

УДК 519.6

## Математическая модель расчета стоимости движения парка электробусов по маршрутам в зависимости от внешних факторов

Абрамова Ирина Константиновна

Берчун Юрий Валерьевич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*В настоящее время растет тенденция перехода на экологичные виды наземного транспорта. Одной из таких альтернатив стал электробус. Он более экономичен и мобилен по сравнению с другими видами транспорта, работающих на альтернативных источниках. К недостаткам электробуса можно отнести необходимость обустройства зарядных и ограниченность хода. В связи с этим при планировании рабочей смены необходимо оценить расход электроэнергии батарей.*

**Ключевые слова:** электробус, планирование зарядок, расход электроэнергии.

**Введение.** В настоящее время электробусы составляют более 20 % от общего парка наземного транспорта города Москва, и их число продолжает расти. К преимуществам электробусов можно отнести их экологичность, экономичность, бесшумность [1]. Однако к недостаткам можно причислить необходимость обустройства зарядных станций, ограниченный запас хода, а также износ батареи с течением времени. Также стоит отметить, что стоимость электроэнергии изменяется в течение суток [2]. В связи с этим возможно поставить задачу о назначении электробусов на рейсы расписания таким образом, чтобы затраты на электроэнергию были минимальны.

Перед тем, как решить задачу оптимизации необходимо оценить расход электроэнергии в зависимости от влияния ряда внешних факторов, оказывающих существенное влияние.

**Определение влияющих факторов.** Содержание парка электробусов включает в себя покупку электробусов и зарядных станций, затраты на техническое обслуживание, а также затраты на электроэнергию. На последние два вида затрат можно повлиять: износ батареи и расход влияют на стоимость технического обслуживания и стоимость суммарной подзарядки электробуса. В связи с этим в работе рассматриваются факторы, которые влияют на расход заряда электробуса и на емкость батареи.

К факторам, которые влияют на скорость расхода электроэнергии можно отнести температуру окружающей среды, среднюю скорость движения электробуса, а также пассажиропоток, перевозимый транспортным средством.

**Емкость батареи в зависимости от количества циклов заряд-разряд.** Учитывая опыт эксплуатации литий-титанатных батарей, применяемых в большинстве электробусов, эксплуатирующихся в автопарках маршрутного наземного транспорта города Москвы, износ батареи в зависимости от коли-

чества циклов использования носит линейный характер [3]. На рис. 1 представлена зависимость емкости батареи электробуса от количества циклов использования.

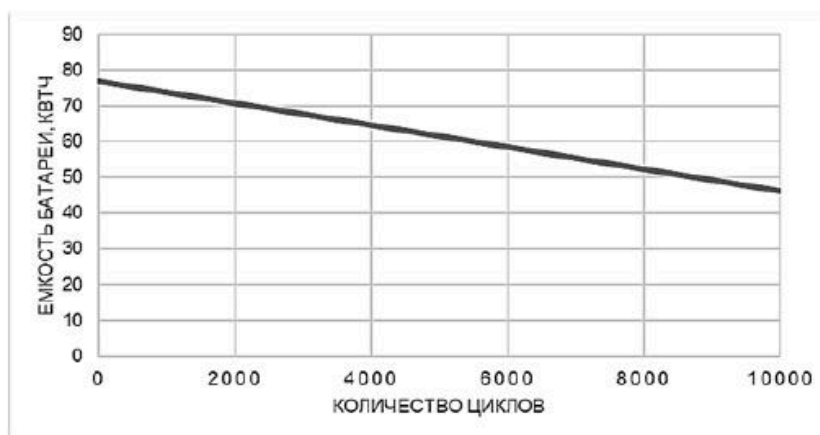


Рис. 1. Зависимость емкости батареи электробуса от количества циклов использования

Коэффициент пропорциональности в таком случае равен  $-0,00026$ . Однако стоит отметить, что при увеличении количества циклов емкость батареи начнет меняться нелинейно, стремясь к нулю.

**Зависимость расхода заряда батареи от окружающей температуры.** Исследования, проведенные компанией, показывают, что среднегодовые расходы двенадцатиметровых электробусов (ЛиАЗ-6274 и КамАЗ-6282), которые составляют основу парка г. Москвы, равняются  $1,98$  кВт·ч на километр маршрута при оптимальных условиях эксплуатации, то есть при температурах от  $15$  до  $19^{\circ}\text{C}$  [3]. Также в исследованиях было определено, что в более холодные месяцы расход на пройденный километр возрастает на  $14\%$ , а в более теплые — на  $9\%$ .

