

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАМВАЯ З УРАХУВАННЯМ ПРОФІЛЮ КОЛІЇ І ЗАВАНТАЖЕННЯ

¹Вінницький Національний Технічний Університет

Анотація

У роботі розглянуто задачу підвищення енергоефективності тягового електроприводу трамвая. Запропоновано підхід до формування закону керування тяговим електроприводом з урахуванням профілю колії та зміни маси вагона. Запропоновано математичну модель руху трамвая на основі рівняння тягового балансу, що дозволяє визначити необхідний тяговий момент двигуна в різних режимах руху. Сформульовано критерій оптимізації, який мінімізує енергоспоживання електропривода у міському циклі руху. Отримані результати можуть бути використані при модернізації та оптимізації систем керування тяговими електроприводами міського електротранспорту.

Ключові слова: трамвай, тяговий електропривод, енергоефективність, оптимізація.

Abstract

The paper considers the problem of increasing the energy efficiency of the traction electric drive of a tram. An approach to forming the law of control of the traction electric drive is proposed, taking into account the track profile and the change in the mass of the car. A mathematical model of tram movement is proposed based on the traction balance equation, which allows determining the required engine traction torque in different driving modes. An optimization criterion is formulated that minimizes the energy consumption of the electric drive in the urban traffic cycle. The results obtained can be used in the modernization and optimization of control systems for traction electric drives of urban electric transport.

Key words: tram, electric traction drive, energy efficiency, optimization.

Вступ

Міський електричний транспорт відіграє важливу роль у забезпеченні сталого розвитку транспортної інфраструктури міст. Значна частина трамвайного рухомого складу, що експлуатується у містах України, була розроблена декілька десятиліть тому і оснащена системами керування тяговими електроприводами з обмеженими можливостями регулювання енергоспоживання. Енергоспоживання трамвая суттєво залежить від режимів розгону, профілю колії та завантаження вагона. Існуючі системи керування тяговим електроприводом формують закон зміни моменту двигуна без урахування ряду факторів, що може призводити до збільшення витрат електроенергії та перевантаження електродвигунів. Задачі оптимізації режимів роботи динамічних систем широко розглядаються в теорії автоматичного керування та електропривода [1, 2]. При цьому як критерій оптимізації часто використовують функціонали, що характеризують енергетичні витрати або відхилення параметрів системи від заданих значень [1].

Метою роботи є розробка підходу до енергоефективного керування тяговим електроприводом трамвая з урахуванням профілю колії та зміни маси вагона.

Об'єктом дослідження є процес роботи тягового електроприводу трамвая.

Предметом дослідження є системи та конструктивні елементи тягового електроприводу, трамвая.

Основна частина

Динаміка руху трамвая може бути описана рівнянням тягового балансу для знаходження сумарної сили тяги [2]:

$$F_T = F_{\Sigma op} \pm F_a = F_{kоч} + F_{нов} + F_{підйом} \pm F_a \quad (1)$$

де $F_{\Sigma op}$ – сума сил опору руху; $F_{коч}$ – сила опору коченню; $F_{нов}$ – сила аеродинамічного опору; $F_{підйом}$ – сила опору підйому, F_a – інерційна складова.

$$F_{підйом} = mg \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

де, α – кут нахилу колії.

Сумарний момент, приведений до валу тягового двигуна визначається як сума статичної і динамічної складової:

$$M_{\deltaв} = M_{ст. \deltaв} + M_{дин. \deltaв} = \frac{F_{\Sigma op} \cdot R_k}{i \cdot \eta_{mp}} + J_{прив} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

де R_k – радіус колеса; i – передаточне число редуктора; η_{mp} – ККД трансмісії (передачі), $J_{прив}$ – приведений момент інерції, $M_{ст}$ – приведений статичний момент, необхідний для подолання основних сил опору руху, $M_{дин. \deltaв}$ – приведений динамічний момент, враховує навантаження при розгоні та обертові маси приводу.

Для підвищення енергоефективності роботи тягового електропривода пропонується формувати заданий момент на валу двигуна як суму сумарного моменту та коригувальної складової:

$$M_{\deltaв}^* = M_{\deltaв}(t) + M_{кор}(t), \quad (4)$$

Коригувальну складову моменту двигуна визначимо за виразом:

$$M_{кор}(t) = k_V (V^* - V(t)) + k_a (a^* - a(t)) + k_\alpha \sin \alpha(x) + k_m (m - m_0), \quad (5)$$

де V^* , $V(t)$ – задана та поточна швидкість руху; a^* , $a(t)$ – задане та поточне прискорення, k_V , k_a , k_α , k_m – коефіцієнти регулювання, m – поточна маса трамвая, m_0 – маса пустого трамвая, $\alpha(x)$ – поточний кут нахилу колії.

Коригувальна складова забезпечує стабілізацію швидкості та прискорення відносно заданого значення та врахування маси вагону і кута нахилу колії. Якщо трамвай не добирає швидкість, момент збільшується, якщо трапляється підйом, момент збільшується; якщо вагон більше завантажений, момент також збільшується; якщо маса зменшилась або ділянка з меншим кутом нахилу, то система не створює зайвого моменту, тобто не перевитрачає енергію. Такий підхід дозволяє формувати більш енергоефективний закон керування при зміні профілю колії та завантаження вагона.

Задача керування тяговим електроприводом може бути сформульована як оптимізаційна задача керування динамічним об'єктом [1]. При цьому критерій оптимізації визначається мінімізацією енергоспоживання електропривода і може бути представлений у вигляді функціонала:

$$J = \int_0^T P_{cn}(t) dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

де $P_{cn}(t) = U(t) \cdot I(t)$ – миттєва споживана електрична потужність двигуна.

Або:

$$J = \int_0^T (U(t) \cdot I(t) + \lambda_1 \cdot a^2(t) + \lambda_2 \cdot (M_{\deltaв}^*(t))^2) dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

де λ_1 , λ_2 – вагові коефіцієнти, які обмежують прискорення (для плавності руху) та величину моменту (для відсутності ривків).

Висновки

У роботі запропоновано підхід до енергоефективного керування тяговим електроприводом трамвая з врахуванням профілю колії та змінної завантаження вагона. Наведено математичну модель руху трамвая та залежність тягового моменту двигуна від сил опору руху. Запропоновано адаптивний закон формування тягового моменту та критерій оптимізації, що мінімізує енергоспоживання електропривода. Отримані результати можуть бути використані при модернізації систем керування тяговими електроприводами міського електротранспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації. Вінниця: ВНТУ, 2013. 210 с.
2. Далека В. Х., Мороз В. І., Карпенко В. О. Рухомий склад міського електричного транспорту. Механічна частина. Харків: ХНУМГ, 2018.
3. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. CRC Press, 2018.
4. Krishnan R. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control. Prentice Hall, 2001.
5. Енергетичні ресурси транспортних засобів. Навчальний посібник / С.М. Бойко, І.В. Касаткіна, О.А. Жуков, А.В. Реута, О. С. Лапіна – Варшава: iScience Sp. z.o.o. – 2024 – 319 с.

Шага Іван Миколайович – студент групи ЕМСА-22б, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: Vanyaps1360@gmail.com

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

Shaha Ivan M. - student of group EMSA-22b, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, e-mail: Vanyaps1360@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