

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОБУСА

Приведены результаты численного моделирования тягово-энергетических режимов движения гибридного электробуса на основании разработанной математической модели и программного обеспечения.

Предложены методики расчета и выполнен сравнительный технико-экономический анализ в части эксплуатационных затрат на энергоносители и системы электроснабжения для трех видов современного наземного общественного транспорта.

*Ключевые слова:* гибридный электробус, аккумуляторный электробус, троллейбус, дизельный двигатель, тормозная рекуперация



**А.Ф. Слутин**



**Л.Г. Ручкина**

**В** связи с появлением новых видов общественного автономного электротранспорта, обострением конкурентной борьбы с традиционными видами транспорта, представляется актуальным сопоставление энергетической эффективности транспортных средств и стоимостных затрат на энергоносители.

Если рассматривать троллейбусные сети и замену их на аккумуляторные электробусы, то в обоих случаях необходимо учитывать дополнительные эксплуатационные расходы, связанные с содержанием систем внешнего электроснабжения и энергетическими потерями в них: контактная сеть; тяговые подстанции; зарядные станции и т.п. Затраты на эксплуатацию троллейбусных сетей в среднем составляют до 25 % от затрат электроэнергии «на движение» [1].

При эксплуатации электробусов, помимо этого требуется существенное превышение парка машин для обслуживания того же пассажиропотока из-за продолжительного нахождения на конечных стоянках на зарядных станциях (40 мин движение и 30 мин заряд батареи).

К настоящему времени нет достаточно эффективного бортового источника электромагнитной энергии для общественного транспорта, а также соответствующих станций для быстрого заряда батарей.

Поэтому моделирование режимов движения гибридного транспортного средства, занимающего промежуточное энергетическое положение между традиционными и новыми, автономными видами электротранспорта, с учетом изменяющихся цен на энер-

**Слутин Александр Флавиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: приводные электромеханизмы; системы тягового электропривода, в т.ч. гибридные энергетические установки транспортных средств. Автор 17 научных работ. Имеет три авторских свидетельства СССР на изобретения и один патент РФ на полезную модель.

**Ручкина Любовь Григорьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: метрология, электротехника. Автор 37 научных работ.

**Бугреев Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрификация и электроснабжение» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность сложных технических систем. Автор более 70 научных работ, в том числе трех монографий. Имеет 16 патентов на изобретения.

гоносители, может служить базовым критерием при сопоставлении эксплуатационных расходов различных видов наземного общественного транспорта.

Ниже приведены результаты численного моделирования режимов движения гибридного электробуса («последовательный гибрид») с техническими характеристиками физической модели, сопоставимыми с характеристиками современных троллейбусов и автобусов по массе, пассажироместности и скорости сообщения.

В процессе торможения используется режим рекуперации на бортовой накопитель (например, ионисторы) с автоматическим замещением на торможение механическим тормозом при наступлении ограничений по условиям электродинамического торможения (рис. 1).

Разработана математическая модель и ПО (Visual Basic), которые позволяют проводить многовариантные исследования с различными конструктивными константами транспортного средства, на различном профиле, с учетом полиномов основного сопротивления движению «на выбеге» и в режиме «тяги», а также с учетом изменяющихся «потерь» тягового электродвигателя и тягового редуктора (рис. 2).

«На печать» выведены следующие параметры:

- $t$  – время, с момента начала движения, с;
- $v$  – скорость движения на указанный момент времени, м/с;
- $a$  – ускорение, м/с<sup>2</sup>;
- $f$  – касательная сила тяги и тормозная при рекуперации, Н;

$f_3$  – касательная сила от механического тормоза, Н;

$I$  – ток тягового электродвигателя (ТЭД), А;

$u$  – напряжение ТЭД, В;

$e_1$  – электроэнергия, затраченная от бортовых источников с момента начала движения, Дж;

$e_2$  – электроэнергия, полученная от тормозной рекуперации с момента начала движения, Дж;

$p$  – электрическая мощность ТЭД, Вт;

$s$  – пройденный путь с начала движения, м.

На рис. 3 показаны результаты численного моделирования движения гибридного электробуса на участке пути между двумя остановочными пунктами на расстоянии около 1 км.

