

# Електронні системи та сигнали

УДК 621.314

## Транспортний засіб з акумулятором зі зменшеними масогабаритними показниками

Мартюхін І. А.

e-mail: [margigoand@ukr.net](mailto:margigoand@ukr.net)

Білий М. В.

e-mail: [mxbely98@gmail.com](mailto:mxbely98@gmail.com)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)Факультет електроніки [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)

Вул. Політехнічна, 16, Київ, Україна

**Реферат** — У статті розглядається електричний транспортний засіб, заряджання якого відбувається на кожній зупинці, що дозволяє зменшити масогабаритні показники системи акумулявання і вартість транспортного засобу. Аналізується режим споживання електроенергії транспортним засобом на основі типової тахограми руху електротранспорту, визначається обсяг енергії, необхідний для руху транспорту між зупинками. На основі розрахованих характеристик руху даються рекомендації щодо обмеження прискорення транспортного засобу під час його прискорення. Аналізуються тип накопичувача енергії, придатного для забезпечення необхідних швидкісних характеристик та розраховується ємність системи акумулявання енергії.

**Ключові слова** — тахограма руху; потужність; рекуперація; ємність акумулятора.

### І. ВСТУП

Поступове зростання кількості транспортних засобів (ТЗ) погіршує екологічний фон та негативно впливає на навколишнє середовище у великих індустриальних містах. Частково вирішити цю проблему дозволяє заміна громадського транспорту на двигунах внутрішнього згорання на електротранспорт [10]. Сучасні види електротранспорту – тролейбуси і трамваї мають обмежену мобільність і потребують значних коштів для будівництва і підтримання інфраструктури, тому не можуть замінити дешевший в експлуатації і обслуговуванні транспорт – автобус. Натомість існуючі електробуси мають значну вартість, зумовлену великою ціною акумуляторної батареї, і тому не можуть бути масово впроваджені у великих містах. У цьому випадку доцільно використовувати електробуси з акумуляторами невеликої ємності, що підзаряджаються на кожній зупинці.

Структурна схема електробуса складається з наступних елементів, які зображені на рис. 1.

Основна відмінність цієї схеми від схеми тролейбуса у високовольтному акумуляторі, завдяки якому можливе живлення тягової системи.

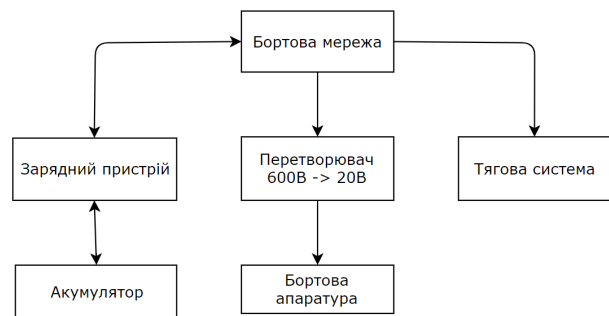


Рис. 1. Структурна схема електробуса

У статті аналізується циклограма руху ТЗ, та розраховується обсяг енергії, необхідний для його руху на певну відстань. На основі отриманих даних обирається тип та ємність акумулятора, необхідного для забезпечення руху транспортного засобу.

### ІІ. РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Сумарна сила опору  $F_{\Sigma}$ , яка діє на транспортний засіб, складається з сили опору коченню коліс  $F_k$ , опору підйому  $F_n$ , опору повітря  $F_{нов}$  та інерції  $F_i$  [1].

$$F_{\Sigma} = F_k + F_n + F_{нов} + F_i. \quad (1)$$



Сила опору кочення залежить від маси ТЗ  $G_a$  і коефіцієнта кочення  $f_k$ :

$$F_k = G_a \cdot f_k. \quad (2)$$

Сила опору підйому  $F_n$  визначається кутом нахилу дорожнього полотна  $\alpha$ :

$$F_n = G_a \cdot \sin(\alpha). \quad (3)$$

Сила опору повітря визначається коефіцієнтом аеродинамічного опору  $C_x$ , опором повітря  $\rho_{нов}$ , площею поперечного перерізу транспортного засобу  $S$  та швидкістю транспортного засобу  $v$ :

$$F_{нов} = 0,5 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_{нов} \cdot v^2. \quad (4)$$

Сила опору розгону розраховується як

$$F_i = m_e \cdot a, \quad (5)$$

де  $a$  – прискорення транспортного засобу,  $m_e$  – еквівалентна маса транспортного засобу з врахуванням моменту інерції валу двигуна і редуктора[9].

