

О.В. Шугаев

Сибирский государственный индустриальный университет

ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАЗВИТИЯ БЕЗРЕЛЬСОВОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В сфере городской системы передвижения пассажиров троллейбусный транспорт занимает периферийное положение. Однако безрельсовый электрический общественный транспорт несравнимо экологичнее автомобильного, он значительно дешевле в обслуживании и эксплуатации. При этом троллейбусный транспорт имеет и недостатки, связанные с полным отсутствием автономии и низкой скоростью передвижения из-за привязки к контактной сети.

Одним из вариантов решения проблемы автономности и увеличения скорости передвижения троллейбусного транспорта может послужить применение топливных элементов (ТЭ), оснащенных твердополимерным электролитом, которые способны вырабатывать необходимую для полноценной работы безрельсового электрического общественного транспорта электроэнергию.

Целью настоящей работы является определение экономического эффекта от внедрения топливных элементов в безрельсовый электрический общественный транспорт:

– сравнение затрат на обслуживание троллейбусного, автомобильного и общественного электрического транспорта на колесном ходу, оснащенного топливными элементами;

– выявление срока окупаемости капитальных вложений, необходимых для переоборудования одной подвижной единицы безрельсового электрического общественного транспорта.

Объектом исследования выбран наиболее распространенный в Новокузнецке троллейбус марки ЗИУ-682Г-016.03, в табл. 1 приведены основные технические характеристики подвижной единицы [1]. Для переоборудования электрического пассажирского средства передвижения возможно применение твердополимерных топливных элементов марки НуРМ HD-30, которые способны вырабатывать эклектическую энергию, достаточную для полного перевода троллейбуса в автономный режим работы. Эксплуатационные характеристики электрохимических генераторов приведены в табл. 2 [2, 3].

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что для обеспечения непрерывной и бесперебойной эксплуатации троллейбуса во всех режимах работы требуется использование четырех блоков топливных элементов марки НуРМ HD-30. Для минимального изменения конструкции возможно расположение электрохимических генераторов на крыше транспортного средства. Также предполагается демонтаж токосъемного оборудования. Предлагаемая расстановка топливных элементов представлена на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные технические характеристики троллейбуса марки ЗИУ-682Г-016.03

Параметр	Значение
Длина, мм	11830
Ширина, мм	2476
Высота, мм	3435
Максимальная скорость движения с полной нагрузкой на горизонтальном участке дороги, км/ч	50
Мощность тягового электродвигателя, кВт	110
Номинальное напряжение (переменный ток), В	550
Снаряженная масса, кг	10335

Эксплуатационные характеристики топливных элементов марки НурМ HD-30

Характеристика	Значение
Удельный расход топлива (0 °С, 760 мм рт.ст.), нм ³ /(кВт·ч) (кг/(кВт·ч))	0,648 (0,0583)
Расход топлива (учитывая мощность ТЭ), нм ³ /ч (кг/ч)	19,44 (1,75)
Рабочее давление, кПа	101,3
Напряжение, В	60 – 120
Допустимая сила тока, А	500
Номинальная мощность, кВт	30
КПД, %	55
Рабочая температура, °С	от –40 до +65
Степень чистоты водорода, требуемая для работы ТЭ, %	99,98
Масса, т	0,07
Габаритные размеры, мм:	
длина	950
ширина	1630
высота	265
Объем, м ³	0,041

В табл. 3 приведены данные работ [4 – 8] для сравнения энергозатрат на эксплуатацию реконструированного троллейбуса, работающего на водородном топливе, безрельсового общественного транспорта ЗИУ-682Г-016.03, функционирующего на электрической тяге, и автобуса (наиболее распространенного в городе Новокузнецк вида транспорта), сопоставимого по мощности. Потребление дизельного топлива автобусом ПАЗ-4234 рассчитывается исходя из среднего расхода топлива и разрешенной скорости.

Расчет стоимости потребленного водорода проведен с учетом уравнения Менделеева-Клапейрона и цены на баллон (40 л) водорода ГОСТ 9909 – 81 [4, 9] (не рассматривая расходы на емкость).