В данном варианте производился разгон до 50 км/ч «на площадке», затем сброс скорости до 40 км/ч, поддержание этой скорости с последующим остановочным торможением (пройденный путь 950 м):

- средняя техническая скорость – 36 км/ч;
- скорость сообщения – 29,4 км/ч (стоянка на остановке 20 с);
- возврат электроэнергии от тормозной рекуперации – 16%;
- результирующий расход электроэнергии («на жажимах» ТЭД) – 3,95 МДж.

В следующем варианте (табл. 1) производился разгон до 60 км/ч «на площадке» с последующим остановочным торможением (пройденный путь 950 м):

- средняя техническая скорость – 40,5 км/ч;
- скорость сообщения – 32,4 км/ч (стоянка на остановке 20 с);

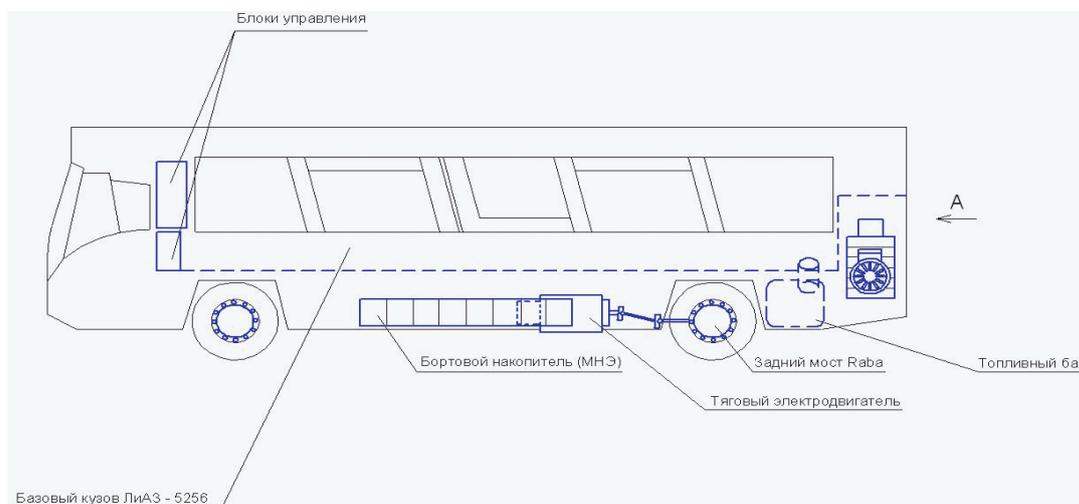


Рис. 1

А.Ф. Слутин, Л.Г. Ручкина, В.А. Бугреев

«МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОБУСА»

