

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Анотація

Отримано математичну модель взаємозв'язаної електромеханічної системи для дводвигунного індивідуального електроприводу транспортного засобу з урахуванням перехресних зв'язків та створено структурну схему для синтезу законів керування та моделювання статичних і динамічних режимів.

Ключові слова: математична модель, індивідуальний електропривод, перехресні зв'язки, взаємозв'язана електромеханічна система.

Abstract

The mathematical model of the interconnected electromechanical system for a two-motor individual electric vehicle drive with cross-linking was obtained, and the structural diagram for control algorithms synthesis and static & dynamic modes modeling was created.

Keywords: mathematical model, individual electric drive, cross-linking, interconnected electromechanical system.

Вступ

Останнім часом особливо актуальною стає заміна автомобільного транспорту з двигунами внутрішнього згоряння, які є значним джерелом забруднення навколишнього середовища через викиди парникових газів, монооксиду вуглецю та інших токсинів, на екологічно безпечні транспортні засоби - електромобілі. Маючи значно менший вплив на навколишнє середовище, електромобілі на даний час є основним рішенням проблеми створення транспортних засобів з низьким рівнем забруднення природи [1]. За попередні роки були удосконалені енергоефективність та керованість електричних наземних транспортних засобів за рахунок використання сучасних технологій та розробок.

Електричні наземні транспортні засоби можуть використовувати різні конфігурації приводної системи, що значно впливає на технічні характеристики електромобіля, його керованість та ефективність [2]. Більшість пасажирських електромобілів, представлених на ринку, використовують один приводний двигун, який розподіляє потужність на два або чотири колеса через коробку передач і диференціали. Це зменшує маневреність, керованість та надійність електромобіля, підвищує його вагу та вартість.

Однією з перспективних конфігурацій, що показала поліпшені характеристики роботи транспортного засобу, є використання індивідуально керованих двигунів для кожного з коліс (безпосередній або безредукторний привод) [3]. Дана концепція дозволяє покращити керованість транспортного засобу, підвищити точність вимірювання характеристик руху, оскільки кожен двигун може використовуватися як вимірювальний прилад для визначення власної швидкості та моменту. Основним напрямком покращення параметрів функціонування електромобілів є точна та швидка генерація крутного моменту як в прямому, так і в зворотному напрямках. Індивідуальний привод дозволяє проводити більш точні вимірювання та оцінки динаміки транспортного засобу при різних умовах дорожнього покриття для регулювання крутного моменту та швидкості електромобіля, що покращує продуктивність та керованість.

Переваги індивідуального приводу коліс можуть бути застосовані при розробці систем з розподілом крутного моменту між ведучими колесами електричного транспортного засобу за рахунок використання так званого електронного диференціалу. За рахунок вимірювання кута повороту машини, система керування розподіляє крутний момент у необхідному співвідношенні між ведучими колесами, що є ефективним засобом поліпшення динамічних характеристик електромобіля. Використання

індивідуального приводу коліс в поєднанні з системами оцінки кута повороту автомобіля є перспективним напрямком в наукових і комерційних дослідженнях та розробках.

Для синтезу законів керування та дослідження статичних та динамічних режимів автомобіля з індивідуальним електроприводом коліс необхідна розробка коректної математичної моделі електромобіля, як об'єкта керування взаємозв'язаної електромеханічної системи. Особливістю такої моделі є взаємозв'язок між локальними електроприводами коліс через загальний об'єкт керування – корпус електромобіля.

Метою даної статті є розробка математичної моделі взаємозв'язаної електромеханічної системи транспортного засобу з індивідуальним приводом коліс.

Результати дослідження

Для отримання математичної моделі електромобіля будемо розглядати переміщення транспортного засобу як плоско-паралельний рух твердого тіла. Це припущення зроблено для спрощення системи рівнянь, що описують рух.

Прийmemo, що автомобіль знаходиться в двовимірній системі координат та апроксимуємо його прямокутним твердим тілом. Розгляд рівнянь динаміки автомобіля проводиться тільки для проєкцій горизонтальних складових зовнішніх сил на вісь Y (у напрямку руху транспортного засобу), оскільки сили тяги електродвигунів діють лише вздовж цієї осі.

Плоско-паралельний рух можна розкласти на поступальний та обертальний навколо центру мас (полюсу), тому справедливим буде твердження, що швидкість будь-якої точки твердого тіла, що здійснює плоско-паралельний рух, дорівнює геометричній (векторній) сумі швидкості полюса і лінійної швидкості цієї точки в її обертанні навколо полюса [4].

Кожне з приводних коліс прикладає до транспортного засобу силу тяги, яка призводить до приросту координати по осі Y (переміщення) за рахунок абсолютного переміщення та обертання навколо центру мас (рис. 1).

