20):112-115. (In Russ.)
2. Hitachi Construction Machinery: dobyvayushchie predpriyatiya delayut stavku na trollejvozy. *Gornaya promyshlennost'*. 2021; 2:24-25. ISSN 1609-9192. (In Russ.)
3. Hazin M.L. Robotizirovannye kar'ernye samosvaly. *Izvestiya UGGU*. 2020; 3(59):123-130. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123-130. (In Russ.)
4. Semykina I.Yu., Zav'yalov V.M., Nechiporenko Ya.A. Ocenka vliyaniya tipa besprovodnoj zaryadnoj stancii na tekhnicheskie harakteristiki tyagovyh akkumulyatorov elektricheskikh kar'ernyh samosvalov. *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2025: sbornik statej po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet; pod red. D.A. Kozyrya, G.V. Kucherik, Yu.A. Omel'chuk. Sevastopol': SevGU; 2025. Pp. 231-234. (In Russ.)*
5. Enrico D.S., Vanessa P., Massimiliano L., Antonello R. Degradation Mechanisms and Differential Curve Modeling for Non-invasive Diagnostics of Lithium Cells: An Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025; 211:115349. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115349.
6. Tseng K.-H., Liang J.-W., Chang W., Huang S.-C. Regression models using fully discharged voltage and internal resistance for state of health estimation of lithium-ion batteries. *Energies*. 2015; 8:2889-2907.
7. Kuo T.J., Lee K.Y., Chiang M.H. Development of a neural network model for SOH of LiFePO4 batteries under different aging conditions. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019; 486:012083.
8. Hafsaoui J., Sellier F. Electrochemical model and its parameters identification tool for the follow-up of battery aging. *World Electric. Veh. J.* 2010; 4:386-395.
9. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *J. Comput. Phys.* 2019; 378:686-707.
10. Tian Y., Xia B., Wang M., Sun W., Xu Z. Comparison study on two model-based adaptive algorithms for SOC estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Energies*. 2014; 7:8446-8464.
11. Cordoba A. Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes. *J. Power Sources*. 2015; 278:473-483.
12. Oparina T.A., Sevryugina N.S., Gozbenko V.E., Kondratiev V.V. Determination of the Performance Characteristics of a Traction Battery in an Electric Vehicle. *World Electr. Veh. J.* 2024; 15:64.
13. Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Demin A.Y. [et al.] Modeling the Reliability of an Electric Car Battery While Changing Its Charging and Discharge Characteristics. *Mathematics*. 2025; 13(11):1832. 24 p.
14. Dubinkin D.M., Sadovec V.Yu., Kotiev G.O., Kartashov A.B. Issledovanie processa transportirovaniya vskryshnyh porod i uglja na razrezah. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. 2019; 4(7):50-66. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-4-50-66. (In Russ.)
15. Cherepanov V.A., Zhuravlev A.G. Sovremennye tekhnologicheskie i konstruktivnye resheniya v kar'ernom transporte. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2022; 4(35):75-93. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.075. (In Russ.)
16. Zhuravlev A.G. Tendencii razvitiya transportnyh sistem kar'erov s ispol'zovaniem robotizirovannyh mashin. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014; 3 (3):164-175. (In Russ.)
17. Shevchenko A.N., Hramovskih V.A. O perspektivah primeneniya avtomatizirovannyh sposobov dobychi poleznyh iskopaemyh. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sekcii nauk o Zemle Rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh*. 2019; 42(1(66)):104-111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111. (In Russ.)
18. Stenin D.V. Perspektivy razvitiya proizvodstva avtonomnyh tyazhelyh platform dlya bezlyudnoj dobychi poleznyh iskopaemyh. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2019; 6(146):3-8. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-3-8. (In Russ.)
19. Semykina I.Yu., Zav'yalov V.M., Nechiporenko Ya.A., Taran E.N. The model of wireless charging infrastructure for electric transport of open-pit mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2025; 275:56-69.
20. Grachev A.I. Absolyutno «zelenyj» BelAZ-7558E. *Gornaya promyshlennost'*. 2022; 2:30-32. ISSN 1609-9192. (In Russ.)
21. Gurskij A.S. Analiz parametrov vysokovol'tnyh akkumulyatornyh batarej elektrobusev s cel'yu sozdaniya algoritmov ih obshego i poelementnogo diagnostirovaniya s primeneniem telematicheskikh system. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluataciya, tekhnologii*. Minsk: Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet; 2022. № 4. Pp. 12-20. (In Russ.)

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Irina Yu. Semykina, Senior Researcher, Mining Industry Digital Transformation Laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0001-6874-1735, e-mail: arinasemykina@gmail.com

Valery M. Zavyalov, Professor, Department of Electric Drives and Automation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennaya St., Kemerovo, 650000, Russia), Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8485-9864>, e-mail: vmzavyalov@sevsu.ru

Yaroslava A. Nechiporenko, Postgraduate Student, Technician, Mining Industry Digital Transformation Laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), e-mail: ja.ne4iporenko2017@yandex.ru

Elena N. Taran, Researcher, Mining Industry Digital Transformation Laboratory, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya str., 28), C. Sc. (Engineering), ORCID: 0009-0005-9656-9457, e-mail: taranelena23@yandex.ru

Alla G. Zakharova, Professor, Department of Electric Drives and Automation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya St., 28), Dr. Sc. (Engineering), Professor, ORCID: 0000-0002-0046-7976, e-mail: zaharovaag@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Irina Yu. Semykina – research problem statement, drawing the conclusions.

Valery M. Zavyalov – conceptualisation of research, scientific management.

Yaroslava A. Nechiporenko – data collection, data analysis (modelling), writing the text.

Elena N. Taran – reviewing the relevant literature.

Alla G. Zakharova – data collection, data analysis (assessment of connections).

Authors have read and approved the final manuscript.