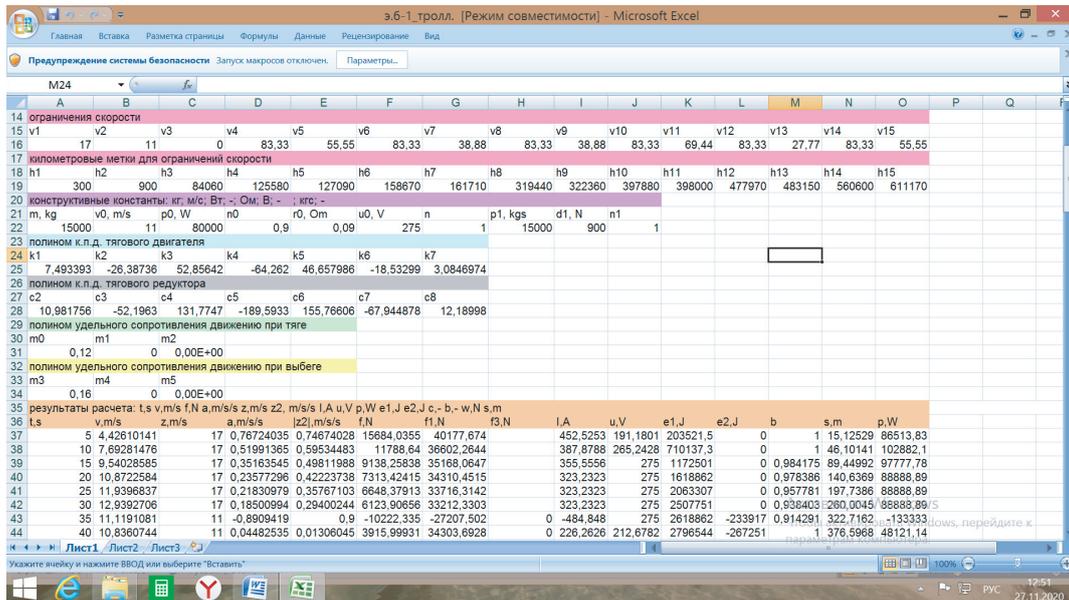


Рис. 2

Таблица 1

$I, A$	$U, B$	$e1, Дж$	$e2, Дж$	$s, м$	$p, Вт$
323,2323	275	4729973	0	621,2289	88888,89
323,2323	275	5174418	0	701,301	88888,89
-484,848	275	5218862	-346760	777,885	-133333
-420,202	272,5213	5218862	-993167	835,3041	-114514
-387,879	110,9807	5218862	-1335406	869,6074	-43047

• возврат электроэнергии от тормозной рекуперации – 25,6%;

• результирующий расход электроэнергии (на зажимах ТЭД) – 3,88 МДж.

Как видно из сравнения результатов, при имеющейся разгонной динамике, с ростом средней технической скорости (до определенных пределов), результирующий расход электроэнергии имеет тенденцию к снижению, вследствие нелинейного, опережающего роста эффективности рекуперативного торможения.

В качестве примера расчета расхода топлива гибридным электробусом, на измеритель 100 км, примем среднее значение для рассмотренных выше вариантов при одинаковом минимальном удельном расходе топлива «дизелем» и газопоршневым двигателем компенсирующего генератора на уровне 0,24 кг/эфф.кВт·ч:

$$G'_{Ti} = (e1 - e2) / (3,6 \cdot 10^{-6}) / (\eta_r \cdot \eta_{ст}) \cdot g_e \cdot 100 / s_i,$$

где  $G'_{Ti}$  – массовый расход топлива на 100 км пробега, вычисленный по результатам численного моделирования, при пробеге  $s_i$ , км, между двумя остановочными пунктами, кг/100 км;

$\eta_r = 0,95$  – КПД компенсирующего генератора (45÷55 кВт);

$\eta_{ст} = 0,97$  – КПД статического преобразователя;

$g_e = 0,195 \div 0,3$  кг/эфф.кВт·ч – минимальный удельный эффективный расход топлива дизельного двигателя;

$g_e = 0,24$  кг/эфф.кВт·ч – минимальный удельный эффективный расход топлива газопоршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при работе на пропане [2;3];

$g_e = 0,22$  кг/эфф.кВт·ч – минимальный удельный эффективный расход топлива газопоршневого ДВС при работе на метане [2;3].

По результатам моделирования получено:

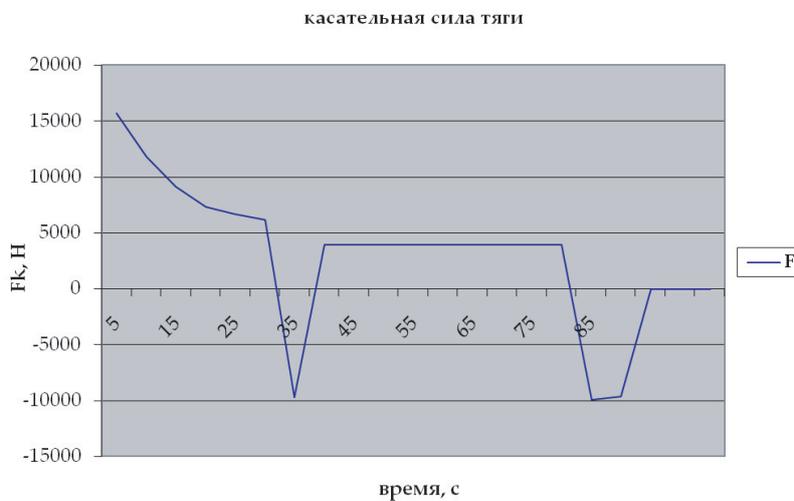
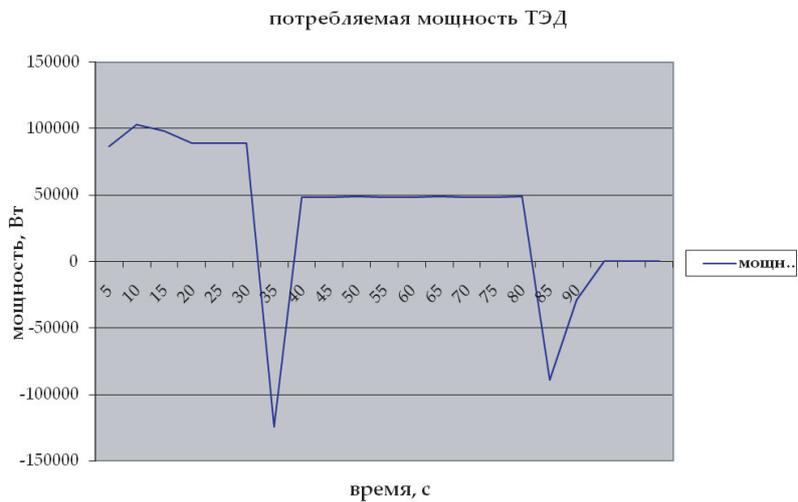
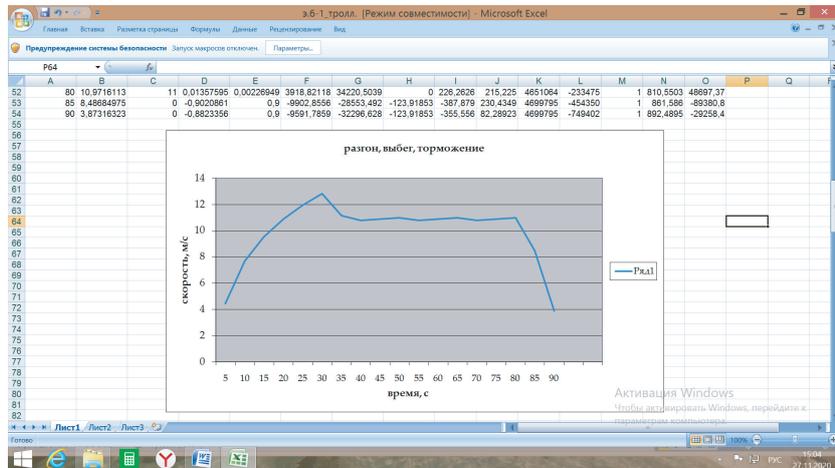


Рис. 3

$$G'_{T1}=30,08 \text{ кг (34,9/58,9 л);}$$

$$G'_{T2}=29,57 \text{ кг (34,3/57,96 л);}$$

$$G'_T=1/n \cdot \Sigma G'_{Ti}=29,82 \text{ кг (34,6/58,4 л).}$$

Здесь и далее – в скобках: числитель – дизельное топливо; знаменатель – сжиженный газ, пропан.

Дополнительный расход топлива, связан с работой вспомогательного оборудования, в т.ч. тормозного электрокомпрессора, а также с системой кондиционирования в летнее время. С учетом коэффициента неодновременности работы электрооборудования:

$$G''_T=5 \text{ кВт} \cdot 0,24 \text{ кг/эфф. кВт} \cdot \text{ч} \cdot 3,2 \text{ ч} = \\ =3,84 \text{ кг (4,4/7,5 л).}$$

Результирующий расход топлива на измеритель 100 км пробега:

$$G_T=G'_T+G''_T=33,6 \text{ кг (38,9/65,8 л).}$$

Относительная экономия топлива в эксплуатации за счет замены дизельного городского автобуса гибридным электробусом:

$$\Delta G_T=(G_0-G_T)/G_0 \cdot 100\% = \\ = (50-38,9)/50 \cdot 100=22,2\%,$$

где  $G_0 \approx 50$  л – норма расхода дизельного топлива для городского автобуса на 100 км пробега (с учетом поправочных коэффициентов) по распоряжению Минтранса [4].

Соответственно, при сопоставлении трех видов современного наземного общественного транспорта выполняются следующие энергетические соотношения:

1. Гибридный электробус энергетически эффективнее «эквивалентного» автобуса с гидромеханической передачей (ГМП), примерно на 22%.

2. Гибридный электробус энергетически эффективнее троллейбуса с импульсным регулированием ТЭД (100÷150 кВт·ч/100 км) на величину энергии тормозной рекуперации (как правило, троллейбус ее не использует) и потерь в сети электроснабжения ( $\approx 15\%$  [5]), т.е. примерно на 31% (по результатам численного моделирования). По данным эксплуатирующих организаций, суммарный удельный расход электроэнергии троллейбусом, с учетом потерь в контактной сети, может достигать 250÷360 кВт·ч/100 км пробега.

3. Гибридный электробус энергетически эффективнее аккумуляторного электробуса на величину потерь в сети электроснабжения зарядных станций и в самих зарядных станциях.

