

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Будниченко І.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

EXPERIMENTAL STUDIES ON VEHICLE MOTION RESISTANCE

Budnychenko I.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine, repair2006@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3073-4913

Постановка проблеми

Україна має одну із розвинутих систем громадського транспорту, в якій пасажирські перевезення в містах здійснюються транспортними засобами з електричною тяговою установкою. Нещодавно прийнятим Законом України [1] передбачається її подальший розвиток за рахунок заміни транспортних засобів з тяговими силовими устаткуваннями, що мають двигуни внутрішнього згорання на транспортні засоби з електричними тяговими установками.

В умовах, коли в наслідок бойових дій мають місце пошкодження енергогенеруючою устаткування енергетичної системи України, особливо важливою стає проблема енергозберігаючої діяльності на транспорті, що передбачає діяльність, яка спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної та перетвореної енергії. Енергоефективність згідно закону України [2] є кількість енергетичних ресурсів, які витрачаються на виконання заданого обсягу роботи.

Окремо зазначимо, що на даний час не існує нормативного документу згідно яким має бути оцінена енергоефективність транспортного засобу з електричною тяговою установкою транспортних засобів категорії М2, М2 класів В,Б та І, ІІ. Розроблення методу оцінювання енергоефективності таких транспортних засобів потребує розгляду окремих складових, які впливають на витрати енергоносія, серед яких є опір руху транспортного засобу.

Аналіз відомих нам публікацій показує, що на даний час основні дослідження виконувалися в напрямку оцінювання впливу експлуатаційних чинників на витрату енергоносія транспортним засобом з електричною тяговою установкою, наприклад в роботах [3,4].

Окремо зазначимо, що достатньо велика кількість досліджень для транспортних засобів з електричною тяговою установкою присвячена визначенню характеристик його електричного приводу та управління ним [5,6,7,8,9,10].

Метою досліджень, які передбачається виконати, є експериментальне визначення опору руху транспортного засобу з електричною тяговою установкою категорії М3, класу І, як однієї із складових, яка впливає на його енергоефективність.

Для досягнення означеної вище мети роботи повинні бути вирішені наступні завдання:

- виконання вимірювання зміни швидкості уразі руху транспортного засобу без тяги під дією сили опору руху;
- розроблення та застосування методики порівняльного аналізу отриманих даних для підтвердження або спростування гіпотези про залежність опору руху від швидкості транспортного засобу;
- визначення питомого показника витрати енергоносія на долаття опору руху.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Експериментальні дослідження опору руху були виконані на транспортних засобах з електричною тяговою установкою, а саме тролейбусах типу АКСМ-321, Т12120 технічні характеристики яких можуть вплинути на значення опору руху подані в таблиці 1.

Вимірювання опору руху виконувалося не прямим методом за показником зміни швидкості в часі під час руху тролейбуса без тяги по горизонтальній ділянці дороги, що має асфальтобетонне покриття та довжину приблизно 500 м. Для виконання вимірювання зміни швидкості в часі було застосовано засіб вимірювальної техніки типу ВЕГС-01, який був наданий ТОВ «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС» і призначений для вимірювання ефективності гальмових систем транспортних засобів. Прилад типу ВЕГС-01 має у своєму складі високоточний GPS модуль типу ZED-F9P F9 (див.рис.1), адаптер, датчик ходу педалі та програмний продукт (див.рис.2), який інсталюється на будь-якому комп'ютері.

Таблиця 1
Table 1

Технічні характеристики	Типи тролейбусів	
	АКСМ -231	T12120
Габаритні розміри, м		
- довжина	12,3	12,0
- ширина	2,5	2,55
- висота	3,7	3,5
Кількість осей	2	2
Кількість тягових двигунів	1	1
Тип двигуна	асинхронний	асинхронний
Розміри шин коліс	275/70 R22,5	275/70 R22,5
Маса у спорядженому стані, т	11,4	10,860