Розглянемо типову тахограму руху транспортного засобу, зображену на рис. 2. Згідно з тахограмою ТЗ має три режими руху:

- розгін з постійним прискоренням  $a_p$  до максимальної швидкості  $v_{max}$ ;
- рух з постійною швидкістю  $v_{max}$ ;
- гальмування з постійним прискоренням  $a_r$ .

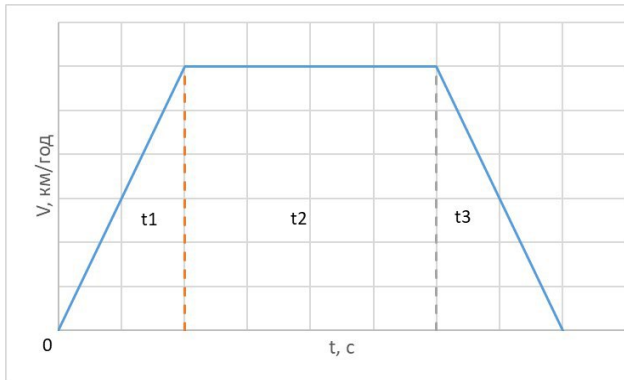


Рис. 2. Тахограма руху електробусу: t1 - інтервал розгону; t2 - інтервал постійної швидкості; t3 - інтервал гальмування

Сила тяги ТЗ  $F_m$  повинна бути рівною або перевищувати сумарну силу опору  $F_{\Sigma}$ . Враховуючи електричні та механічні втрати, які враховуються коефіцієнтами корисної дії електричної  $\eta_e$  та механічної частин тягової установки  $\eta_m$ , сила тяги двигуна може бути записана так:

$$F_m = \frac{F_k + F_n + F_{нов} + F_i}{\eta_e \eta_m} = K_0 + K_1 v^2 + K_2 a, \quad (6)$$

$K_0, K_1, K_2$  – постійні коефіцієнти.

Обсяг енергії  $W$ , необхідний для переміщення на відстань 1 км згідно з тахограмою руху розраховується як інтеграл:

$$W = \int_1^2 F_m dl. \quad (7)$$

Для трьох інтервалів руху обсяг енергії розраховується за формулами:

$$W_1 = K_0 S_1 + K_1 a_p S_1^2 + K_2 a_p S_1; \quad (8)$$

$$W_2 = K_0 S_2 + K_1 v_{max}^2 S_2; \quad (9)$$

$$W_3 = K_0 S_3 + K_1 v_{max}^2 S_3 + \frac{4K_1 v_{max} \sqrt{2a_r S_3^3}}{3} + \quad (10)$$

$$+ 2K_1 a_r \frac{S_3^2}{2} + K_2 a_r S_3,$$

де  $S_1, S_2, S_3$  – відстані, які проходить ТЗ, протягом відповідного інтервалу руху.

Миттєва потужність, яка споживається ТЗ протягом руху, знаходиться як похідна по часу від отриманих значень енергій  $W_1, W_2, W_3$  на інтервалах:

$$P_1(t) = \frac{dW_1}{dt} = K_0 a_p t + K_1 a_p^3 t^3 + K_2 a_p^2 t; \quad (11)$$

$$P_2(t) = \frac{dW_2}{dt} = K_0 v_{max} + K_2 v_{max}^3; \quad (12)$$

$$P_3(t) = \frac{dW_3}{dt} = K_0 (v_{max} + a_r t) + K_1 v_{max}^2 (v_{max} + a_r t) + K_2 a_r (v_{max} + a_r t) + 2K_1 v_{max}^2 \sqrt{2a_r} (v_{max} + a_r t) \cdot (v_{max} t + \frac{a_r t^2}{2}) + 2K_1 a_r (v_{max} + a_r t) (v_{max} t + \frac{a_r t^2}{2}) \quad (13)$$

Для ТЗ з висотою 2.5 м, шириною 2.7 м, масою 11 т, радіусом шин колеса 0.372 м, максимальною швидкістю 60 км/год та тахограмою руху, представленою на рис. 1, складові сили опору руху, розраховані за формулами (2)-(5) мають такі значення:  $F_k = 1079.1$  Н,  $F_n = 32373$  Н,  $F_{нов} = 2,847 \cdot v^2$ ,  $F_i = 12.602 \cdot 1 \cdot a$ . Залежність потужності від часу  $p(t)$ , що необхідна для руху в заданому швидкісному режимі з максимальною швидкістю  $v_{max} = 60$  км/год показано на рис. 3.

