

УДК 629.3.05

*Д. А. Лычев, А. С. Поварехо*

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

UDC 629.3.05

*D. A. Lyuchov, A. S. Pavarekha*

## OPTIMIZATION OF TRAFFIC MODES OF URBAN ELECTRIC VEHICLES

### Аннотация

Рассмотрен метод определения оптимальных режимов движения троллейбуса при пассажирских перевозках в городских условиях. Изложены известные подходы к решению задач оптимальной и экономной эксплуатации транспортных средств городского электротранспорта, которые можно условно поделить на численные и аналитические. Показано, что численные методы в современных условиях функционирования транспортных предприятий являются более перспективными. При выборе режима движения транспортных средств городского электрического транспорта с минимально возможными затратами электроэнергии необходимо решать задачу оптимизации потребления электрической энергии. Эта задача состоит в том, чтобы из каждой точки маршрута транспортное средство двигалось к остановке таким образом, чтобы затраты энергии на движение были минимальны. Причем необходимо соблюдать график движения и прибытия на остановочный пункт не позднее определенного времени.

### Ключевые слова:

оптимизация, численные методы, городской транспорт, пассажирские перевозки.

### Abstract

The scientific article considers a method for determining the optimal modes of trolleybus movement in passenger traffic under urban conditions. The known approaches to solving the problems of optimal and economical operation of urban electric vehicles are presented, which can be conventionally divided into numerical and analytical ones. The paper shows that the numerical methods are more promising in modern conditions of functioning of transport enterprises. When choosing the mode of movement of urban electric vehicles at the lowest possible energy costs, it is necessary to solve the problem of optimizing the consumption of electric energy. This task consists in vehicle's moving from each point of its route to a stop in such a way that the energy consumption for its movement is minimal. Moreover, it is necessary to observe the schedule of movement and arrival at a stop no later than the time specified.

### Keywords:

optimization, numerical methods, urban transport, passenger transportation.

### Введение

Постоянное повышение стоимости электрической энергии для транспортных предприятий заставляет переосмыслить подход к организации пассажирских перевозок с использованием городского электрического транспорта. Заданием оптимизации расхода электрической энергии озабочены все элек-

тротранспортные предприятия мира. Современные системы контроля и учета электрической энергии не позволяют анализировать потребление электрической энергии троллейбусами в связи с особенностями систем электроснабжения и динамически изменяющимися условиями движения на маршруте города. Установка счетчика электрической энергии на подвижной состав дает воз-



возможность фиксировать расход электрической энергии только по завершении работы в депо. Возникает необходимость в контроле потребления электрической энергии в режиме реального времени при эксплуатации транспортных средств на маршруте в городских условиях.

### Результаты исследований

Над решением задач контроля расхода электрической энергии подвижным составом работает большое количество научных коллективов [1–9]. Городской электрический транспорт является динамически развивающейся транспортной отраслью. Научные работы в большей степени посвящены железнодорожному транспорту, который имеет фиксированную длину перегона. Городской транспорт, в частности троллейбус, при движении в городских условиях может несколько раз осуществлять полную остановку между остановочными пунктами (на светофорах, прохождение спецчастей контактной сети, а также остановка на нерегулируемых переходах). Продолжение движения, после внеплановой остановки между перегонами, сопровождается дополнительным расходом электрической энергии на тягу, которую и необходимо контролировать путем решения оптимизационных задач в режиме реального времени при движении транспортных средств между остановочными пунктами. Мероприятия по снижению стоимости эксплуатации транспортных средств за счет оптимизации потребления электрической энергии являются актуальными.

Цель исследований – разработка метода выбора режима движения троллейбуса с минимально возможными затратами электроэнергии с помощью решения задачи оптимизации режимов движения транспортных средств.

При выборе режима движения транспортных средств городского элект-

рического транспорта с минимально возможными затратами электроэнергии приходится решать задачу оптимизации потребления электрической энергии. Эта задача состоит в том, чтобы из каждой точки маршрута транспортное средство двигалось к остановке таким образом, чтобы затраты энергии на движение были минимальны. Причем необходимо соблюдать график движения и прибытия на остановочный пункт не позднее определенного времени.