Рисунок 1 – Високоточний GPS модуль
Figure 1 – High-precision GPS module

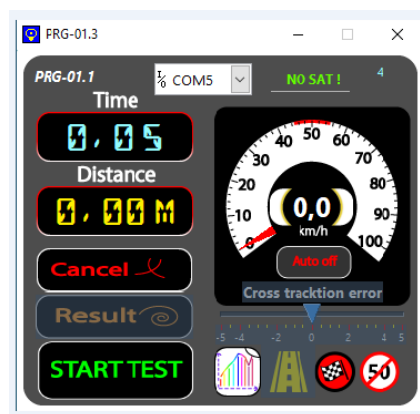


Рисунок 2 – Віртуальна панель керування приладом
Figure 2 – Virtual device control panel

Високоточний GPS модуль типу ZED-F9P F9, закріплюється на будь яку металеву поверхню кузова або салону транспортного засобу.

Застосування ВЕГС-01 дозволило отримати масив даних про зміну швидкості транспортного засобу через кожні 0,1 с його руху без тяги, які показані на рис. 3,5. Наявність масиву даних функції $v(t)$ дозволило отримати масив даних функції уповільнення $J(v)$, а саме:

$$J(v) = \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

де dt – прийняти інтервал часу 2 с.

В подальшому розглядалося лінійна та нелінійна залежність уповільнення від швидкості транспортного засобу, які мали вигляд поліному першого та другого ступеню.

$$J(v) = b_0 + b_1V \quad (2)$$

$$J(v) = b_0 + b_1V + b_1V^2 \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів рівнянь 2,3 та їх статистичні характеристики були визначенні із застосуванням функції «ЛИНЕЙН» Microsoft Excel та подані у таблиці 2.

На рис. 4,6 показані зміни фактичні миттєві значення сповільнення та теоретичні значення в залежності від швидкості транспортного засобу.

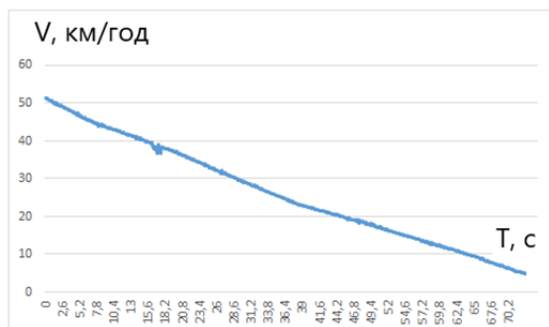


Рисунок 3 – Зміна швидкості тролейбуса АКСМ
Figure 3 – Changing the speed of the AKCM trolleybus

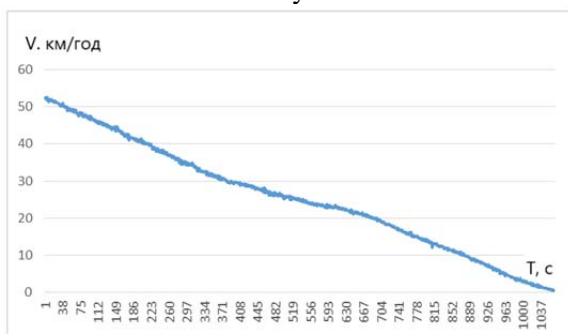


Рисунок 5– Зміна швидкості тролейбуса Т12120
Figure 5 – Changing the speed of the T12120 trolleybus

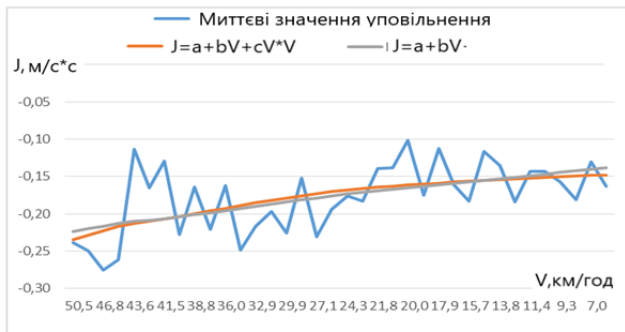


Рисунок 4 – Зміна уповільнення тролейбуса АКСМ
Figure 4 – Change in deceleration of the AKCM trolleybus

