

УДК 621.355:622.684

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТОИМОСТИ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

Семыкина И.Ю., д.т.н., старший научный сотрудник
Завьялов В.М., д.т.н., профессор
Нечипоренко Я.А., аспирант
Таран Е.Н., к.т.н., научный сотрудник
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Ввиду особенностей рабочих циклов на предприятиях горнодобывающей промышленности, а именно повторяемости задач и маршрутов передвижения карьерных самосвалов, необходимо автоматизировать процесс разработки карьера. Одним из эффективных способов достичь данной цели является совмещение безлюдных технологий, электрификации технологического транспорта и беспроводной передачи энергии.

При этом желательно оптимизировать капитальные затраты, динамику эксплуатационных затрат и энергопотребления для беспроводной инфраструктуры и автономного электротранспорта до этапа выработки ископаемого ресурса, для чего нужно оценить стоимость всего жизненного цикла системы беспроводного заряда [1]. Модель цикла (рис. 1) учитывает потребление электроэнергии инфраструктурой беспроводного заряда и аккумуляторными батареями (АКБ) карьерных самосвалов, предполагает оптимизацию беспроводной зарядной инфраструктуры и составляющих ее станций – схемотехнические решения зарядных станций и системы электроснабжения, и рассматривает различные сценарии заряда, а именно:

Сценарий 1. Зарядная станция расположена на дополнительном земельном участке вне технологических трасс на расстоянии L_c от пункта погрузки и в пересменок одновременно заряжает несколько самосвалов до полного заряда АКБ, поэтому есть затраты на простой самосвала. Технологический процесс определяется несколькими рабочими циклами без учета простоев.

Сценарий 2. Зарядные станции находятся на пунктах погрузки и разгрузки и перемещаются со своими зарядными площадками по мере разработки карьера с каждым отдельным самосвалом.

Сценарий 3. Динамическая зарядная станция заряжает АКБ во время проезда самосвала по оборудованному участку дороги протяженностью L_d на расстоянии L_s от пункта погрузки, соответственно, простои исключены.

Соответствующие данным сценариям маршруты изображены на рис. 2.



Рис. 1. Модель жизненного цикла системы беспроводного заряда

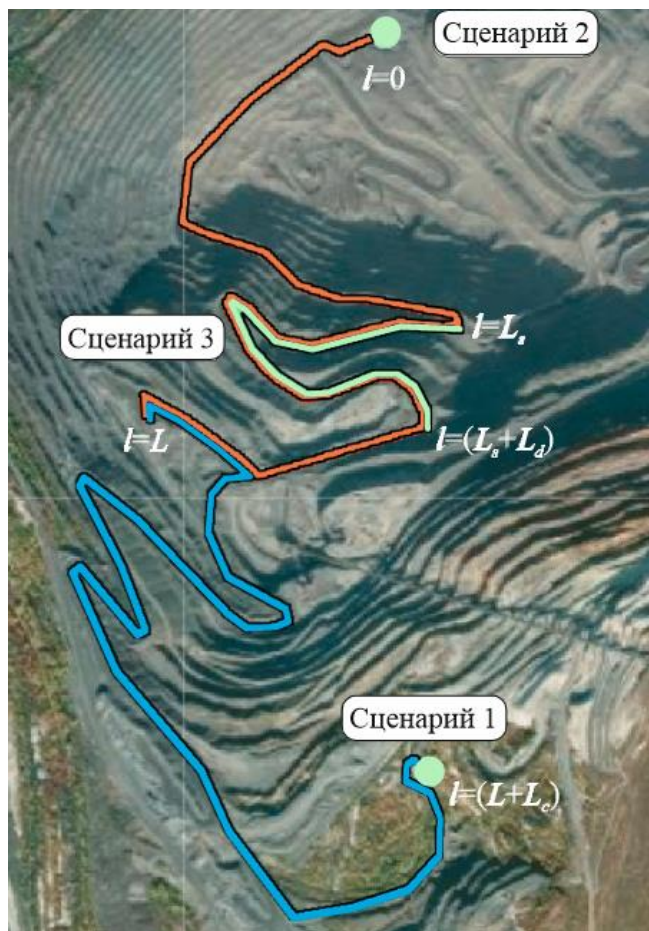


Рис. 2. Расположение трассы и инфраструктуры беспроводного заряда

В рамках исследования была проведена технико-экономическая оценка жизненного цикла для описанных сценариев функционирования беспроводной зарядной инфраструктуры карьерного самосвала.