На рис. 3 показано залежність потужності від часу лише на максимальній швидкості, графіки потужностей для швидкостей 10-50 км/год мають таку ж саму залежність.

Під час розгону ТЗ буде витратити найбільшу потужність. При постійній швидкості сили, які діють на ТЗ будуть менші, ніж у початковий момент часу[6,7].

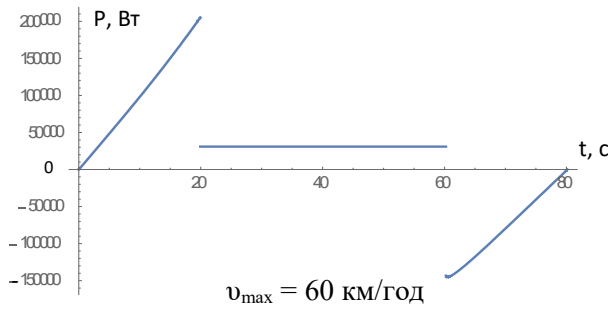


Рис. 3. Залежність потужності, необхідної для руху ТЗ, від часу

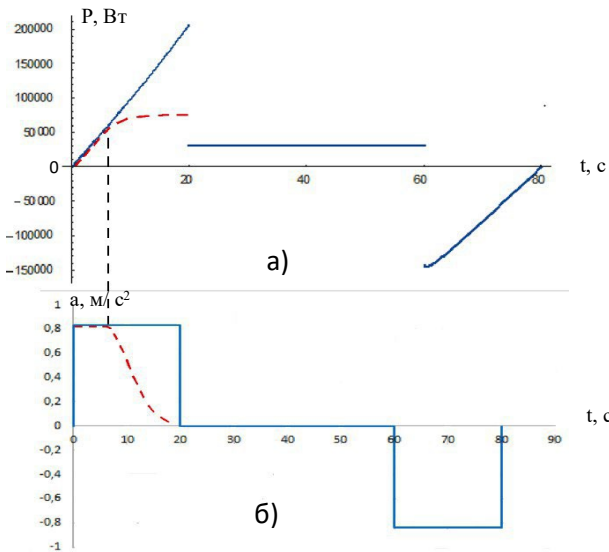


Рис. 4. Ілюстрація принципу обмеження прискорення під час розгону: а) залежність потужності від часу, б) залежність прискорення від часу.

ТАБЛИЦЯ 1

$\alpha$ , град	$18^\circ$	$0^\circ$	$-18^\circ$
$v_{\max} = 10$ км/год	$3.35 \cdot 10^7$ Дж	$1.10 \cdot 10^6$ Дж	$-3.13 \cdot 10^7$ Дж
$v_{\max} = 20$ км/год	$3.35 \cdot 10^7$ Дж	$1.17 \cdot 10^6$ Дж	$-3.11 \cdot 10^7$ Дж
$v_{\max} = 30$ км/год	$3.36 \cdot 10^7$ Дж	$1.27 \cdot 10^6$ Дж	$-3.10 \cdot 10^7$ Дж
$v_{\max} = 40$ км/год	$3.38 \cdot 10^7$ Дж	$1.40 \cdot 10^6$ Дж	$-3.09 \cdot 10^7$ Дж
$v_{\max} = 50$ км/год	$3.39 \cdot 10^7$ Дж	$1.54 \cdot 10^6$ Дж	$-3.08 \cdot 10^7$ Дж
$v_{\max} = 60$ км/год	$3.41 \cdot 10^7$ Дж	$1.70 \cdot 10^6$ Дж	$-3.06 \cdot 10^7$ Дж

При гальмуванні відбувається процес рекуперації, тобто електродвигун буде віддавати енергію в мережу. З графіків видно, що потужність під час розгону значно більше, ніж при постійній швидкості руху. Тому на практиці на великих швидкостях обмежують прискорення, що дозволяє зменшити пікові потужності[2] як показано на рис. 4.

Продемонстрований принцип обмеження прискорення дозволяє значно зменшити потужність тягової системи, що забезпечує рух ТЗ.

### III. РОЗРАХУНОК ЄМНОСТІ СИСТЕМИ АКУМУЛЮВАННЯ

Для того, щоб оцінити ємність акумулятора необхідно визначити енергію, яка витрачається на рух ТЗ між зупинками, по графікам потужностей за формулою (7) було розраховано дані, які наведені у таблиці 1. Умовно вважається, що відстань між зупинками складає один кілометр. Дані щодо енергії, необхідної для подолання відстані ТЗ для різних кутів нахилу дорожнього полотна  $\alpha$  наведено у таблиці 1.