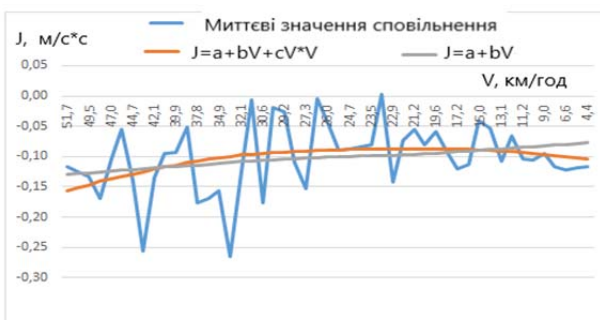


Рисунок 6 – Зміна уповільнення тролейбуса Т12120
Figure 6 – Changing the speed of the T12120 trolleybus

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів поліномів та їх статистика

Table 2 – Values of coefficients of polynomials and their statistics

Параметр	АКСМ-231		Т12120	
Коефіцієнт b_0	0,14610	0,12682	-0,1159	-0,0725
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b_0}	0,02950	0,01466	0,0536	0,017984
Коефіцієнт b_1	0,00011	0,00191	0,0028	-0,001097
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b_1}	0,00244	0,03895	0,0026	0,000594
Коефіцієнт b_2	0,00003	-	0,00007	-
Стандартне відхилення коефіцієнту S_{b_2}	0,00004	-	0,00004	-
Кількість ступенів свободи, n	33	34	46	47
Критерій Фішера F	7,63	14,89	3,01	3,4
Унормоване значення F , для $P=0,95$	2,88	2,87	2,81	2,81
Коефіцієнт детермінації, R	0,316	0,306	0,1157	0,067
Унормоване значення R для $P=0,95$	0,194	0,128	0,128	0,0837

Аналіз статистики, що подана у таблиці 2 дає можливість зазначити, що для тролейбусів типу:

– АКСМ може бути застосований поліном першого та другого ступеню, але в обох математичних моделях вплив швидкості на уповільнення несуттєвий, так як значення коефіцієнтів не перевищує похибку їх визначення;

– Т12120 відсутній вплив швидкості руху на уповільнення, так як коефіцієнт детермінації менше критичного значення.

Це дозволяє під час подальших досліджень витрати енергоносія транспортного засобу з електричною тяговою установкою вважати опір руху сталою величиною.

Висновки.

Запропоновані математичні моделі визначення уповільнення транспортного засобу під час руху без тяги в наслідок дії сил опору та отримана статистика цього процесу дозволяє вважати, що сила опору руху в інтервалі швидкості до 50 км/год є сталою величиною, так як значення коефіцієнтів впливу швидкості на уповільнення не перевищують похибки їх визначення.

Перспективи подальшого дослідження

Подальші дослідження мають бути спрямовані на отримання аналогічних математичних моделей для інших типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою, що вони можуть бути застосовані і для інших транспортних засобів, а їх опір руху є сталою величиною в інтервалі швидкості до 50 км/год.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Закон України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» від 24 лютого 2023 року № 2956-IX // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 61, ст.203.

2 Закон України «Про енергоефективність» від 21.10.2021 № 1818--IX// Відомості Верховної Ради України, 2022 р. – № 2. – Ст.8.].

3 Dembitskyi V. Influence of a system «vehicle – driver – road – environment» on the energy efficiency of the vehicles with electric drive / Valerii Dembitskyi, Oleg Sitovskyi, Vasyl Pavliuk // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House «SciView», 2019. — P. 162–173. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28705> (Web of Science).

4 Дембіцький Валерій. Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом. Монографія / за заг. ред. Д.В. Ломотька. – Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М. – 2022. Т1 – 216 с. (с. 77 – 114).

5 Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. Environ Sci Eur 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>

6 Haakana A, Laurikko J, Granström R, Hagman R (2013) Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions—End of Project Report. Nordisk Energieforskning, December 2013, pp 74. <https://docplayer.net/11036905-Assessing-range-and-performance-of-electric-vehicles-in-nordic-driving-conditions-project-final-report.html>

7 Zhao Y, Hou J, Wang C, Chen L, Sun Q. Design of vehicle control research and development platform for a pure electric vehicle. Advances in Mechanical Engineering. February 2019. doi:10.1177/1687814019826427.