Согласно принципу оптимальности величины, сформулированному Р. Беллманом, оптимальная стратегия управления не зависит от «предыстории» системы, а определяется состоянием системы в данный момент времени и целью управления. Метод динамического программирования используется в процессах, когда в каждый момент определенного интервала времени необходимо принимать решение. Причем последующее управление должно избираться оптимальным относительно состояния, к которому придет система в конце этого шага. Данный метод, основанный на использовании принципа оптимальности, и позволяет установить соотношение между экстремальными значениями целевой функции в задачах, характеризующихся разной продолжительностью процесса и различными начальными состояниями.

Решение поставленной задачи осуществляется путем минимизации функционала  $Q$ , который определяется посредством интегрирования зависимости расхода электроэнергии за время движения в соответствии с уравнением динамики транспортного средства и электромеханических характеристик двигателя:

$$Q = \int_0^T (y, u, t) \cdot dt, \quad (1)$$

где  $F(y, u, t)$  – функция, которая определяет расход электрической энергии;



$y$  – координата транспортного средства;  
 $u$  – управление.

При использовании компьютерной техники задача решается в конечных интервалах путем разбиения интервала времени  $T$  на  $n$  равных интервалов продолжительностью  $T/n$ . Таким образом, функционал (1) замещается суммой:

$$Q = \sum_0^{n-1} F(y_k, u_k, t_k) + \varphi(y_n). \quad (2)$$

В уравнении (2) выделено последнее слагаемое суммы при  $k = n$ , которое не зависит от управления, т. к. в конечный момент времени  $t = T$  управление завершается и  $u_k = 0$ . Далее задача сводится к минимизации суммы. Для этого расчет выполняют с конца процесса – прибытие транспортного средства на остановочный пункт  $t = T$  до начала  $t = 0$ .

Для нелинейных уравнений используют принцип максимума Понтрягина [10–12]. При нахождении минимума целевой функции необходимо найти максимум сопряженной функции, которая рассчитывается на основе функционала. При решении поставленной задачи – выбора режима продолжения движения транспортного средства – целевой функцией выступает расход электроэнергии. Следует отметить, что для описанного далее режима движения целевая функция является монотонной функцией времени движения. Причем с увеличением времени движения значение целевой функции уменьшается. При этом рассматриваются режимы, когда транспортное средство движется в режиме тяги до набора нужной скорости, затем переходит в режим выбега с последующим торможением (рис. 1).

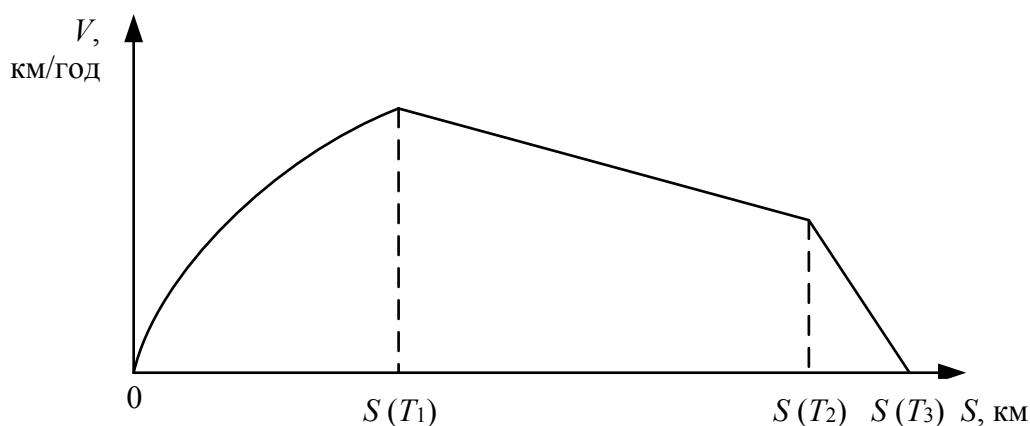


Рис. 1. График изменения скорости

Для использования численного метода решения сформулируем оптимизационные задачи в следующем виде. Необходимо найти точки режимов движения, а именно моменты  $T_1$ ,  $T_2$  и соответствующие значения скорости  $V(T_1)$ ,  $V(T_2)$ , значения пройденного пути  $S_1$ ,  $S_2$ , чтобы расходы электрической энергии были минимальны при известных

начальных значениях пути  $S_0$  и скорости  $V(T_0)$ . На рис. 1 значения  $S_0$ ,  $V(T_0)$  приняты нулевыми.

