

СИНТЕЗ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БЫСТРОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ДЛЯ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

С.И. Дедов¹, Н.И. Щуров¹, А.А. Штанг¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.
e-mail: dedov@corp.nstu.ru

Аннотация: Представлено решение задачи выбора параметров электрозарядного устройства постоянного тока с буферным накопителем энергии для аккумуляторной карьерной транспортной техники в условиях ограничения мощности сети и минимизации времени заряда. Быстрые темпы электрификации горной отрасли способствуют увеличению количества и мощности применяемых зарядных станций. Актуальным вопросом является оптимальная инфраструктура и топология зарядных устройств. На основе анализа наиболее применяемых моделей электрических карьерных самосвалов определена требуемая мощность электрозарядной станции, способная обеспечить достаточную скорость заряда. Выполнено имитационное моделирование в программной среде MATLAB Simulink зарядной станции с шиной постоянного тока, выполняющей распределение запрашиваемой транспортным средством мощности между входным AC/DC-преобразователем и буферным накопителем энергии. Функционал синтезированной модели позволяет проводить гибкую настройку параметров, таких как мощность AC/DC-преобразователя, энергоёмкость буферного накопителя и его рабочий диапазон уровня заряда, а также формировать нагрузочную диаграмму потребителя. Результаты моделирования использованы для анализа основных режимов работы электрозарядной станции с накопителем для последующего их внедрения в физическую лабораторную исследовательскую установку. Получена зависимость длительности заряда аккумуляторных батарей карьерного самосвала от энергоёмкости установленного буферного накопителя, на основе которой предложен рациональный выбор параметров электрозарядной станции. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение функционала имитационной модели, согласование с реальным графиком нагрузки, сравнение разных принципов управления и модернизации исследовательской установки.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, электротранспорт, аккумулятор, зарядная станция, имитационное моделирование, накопитель энергии, быстрая зарядка, преобразователи электрической энергии, оптимизация, литий-железо-фосфат.

Для цитирования: Дедов С.И., Щуров Н.И., Штанг А.А. Синтез имитационной модели быстрой зарядной станции с накопителем энергии для карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 187–200. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_187.

Synthesis of a simulation model of fast-charging station with energy storage for quarry transport

S.I. Dedov¹, N.I. Shchurov¹, A.A. Shtang¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

Abstract: The article presents a solution to the problem of choosing the parameters of a DC electric charger with a buffer energy storage device for battery-powered quarry transport equipment under conditions of limited network power and minimizing charging time. The rapid pace of electrification in the mining industry is contributing to an increase in the number and power of charging stations used. A pressing issue is the optimal infrastructure and topology of chargers. Based on an analysis of the most used models of electric mining dump trucks, the required power of an electric charging station, capable of providing a sufficient charging speed, was determined. Simulation modeling was carried out in the MATLAB Simulink software environment of a charging station with a DC bus that distributes the power requested by the vehicle between the input AC/DC converter and the buffer energy storage device. The functionality of the synthesized model allows for flexible adjustment of parameters, such as: the power of the AC/DC converter, the energy capacity of the buffer storage device and its operating charge level range, as well as generating a consumer load diagram. The simulation results were used to analyze the main operating modes of the charging station with a storage device for their subsequent implementation in a physical laboratory research facility. The dependence of the battery charge duration of a mining dump truck on the energy intensity of the installed buffer storage was obtained, on the basis of which a rational choice of parameters for the electric charging station was proposed. Further research will be aimed at expanding the functionality of the simulation model, matching it with the real load schedule, comparing different management principles and modernizing the research facility.

Key words: mining enterprises, electric vehicles, battery, charging station, simulation modeling, energy storage, fast charging, electrical energy converters, optimization, lithium iron phosphate.

For citation: Dedov S.I., Shchurov N.I., Shtang A.A. Synthesis of a simulation model of fast-charging station with energy storage for quarry transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):187–200. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_187.

1. Введение

На современном этапе развития горнодобывающей промышленности значительными темпами происходит технологическое видоизменение парка транспортной техники, направленное в сторону электрификации [1]. Горная промышленность характеризуется высоким показателем потребления углеводородного топлива. Традиционный дизельный карьерный и шахтный транспорт характеризуется малой эффективностью (до 35%), низкой перегрузочной способностью, значительными затратами на техническое обслуживание, является источником вредного для здоровья человека уровня шума (~105 дБ), а также требует высокой квалификации обслуживающих специалистов [2–4]. Кроме этого, дополнительные сложности возникают при проектировке новых моделей

с точки зрения сбора данных, удаленного мониторинга и автоматизации работ [5–7].

Благодаря достижениям в области силовой электроники и аккумуляторной техники, дизельные виды карьерного транспорта постепенно замещаются на гибридные и полностью электрические решения. Так, объем мирового рынка электрических карьерных самосвалов (ЭКС) в 2022 г. превысил 515,6 млн долларов и по разным оценкам аналитических агентств к 2033 г. составит до 934 млн долларов (рис. 1) со среднегодовым темпом роста более 6%. Следует отметить, что на данный момент доля аккумуляторных ЭКС составляет 42%, остальное — самосвалы с гибридной энергоустановкой и использующие топливные ячейки в качестве основного источника энергии.

