

И.Ю. СЕМЫКИНА, д.т.н., старший научный сотрудник (КузГТУ)  
Я.А. НЕЧИПОРЕНКО, аспирант (КузГТУ)  
Научный руководитель В.М. ЗАВЬЯЛОВ, д.т.н., профессор (КузГТУ)  
Е.Н. ТАРАН, к.т.н., научный сотрудник (КузГТУ)  
г. Кемерово

### **ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОГО ЗАРЯДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА РАЗРЕЗА**

Для большегрузных карьерных самосвалов целесообразно рассмотреть замену двигателя внутреннего сгорания на аккумуляторную систему с использованием беспроводной передачи энергии. Поскольку задачи и маршруты самосвалов в течение смены повторяются, автоматизация становится экономически оправданной мерой.

При проектировании беспроводной зарядной инфраструктуры для аккумуляторных карьерных самосвалов необходимо учитывать специфику рабочего цикла, а также капитальные и эксплуатационные затраты на протяжении всего периода разработки разреза. В связи с этим возникает необходимость в проведении детального анализа стоимости жизненного цикла данной инфраструктуры. Модель жизненного цикла системы беспроводного заряда [1] изображена на рисунке 1.

Представленная модель предполагает решение задач оптимизации элементов системы и распределения энергетических потоков в технологическом процессе, включая беспроводную зарядную инфраструктуру и аккумуляторную батарею карьерного самосвала. Оптимизация проводится как для отдельных зарядных станций, так и всей зарядной инфраструктуры в целом, при этом учитываются схмотехнические решения зарядных станций, системы электроснабжения, а также схема диспетчеризации экскаваторно-автомобильного комплекса разреза и различные сценарии заряда.

Предполагаются следующие сценарии заряда технологического электротранспорта. Во-первых, зарядная станция может работать на несколько самосвалов одновременно, располагаясь за пределами технологических трасс на расстоянии  $L_c$  от пункта погрузки, для нее необходим дополнительный земельный участок. Заряд происходит в пересменок по истечению некоторого числа погрузочно-разгрузочных циклов до полного заряда аккумулятора, поэтому надо учитывать затраты на простой самосвала. В таком случае длительность технологического процесса определя-

ется продолжительностью рабочего цикла и их количеством в течение смены за вычетом простоев.