Анализируя приведенные в табл. 3 данные, можно сделать вывод, что использование топ-

ливных элементов марки НурМ HD-30 позволит сократить эксплуатационные затраты практически в 4,6 раз, а по сравнению с автобусным транспортом – в 6,6 раз.

Для переоборудования системы питания троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 с учетом стоимости топливных элементов [10, 11] и курса доллара на 20.02.2018 потребуется 407 400 рублей.

Для определения срока окупаемости капитальных вложений на переоборудование троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 твердополимерными топливными элементами с платино-никелевым катализатором использована модель Брауна [12], которая учитывает прогнозное изменение затрат на водородное топливо на длительный период. Учитывается стоимость водорода по состоянию

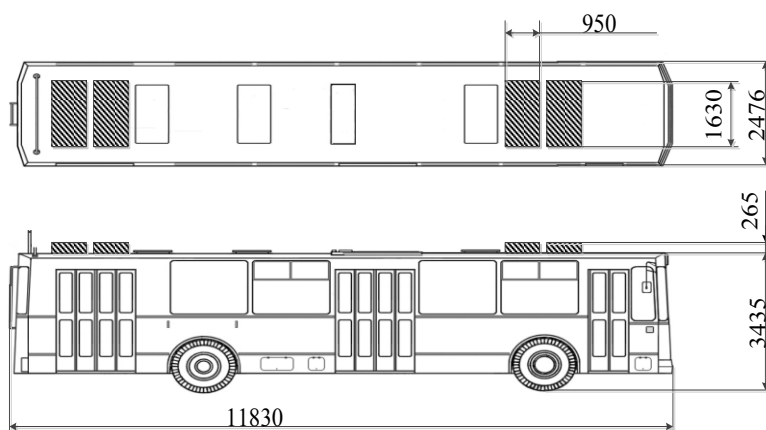


Рис. 1. Предлагаемая схема расположения топливных элементов на троллейбусе ЗИУ-682Г-016.03

Т а б л и ц а 3

Потребление различных видов энергоресурсов подвижным составом

Вид подвижного состава	Общая мощность, необходимая для работы, кВт (л.с.)	Топливо	Требуемое количество топлива	Стоимость, руб./ч
Троллейбус ЗИУ-682Г-016.03 на топливных элементах марки НуРМ HD-30	110	Водород газообразный технический марки А ГОСТ 3022 – 80, степень чистоты 99,99 %	71,2 нм ³ /ч (6,41 кг/ч)	87,7
Троллейбус ЗИУ-682Г-016.03, использующий контактную сеть	110	Эл.энергия (по среднесуточному тарифу)	110 кВт·ч	405,9
ПАЗ-4234	100 (136)	Дизельное топливо	14,4 л·ч	583,2

на январь 2018 г. [8] и значение инфляции (%) в период с июня по декабрь 2017 г. [13]. Расчет затрат на топливо для топливных элементов проведен в информационной среде Microsoft Excel. Аналогично рассчитано предполагаемое изменение стоимости электроэнергии в 2018 – 2019 гг. (с учетом данных [14 – 16] стоимости электроэнергии для юридических лиц на период с 2014 по 2017 гг.).

С целью выявления срока окупаемости затрат на переоборудование троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 топливными элементами составлена имитационная модель для нахождения наименьшего срока эксплуатации оборудованного электрохимическими генераторами пассажирского подвижного состава, за который финансовые вложения на модернизацию в полной мере окупятся. Неиспользованные экономические ресурсы, предназначенные для работы транспорта на электрической тяге, будут являться средствами, возмещающими затраты на переоборудование. Расчетный период принят с 1 февраля 2018 г. при ежедневной средней нагрузке троллейбуса 16 ч [17].

Введем следующие обозначения: a, b, c, d, e, f, g, q – количество дней расчетного месяца; T – затраты на водородное топливо в зависимости от действия инфляции для расчетного месяца; E – затраты на электроэнергию в зависимости от действия инфляции для расчетного года; k – суточная норма работы одного троллейбуса ЗИУ-

682Г-016.03; L – затраты на переоборудование одного троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 топливными элементами (407 400 руб.).