К дополнительным эксплуатационным расходам относятся:

1) для троллейбуса – содержание сети электроснабжения,  $\Delta_T$ ;

2) для аккумуляторного электробуса – содержание сетей электроснабжения зарядных станций и увеличение потребного парка из-за длительного простоя на конечных остановках для заряда АБ,  $\Delta_3$ .

На основании полученных данных приведем сравнительную стоимостную оценку эксплуатационных затрат на энергоносители в отношении гибридного электробуса (дизель-генератор/газопоршневой электрогенератор на пропане) с учетом текущих цен: сжиженный газ – 15 руб./л; дизельное топливо – 45 руб./л; электроэнергия для предприятий – 6 руб./кВт·ч.

1. Экономический эффект по сравнению с дизельным автобусом, на 100 км пробега:

$$\mathcal{E}_1=50 \cdot 45-39 \cdot 45 (65,8 \cdot 15)= \\ =495/1263 \text{ руб. (22/56\%);}$$

2. Экономический эффект по сравнению с троллейбусом, на 100 км пробега:

$$\mathcal{E}_2=200 \cdot 6+\Delta_T-39 \cdot 45(65,8 \cdot 15)= \\ =-555+\Delta_T/213+\Delta_T \text{ руб. (-46\%+\Delta_T\%/18\%+\Delta_T);}$$

3. Экономический эффект по сравнению с аккумуляторным электробусом (при наличии рекуперативного торможения), на 100 км пробега:

$$\mathcal{E}_3=108 \cdot 6+\Delta_3-39 \cdot 45(65,8 \cdot 15)= \\ =-1107+\Delta_3/-339+\Delta_3 \text{ руб.} \\ (-58,5\%+\Delta_3\%/-52\%+\Delta_3\%).$$

## Выводы

- гибридный электробус с газопоршневым электрогенератором, компенсирующим разряд бортового источника, отличается на сегодняшний день наибольшей эксплуатационной эффективностью по сравнению с дизельными автобусами (56%), троллейбусами ( $18\%+\Delta_T$ ) и под вопросом сравнение с аккумуляторными электробусами (необходимо знать дополнительные эксплуатационные расходы,  $\Delta_3\%$ , на содержание сетей электроснабжения и зарядных станций, а также затраты на увеличение потребного парка электробусов примерно на 30÷50% по сравнению с автобусами и троллейбусами при одинаковой «перевозочной» работе);

- уровень высокой экономичности и экологичности гибридного электробуса достигается за счет работы

первичного ДВС небольшой мощности, в основном на расчетном режиме, с постоянной частотой вращения (без переходных процессов и с минимальным числом выходов на режим «холостого хода») соответственно при минимальном удельном расходе топлива, а также за счет использования газового топлива;

• другим преимуществом гибридного электробуса является возможность обеспечения работы системы кондиционирования (вентиляция и охлаждение воздуха) за счет питания от компенсирующего электрогенератора (для аккумуляторного электробуса это остается серьезной энергетической проблемой при существующих удельных энергоемкостях аккумуляторных батарей). 

## Литература

1. Глушкова, Ю.О. Сравнение экономической эффективности эксплуатации троллейбуса и автобуса с учетом экологического фактора / Ю.О. Глушкова, А.В. Пахомова, А.С. Асоян // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». –2018. –Т15, №3. Сквозной номер выпуска-61. –С. 372–389.
2. Кавтарадзе, З.Р. Перспективы применения поршневых двигателей на альтернативных моторных топливах / З.Р. Кавтарадзе, Р.З. Кавтарадзе // Транспорт на альтернативном топливе. –2010. –№1. –С. 74–80.
3. Amirante R., Distaso E., Tamburrano P., Reitz R.D. Laminar flame speed correlations for methane, ethane, propane and their mixtures, and natural gas and gasoline for spark-ignition engine simulations. *International Journal of Engine Research*. 2017. Vol. 18. No. 9. Pp. 951–970.
4. Распоряжение Минтранса №АМ-23-р от 14.03.2008 г.
5. Ефремов, И.С. Теория и расчет троллейбусов: Электрическое оборудование: учебное пособие для вузов по спец. «Гор. электр. трансп.» В 2-х ч. / И.С. Ефремов, Г.В. Косарев. –М.: Высш. школа, 1981. –Ч .1. –293; Ч.2. –248 с.