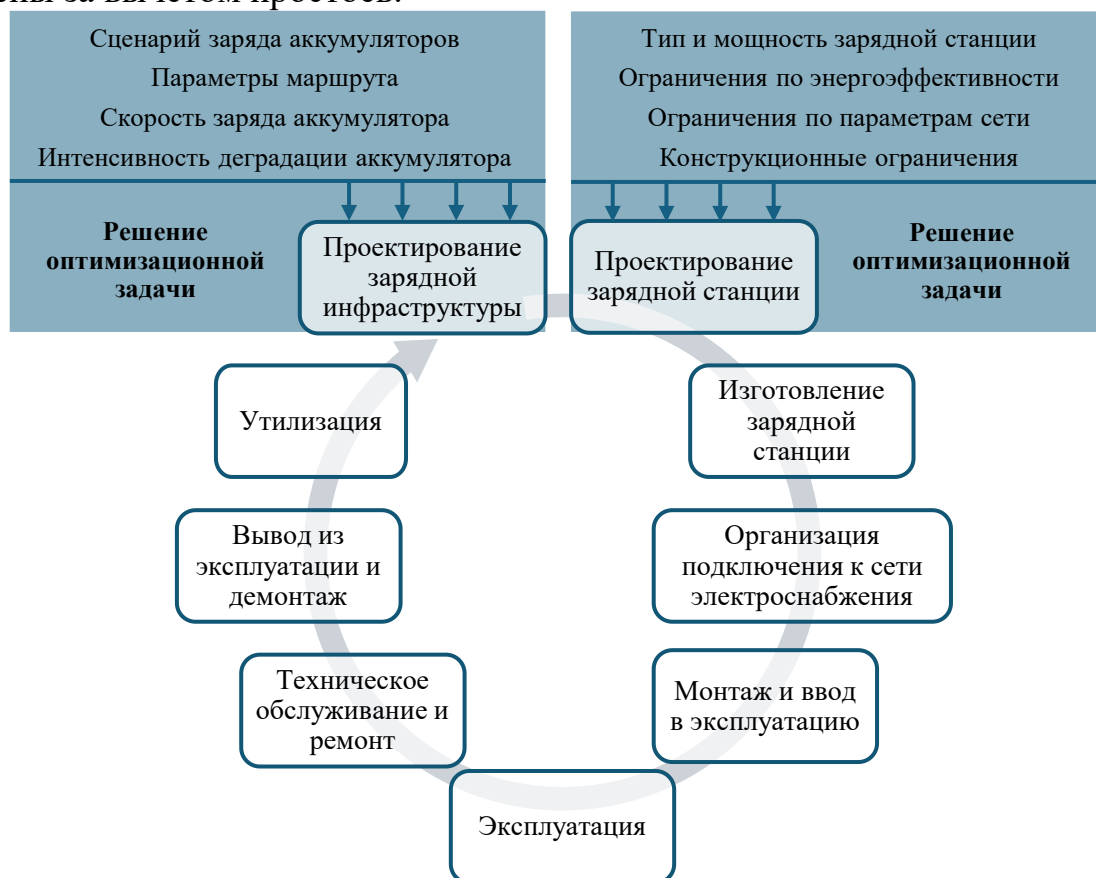


Рис. 1. Модель жизненного цикла системы беспроводного заряда

Во-вторых, зарядная станция может быть мобильной и перемещаться с каждым отдельным самосвалом по мере продвижения выработки. В таком случае такие станции находятся на пунктах погрузки и разгрузки, а зарядные площадки вынуждены смещаться вместе с ними.

В-третьих, зарядную станцию можно реализовать в динамическом исполнении, оборудовав определенный участок дороги протяженностью  $L_d$ , расположенный на расстоянии  $L_s$  от пункта погрузки. Тогда ее работа происходит во время движения по нему самосвала. Такая станция обладает наименьшим коэффициентом полезного действия из предложенных вариантов, отлична сложностью проектирования и эксплуатации, отсутствием простоев в работе. Соответствующие данным вариантам маршруты представлены ниже (рисунок 2).

В рамках исследования был проведен анализ эксплуатационных затрат для описанных сценариев функционирования беспроводной зарядной инфраструктуры карьерного самосвала. В качестве учитываемых эксплуатационных затрат рассматриваются затраты на электроэнергию, а также затраты на замену аккумуляторных батарей.

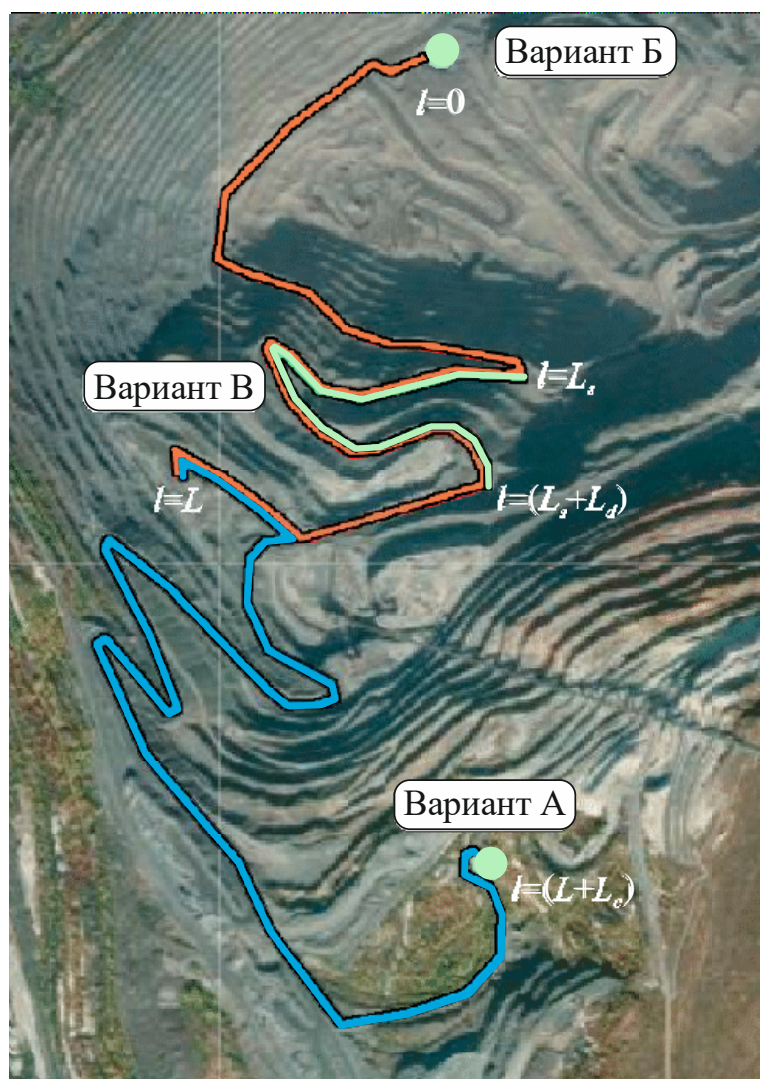


Рис. 2. Расположение трассы и инфраструктуры беспроводного заряда: вариант А – стационарная зарядная станция вне трассы; вариант Б – стационарные зарядные станции на местах погрузки и разгрузки; вариант В – динамическая зарядная станция;  $l$  – общая длина участка трассы для каждого сценария;  $L$  – длина трассы;  $L_s$  – координаты начала динамической зарядки;  $L_c$  – расстояние от конца трассы до групповой зарядки;  $L_d$  – длина оборудованного участка