Целевая функция:

$$F = a + b + c + d + e + f + g + q \rightarrow \min.$$

Ограничения модели:

$$L \leq a(k(E1 - T12)) + b(k(E2 - T1)) + c(k(E2 - T2)) + d(k(E2 - T3)) + e(k(E2 - T4)) + f(k(E2 - T5)) + g(k(E2 - T6)) + q(k(E2 - T7));$$

$$a \leq 28; b \leq 31; c \leq 30; d \leq 31; e \leq 30; f \leq 31; g \leq 31; q \leq 30.$$

Поиск решения данной целевой функции выполнен методом обобщенного приведенного градиента (рис. 2).

С целью детального отображения экономии денежных средств от внедрения твердополимерных топливных элементов марки НуРМ HD-30 с платино-никелевым катализатором составлены диаграммы (рис. 3 и 4), где показаны доходы от экономии энергоресурсов с учетом инфляции за каждый месяц и накопление общего остатка за расчетный период.

Капитальные затраты на переоборудование троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 топливными элементами НуРМ HD-30 окупятся при ежедневной нагрузке 16 ч за 79 дней.

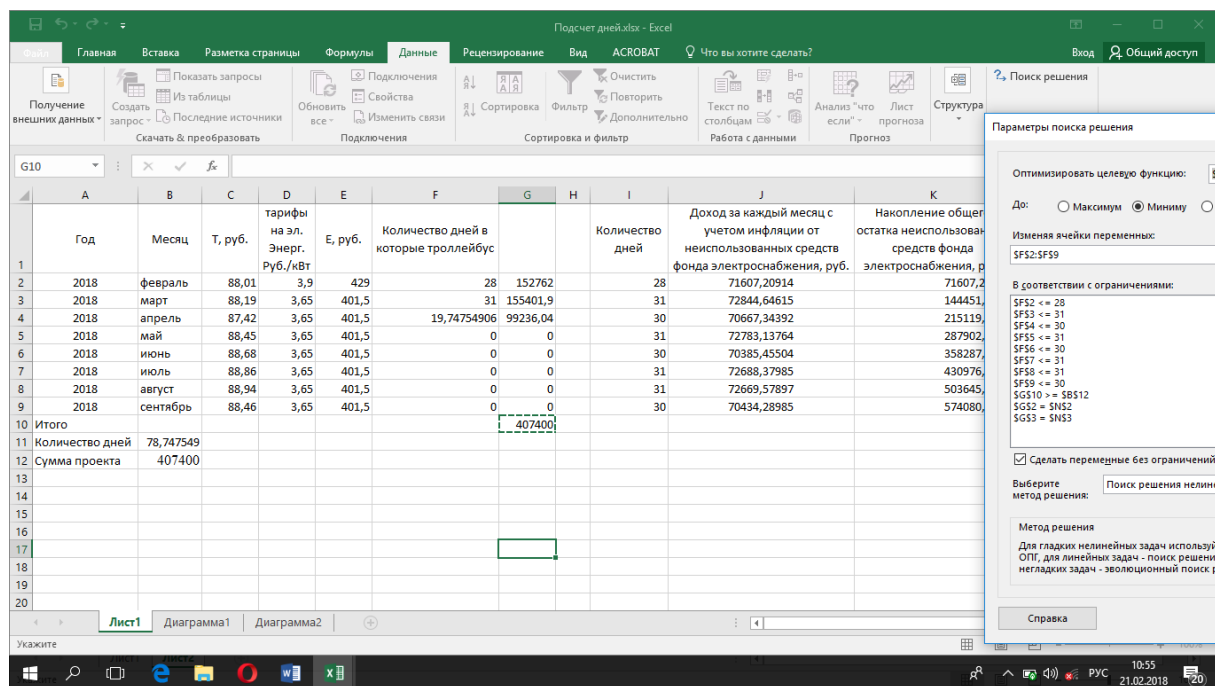


Рис. 2. Решения целевой функции определения срока окупаемости проекта внедрения автономных водородных ТЭ троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03 на период 8 месяцев