Решающими критериями при принятии решений о модернизации горной техники являются стоимость внедрения и обслуживания новой техники, а также производительность, которая напрямую зависит от продолжительности простоев. Одной из ключевых составляющих простоев такой техники является время заряда бортовых аккумуляторов. С учётом необходимости минимизации этого времени, основными решениями по восполнению уровня заряда аккумуляторов для горной техники являются [4]:

1) применение бортовых зарядных устройств, как правило, работающих на дизельном топливе;

2) использование внешних электрозарядных станций (ЭЗС) постоянного тока большой мощности;

3) применение съемных бортовых аккумуляторов и ЭЗС для быстрой замены (~5 мин) разряженных модулей;

4) использование токоприемников для подключения к воздушной контактной сети в моменты пикового энергопотребления на подъемных участках и для обеспечения рекуперации в сеть при спуске (технология Trolley Assist).

Технология бортового зарядного устройства позволяет гибридизировать типовую энергоустановку карьерного самосвала, при этом используя все достоинства электрического привода — высокую эффективность,

возможность рекуперации энергии торможения и простоту управления с улучшением динамических качеств электротранспортного средства (ЭТС). Так, в работах [8, 9] рассмотрены вопросы повышения экономии топлива и эффективности рекуперативного торможения для гибридных карьерных самосвалов.

Развитие инфраструктуры быстрых ЭЗС и систем замены аккумуляторных батарей (АБ) позволяет внедрить полностью электрические карьерные самосвалы в промышленность. Основные направления исследований — оптимальные режимы заряда АБ [10], механизмы быстрой замены [11], минимизация стоимости инфраструктуры и ее обслуживания за счет оптимизации топологии ЭЗС и их расположения [12]. В работе [13] проведено сравнение производительности и стоимости внедрения систем замены аккумуляторов и быстрых ЭЗС. Получено, что для ЭЗС с АБ энергоемкостью 228 кВт·ч замена аккумулятора обеспечивает такую же производительность, как и быстрая зарядка, но стоит на 48% дороже. В исследовании [14] определены критические параметры электрозарядной инфраструктуры для парка подземных карьерных самосвалов.

Потенциальной проблемой при внедрении электрозарядной инфраструктуры является увеличение нагрузки

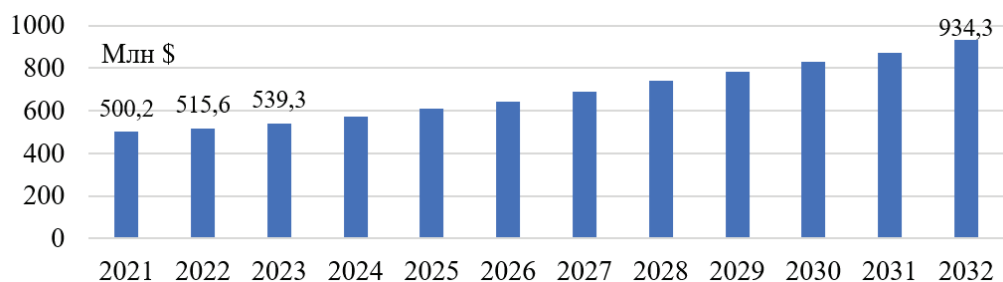


Рис. 1. Прогноз мирового рынка ЭЗС

Fig. 1. Forecast of the global ECS market

на сеть [15]. При этом возникают задачи регулирования напряжения и контроля качества электроэнергии, что оказывает влияние на эффективность и надежность сети. В работе [16] рассмотрено текущее состояние электрификации горнодобывающих предприятий и выделены основные направления исследований, в том числе применение буферных накопителей (БН) в составе быстрых ЭЭС, которые способны снизить потребность в новых мощностях при сохранении высокой скорости заряда аккумуляторной техники.

В рамках данной статьи представлен метод определения соотношения мощности входного АС/DC-преобразователя ЭЭС и энергоемкости БН литий-железо-фосфатного (LFP) типа при заданной выходной мощности ЭЭС на основе результатов, полученных с использованием разработанной имитационной модели в программной среде MATLAB Simulink.

2. Обзор современного рынка электрических самосвалов

Для установления величины требуемой выходной мощности ЭЭС проведен детальный анализ характеристик современных образцов ЭЭС. В табл. 1 приведена энергоемкость аккумулятора каждой модели и паспортное значение длительности быстрого заряда (заряд постоянным током с 30 до 80% уровня заряда [17]). Установлено, что наиболее распространенным типом химии аккумуляторов для ЭЭС является литий-железо-фосфат (LFP).

Величина мощности ЭЭС для обеспечения быстрого заряда в рамках данной работы принята по следующему соотношению:

$$P_{\text{эс}} = \frac{\sum Q}{\sum t} \cdot \Delta SOC, \text{ кВт}, \quad (1)$$

Таблица 1

Модели применяемых ЭЭС

Models of implemented electric mining dump trucks

№	Наименование	Энергоемкость АКБ, кВт·ч	Тип АКБ	Длительность быстрого заряда, ч	Требуемая мощность ЭЭС, кВт
1	SANDVIK TH550B	354	LFP	1,5	145
2	KNOW-HOW NKE90	564	LFP	1	340
3	KNOW-HOW NKE105	422	LFP	1	255
4	Zoomlion ZT105EV	700	LFP	2	210
5	Breton BRT105e	700	LFP	1,2	350
6	Sany SKT90E	525	LFP	1	315
7	Foton BJ3319EVPA1	282	LFP	1,5	115
8	CAMC HN3311B36C7BEV	282	LFP	1	170
9	Beiben BB-E-04	282	LFP	1	170
10	Shacman x3000	350	LFP	1	140

где Q — табличное значение энергоемкости АКБ, кВт·ч; t — длительность быстрого заряда; ΔSOC — разница между максимальным и минимальным уровнем заряда, %.

