

О.А. Жуков¹
С. М. Бойко²
В. С. Гурківський¹

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ВТРАТ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

²Національний Університет «Запорізька політехніка»

Анотація

Розглянуто сили опору руху електромобіля, включаючи силу тяжіння, аеродинамічний опір та опір кочення шин. Проаналізовано фактори, що впливають на прискорення та швидкість: потужність тягового двигуна, стан дорожнього покриття, аеродинаміку та масу транспортного засобу. Наведено узагальнену систему рівнянь з урахуванням моментів інерції та кутової швидкості для визначення потужності електродвигуна. Запропоновано аналітичний вираз ККД механічної трансмісії з врахуванням залежності від навантаження та швидкості. Акцентовано на практичному застосуванні моделі для оптимізації електроприводу.

Ключові слова: електромобіль, сили опору руху, тяговий електропривод, ККД трансмісії, моменти інерції.

Abstract

The forces of motion resistance acting on an electric vehicle are considered, including gravity, aerodynamic resistance, and tire resistance. The factors influencing acceleration and speed are analyzed: traction motor power, road surface condition, vehicle aerodynamics, and total mass. A generalized system of equations is presented, taking into account inertia moments and angular velocities to determine the motor power. The efficiency of the mechanical transmission is evaluated, depending on load and speed, with analytical expressions for losses proposed. Emphasis is placed on the practical application of the model for optimizing the electric drive.

Keywords: electric vehicle, motion resistance forces, traction electric drive, transmission efficiency, inertia moments.

Вступ

Розвиток електротранспорту вимагає точного моделювання динаміки руху для підвищення енергоефективності та автономності. Під час руху електромобіля на нього діють сили опору, такі як сила тяжіння, аеродинамічний опір та опір шин, які долаються за допомогою тягового електропривода. Прискорення та швидкість транспортного засобу залежать від потужності двигуна, стану дорожнього покриття, аеродинаміки та його маси. Особливо актуально це для руху на підйом, де втрати енергії зростають [1–2].

Метою роботи є розробка математичної моделі сил опору руху електромобіля з урахуванням динамічних моментів та динамічної зміни ККД трансмісії.

Об'єктом дослідження є процес руху електромобіля під впливом сил опору.

Предметом дослідження є математичні моделі тягового електроприводу, моменти інерції та ефективність трансмісії.

Основна частина

Сили, що діють на електромобіль під час руху на підйом [1–2], наведені на рисунку 1.