Для осуществления эксперимента в программе MatLab Simulink разработана динамическая модель [2] инфраструктуры беспроводной зарядной станции (рис. 3), учитывающая расчетные параметры самосвала, технологического цикла, среды, аккумулятора, зарядной станции. Объект моделирования – карьерный самосвал БЕЛАЗ-7558Е с литий-железо-фосфатным аккумулятором; параметры технологической трассы – Лебединского горно-обогатительного комбината (г. Старый Оскол).

Оценка энергопотребления системы и ее возможности непрерывно выполнять технологические задачи при минимальном расходе ресурса аккумуляторной батареи реализуется исследованием потоков мощности между зарядной инфраструктурой и аккумуляторной батареей карьерного самосвала. Это условие учитывается при оценке затрат на замену АКБ для разных сценариев зарядной инфраструктуры.

Чтобы решить оптимизационную задачу по выбору состава электротехнического комплекса и для дальнейшей оценки средней расчетной стоимости производства электроэнергии в течение жизненного цикла, определим в качестве экономических критериев общую стоимость жизненного цикла ΣLCC и нормированную стоимость электроэнергии LCE [3-4]:

$$LCE = \frac{f \cdot \Sigma LCC}{W_{\text{год}}} = \frac{DR \cdot (1 + DR)^{LTS}}{(1 + DR)^{LTS} - 1} \cdot \frac{\Sigma LCC}{W_{\text{год}}},$$

где f – фактор возврата капитала; ΣLCC – общая стоимость жизненного цикла системы беспроводного заряда; $W_{\text{год}}$ – потребленная за год электроэнергия, Вт·ч/год; DR – ставка дисконтирования, примем ее равной 16% (март 2026 г.); LTS – срок службы всей системы беспроводного заряда.

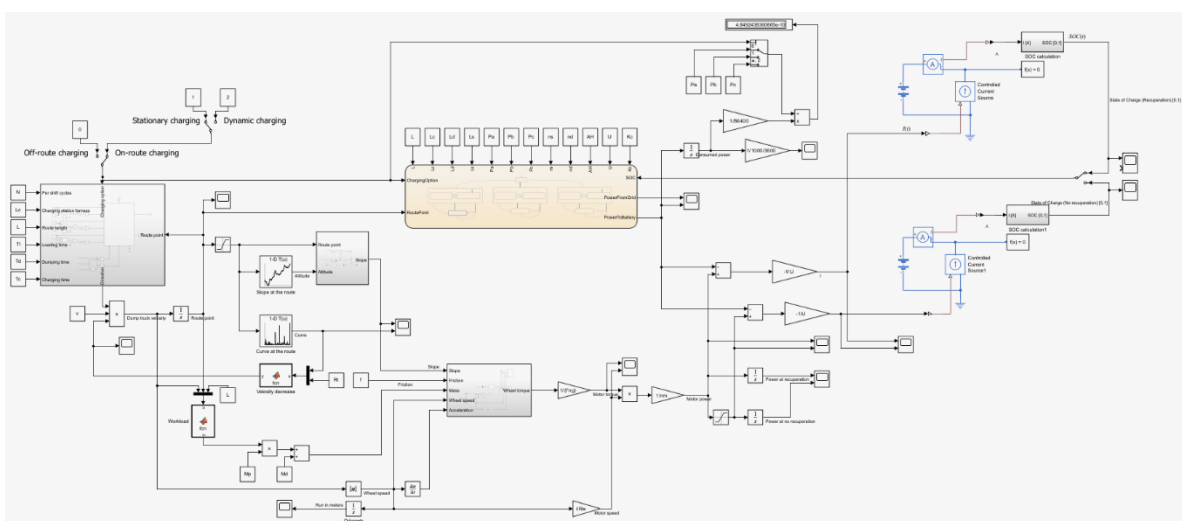


Рис. 3. Модель инфраструктуры беспроводной зарядной станции карьерного самосвала БЕЛАЗ-7558Е в MATLAB Simulink