Таким образом, требуемая мощность ЭЗС составила $P_{ЭЗС} = 220 \text{ кВт}$. При этом обеспечивается быстрый заряд большинства моделей ЭКС за 1,5 часа и менее.

3. Анализ архитектур зарядных станций с накопителем энергии

В ЭЗС постоянного тока, как правило, используется два этапа преобразования. Первый — преобразование трехфазного переменного тока в постоянный с помощью управляемого выпрямителя (AC/DC-преобразователя), второй — управляемый заряд аккумулятора ЭТС согласно запросу его системы энергоменеджмента с помощью DC/DC-преобразователя ЭЗС.

Для зарядной инфраструктуры, имеющей несколько точек подключения, топологии классифицируются по способу

сопряжения с сетью. Наиболее предпочтительные: конфигурация с общей шиной переменного тока и общей шиной постоянного тока (рис. 2).

Основным преимуществом топологии ЭЗС с шиной переменного тока является наличие четко регламентированных стандартов, при этом электротехнические изделия на переменный ток имеют широкое распространение и доступность. Преимуществом топологии с шиной постоянного тока является меньшее число ступеней преобразования энергии, что положительно влияет на общую энергоэффективность и стоимость системы. Так, в работах [18, 19] по результатам имитационного моделирования архитектур ЭЗС установлено, что шина постоянного тока обеспечивает большую энергоэффективность и скорость зарядки, а также достигаются меньшие значения коэффициентов линейного искажения по напряжению и току. Кроме этого, обеспечивается простота подключения возобновляемых источников энер-

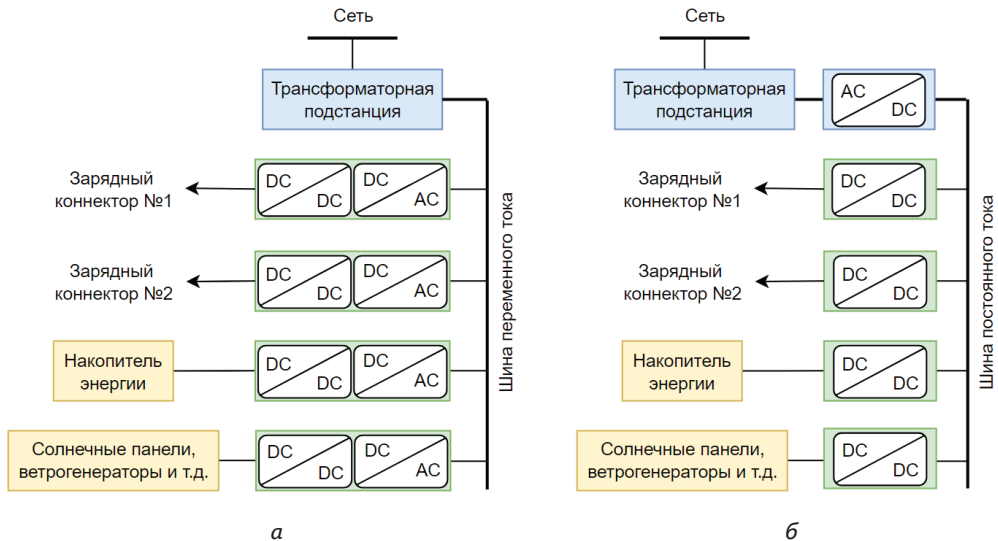


Рис. 2. Топологии быстрых зарядных станций: а — с шиной переменного тока, б — с шиной постоянного тока

Fig. 2. Topologies of fast charging stations: a — with an AC bus, b — with a DC bus

гии и систем накопления энергии [20]. Основные недостатки топологии связаны с ограниченным предложением на рынке устройств защиты и измерений [21]. Таким образом, рациональным представляется разработка ЭЗС с топологией общей шины постоянного тока.

4. Моделирование зарядной станции электросамосвала

В соответствии с выбранной топологией выполнен синтез имитационной модели зарядной станции с накопителем энергии (рис. 3). Модель включает в себя следующие подсистемы:

1) силовую часть ЭЗС, состоящую из регулируемого источника тока, имитирующего AC/DC-преобразователь, DC/DC-преобразователя, буферного

накопителя, а также датчиков тока и напряжения;

2) блок управления ЭЗС, выполняющий расчет уставок по величине тока AC/DC и DC/DC-преобразователей на основе текущего состояния буферного накопителя и аккумулятора ЭТС;

3) силовую часть ЭТС, состоящую из аккумуляторной батареи и сигналов с величинами зарядного тока, SOC и напряжения, передаваемыми на ЭЗС по выделенному информационному каналу зарядного кабеля;

4) измерительный блок, регистрирующий показания величин выходного тока AC/DC-преобразователя, а также величины тока и уровни заряда буферного накопителя и аккумуляторной батареи карьерного самосвала.