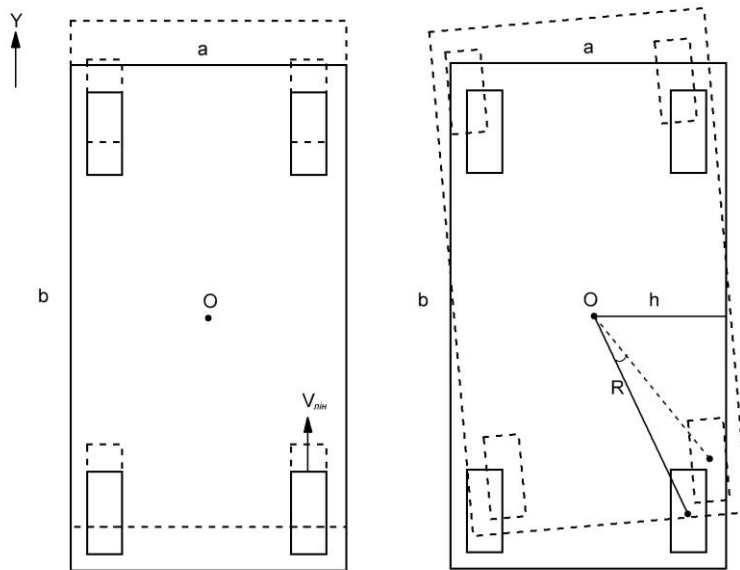


Рис. 1. Представлення електромобіля у двовимірній системі координат

Як бачимо, двигун кожного мотор-колеса змушує рухатись автомобіль разом з центром мас вперед та одночасно обертатись навколо нього. Нехай α – кут повороту, a і b – відповідно ширина та довжина автомобіля. Тоді запишемо геометричні співвідношення

$$h = \frac{a}{2}; \quad R = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2}. \quad (1)$$

Рівняння динаміки автомобіля для плоско-паралельного руху можуть бути представлені у вигляді

$$m \frac{d^2 Y_c}{dt^2} = \sum N_{iY}^l, \quad (2)$$

$$J_Z \frac{d\omega_Z}{dt} = M_Z^l = \sum N_{iY}^l h_i, \quad (3)$$

де N_{iY}^l – сили тяги електродвигунів в напрямку Y і проєкції збурюючих сил, прикладених в i -й точці платформи на вісь Y; h_i – плечі сил N_{iY}^l відносно центра мас автомобіля; J_Z – момент інерції автомобіля відносно осі Z.

Для переходу від приросту кута $\Delta\alpha$ до приростів координат k -х точок машини ΔY_k^α , скористаємося співвідношенням

$$\Delta Y_k^\alpha = l_{kZ} \Delta\alpha \cos \alpha_{ko}, \quad (4)$$

де l_{kZ} – відстань k -ї точки до осі Z; α_{ko} – кут між віссю X і прямою l_{kZ} .

З врахуванням (4), рівняння (3) може бути записане для приросту координати ΔY_k^α у вигляді

$$J_Z \frac{d^2 \Delta Y_k^\alpha}{dt^2} = \Delta N_{iY} h_i l_{kZ} \cos \alpha_{ko}. \quad (5)$$

Повний приріст координати k -ї точки в операторній формі для платформи довільного вигляду отримуємо, розв'язуючи сукупно (2) і (5)

$$\Delta Y_k = \Delta Y_c + \Delta Y_k^\alpha = \frac{1}{p^2} \Delta N_{iY} \left(\frac{1}{m} + \frac{h_i l_{kZ} \cos \alpha_{ko}}{J_Z} \right). \quad (6)$$

При рівномірно розподіленому навантаженні рівняння (5) може бути перетворене наступним чином

$$\Delta Y_k = \frac{1}{mp^2} \left(1 \pm \frac{3h_i l_{kZ} \cos \alpha_{ko}}{l^2} \right), \quad (7)$$

де $J_Z = \frac{m(a^2 + b^2)}{3} = \frac{ml^2}{3}$ – момент інерції прямокутного тіла відносно осі Z; l – половина діагоналі платформи. Знак « \pm » свідчить про те, що приріст «невласних» координат коліс може бути як додатним, так і від'ємним.

Структурна схема механічної частини дводвигунного незалежного електроприводу автомобіля з урахуванням перехресних зв'язків представлена на рис. 2.