В качестве основного инструмента использовалась модель [2] инфраструктуры беспроводной зарядной станции в программе MATLAB Simulink (рисунок 3). Объектом для моделирования был выбран БеЛАЗ-7558Е с литий-железо-фосфатным аккумулятором, а технологические трассы взяты на примере Лебединского горно-обогатительного комбината (г. Старый Оскол). В модели учтены расчетные параметры самосвала, технологического цикла, среды, аккумулятора, зарядной станции.

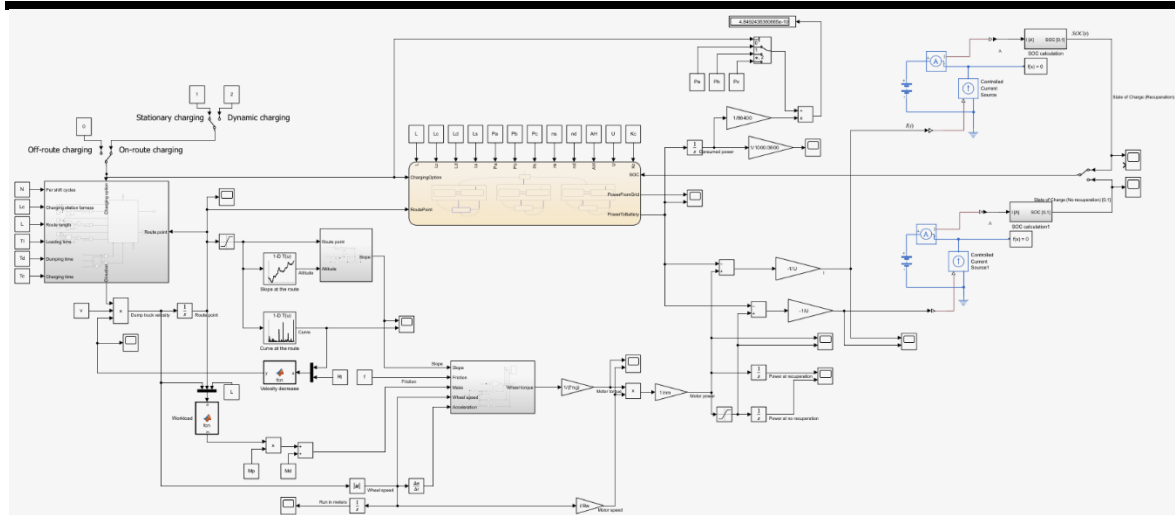


Рис. 3. Модель инфраструктуры беспроводной зарядной станции карьерного самосвала БелАЗ-7558Е в MATLAB Simulink

Модель можно использовать для исследования потоков мощности между зарядной инфраструктурой и аккумуляторной батареей карьерного самосвала, что требуется для оценки электропотребления, а также для оценки непрерывности работы системы с точки зрения способности выполнять технологические задачи при условии наименьшего возможного расхода заряда аккумуляторной батареи, что будет использовано для оценки затрат на замену аккумуляторных батарей в зависимости от выбранного варианта исполнения зарядной инфраструктуры.

В среднем, производители аккумуляторных батарей гарантируют срок эксплуатации 7-8 лет, причем к концу гарантийного срока батарея деградирует до 70-75% от первоначальной емкости. При этом срок службы многих действующих разрезов Кузбасса составляет 30-50 лет. Следовательно, применение предлагаемой технологии потребует несколько замен аккумуляторов. Параметры цикла заряда-разряда батареи, а также кратность зарядного тока и условия эксплуатации аккумуляторных батарей влияют на интенсивность ее износа. При этом исследование показало, что для обеспечения надежной и стабильной работы беспроводной зарядной инфраструктуры для отдельных рассматриваемых режимов работы необходимо повышать коэффициент кратности емкости аккумуляторной батареи  $K_c$ , что негативно влияет на интенсивность износа. Установлено, что при том же зарядном токе и малом колебании текущего уровня заряда  $SOC$  величина этого уровня заряда для варианта динамической зарядной станции меньше аналогичной для статических вариантов как с единой станцией, так и с мобильными станциями. Поэтому динамическая зарядная инфраструктура обеспечивает больший срок службы аккумуляторной батареи и меньшие затраты на его замену.