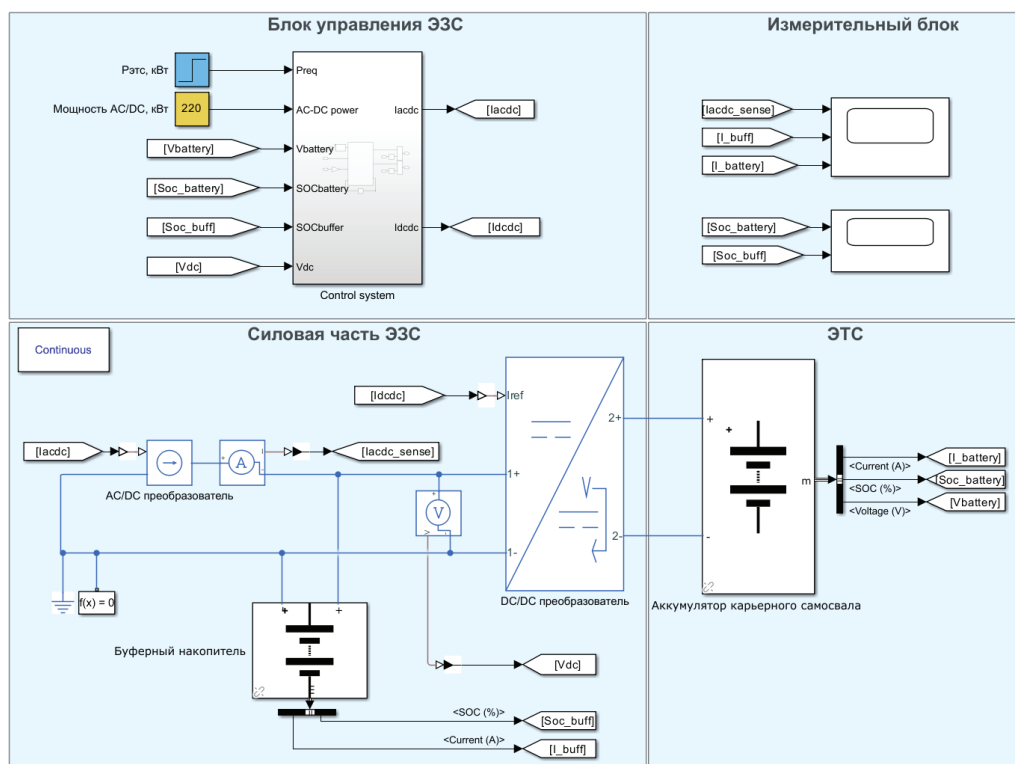


Рис. 3. Модель зарядного устройства с накопителем энергии

Fig. 3. Model of charging station with energy storage

Имитационная модель позволяет выставить максимальную мощность AC/DC-преобразователя и диаграмму запрашиваемой мощности заряда аккумуляторной батареи. Распределение мощности выполняется в подсистеме «Control system» (см. рис. 3). Уравнение баланса мощности имеет вид

$$P_{ЭТС} = P_{AC/DC} + P_{БН}, \text{ кВт},$$

где $P_{ЭТС}$ – запрашиваемая мощность, $P_{AC/DC}$ – выходная мощность AC/DC-преобразователя, $P_{БН}$ – выходная мощность накопителя энергии.

Принцип распределения нагрузки следующий. В первую очередь в работу включается AC/DC-преобразователь, который при необходимости заряжает аккумулятор ЭТС и/или буфер, не превышая своей максимальной мощности и их мощности заряда:

$$P_{AC/DC} = P_{ЭТС} + \min(P_{AC/DC, \text{макс}} - P_{ЭТС}; P_{БН, \text{заряд}}), \text{ кВт},$$

где $P_{AC/DC, \text{макс}}$ – максимальная мощность AC/DC-преобразователя, $P_{БН, \text{заряд}}$ – максимальная мощность заряда буферного накопителя.

В случае, если запрашиваемая мощность превышает максимальную мощность AC/DC-преобразователя, а буферный накопитель готов к работе, то DC/DC-преобразователь выполняет заряд согласно запросу. В противном случае выходная мощность ЭТС ограничивается. Уровень заряда буферного накопителя поддерживается в диапазоне от 30 до 80%, что обеспечивает наибольший срок его службы [22]. Подробный алгоритм распределения нагрузки представлен на рис. 4.