8 Carlson R, Lohse-Busch H, Diez J, Gibbs J (2012) The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle. SAE International 2013-0-1457.

9 Helmbrecht M, Olaverri-Monreal C, Bengler K, Vilimek R, Keinath A (2014) How electric vehicles affect driving behavioral patterns. IEEE Intell Transp Syst Mag 6(3):22–32.

10 Zhao C, Gong G, Yu C, Liu Y, Zhong S, Song Y, Deng C, Zhou A, Ye H (2019) Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles. SAE Technical Paper 2019-01-0723, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>

REFERENCES

1 Law of Ukraine «On Some Issues of the Use of Vehicles Equipped with Electric Engines and Amendments to Some Laws of Ukraine on Overcoming Fuel Dependence and the Development of Electric Charging Infrastructure and Electric Vehicles» dated February 24, 2023 No. 2956-IX // Bulletin of the Verkhovna Rada (VVR), 2023, No. 61, Art. 203.

2 Law of Ukraine «On Energy Efficiency» dated October 21, 2021 No. 1818--IX// Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2022 – No. 2. –Art. 8.].

3 Dembitskyi V. Influence of a system «vehicle – driver – road – environment» on the energy efficiency of the vehicles with electric drive / Valerii Dembitskyi, Oleg Sitovskyi, Vasyl Pavliuk // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House «SciView», 2019. — P. 162–173. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28705> (Web of Science).

4 Dembitsky Valeriy. Research on energy indicators of electric vehicles. Monograph / edited by D.V. Lomotka. – Academy of Technical Sciences of Ukraine. – Ivano-Frankivsk: Publisher Kushnir G.M. – 2022. T1 – 216 p. (pp. 77 – 114).

5 Weiss, M., Cloos, K.C. & Helmers, E. Energy efficiency trade-offs in small to large electric vehicles. *Environ Sci Eur* 32, 46 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00307-8>

6 Haakana A, Laurikko J, Granström R, Hagman R (2013) Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions—End of Project Report. Nordisk Energieforskning, December 2013, pp 74. <https://docplayer.net/11036905-Assessing-range-and-performance-of-electric-vehicles-in-nordic-driving-conditions-project-final-report.html>

7 Zhao Y, Hou J, Wang C, Chen L, Sun Q. Design of vehicle control research and development platform for a pure electric vehicle. *Advances in Mechanical Engineering*. February 2019. doi:10.1177/1687814019826427.

8 Carlson R, Lohse-Busch H, Diez J, Gibbs J (2012) The measured impact of vehicle mass on road load forces and energy consumption for a BEV, HEV, and ICE vehicle. SAE International 2013-0-1457.

9 Helmbrecht M, Olaverri-Monreal C, Bengler K, Vilimek R, Keinath A (2014) How electric vehicles affect driving behavioral patterns. *IEEE Intell Transp Syst Mag* 6(3):22–32.

10 Zhao C, Gong G, Yu C, Liu Y, Zhong S, Song Y, Deng C, Zhou A, Ye H (2019) Research on key factors for range and energy consumption of electric vehicles. SAE Technical Paper 2019-01-0723, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0723>

РЕФЕРАТ

Будниченко І.В. Експериментальні дослідження опору руху транспортного засобу / І.В. Будниченко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковий, науково-виробничий журнал. – К.: НТУ, 2025. – Вип. 1 (60).

У статті запропонована математична модель зміни уповільнення від швидкості транспортного засобу з електричною тяговою установкою.

Об'єкт дослідження – процес уповільнення транспортного засобу з електричною тяговою установкою під дією сил опору руху.

Мета статті – розробка математичної моделі для визначення опору руху, що дозволяє оцінювати витрати енергоносія на долаття опору руху для виконання порівняння енергоефективності різних типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою.

Методи дослідження – експериментальні дослідження впливу сил опору руху на уповільнення транспортного засобу та методи математичної статистики.

Запропонована математична модель встановлює залежність величини сповільнення від швидкості транспортного засобу в діапазоні до 50 км/год, що є максимально дозволеною швидкістю руху в місті.