Общая стоимость жизненного цикла системы беспроводного заряда ΣLCC для каждого сценария определяется стоимостью жизненного цикла системы электроснабжения $LCC_{СЭ}$, зарядной станции $LCC_{ЗС}$, аккумуляторной батареи $LCC_{АКБ}$ за вычетом ликвидационной стоимости компонента $LCC_{Л}$:

$$\begin{aligned}\Sigma LCC &= LCC_{СЭ} + LCC_{ЗС} + LCC_{АКБ} - LCC_{Л}, \\ LCC_{СЭ} &= N_{СЭ} \frac{CC_{СЭ} + LTS \cdot MC_{СЭ}}{LT_{СЭ}}, \\ LCC_{ЗС} &= N_{ЗС} \frac{CC_{ЗС} + LTS \cdot MC_{ЗС}}{LT_{ЗС}}, \\ LCC_{АКБ} &= N_{АКБ} \frac{CC_{АКБ} \cdot (1 + N_3) + MC_{АКБ} \cdot (LTS - N_3)}{LT_{АКБ}}, \\ LCC_{Л} &= CC_{Л} \cdot SFF = \frac{CC_{Л} \cdot DR}{(1 + DR)^{LTS} - 1}, \\ CC_{Л} = \Sigma CC &= N_{СЭ} \cdot CC_{СЭ} + N_{ЗС} \cdot CC_{ЗС} + N_{АКБ} \cdot CC_{АКБ},\end{aligned}$$

где $N_{СЭ}, N_{ЗС}, N_{АКБ}$ – количество компонентов системы беспроводного заряда, т.е. систем электроснабжения, зарядных станций и АКБ соответственно, шт.; $CC_{СЭ}, CC_{ЗС}, CC_{АКБ}$ – их капитальные затраты, руб.; $MC_{СЭ}, MC_{ЗС}, MC_{АКБ}$ – годовая стоимость их технического обслуживания, руб./год; $LT_{СЭ}, LT_{ЗС}, LT_{АКБ}$ – их срок службы, лет; N_3 – число замен компонента АКБ за срок службы всей системы беспроводного заряда; $CC_{Л}$ – капитальная стоимость всей системы беспроводного заряда в конце срока службы, руб.; SFF – коэффициент амортизационного фонда.

Капитальные затраты: системы электроснабжения найдены по результатам оптимизированных расчетов удельных затрат на технологическое присоединение в [5] (рис. 4); зарядной станции – состоят из базовых блоков мощностью по 630 кВт, средней розничной цене 15 млн. руб. и зарядных компонентов на самосвалах по 6 млн. руб. соответственно (март 2026 г.), требуемая выходная мощность станций рассчитана из установленной мощности инфраструктуры в [6]; АКБ – по ее емкости и удельной цене из затрат на замену АКБ в [6]. Годовая стоимость технического обслуживания компонента принята равной 10% от его капитальных затрат. Затраты на электроэнергию рассчитаны ее суточного электропотребления одного самосвала (рис. 5).

Расчет числа замен АКБ производится для срока эксплуатации, при котором ресурс АКБ расходуется на 80% при сроке разработки разреза 40 лет. Ресурс АКБ определялся для литий-железо-фосфатного аккумулятора с помощью специальной модели на основе уравнения Аррениуса [7].

Экономические параметры компонентов электротехнического комплекса для расчета нормированной стоимости электроэнергии указаны в таблице 1.

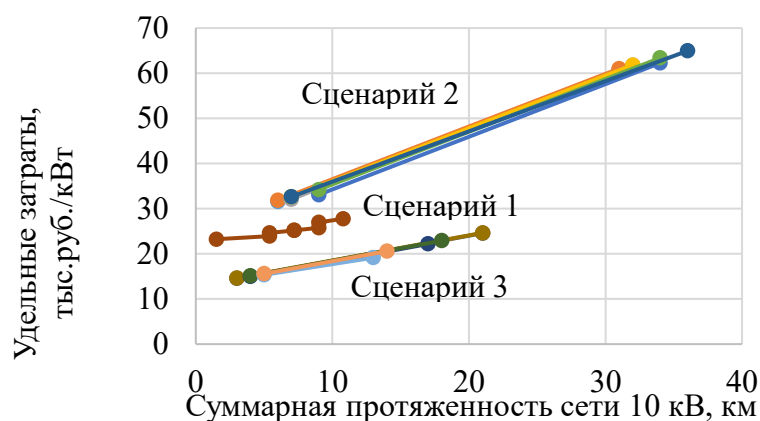


Рис. 4. Зависимость удельных затрат на технологическое присоединение от протяженности и сечений участков сети