Консервативно примем, что изменение потребляемой мощности не имеет порогового значения, а линейно уменьшается на соответствующее значение при температуре от  $19$  до  $24^{\circ}\text{C}$  (максимальное среднее значение температуры летних месяцев в г. Москве), от  $15$  до  $-10^{\circ}\text{C}$  (минимальное среднее значение температуры зимних месяцев в г. Москве). Исходя из этого, получаем, что при изменении температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  за пределами оптимального температурного интервала потребление мощности изменяется на  $1,8\%$  при превышении температурного интервала, на  $0,56\%$  при среднесуточной температуре ниже оптимальной. Также при понижении температуры проявляется еще один эффект, оказывающий существенное влияние на эксплуатацию электробуса, в виде снижения отдаваемой энергии батареи. По исследованиям Viricity при падении температуры ниже  $4^{\circ}\text{C}$  происходит снижение отдаваемой мощности на  $5\text{--}7\%$ .

На основании приведенных данных и результатов ездовых испытаний электробусов, проведенных в рамках исследования, можно определить зависимость расхода электроэнергии электробуса от температуры окружающего воздуха (рис. 2) [4].

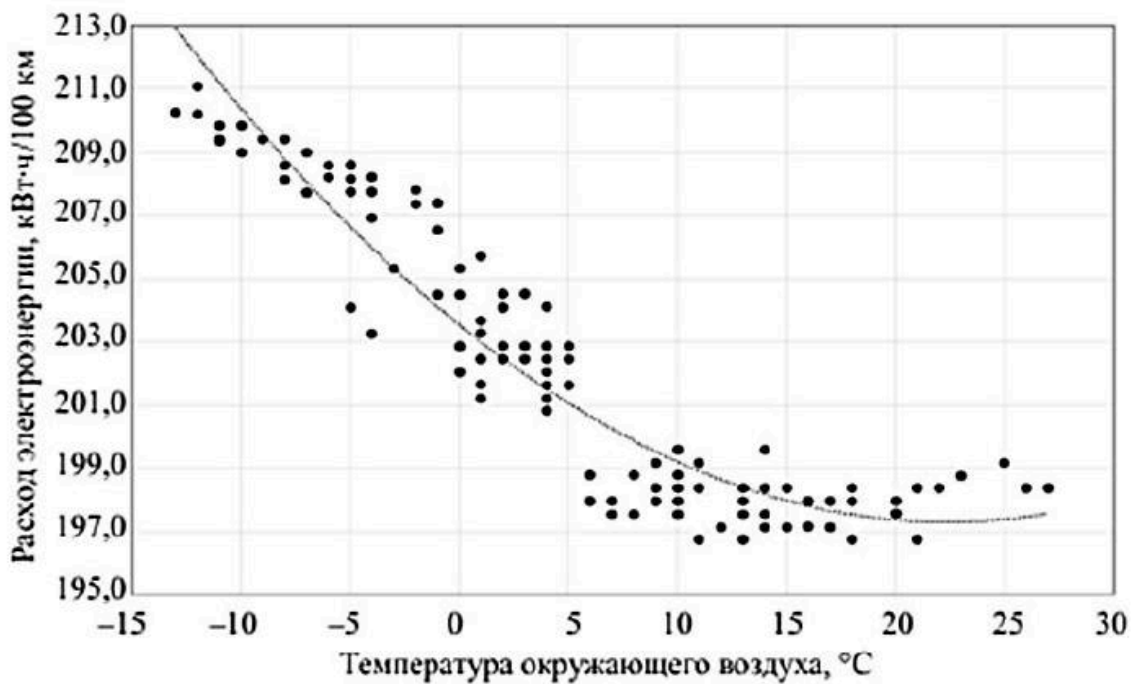


Рис. 2. Результаты эксперимента по расходу электроэнергии электробусом при эксплуатации в различных температурных условиях

Получаемая модель, описывающая закономерность изменения расхода электроэнергии электробуса, относится к моделям квадратичной регрессии и имеет вид

$$q_{эл} = 0,0121t_B^2 - 0,5527t_B + 203,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/100 \text{ км},$$

где  $q_{эл}$  — удельный расход электроэнергии;  $t_B$  — температура окружающего воздуха.