Расходы электроэнергии представим в виде функции  $\Phi(y)$ . С учетом метода Понтрягина получим:

– при разгоне на интервале  $[0 - S(T_1)]$

$$V(t) = [F - k \cdot V(t)],$$

$$\Phi(y) = \int_0^{T_1} F \cdot V(t) \cdot dt; \quad (3)$$

– для режима выбега на интервале  $[S(T_1) - S(T_2)]$

$$V(t) = -k \cdot V(t), \quad \Phi(y) = 0; \quad (4)$$

– для режима торможения на интервале  $[S(T_2) - S_3]$

$$V(t) = -F - k \cdot V(t),$$

$$\Phi(y) = 0. \quad (5)$$

Начальные условия для системы уравнений

$$S(0) = 0; \quad S(T_3) = S_3;$$

$$V(0) = V(T_0); \quad V(T_3) = 0.$$

В результате решения системы уравнений (3)–(5) определяется вектор  $f(t, T_1, T_2)$ . Для уменьшения расхода электрической энергии при движении транспортного средства (ТС) нужно определить соответствующие точки переключения  $T_1, T_2$  режимов работы ТС.

Допустим, что расчетное значение  $T_1$  известно. Существует одна единственная точка  $T_2$  определенным условиям. Причем ее значение зависит от положения точки  $T_1$ . Таким образом, можно аппроксимировать  $T_2$  так, чтобы выполнить следующие условия:

$$S(T_3) = S_3; \quad V(T_3) = 0.$$

Для решения уравнений (3–5) используется метод Ньютона. Имея  $i$ -е приближение  $T_2^{(i)}$ , для  $(i + 1)$ -го приближения определяется  $T_2^{(i+1)}$ . Выполняем разложение в ряд Тейлора с учетом того, что членами более высокого

уровня можно пренебречь из-за их незначительной величины. Ряд Тейлора получаем при начальных условиях  $S(T_3) = [S_3, 0]T$ , принимая во внимание, что  $T_2^{(i+1)} = T_2^{(i)} + \Delta T_2$ .

$$S(t, T_2^i) + \Delta T_2 \cdot \frac{dS(T_2^i)}{dT_2} = S_3;$$

$$V(t, T_2^i) + \Delta T_2 \cdot \frac{dV(T_2^i)}{dT_2} = 0. \quad (6)$$

С учетом (4) представим (6) в следующем виде:

$$(\Delta T_2) = \begin{pmatrix} \frac{dS}{dT_2} \\ \frac{dV}{dT_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -S(t, T_2^i) + S_3 \\ -V(t, T_2^i) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Добавляем  $dT_2$  к  $i$ -му приближению и определяем  $(i + 1)$ -е приближение при вычислении  $T_2$ . Расчеты выполняются до того момента времени, пока разница пройденного пути и длины перегона не превысит заданной точности. В каждой точке перехода на следующий режим движения  $T_1$  существует единое множество расхода электрической энергии на движение  $W(T_1)$ , которое зависит от значения  $T_1$ . Для разных значений  $T_1 = (T_1', T_1'', \dots, T_1^m)$  определяют соответствующую последовательность, в которой существует минимальное значение  $W(T_1^m)$ , которое соответствует оптимальному значению времени  $T_1^{opt}$ . Аналитическое выражение для  $W(T_1)$  неизвестно, поэтому возникает необходимость в использовании численного метода для нахождения минимума функции. Для определения времени  $T_1^{opt}$  применяется метод «золотого» пересечения, при использовании которого требуется невысокое количество аппаратных ресурсов вычислительной техники.