Результати:

1) модель дозволяє отримати значення сили опору руху за відомої маси транспортного засобу та дозволяє вважати її сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год в наслідок незначних значень коефіцієнтів впливу швидкості на уповільнення транспортного засобу.

2) модель передбачає подальше використання під час визначення показника енергоефективності транспортного засобу з електричною тяговою установкою так як показник опору руху є одним із складових, що впливають на витрату енергоносія.

Практичне значення: результати дослідження мають практичну цінність для підприємств, що виготовляють транспортні засоби, для оцінки їх конкурентоздатності.

Перспективи дослідження: подальші дослідження спрямовані на удосконалення математичної моделі шляхом виконання додаткових експериментальних досліджень інших типів транспортних засобів з електричною тяговою установкою, які виготовляються в Україні.

Ключові висновки:

1) уповільнення транспортного засобу з електричною тяговою установкою в наслідок дії сил опору руху можна вважати сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год.

2) опір руху транспортного засобу з електричною тяговою установкою можна вважати сталою величиною в діапазоні швидкостей до 50 км/год, що має бути ураховано під час розроблення математичної моделі споживання енергоносія під час визначення показника його енергоефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, ОПІР РУХУ, УПОВІЛЬНЕННЯ, РУХ БЕЗ ТЯГИ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

ABSTRACT

Budnychenko I.V. Experimental studies of vehicle rolling resistance. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific, scientific and industrial journal. – K.: NTU, 2025. – Issue 1 (60).

The article proposes a mathematical model of the change in deceleration from the speed of a vehicle with an electric traction unit.

Research object: the process of deceleration of a vehicle with an electric traction unit under the action of rolling resistance forces.

The purpose of the article: to develop a mathematical model for determining rolling resistance, which allows estimating the energy consumption for overcoming rolling resistance to compare the energy efficiency of different types of vehicles with an electric traction unit.

Research methods: experimental studies of the influence of rolling resistance forces on vehicle deceleration and methods of mathematical statistics.

The proposed mathematical model establishes the dependence of the deceleration value on the vehicle speed in the range of up to 50 km/h, which is the maximum permitted speed in the city.

Results:

1) the model allows you to obtain the value of the resistance force for a known vehicle mass and allows you to consider it a constant value in the speed range of up to 50 km/h due to the insignificant values of the coefficients of the influence of speed on the vehicle deceleration.

2) the model provides for further use in determining the energy efficiency index of a vehicle with an electric traction unit, since the resistance index is one of the components that affect the energy consumption.

Practical significance: the results of the study have practical value for enterprises that manufacture vehicles to assess their competitiveness.

Research prospects: further research is aimed at improving the mathematical model by performing additional experimental studies of other types of vehicles with an electric traction unit that are manufactured in Ukraine.

Key conclusions:

1) the deceleration of a vehicle with an electric traction system due to the action of resistance forces can be considered a constant value in the speed range up to 50 km/h.

2) the resistance of a vehicle with an electric traction system can be considered a constant value in the speed range up to 50 km/h, which should be taken into account when developing a mathematical model of energy consumption when determining its energy efficiency indicator.

KEYWORDS: ENERGY EFFICIENCY, VEHICLE, RESISTANCE, DECELERATION, MOTION WITHOUT TRACTION, MATHEMATICAL MODEL

АВТОРИ:

Будниченко Ігор Валерійович, аспірант кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: repair2006@ukr.net, тел. +38(067) 465-57-96, , Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

AUTHORS:

Budnychenko Igor Valeriyovych, postgraduate student of the Department of Technical Operation of Automobiles and Car Service, e-mail: repair2006@ukr.net, tel. +38(067) 465-57-96, , Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelyanovicha-Pavlenko St., 1, room 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Кугут Микола Миколайович., директор Товариства з обмеженою відповідальністю «ПОЛІТЕХНОСЕРВІС», Бровари, Україна.

Сахно В.П., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри автомобілів, Київ, Україна.

REVIEWERS:

Kugut Mykola Mykolayovych, Director of the Limited Liability Company «POLITEHNOSERVICE», Brovary, Ukraine.

Sakhno V.P., Doctor of Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Automobiles, Kyiv, Ukraine.