**Влияние скорости маршрута на расход электроэнергии электробусом.** По результатам анализа ранее проведенных исследований было установлено, что увеличение количество остановочных пунктов, времени простоя на них, снижение длины перегона приводят к снижению средней скорости маршрута и вызывают рост расхода электроэнергии.

Очевидно, что снижение средней скорости связано с увеличением количества торможений и ускорений, что, в свою очередь, вызывает повышение крутящего момента при увеличении частоты оборотов двигателя. В связи с этим происходит рост потребляемой мощности двигателя и повышение расхода электроэнергии в единицу времени. При этом также уменьшается километраж, пройденный электробусом в единицу времени.

При построении математической модели необходимо учитывать, что при скорости маршрута, стремящейся к бесконечности расход электроэнергии, не стремится к нулю, а выходит на фиксированное значение [4]. А при средней скорости движения, стремящейся к нулю, значения расхода электроэнергии не устремляется к максимальным значениям. Для исключения крайних значений и упрощения модели асимптотически ограничим функцию рабочим

диапазоном скоростей (от 5 до 50 км/ч). На основании экспериментальных исследований, проведенных в рамках работы, результаты которых приведены на рис. 3, и выдвинутых ранее допущений, можно определить зависимость расхода электроэнергии электробуса от средней скорости движения на участке маршрута [5].

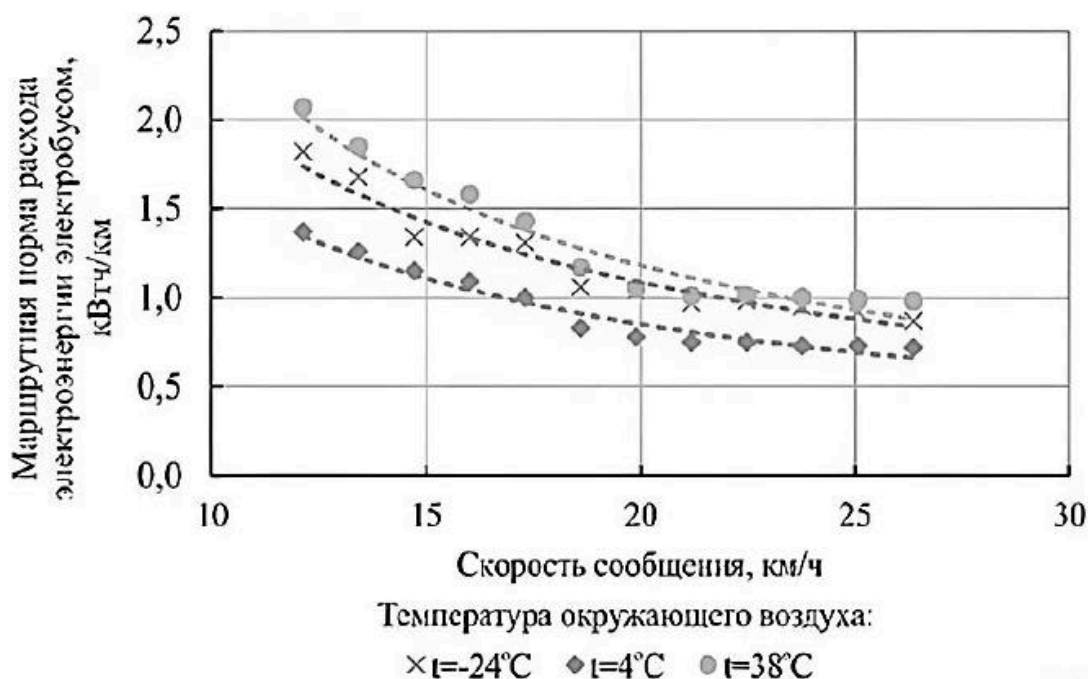


Рис. 3. Зависимость расхода электроэнергии от средней скорости движения на участке

Получаемая модель, описывающая закономерность изменения расхода электроэнергии электробуса, относится к моделям кубической регрессии и имеет вид

$$\begin{cases} q_{эл} = 0,0492V_{ср}^3 - 2,1508V_{ср}^2 - 1,869V_{ср} + 203,6 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{ч}}{100 \text{ км}}, \\ 5 \frac{\text{км}}{\text{ч}} < V_{ср} < 50 \frac{\text{км}}{\text{ч}}, \end{cases}$$

где  $V_{ср}$  — средняя скорость движения электробуса.