Як видно з даних наведених у таблиці, обсяг необхідної енергії суттєво залежить від кута нахилу дорожнього покриття[10].

Процес заряджання і розряджання акумуляторів системи проходить за дуже короткий час. Час розряджання  $t_p$  відповідає часу руху ТЗ між зупинками, що не перевищує 5 хвилин,  $t_p < 5$  хв, а час заряджання  $t_z$  – тривалості зупинки – до однієї хвилини,  $t_z < 1$  хв. Якщо обрати ємність акумулятора  $C$ , за даними, наведеними у табл. 1, розрядний струм акумулятора становитиме  $I_p = C / t_p > 12C$ , зарядний струм акумулятора  $I_z = C / t_z > 60C$ . Існуючі типи хімічних акумуляторів не здатні забезпечувати таких зарядних і розрядних режимів[3,4], тому ємність таких акумуляторів повинна братись із запасом, що нівелює переваги запропонованої системи[8].

В даному випадку як елемент акумулявання енергії доцільно використовувати суперконденсатори[5]. Ємність  $C$  системи акумулявання розраховується для діапазону робочих напруг системи електротранспорту  $U = 400..600$  В.

$$C = \frac{2W}{(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)} = \frac{2 \cdot 3.41 \cdot 10^7}{(600^2 - 400^2)} = 341 \text{ Ф.} \quad (14)$$

Розрахована ємність системи накопичення енергії на суперконденсаторах забезпечить рух ТЗ при максимальному куті підйому дорожнього полотна,  $\alpha = 18^\circ$ .

### ВИСНОВКИ

У статті запропоновано ТЗ зі зменшеною ємністю акумулятора.

Розраховано тягові характеристики ТЗ на основі рівнянь руху з врахуванням сил опору повітря та кочення. Отримані тягові характеристики використано для розрахунку часових залежностей потужності тягової системи ТЗ для різних швидкостей та розраховано обсяг енергії, необхідний для його переміщення на задану відстань.

Якісний аналіз отриманих даних засвідчив, що для побудови системи акумулявання доцільно використовувати суперконденсатори через кращі навантажувальні характеристики. Розраховано ємність батареї суперконденсаторів, що забезпечує рух ТЗ на задану відстань.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. V. Selifanov, A. S. Khusainov, and V. V. Lomakin, *Teoriya avtomobilya: Uchebnoye posobiye*. Moscow: MG TU «MAMI», 2007, ISBN: 9785040585304
- [2] N. A. Khripach, F. A. Shustrov, and D. A. Petrichenko, “Analiz effektivnosti energopotrebleniya bezrel’sovogo passazhirskogo transporta na baze tyagovogo elektroprivoda [Analysis of the energy efficiency of trackless passenger transport on the basis of traction electric drive],” *Mod. Probl. Sci. Educ.*, no. 6, 2014.
- [3] Y. V. Verbytskyy, A. G. Kiselyova, and K. S. Osypenko, *Kontekstno-zaleznye keruvannya avtonomnyy systemamy elektrozhyvlennya: pid zahal’noyu redaktsiyeyu d.t.n. Zhuykova V.YA. [Context-dependent control of stand-alone power supply systems: under the general editorship of D.Sc. Zhuykova V.Ya.]*. Kyiv: AVERS, 2015, ISBN: 978-966-8777-13-4
- [4] I. Verbytskyi, O. Bondarenko, and D. Vinnikov, “Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding,” in *58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTU-CON 2017 - Proceedings*, 2017, vol. 2017–November, pp. 1–6, DOI: [10.1109/RTU-CON.2017.8124844](https://doi.org/10.1109/RTU-CON.2017.8124844)
- [5] D. A. Khrustalev, *Akkumulyatory [Accumulators]*. Moscow: Izumrud, 2004, ISBN: 5-98131-001-4
- [6] V. K. Vakhlamov, *Konstruksiya, raschet i ekspluatatsionnyye svoystva avtomobiley [Construction, calculation and operational properties of cars]*. Moscow: Academy, 2007, ISBN: 978-5-7695-3793-6
- [7] I. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkin, and B. F. Tokarev, *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin [Electrical Machinery Design]*. Moscow: Vysshaya shkola, 2002, ISBN: 5-06-004032-1
- [8] Edison. (2012, January). WP 1.5 Battery modeling. EDISON Consortium. [Online]. Available: [http://www.edison-net.dk/Dissemination/Reports/Report\\_018.aspx](http://www.edison-net.dk/Dissemination/Reports/Report_018.aspx)
- [9] B. P. Busygin, *Elektromobili (metody raschota)- Uchebnoye posobiye [Electric Vehicles (calculation methods) - Study Guide]*. Moscow: MADI, 1979.
- [10] V. A. Schetina, Y. Y. Morgovsky, and V. A. Bogomazov, *El-ektromobil’: Tekhnika i ekonomika [Electric car: Technics and economy]*. L: Mashinostroyeniye, 1987.