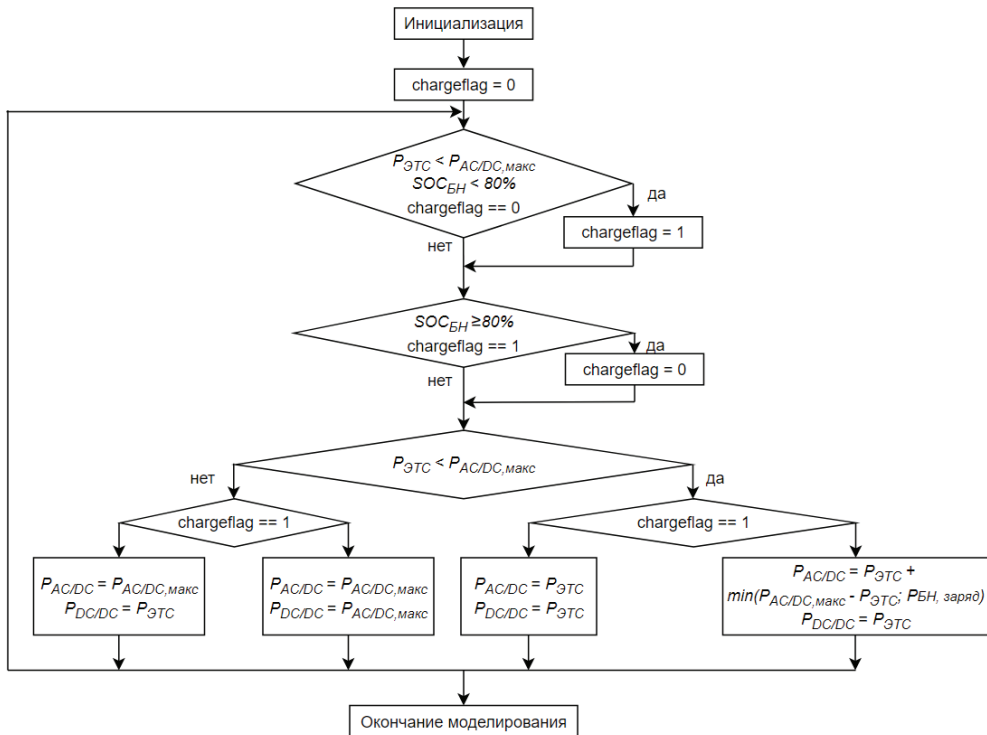


Рис. 4. Алгоритм определения мощности AC/DC и DC/DC-преобразователя
Fig. 4. Algorithm for determining the power of AC/DC and DC/DC converter

5. Обработка результатов моделирования

В качестве буферного накопителя энергии выбран LFP-аккумулятор с номинальным напряжением 600 В, максимальная зарядная и разрядная мощность при этом определяется емкостью выбранных ячеек. Рассмотрены четыре конфигурации ЭЭС:

- 1) типовая ЭЭС без БН;
- 2) ЭЭС с БН, реализующим 25% от максимальной мощности;
- 3) ЭЭС с БН, реализующим 50% от максимальной мощности;
- 4) ЭЭС с БН, реализующим 75% от максимальной мощности.

Параметры имитационной модели при различных конфигурациях (табл. 2) определялись с учетом того, что типовое значение относительного зарядного и разрядного тока LFP ячеек соответственно равно 0,5 С и 1 С. Для имитации нагрузки использованы параметры аккумулятора ЭЭС модели CAMC HN3311B36C7BEV (табл. 3).

Результаты имитационного моделирования конфигураций ЭЭС №1, №2 и №3 представлены на рис. 5. Во всех случаях запрашиваемая мощность составляла $P_{ЭЭС} = 210$ кВт. Исходный уровень заряда аккумулятора и буферного накопителя $SOC_{АКБ} = 20\%$ и $SOC_{АКБ} = 80\%$ соответственно. Быстрый заряд осуществляется до 80% с максимально доступной мощностью.

В конфигурации без накопителя (№1) AC/DC-преобразователь работает вплоть до полного заряда аккумулятора ЭЭС (момент времени t_3), а затем отключается. В конфигурациях №2 и №3 запрашиваемую мощность совместно обеспечивают AC/DC-преобразователь и накопитель через выходной DC/DC-преобразователь до момента времени t_2 и t_1 соответственно, когда уровень заряда БН опускается до 30%. Дальнейший заряд осуществляется с ограничением по величине максимальной выходной мощности DC/DC-преобразователя до полного заряда

Таблица 2

Параметры модели ЭЭС при различных конфигурациях
Parameters of the electric charging station model for various configurations

	Размерность	Конфигурация №1	Конфигурация №2	Конфигурация №3	Конфигурация №4
Мощность AC/DC преобразователя	кВт	220	165	110	55
Максимальная мощность разряда БН	кВт	—	55	110	165
Мощность заряда БН	кВт	—	27,5	55	82,5
Минимальная емкость БН	А·ч	—	92	184	75

Таблица 3

Параметры аккумулятора CAMC HN3311B36C7BEV
CAMC HN3311B36C7BEV battery parameters

Параметр		Размерность	Величина
Энергоемкость		кВт·ч	282
Тип АКБ		-	LFP
Напряжение	Минимальное	В	460
	Номинальное		615
	Максимальное		750
Мощность заряда		кВт	210

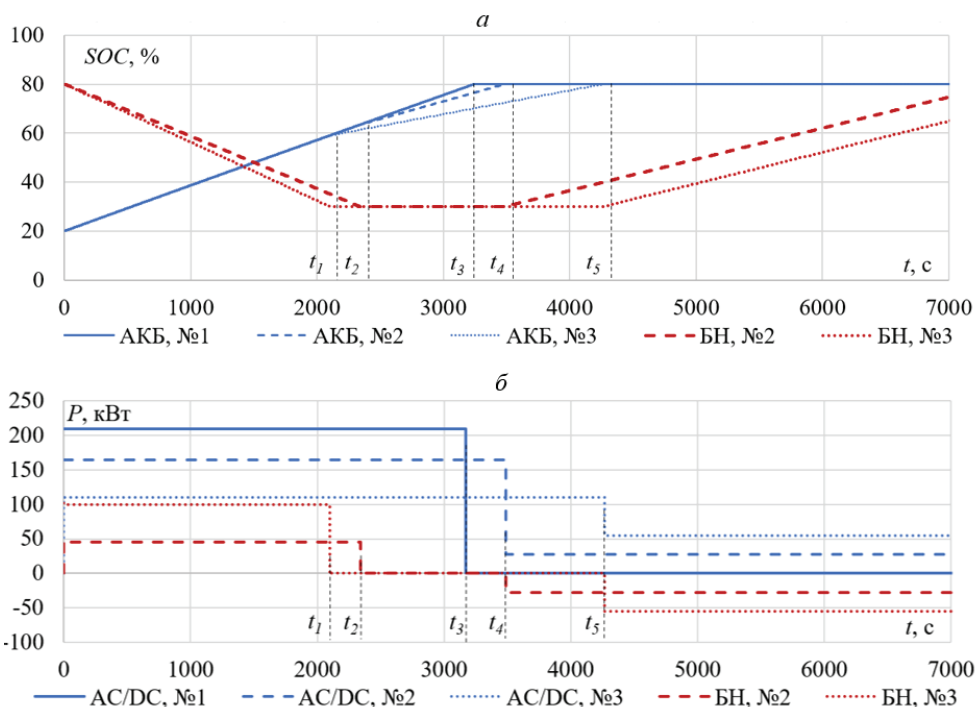


Рис. 5. Диаграммы изменения основных величин ЭЗС, а – изменение SOC, б – изменение мощности