Выводы. Троллейбус ЗИУ-682Г-016.03, работающий на топливных элементах НурМ HD-30, полностью автономен и не требует затрат на монтаж и обслуживание контактной сети. Безрельсовый пассажирский подвижной состав, использующий электрохимические генераторы, способен передвигаться с более высокой скоростью за счет исключения токосъемного оборудования. Эксплуатационные расходы на обслуживание троллейбуса, оснащенного топливными

элементами, в 4,6 раза ниже по сравнению с затратами на эксплуатацию троллейбусов и в 6,6 раза по сравнению с затратами на автобусный транспорт. Срок окупаемости капитальных вложений, связанных с приобретением твердотопливных элементов с платиновым катализатором для переоборудования троллейбуса ЗИУ-682Г-016.03, при средней нагрузке 16 ч составляет не более 3 месяцев.



Рис. 3. Доходы от неиспользованных средств фонда электроснабжения за каждый месяц с учетом инфляции

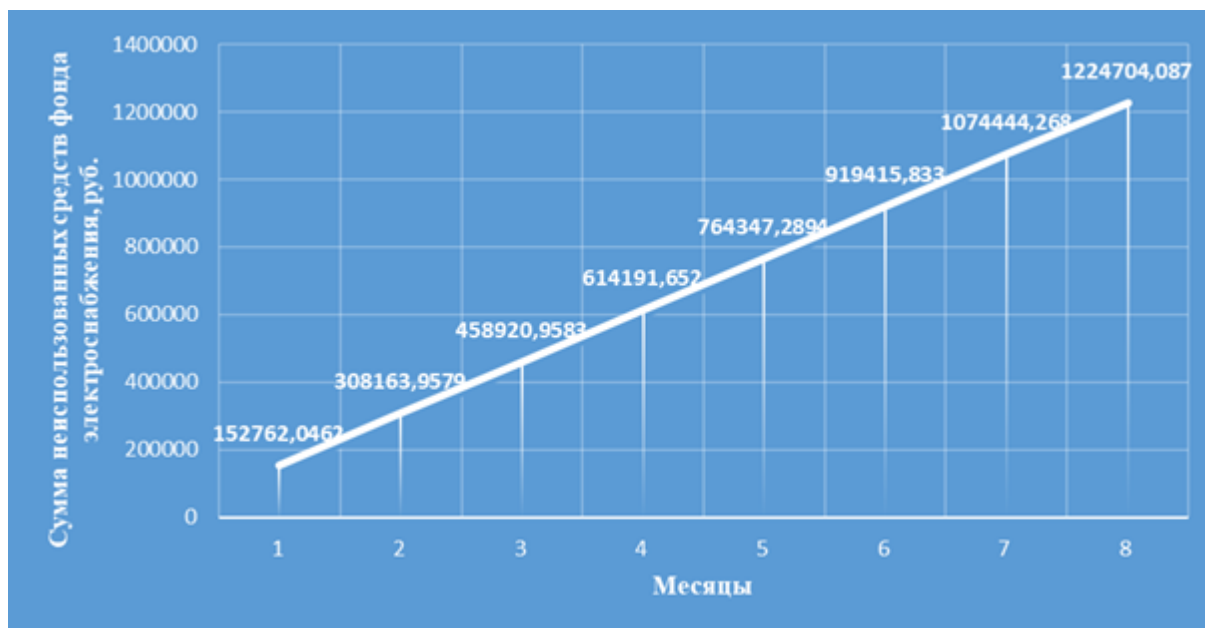


Рис. 4. Диаграмма накопления общего остатка неиспользованных средств фонда электроснабжения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Троллейбус ЗиУ-682Г-016.02, ЗиУ-682Г-016.03. Открытое акционерное общество "Троллейбусный завод" TROLZA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eltroll.ru/Troll/ZiU_682.pdf/ (Дата обращения 07.02.2018).
2. HyPM™ HD30(33 kW): Hydrogenics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://hydrail.appstate.edu/sites/hydrail.appstate.edu/files/9_Kammerer.pdf/ (Дата обращения 08.02.2018).
3. Fuel Cell Technologies Office Accomplishments and Progress: energy.gov. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office-accomplishments-and-progress/> (Дата обращения 08.02.2018).
4. Сырбаков А.П., Корчуганова М.А. Топливо и смазочные материалы: учебное пособие. – Томск: изд. Томского политехнического университета, 2015. – 159 с.
5. Тарифы на электроэнергию для Кемерово и Кемеровской области с 1 января 2018 года: Тарифы-24! Тарифы на энергоресурсы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tarif-24.ru/russia/electro/2018/546-tarif-na-elektroenergiyu-dlya-keмеровo-i-keмеровskoj-oblasti-s-1-iyulya-2018-goda.html> (Дата обращения 13.02.2018).
6. Автобус ПАЗ-4234: технические характеристики и фото. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.syl.ru/article/183234/new_avtobus-paz--tehnicheckie-harakteristiki-i-foto (Дата обращения 13.02.2018).
7. Цены на бензин, ДТ, газ в Кемеровской области. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.benzin-price.ru/price.php?region_id=42/ (Дата обращения 13.02.2018).