Для оценки затрат на электроэнергию с помощью модели получены удельные на один самосвал графики суточного потребления электроэнергии (рисунок 4). Очевидно, мобильные зарядные станции обладают лучшими характеристиками, а динамическая – худшими, поскольку мощность мобильных станций меньше, а коэффициент полезного действия стационарной станции гораздо больше, чем у динамической.

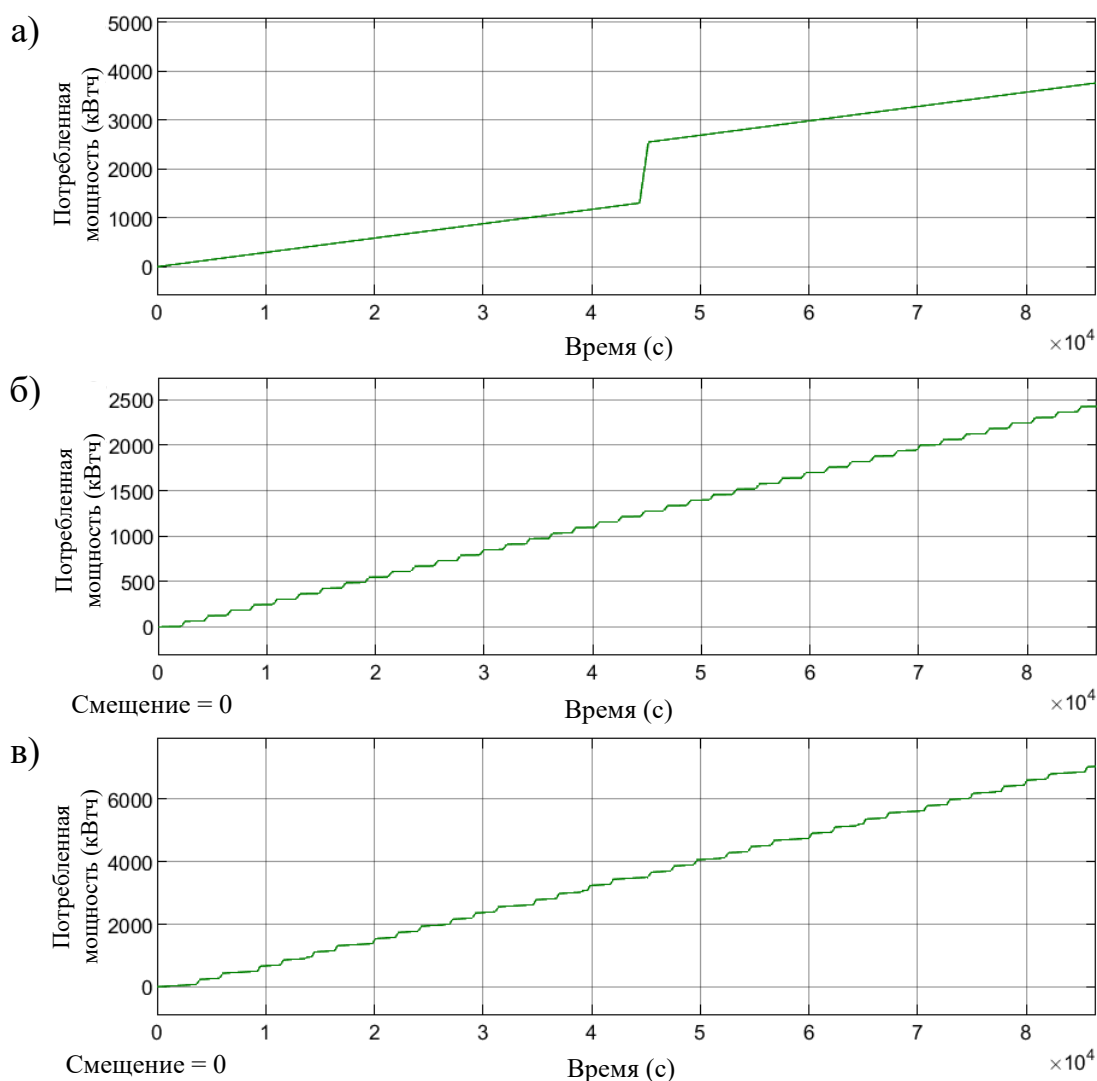


Рис. 4. Суточное потребление электроэнергии на один самосвал:  
а – вариант А; б – вариант Б; в – вариант В

Таким образом, для конкретного типа самосвалов и его аккумуляторных батарей, схемных решений зарядных станций и зарядной инфраструктуры может быть выполнена оценка эксплуатационных затрат при функционировании системы беспроводного заряда технологического электротранспорта разреза, а в последующем расчет полной стоимости жизненного цикла с учетом разных сценариев заряда.

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.

Информация об авторах:

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

Нечипоренко Ярослава Аджайевна, аспирант гр. Эта-214, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, ja.ne4iporenko2017@yandex.ru

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

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