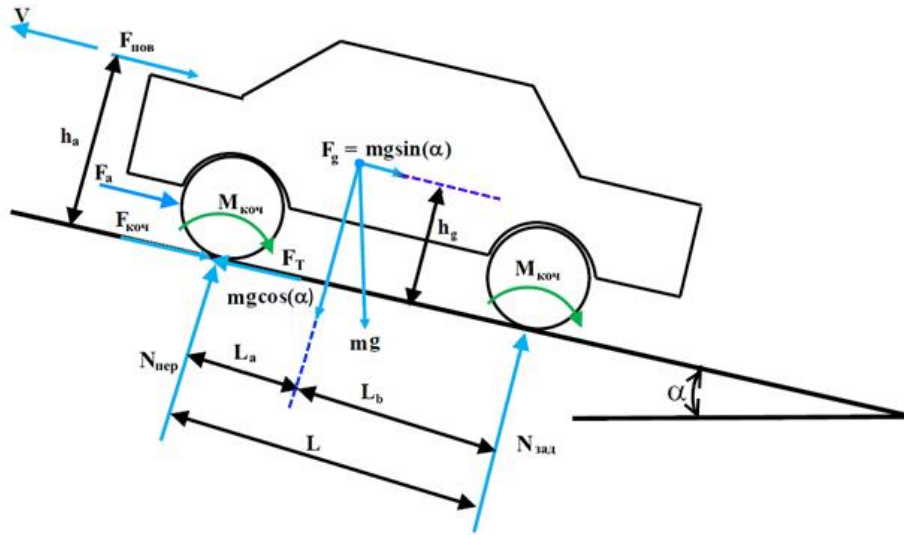


Рисунок 1 – Сили, що діють на електромобіль, який рухається на підйом

Узагальнена система рівнянь з урахуванням моментів інерції та кутових швидкостей має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\Sigma on} = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 + f_k \cdot mg \cdot \cos(\alpha) + mg \cdot \sin \alpha \\ M_T = F_{\Sigma on} \cdot R_k \\ M_{ст.дв} = \frac{M_T}{i \cdot \eta_{тр}} \\ J_{прив} = J_{дв} + \frac{J}{i^2} + m \frac{V^2}{\omega_{дв}^2} \\ M_{дин.дв} = J_{прив} \cdot \varepsilon = J_{прив} \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ M_{сум.дв} = M_{ст.дв} + M_{дин.дв} \\ \omega_{дв} = \frac{V}{R_k} \cdot i \\ P_{дв} = M_{сум.дв} \cdot \omega_{дв} \end{array} \right. , \quad (1)$$

Система (1) дозволяє визначити необхідну потужність і кутову швидкість обертання валу тягового електродвигуна.

ККД механічної передачі трансмісії в загальному випадку [4] знаходиться за виразом:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{\gamma} + b}, \quad (2)$$

де a – коефіцієнт постійних втрат; b – коефіцієнт змінних втрат; γ – коефіцієнт навантаження, який для трансмісії електромобіля.

У електромобілі втрати залежать не лише від навантаження γ , а й від кутової швидкості вихідного валу ω (гідродинамічний опір, вентиляційні, стискання та перемшування мастила тощо). Виразимо їх через множник:

$$c(\omega) = \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p, \quad p \in [1,6; 2,2], \quad (3)$$

де $\omega_{ном}$ – еталонне (номінальне) значення кутової швидкості.

ω – поточне значення кутової швидкості.

p – показник степеня підбирається на основі експериментальних даних.

З урахуванням швидкісної залежності (3):

$$\eta(\gamma, \omega) = \frac{1}{1 + \frac{a_0 \cdot c(\omega)}{\gamma} + b_0 \cdot \gamma}, \quad (4)$$

Для низьких швидкостей вводимо нижню межу:

$$c(t) = \max \left(\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^p \cdot c_{\min} \right). \quad (5)$$

Висновки

Запропонована модель при розрахунку потужності дозволяє оцінити сили опору та ККД трансмісії електромобіля, враховуючи динамічні фактори залежно від навантаження та від швидкості. Це сприяє оптимізації електроприводу, зменшенню втрат енергії та підвищенню запасу ходу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на валідацію результатів моделювання на основі експериментальних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Електропривод транспортних засобів» зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / уклад.: О. А. Жуков, А. М. Коваль. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 81 с.
2. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. M. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. – 3rd ed. – Boca Raton ; London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. – 573 p. – ISBN 978-1-4987-6177-2.
3. Основи теорії автомобілів та тракторів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agroinjenerija/traktoru_i_avtomobili_I%D0%86_g/traktoru_i_avtomobili_I%D0%86_g/8/8_1.htm
4. Бабій С. М., Мошноріз М. М., Проценко Д. П., Паянок О. А., Жуков О. А. Моделювання режимів роботи електропривода підйомної лебідки крана в середовищі MATLAB // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2022. – № 313(5). – С. 99–107. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-99-107>
5. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина : навч. посібник / В. Х. Далека, М. В. Хворост, В. І. Скуріхін, Д. І. Скуріхін ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 388 с.

Жуков Олексій Анатолійович – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: alex4444_2004@ukr.net.

Бойко Сергій Миколайович – канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних технологій Національний університет «Запорізька політехніка», ел. пошта: boikosn2017@gmail.com

Гурківський Віктор Сергійович – студент групи ЕПА-24м, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: hurkiwskoj@gmail.com

Zhukov Oleksii A. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: alex4444_2004@ukr.net

Boiko Serhii M. – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Department of Transport Technologies, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», e-mail: boikosn2017@gmail.com

Hurkiwskoj Viktor S. - student of group EPA-24m, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: hurkiwskoj@gmail.com