8. Водород газообразный технический марки А: НИИ КМ 2000-2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.niikm.ru/products/hydrogen/hydrogen_40/ (Дата обращения 08.01.2018).
9. Водородный баллон 40 л: Промышленная компания Волга. Технические газы, газовые баллоны, газосварочное оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pkvolga.ru/vodorodni-ballon-40l/> (Дата обращения 20.02.2018).
10. Fuel cells: IOP Institute of Physics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iop.org/resources/topic/archive/fuel/index.html/> (Дата обращения 20.02.2018).
11. Fuel Cell Technologies Office Accomplishments and Progress [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office-accomplishments-and-progress/> (Дата обращения 20.02.2018).
12. Федосеев В.В., Гармаш А.Н., Орлова И.В. Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник для бакалавров. – М.: Юрайт, 2012. – 328 с.
13. Таблица инфляции: Уровень инфляции в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://уровень-инфля->

ции.рф/%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B8%D1%86%D0%B0_%D0%B8%D0%BD%D1%84%D0%BB%D1%8F%D1%86%D0%B8%D0%B8.aspx/ (Дата обращения 22.11.2017).

14. Тарифы на электроэнергию, поставляемую Мосэнергосбыт для юридических лиц (предприятий) Московской области (МО), действующие с 1 июля 2014 года: Народная Служба Тарифов – НСТ: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия – Украина. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektricheskuyu-energiyu-postavlyaemuyu-mosenergobyt-dlya-yuridicheskikh-lits-na--2/> (Дата обращения 20.02.2018).
15. Тарифы на электроэнергию для предприятий и прочих потребителей Московской области, действующие с 1 июля 2015 года: Народная Служба Тарифов – НСТ: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия – Украина. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elekt>

roenergiyu-dlya-predpriyatii-i-prochikh-potrebitelei-moskovskoi-oblasti-deist-0 (Дата обращения 20.02.2018).

16. Тарифы на электроэнергию, поставляемую Мосэнергосбыт для предприятий и прочих потребителей Московской области (МО), действующие с 1 января 2016 года: Народная Служба Тарифов – НСТ: новые тарифы на электроэнергию, цены на газ, тепло, Россия – Украина. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newtariffs.ru/tariff/tarify-na-elektroenergiyu-postavlyaemuyu-mosenergobyt-dlya-predpriyatii-i-prochikh-potrebit-1/> (Дата обращения 20.02.2018).
17. Расписание троллейбусов в Новокузнецке: novokuznetsk.su городская электронная газета. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://novokuznetsk.su/auto/trol/> (Дата обращения 20.02.2018).

© 2019 г. *О.В. Шугаев*
Поступила 13 сентября 2018 г.