Согласно [1, 2] произведен расчет

оптимальных режимов движения с использованием вышепредложенного метода оптимизации. Эксперимент проведен для участка длиной 1000 м на троллейбусе марки ЛАЗ Е183А1 с тяговым трехфазным асинхронным двигате-

лем ДТА-2У1, курсирующем по маршруту № 2 г. Харькова (рис. 2). Полученные результаты представлены в табл. 1. Расчетные и полученные результаты отличаются не более  $\pm 5\%$ .



Рис. 2. Схема маршрута проведения эксперимента

Табл. 1. Показатели эксплуатации троллейбуса ЛАЗ Е183А1 на экспериментальном участке пути

Показатель	Режим движения	
	Экономный	Скоростной
Потребление электроэнергии, кВт·ч	1,25	2,35
Время проезда, с	129	91
Средняя скорость, км/ч	29	40
Удельные затраты электроэнергии, Вт·ч/(т·км)	129	238
Эксплуатационная скорость, км/ч	17,52	21,86

### Заключение

Рассмотрен метод Понтрягина для определения оптимальных режимов движения троллейбуса ЛАЗ Е183А1 при пассажирских перевозках в городских условиях. Изложены существующие

подходы к решению задач оптимальной и экономной эксплуатации транспортных средств городского электротранспорта с точки зрения потребления электрической энергии. Показано, что численные методы в современных условиях функционирования транспортных пред-



приятий являются более перспективными, т.к. позволяют в режиме реального времени выбирать режимы движения

между остановочными пунктами в зависимости от дорожных условий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Soroka, K. O.** System for automatic selection of the speed rate of electric vehicles for reducing the power consumption / K. O. Soroka, T. R. Pavlenko, D. A. Lychov // Science and Transport Progress. – 2017. – № 3 (69). – P. 77–91.
2. **Сорока, К. О.** Підвищення ефективності експлуатації засобів електротранспорту за рахунок керування і оптимізації швидкісних режимів руху / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт» – Харьков, 2017. – Вып. 27. – С. 289–293.
3. **Притула, М. Г.** Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М. Г. Притула, О. А. Пасечник // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 6 (78). – С. 82–100.
4. **Soroka, K. O.** The Content Model and the Equations of Motion of Electric Vehicle / K. O. Soroka, D. A. Lychov // Science and Transport Progress. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106.
5. Definition of Energy Saving Acceleration Modes of Trains / B. Y. Bodnar [et al.] // Science and Transport Progress. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52.
6. **Kulbashna, N. I.** Novi pidkhody shchodo skladannia ratsionalnykh rezhymiv vodinnia rukhomoho skladu po marshrutakh / N. I. Kulbashna, A. H. Tarnovetska, O. I. Balas // Proceedings of the International Conference Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii, 01–03 October 2014. – Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2014. – P. 84–85.
7. Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty. – Moscow: Transport, 1985.
8. **Prytula, M. H.** Modeliuvannia ta rozrakhunok optymalnykh parametriv rukhu poizdiv / M. H. Prytula, R. R. Shpakovych // Fyzyko-matematychni modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii. – 2007. – № 5. – С. 139–145.
9. **Wang, P.** Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations: doctoral thesis / P. Wang. – 2017. Retrieved from <http://clc.am/2oMizA> (in English).
10. **Петренко, О. М.** Аналіз методів визначення енергетично оптимальних параметрів управління транспортних засобів / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4 (44). – С. 96–100.
11. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. – Москва: Наука, 1969. – 384 с.
12. Optimal Control of Heavy-Haul Freight Trains to Save Fuel / P. K. Houpt [et al.] // University of California at Santa Barbara, Winter: seminar. – 2009. – P. 1033–1040.

Статья сдана в редакцию 20 января 2020 года

**Дмитрий Александрович Лычев**, ст. преподаватель, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова. E-mail: [dimalychov@gmail.com](mailto:dimalychov@gmail.com).

**Александр Сергеевич Поварехо**, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: [povarekho@bntu.by](mailto:povarekho@bntu.by).

**Dmitry Alexandrovich Lychov**, senior lecturer, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: [dimalychov@gmail.com](mailto:dimalychov@gmail.com).

**Aliaksandr Sergeevich Pavarekha**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: [povarekho@bntu.by](mailto:povarekho@bntu.by).