УДК 621.314

## Транспортное средство с аккумулятором с уменьшенными массогабаритными показателями

Мартюхин И. А.

e-mail: [margigoand@ukr.net](mailto:margigoand@ukr.net)

Белый М. В.

e-mail: [mxbely98@gmail.com](mailto:mxbely98@gmail.com)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)Факультет електроніки [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)

Вул. Політехнічна, 16, Київ, Україна

**Реферат** — В статье рассматривается электрическое транспортное средство, зарядка которого происходит на каждой остановке, что позволяет уменьшить массогабаритные показатели системы аккумулирования и стоимость транспортного средства. Анализируется режим потребления электроэнергии транспортным средством на основе типовой тахограммы движения электротранспорта, определяется объем энергии, необходимый для движения транспорта между остановками. На основе рассчитанных характеристик движения даются рекомендации по ограничению ускорения транспортного средства во время его ускорения. Анализируется тип накопителя энергии, пригодного для обеспечения необходимых скоростных характеристик и рассчитывается емкость системы аккумулирования энергии.

**Ключевые слова** — тахограмма; мощность; рекуперация; емкость аккумулятора.



# Vehicle with a battery with reduced weight and gross dimensions

I. A. Martiukhin

e-mail: [margigoand@ukr.net](mailto:margigoand@ukr.net)

M.V. Bilyi

e-mail: [mxbely98@gmail.com](mailto:mxbely98@gmail.com)

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» [www.kpi.ua](http://www.kpi.ua)

Faculty of electronics [fel.kpi.ua](http://fel.kpi.ua)

16, Polytechnichna st., Kyiv, Ukraine

**Abstract** – Modern types of electric vehicles – trolley buses and trams have limited mobility and require significant funds for the construction and maintenance of infrastructure, and therefore can not replace the as the cheaper in operation and maintenance transport. Instead, electric buses have a significant cost due to a high capacity electric accumulator, and therefore can not be widely implemented in big cities. In this case it is advisable to use electric buses with small capacity batteries, which are charged at each stop. In the article, the total resistance force of the vehicle is calculated, consisting of the rolling resistance force, the lifting resistance and the air resistance and the engine inertia. The torque moment of the vehicle must be equal to or exceed the total strength of the resistance forces. Based on the calculation of energy we can conclude the: during acceleration, the vehicle will elaborate maximum power; at constant speed, the forces acting on the vehicle will be smaller than during acceleration period; when braking, there is a process of energy recuperation i.e. returning energy to electric network. From the time diagrams it is clear that the power during acceleration is much greater than at constant speed. Therefore, in practice at high speeds it is proposed to limiting acceleration, which reduces peak power. The demonstrated principle allows to significantly reduce the power of the traction system, which provides the vehicle's movement. In order to estimate the capacity of the batter it is necessary to determine the energy consumed on the vehicle's movement between the stops. It is assumed that the distance between the stops is one kilometer. Based on the calculations it can be concluded that the amount of required energy is significantly dependent on the angle of inclination of the road surface. The charge and discharge process of the battery system takes a short time. The discharge time corresponds to the travel time of the vehicle between stops of no more than 5 minutes and the charging time – the duration of the stop (up to one minute). Existing types of chemical accumulators can not provide such charge and discharge modes, there fore the capacity of such accumulators should be taken with the reserve, which offsets the advantages of the proposed system. In this case, as an element of energy accumulation it is expedient to use supercapacitors. Capacity C from the accumulator system is calculated for the range of operating voltages of the electric transport syste  $U = 400...600$  V. The calculated capacity of the system if energy accumulation on supercapacitors will provide the vehicle's movement at the maximum lifting angle  $\alpha = 18$  degrees.

**Keywords** – tachogram; power; recovery; battery; capacity.