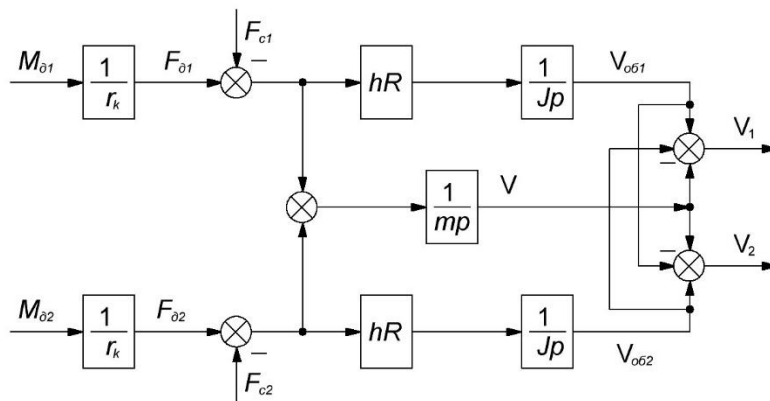


Рис. 2. Повна структурна схема електромобіля у двовимірній системі координат

Зі структурної схеми рис. 2 видно, що сума тягових зусиль обох двигунів змушує рухатись автомобіль у заданому напрямку (абсолютне переміщення), і разом з цим кожен двигун створює обертове зусилля, яке в свою чергу створює позитивний приріст координати переміщення відповідного привідного колеса і негативний приріст для іншого, що безпосередньо і є перехресними зв'язками.

Визначимо передаточні функції даних перехресних зв'язків. Було прийнято, що автомобіль є прямокутним твердим тілом. Тоді його момент інерції навколо осі, що проходить через центр мас, дорівнює

$$J = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \quad (8)$$

Об'єднавши формули (1) та (8), маємо

$$\frac{h \cdot R}{J} = \frac{a\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot 2 \cdot m(a^2 + b^2)} = \frac{3a\sqrt{a^2 + b^2}}{m(a^2 + b^2)^2} = \frac{3a}{m\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (9)$$

Знаючи масу, довжину і ширину автомобіля, отримаємо наступні коефіцієнти перехресних зв'язків

$$k = \frac{3a}{m\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{1}{m\sqrt{\frac{1}{9} + \frac{b^2}{9a^2}}} = \frac{1}{m\sqrt{\frac{1}{9} + \frac{4.2^2}{9 \cdot 1.8^2}}} = \frac{1}{0.74mp}. \quad (10)$$

Спрощена структурна схема, яку отримано після перенесення зв'язків на вхід і обчислення коефіцієнтів перехресних зв'язків двох тягових двигунів, зображена на рис. 3.

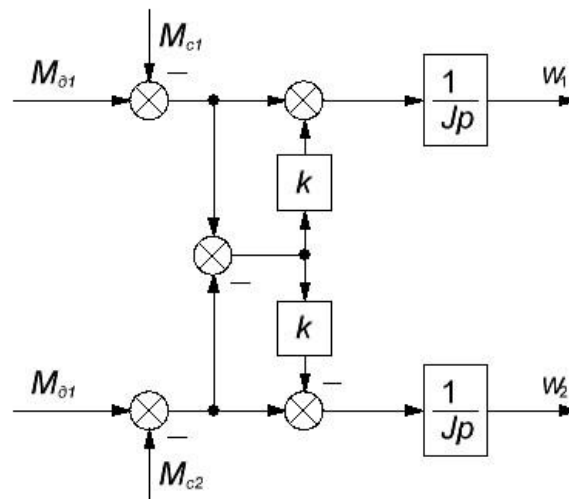


Рис. 3. Структурна схема електромобіля у двовимірній системі координат

Висновки

На основі аналізу законів руху транспортного засобу, як вільного твердого тіла, отримано математичну модель взаємозв'язаної електромеханічної системи для дводвигунного індивідуального електроприводу транспортного засобу. Визначені передаточні функції перехресних зв'язків та створено структурну схему, яка дає можливість здійснювати синтез законів керування та моделювання статичних і динамічних режимів взаємозв'язаної електромеханічної системи електромобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fareeduddin, Mohammed & Selim, Shokri & Hassan, Adnan & Syed, N. Mujahid. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 51. 146-172. 10.1016/j.trd. 2016.10.033.

2. C.C. Chan and K.T. Chau. Modern electric vehicle technology. Oxford University press, Oxford, 1st edition, 2001.
3. McTrusty, Sean Christifor, Modelling and control of electric vehicles with individually actuated in-wheel motors, Master of Philosophy thesis, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong, 2016.
4. I. Husain. *Electric and Hybrid Vehicles*. CRC Press LLC, Florida, 1st edition, 2003.

Теряєв Віталій Іванович — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: kprivit@gmail.com

Сорока Павло Ігорович — студент групи ЕП-91мп, факультет електроенергетехніки та автоматики, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, e-mail: sorokapavv@gmail.com

Teriaiev Vitalii I. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Electromechanical System Automation and Electrical Drives, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv

Soroka Pavlo I. — Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, email: sorokapavv@gmail.com