**Влияние полезной нагрузки на расход электроэнергии при движении электробуса.** Для определения зависимости потребляемой мощности от массы полезной нагрузки зададимся следующими упрощениями:

- время разгона и торможения и затрачиваемая на это энергия малы в сравнении с временем движения по участку с постоянной скорости;
- системы трансмиссии и подвески электробуса исправны и не оказывают влияния на движение, вследствие чего на электробус действует только сила трения и сила сопротивления воздуха;
- полезная нагрузка определяется исходя из среднего пассажиропотока на рассматриваемом участке и массе одного пассажира в 80 кг.

Приняв данные упрощения, суммарная мощность электродвигателей необходимая для движения будет определяться выражениями

$$P = F_T V_{cp};$$

$$P = (F_{тр} + F_c) \cdot V_{cp};$$

$$P = \left( fmg + C_x S \rho \frac{V_{cp}^2}{2} \right) \cdot V_{cp};$$

$$P = \left( f_0 (1 + (0,006 V_{cp})^2) \cdot mg + C_x S \rho \frac{V_{cp}^2}{2} \right) \cdot V_{cp},$$

где  $f_0$  — коэффициент сопротивления качению при движении с малой скоростью (рекомендуемое значение 0,007);  $V_{cp}$  — средняя скорость движения автомобиля на участке;  $C_x$  — коэффициент сопротивления воздуха;  $S$  — лобовая площадь авто ( $m^2$ );  $\rho$  — плотность воздуха ( $1,29 \text{ кг/м}^3$  при нормальных условиях)

Изменение мощности в зависимости от потребляемой нагрузки относится к линейным моделям и имеет вид

$$\Delta P = 0,06867 (1 + (0,006 V_{cp})^2) \cdot \Delta m.$$

Тогда полученная зависимость примет вид

$$\Delta P = 0,06867 \cdot (1 + (0,006 V_{cp})^2) \cdot 0,08 \cdot n_{cp},$$

где  $V_{cp}$  — средняя скорость движения автомобиля на участке;  $n_{cp}$  — средний пассажиропоток на участке.

**Зависимость потребляемой мощности от эксплуатационных условий и внешних факторов.** Сопоставим полученные зависимости от действия отдельных факторов и выведем зависимость для воздействия совокупности внешних факторов, приведенной в формуле:

$$q_{эл} = 203,6 + 0,0121 t_B^2 - 0,5527 t_B + 0,0492 V_{cp}^3 - 2,1508 V_{cp}^2 - 1,869 V_{cp} + \\ + 0,5493 \cdot \left( 1 + (0,006 V_{cp})^2 \cdot \frac{n_{cp}}{V_{cp}} \right) \text{ кВт} \cdot \text{ч/100 км}.$$

Полученная зависимость учитывает усредненный расход запаса электроэнергии при кратковременной остановке.

**Заключение.** В результате работы была получена математическая модель, позволяющая оценить уровень заряда электробуса в различных условиях. Данная модель применима для подсчета среднего расхода электроэнергии при движении электробуса. Однако для получения точного значения требуемой электроэнергии необходимо учесть износ транспортного средства, количество ускорений и торможений при движении.

## Литература

- [1] *Электробус для Москвы*. URL: <https://mosgortrans.ru> (дата обращения 20.02.2025).
- [2] *Тарифы и цены*. URL: <https://www.mosenergosbyt.ru/legals/tariffs-n-prices/> (дата обращения 19.02.2025).
- [3] Оспанбеков Б.К. *Оптимизация ресурсопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017, 170 с.
- [4] A report on energy distribution of electric buses. URL: <https://www.sustainable-bus.com/components/viriciti-a-report-on-energy-distribution-of-electric-buses/> (accessed 15.03.2025).
- [5] Горбунова А.Д., Смирнова О.Ю. Разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса. *Вестник СиБАДИ*, 2021, т. 18, № 4, с. 378–389.

## Development of a mathematical model for calculating the cost of operating a fleet of electric buses on routes depending on external factors

Abramova Irina Konstantinovna

Berchun Yuri Valerievich (*scientific advisor*)

*BMSTU, Moscow, Russia*

Currently, there is a growing trend towards the transition to environmentally friendly types of land transport. One of these alternatives was the electric bus. It is more economical and mobile compared to other modes of transport powered by alternative sources. The disadvantages of the electric bus include the need to equip charging stations and limited travel. In this regard, when planning a work shift, it is necessary to estimate the battery power consumption.

**Keywords:** electric bus, charging planning, power consumption