Fig. 5. Diagrams of changes in the main values of charging station, a – SOC, b – Power

(моменты времени t_4 и t_5). Далее осуществляется дозаряд БН, после чего AC/DC-преобразователи отключаются.

Полученные графики мощности, реализуемые AC/DC-преобразователями, совпадают с графиком нагрузки на сеть. Из рис. 6 следует, что внедрение БН в состав ЭЗС позволяет значительно снизить мощность нагрузки на сеть со стороны ЭЗС. При этом длительность заряда при минимальном значении емкости БН увеличивается на 10% и 31% для конфигурации №2 и №3 соответственно. Время заряда можно сократить, увеличивая устанавливаемую емкость либо расширяя рабочий диапазон уровня заряда БН. Тем не менее, даже полученные значения показывают удовлетворительный результат, позволяя обеспечить быструю зарядку аккумулятора ЭЗС менее чем за 1,5 часа.

Для принятых конфигураций ЭЗС проведено имитационное моделирование с установлением зависимости длительности заряда от емкости БН. Полученная диаграмма представлена на рис. 6.

На кривой 1 лежат наиболее дешевые решения с минимальной емкостью БН и максимальным временем заряда при разной установленной мощности ЭЗС. На прямой 2 лежат наиболее дорогие решения, которые при большой емкости БН обеспечивают время заряда, равное времени заряда от сети без использования БН.

Очевидно, что точка пересечения линий 1 и 2 отражает конфигурацию №1, в которой отсутствует БН, а запрашиваемая мощность обеспечивается AC/DC-преобразователем. Таким образом, согласно рис. 6, возможно опреде-

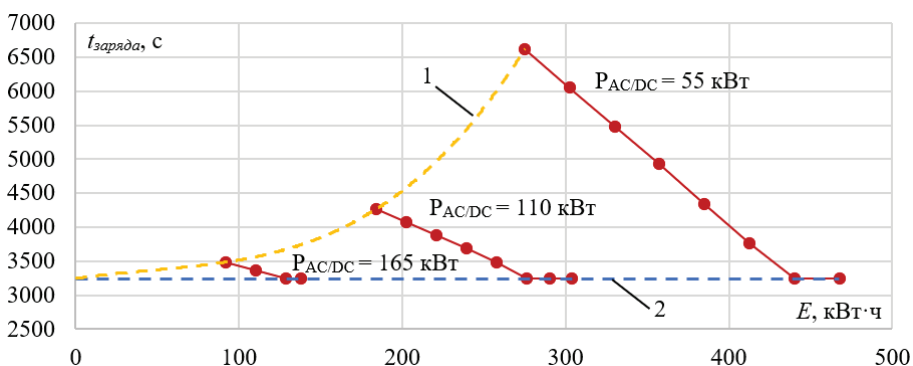


Рис. 6. Зависимость длительности заряда от энергоемкости накопителя для различных конфигураций ЭЭС

Fig. 6. Dependence of charge duration on the energy capacity of the storage device for various charging station configurations

лить множество конфигураций ЭЭС для обеспечения быстрого заряда выбранной длительности.

Полученная модель позволяет сконфигурировать ЭЭС с накопителем энергии по оптимальному соотношению мощности входного AC/DC-преобразователя и энергоемкости БН. Кроме этого, синтезированная система управления позволяет оценить возможные режимы работы с различной энергоемкостью аккумуляторов ЭЭС и текущим состоянием ЭЭС. Разработанные методы конфигурирования ЭЭС в дальнейшем будут дополняться и совершенствоваться. Полученные результаты могут быть использованы для зарядных станций других видов техники.

5. Заключение

В статье представлено решение задачи выбора параметров зарядного устройства с буферным накопителем энергии на основе топологии с шиной постоянного тока для заряда аккумуляторного карьерного транспорта. При рассмотрении наиболее реализуемых моделей карьерных самосвалов сделан вывод, что в большинстве случаев мощности $P_{ЭЭС} = 220 \text{ кВт}$ достаточно для реализации быстрого заряда.

По результатам сопоставления схемотехнических решений для ЭЭС получено, что топология с шиной постоянного тока наиболее предпочтительна с точки зрения эффективности и стоимости зарядной инфраструктуры. Так как горнодобывающие предприятия характеризуются высокой неравномерностью нагрузки, применение буферных накопителей энергии в составе быстрых ЭЭС способно обеспечить необходимую мощность заряда аккумуляторной техники без ухудшения показателей электроснабжения.

В программной среде MATLAB Simulink выполнен синтез имитационной модели ЭЭС, на базе которой выполнено исследование по четырем конфигурациям ЭЭС с различным соотношением реализуемой мощности входным AC/DC-преобразователем и БН. Показано, что увеличение энергоемкости БН позволяет снизить мощность нагрузки на сеть со стороны ЭЭС при сохранении времени заряда аккумулятора ЭЭС на уровне менее 1,5 часов.