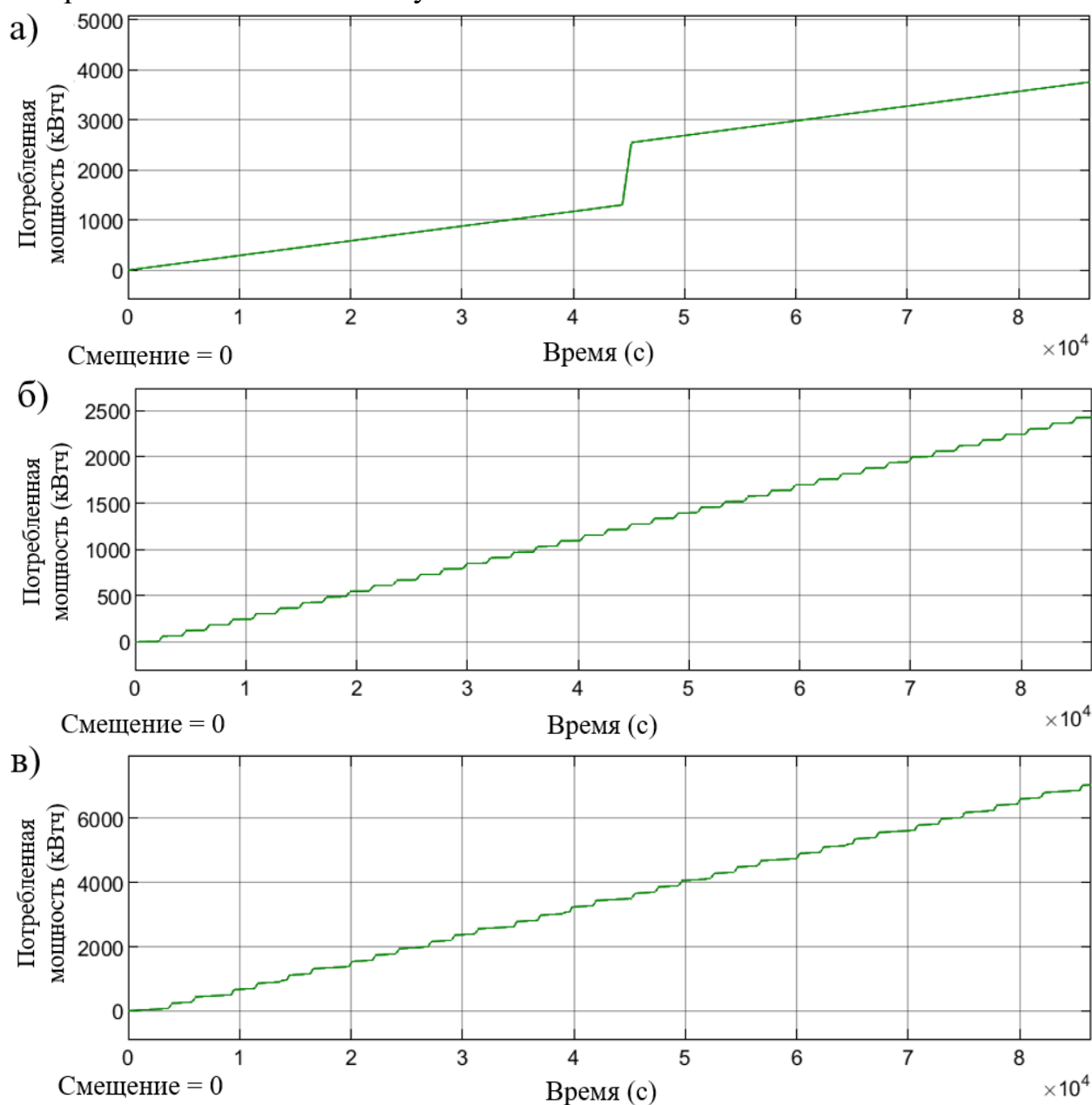


Рис. 5. Суточное потребление электроэнергии на один самосвал:

а) сценарий 1; б) сценарий 2; в) сценарий 3

Таблица 1 – Экономические характеристики компонентов беспроводной зарядной инфраструктуры

Единица компонента беспроводной зарядной инфраструктуры	Капитальные затраты, тыс. руб.	Стоимость технического обслуживания, тыс. руб./год	Срок службы, лет	Число замен компонента за срок службы карьера
Сценарий 1				
Система электро-снабжения	23	2	40	—
Зарядная станция	315 000	31 500	40	—
АКБ	20 604	2 060	7,5	6
Сценарий 2				
Система электро-снабжения	32	5	40	—
Зарядная станция	210 000	31 500	40	—
АКБ	3 434	515	3	14
Сценарий 3				
Система электро-снабжения	15	1	40	—
Зарядная станция	390 000	39 000	40	—
АКБ	3 434	343	0,5	63

Таким образом, с помощью модели выполнена технико-экономическая оценка полной стоимости жизненного цикла для разных сценариев заряда исследуемого типа самосвалов, их аккумуляторных батарей и схемных решений зарядных станций и зарядной инфраструктуры. Из данных расчетов следует, что жизненный цикл системы беспроводного заряда наименьший у стационарных зарядных станций на местах погрузки и разгрузки, нормированная стоимость электроэнергии – у стационарной зарядной станции вне трассы, наибольшие – у динамической зарядной станции.

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

Список литературы:

1. Семькина И.Ю. Модель жизненного цикла систем беспроводного заряда для автономного технологического электротранспорта / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, Я.А. Нечипоренко // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. ст. науч.-техн. конф./ Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. – С. 271-277.
2. И. Ю. Семькина, В. М. Завьялов, Я. А. Нечипоренко, Е. Н. Таран. Модель инфраструктуры беспроводного заряда для электротранспорта предприятий открытой добычи полезных ископаемых // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 56-69. EDN OMOYZR.

3. Khatib, T. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system / T. Khatib, I.A. Ibrahim, A. Mohamed // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – Vol. 120. – P. 430-448. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.011.

4. Глуханич, Д. Ю. Автономный электротехнический комплекс с фото- и термоэлектрической установками для электроснабжения пункта телемеханики нефтепровода: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Глуханич Дмитрий Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2024. – 153 с.

5. Семькина, И.Ю. Сценарное моделирование стоимости технологического присоединения беспроводной зарядной инфраструктуры аккумуляторного электротранспорта предприятий открытой добычи полезных ископаемых / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, Е.Н. Таран, Я.А. Нечипоренко, Г.Н. Климова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2025. – Т. 336. – No 12. – С. 142–154. (журнал из перечня ВАК «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», индексируемый SCOPUS).

6. Семькина, И.Ю. Оценка эксплуатационных затрат при функционировании системы беспроводного заряда технологического электротранспорта разреза / И.Ю. Семькина, Я.А. Нечипоренко, В.М. Завьялов, Е.Н. Таран // сборник материалов VIII Международной молодежной научно-практической конференции, 20-21 ноября 2025 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: А.Р. Богомолов (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово, 2026. – 1 электрон. опт. диск. – Статья 331.

7. Modeling the Reliability of an Electric Car Battery While Changing Its Charging and Discharge Characteristics / Nikita V. Martyushev, Boris V. Maloz-yomov, Anton Y. Demin [et al.] // *Mathematics*. 2025. Vol. 13, iss. 11. Article number 1832, 24 p.

Информация об авторах:

Семькина Ирина Юрьевна, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, КузГТУ, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, arinasemykina@gmail.com

Завьялов Валерий Михайлович, д.т.н., профессор, КузГТУ, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, vmzavyalov@mail.sevsu.ru

Нечипоренко Ярослава Аджайевна, аспирант, КузГТУ, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, ja.ne4iporenko2017@yandex.ru

Таран Елена Николаевна, к.т.н., научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, КузГТУ, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, taranelena23@yandex.ru