Получены зависимости длительности заряда АБ карьерного самосвала энергоемкостью 282 кВт·ч от энергоемкости БН при различных значениях

мощности AC/DC-преобразователя. Эти зависимости совместно с предложенными ограничениями по минимальной и максимальной энергоёмкости БН образуют область оптимальных решений и позволяют выбрать основные параметры ЭЭС по заданным значениям времени заряда и допустимой нагрузке на сеть.

Дальнейшие работы будут направлены на расширение возможностей представленного алгоритма и методики

выбора параметров ЭЭС для учета разницы в интервалах между зарядными сессиями, различий в энергоёмкостях и уровнях заряда аккумуляторов ЭТС, потребности в согласовании работы ЭЭС с графиком нагрузки сети. Для верификации результатов имитационного моделирования планируется применение разработанного алгоритма распределения запрашиваемой ЭТС мощности на лабораторной исследовательской установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R.* Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads // *Energies*. 2022, vol. 15, no. 4871, pp. 1–19. DOI: 10.3390/en15134871.

2. *Moore P.* Plugging the gap underground // *Mining Mag*. 2010, vol. 201, no. 11, pp. 40–46.

3. *Paraszczyk J., Svedlund E., Fytas K., Laflamme M.* Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining // *RE&PQJ*. 2014, vol. 1, no. 12, pp. 81–86. DOI: 10.24084/repqj12.240.

4. *Grycan W.* Electric Vehicles in Mining for the Aspect of Operational Safety // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022, pp. 110–113. DOI: 10.15199/48.2022.12.27.

5. *Sánchez F., Hartlieb P.* Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.

6. Yanbiao Feng, Zuomin Dong. Optimal energy management with balanced fuel economy and battery life for large hybrid electric mining truck // *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 454. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227948.

7. *Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunl T.* A Cost-Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, vol. 51, iss. 3. DOI: 10.1109/TIA.2014.2372046.

8. *Esfahanian E., Meech J. A.* Hybrid Electric Haulage Trucks for Open Pit Mining // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013, vol. 46, no. 16, pp. 104–109. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00042.

9. *Zhou M., Gao Z., Zhang H.* Research on regenerative braking control strategy of hybrid electric vehicle // *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ifost.2011.6021027.

10. *Brenna M., Foadelli F., Leone C., Longo M.* Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020, no. 15, pp. 2539–2552. DOI: 10.1007/s42835-020-00547-x.

11. Xi Chen, Kai Xing, Feng Ni, Yujie Wu, Yongxiang Xia. An Electric Vehicle Battery-Swapping System: Concept, Architectures, and Implementations // *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2021, vol. 14, no. 5, pp. 175–194. DOI: 10.1109/MITS.2021.3119935.

12. Zaibao Xiong, Lei Li, Di Xu, Guang Su, Huaguang Wang, Yanning Li. Research on Application of DC Microgrid Heavy Truck Battery Charging-Replacement Station // 2022

7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2022. DOI: 10.1109/ACPEE53904.2022.9783673.

13. Md Ahsanul Hoque Rafi, *Rennie R., Larsen J., Bauman J.* Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines // 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). 2020. DOI: 10.1109/ITEC48692.2020.9161654.

14. Ata Meshginqalam, Muhammad Hosnee Mobarak, Jingting Dong, Md. Ahsanul Hoque Rafi, *Rennie R., Bauman J.* An Optimization Algorithm for the Design of Battery Electric Fleets in Underground Mines // IEEE Access. 2024, vol. 12, pp. 8513–8525. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3353108.

15. Xiangqi Zhu, Barry Mather, Partha Mishra. Grid Impact Analysis of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations // 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2020. DOI: 10.1109/ISGT45199.2020.9087651.

16. *Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Morán L.* Status of Mine Electrification and Future Potentials // 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES). 2020. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.

17. Kuan-Hung Chen, Min Ji Namkoong, Vishwas Goel, Chenglin Yang. Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures // Journal of Power Sources. 2020, vol. 471. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228475.

18. Gagandeep Sharma, *Sood V. K., Mohammad Saad Alam, Samir M. Shariff.* Comparison of common DC and AC bus architectures for EV fast charging stations and impact on power quality // eTransportation. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100066.

19. Tingting He, Jianguo Zhu, Dylan Dah-Chuan Lu, Linfeng Zheng, Mahlagha Mahdavi Aghdam, Jianwei Zhang. Comparison study of electric vehicles charging stations with AC and DC buses for bidirectional power flow in smart car parks // IECON 2017–43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216794.

20. *Savio A. D., Verma R., Kanagaraj L., Giri Thulasi Raman S. R., Rajamanickam N., Chokkalingam B., Sekar K. M., Mihet-Popa L.* Electric Vehicles Charging Stations' Architectures, Criteria, Power Converters, and Control Strategies in Microgrids // Electronics. 2021, vol. 10, no. 16. DOI: 10.3390/electronics10161895.

21. Ganta Naveen, Tony Ho-Tung Yip, Yuyu Xie. Modeling and protection of electric vehicle charging station // 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON). 2014. DOI: 10.1109/POWERI.2014.7117733.

22. *Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Andriashin S. N., Martyushev N. V., Klyuev R. V.* Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // Energies. 2021, vol. 14, iss. 23, 1872. DOI: 10.3390/en14238072. **PIAB**

REFERENCES

1. Lindgren L., Grauers A., Ranggård J., Mäki R. Drive-Cycle Simulations of Battery-Electric Large Haul Trucks for Open-Pit Mining with Electric Roads. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 4871, 99. 1–19. DOI: 10.3390/en15134871.

2. Moore P. Plugging the gap underground. *Mining Mag*. 2010, vol. 201, no. 11, pp. 40–46.

3. Paraszczak J., Svedlund E., Fytas K., Laflamme M. Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining. *RE&PQJ*. 2014, vol. 1, no. 12, pp. 81–86. DOI: 10.24084/repqj12.240.

4. Grycan W. Electric Vehicles in Mining for the Aspect of Operational Safety. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022, pp. 110–113. DOI: 10.15199/48.2022.12.27.

5. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.
6. Yanbiao Feng, Zuomin Dong. Optimal energy management with balanced fuel economy and battery life for large hybrid electric mining truck. *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 454. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227948.
7. Jacobs W., Hodkiewicz M. R., Bräunl T. A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, vol. 51, iss. 3. DOI: 10.1109/TIA.2014.2372046.
8. Esfahanian E., Meech J.A. Hybrid Electric Haulage Trucks for Open Pit Mining. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013, vol. 46, no. 16, pp. 104–109. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00042.
9. Zhou M., Gao Z., Zhang H. Research on regenerative braking control strategy of hybrid electric vehicle. *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ifost.2011.6021027.
10. Brenna M., Foadelli F., Leone C., Longo M. Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2020, no. 15, pp. 2539–2552. DOI: 10.1007/s42835-020-00547-x.
11. Xi Chen, Kai Xing, Feng Ni, Yujie Wu, Yongxiang Xia. An Electric Vehicle Battery-Swapping System: Concept, Architectures, and Implementations. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2021, vol. 14, no. 5, pp. 175–194. DOI: 10.1109/MITS.2021.3119935.
12. Zaibao Xiong, Lei Li, Di Xu, Guang Su, Huaguang Wang, Yanning Li. Research on Application of DC Microgrid Heavy Truck Battery Charging-Replacement Station. *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. 2022. DOI: 10.1109/ACPEE53904.2022.9783673.
13. Md Ahsanul Hoque Rafi, Rennie R., Larsen J., Bauman J. Investigation of Fast Charging and Battery Swapping Options for Electric Haul Trucks in Underground Mines. *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. 2020. DOI: 10.1109/ITEC48692.2020.9161654.
14. Ata Meshginqalam, Muhammad Hosnee Mobarak, Jingting Dong, Md. Ahsanul Hoque Rafi, Rennie R., Bauman J. An Optimization Algorithm for the Design of Battery Electric Fleets in Underground Mines. *IEEE Access*. 2024, vol. 12, pp. 8513–8525. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3353108.
15. Xiangqi Zhu, Barry Mather, Partha Mishra. Grid Impact Analysis of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations. *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2020. DOI: 10.1109/ISGT45199.2020.9087651.
16. Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Morán L. Status of Mine Electrification and Future Potentials. *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*. 2020. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.
17. Kuan-Hung Chen, Min Ji Namkoong, Vishwas Goel, Chenglin Yang. Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures. *Journal of Power Sources*. 2020, vol. 471. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228475.
18. Gagandeep Sharma, Sood V. K., Mohammad Saad Alam, Samir M. Shariff. Comparison of common DC and AC bus architectures for EV fast charging stations and impact on power quality. *eTransportation*. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100066.
19. Tingting He, Jianguo Zhu, Dylan Dah-Chuan Lu, Linfeng Zheng, Mahlagha Mahdavi Aghdam, Jianwei Zhang. Comparison study of electric vehicles charging stations with AC and DC buses for bidirectional power flow in smart car parks. *IECON 2017–43rd*

Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216794.

20. Savio A. D., Verma R., Kanagaraj L., Giri Thulasi Raman S. R., Rajamanickam N., Chokkalingam B., Sekar K. M., Mihet-Popa L. Electric Vehicles Charging Stations' Architectures, Criteria, Power Converters, and Control Strategies in Microgrids. *Electronics*. 2021, vol. 10, no. 16. DOI: 10.3390/electronics10161895.

21. Ganta Naveen, Tony Ho-Tung Yip, Yuyu Xie. Modeling and protection of electric vehicle charging station. *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*. 2014. DOI: 10.1109/POWERI.2014.7117733.

22. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Andriashin S. N., Martyushev N. V., Klyuev R. V. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, iss. 23, 1872. DOI: 10.3390/en14238072.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Дедов Сергей Игоревич*¹ — канд. техн. наук, доцент каф. Электротехнических комплексов, dedov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;

*Щуров Николай Иванович*¹ — докт. техн. наук, профессор, заведующий каф. Электротехнических комплексов, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5459-9544;

*Штанг Александр Александрович*¹ — канд. техн. наук, доцент, доцент каф. Электротехнических комплексов, shtang@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, 630073.

Для контактов: *Дедов С. И.*, e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Dedov S. I.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 630073, dedov@corp.nstu.ru; ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;

*Shchurov N. I.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor, Head of the Department of Electrical Engineering Complexes, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5459-9544;

*Shtang A. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering Complexes, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 630073, shtang@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, 630073.

Corresponding author: Dedov S. I., e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 28.06.2024; получена после рецензии 07.09.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 28.06.2024; received after the review 07.09.2024; accepted for printing 10.10.2024.

