

УДК 651.3:518.5

Назарова О.С., Осадчий В.В., Брилистий В.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

E-mail: nazarova16@gmail.com, w.osadchiy@gmail.com, 77vitya77@gmail.com

ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЧОТИРИПРИВІДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Одним з основних завдань розвитку електричного транспортного засобу є збільшення пробігу без підзарядки і поліпшення показників керованості і маневреності, а також безпеки пасажирів і умов перевезення вантажу. Збільшення пробігу може бути досягнуто як за рахунок вдосконалення акумуляторної батареї, так і шляхом підвищення енергоефективності електроприводу. Метою роботи є підвищення керованості транспортного засобу шляхом застосування чотириприводної установки, що дозволяє перерозподіляти крутний момент між приводними колесами. Проаналізовано тенденції розвитку сучасних електромобілів. На підставі проведеного аналізу, доведено доцільність застосування чотириприводної силової установки в сучасному електромобілі і розробки для даного типу силової установки системи автоматичного керування розподілом крутного моменту.

Ключові слова: автомобільна промисловість, електричний транспортний засіб, електромобіль, система автоматичного управління, крутний момент, електропривод, повний привід, 4 двигуни.

O. Nazarova, V. Osadchii, V. Brilistyy. Justification for the use of a 4-drive power plant for electric vehicles

Abstract. One of the main tasks for the development of an electric vehicle is to increase the mileage without recharging and to improve the handling and maneuverability, as well as the safety of passengers and the conditions of cargo transportation. Increased mileage can be achieved both by improving the battery and by improving the energy efficiency of the drive. The purpose of the work is to increase the steering of the vehicle through the use of four-wheel drive, which allows you to redistribute torque between the drive wheels. Trends in the development of modern electric vehicles are analyzed. Based on the analysis, the feasibility of using a four-drive power plant in a modern electric vehicle and development for this type of power plant, a system for automatic control of torque distribution was proved.

Keywords: automotive, electric vehicle, electric car, automatic control system, torque, electric drive, four-wheel drive, 4 engines.

Е.С. Назарова, В.В. Осадчий, В.В. Брылистый. Обоснование применения 4-х приводной силовой установки для электрических транспортных средств.

Одной из основных задач развития электрического транспортного средства является увеличение пробега без подзарядки и улучшения показателей управляемости и маневренности, а также безопасности пассажиров и условий перевозки груза. Увеличение пробега может быть достигнуто как за счет совершенствования аккумуляторной батареи, так и путем повышения энергоэффективности электропривода. Целью работы является повышение управляемости транспортного средства путем применения четырехприводной установки, позволяет перераспределять крутящий момент между приводными колесами. Проанализированы тенденции развития современных электромобилей. На основании проведенного анализа, доказана целесообразность применения четырехприводной силовой установки в современном электромобиле и разработки для данного типа силовой установки системы автоматического управления распределением крутящего момента.

Ключевые слова: автомобильная промышленность, электрическое транспортное средство, электромобиль, система автоматического управления, крутящий момент, электропривод, полный привод, 4 двигателя.

Постановка проблеми. Сучасний стан світового ринку транспортних засобів характеризується істотним збільшенням частки електричних транспортних засобів (ЕТС) в

загальному обсязі виробництва. Одними з основних завдань розвитку ЕТС є збільшення пробігу без підзарядки і поліпшення показників безпеки пасажирів і умов перевезення вантажу. Збільшення пробігу може бути досягнуто як за рахунок вдосконалення акумуляторної батареї так і шляхом підвищення енергоефективності електроприводу. Безпека пасажирів в значній мірі залежить від керованості транспортного засобу. Тому актуальною проблемою є підвищення показників керованості та енергоефективності ЕТС засобами електроприводу. Пропоноване рішення даної проблеми - використання 4-х приводних силової установки в якості базової і розробка, під дану силову установку, системи автоматичного управління розподілу крутним моментом.

Порівняльний аналіз літературних джерел показав недостатню освітленість питання розробок систем управління крутним моментом саме 4-х приводних силових установок. Досліджувані джерела умовно структуровані за категорією відповідно до тематики.

До 1-ї категорії можна віднести огляд і вибір тягових силових установок для електромобіля. Основною ідеєю, що об'єднує зазначені джерела, є застосування в якості тягової установки для електромобіля синхронного двигуна на постійних магнітах (СМПМ), який має низку істотних переваг щодо двигунів інших конструкцій, описаних в джерелах, а саме: високий ККД, тривалий термін служби, низький рівень шуму.[1-2] Недоліком є його висока вартість через використання в конструкції рідкоземельних металів. Незважаючи на це СМПМ - перспективна для електромобіля.

До другої категорії відноситься огляд і вибір бортових систем управління та систем управління тяговим приводом сучасних електромобілів [3-4].

Джерела, описані в 3-й категорії, на підставі сформованих завдань, цілей і початкових умов призводять розрахунки механічних параметрів вузлів транспортного засобу і елементів трансмісії. Важливим в даній тематиці є стаття [5], що представляє концепцію високоефективної трансмісії з урахуванням динаміки руху. Робота [6] демонструє результати експериментального дослідження по ефективності коробки передач електромоторів.

Цікавою з точки зору результатів дослідження, є 4-я категорія літературних джерел, присвячена результатам реальних експериментів, так як носить суперечливий характер. Наприклад, в статті [7] у висновках вказано «великий соціальний ефект» від масової модернізації автомобіля шляхом заміни ДВС на ЕП (конвертація), який, за підсумком, повинен активізувати малий і середній бізнес з виробництва такої модернізації. Однак в авторефераті [9] аналітично і досвідченим шляхом доведено, що метод часткової або повної конвертації автомобіля в електромобіль нівелює більшу частину переваг електроприводу щодо ДВС.

Важливо відзначити роботи [8], [10], що використовують схожу ідею 4-х приводних силової установки, але має принципову відмінність - використання в якості приводів мотор - колеса, що в даному дослідженні неприпустимо. Без пружинна маса мотор-коліс знижує комфорт і керованість, підвищує знос підвіски, передає вібрації на кузов. Відповідно виведення з ладу мотор - колеса вимагає чималих коштів на ремонт і знижує гнучкість експлуатації транспортного засобу.

Таким чином, недостатня освітленість питання застосування 4-х приводних установки, в якості базової на сучасному ЕТС, як способу підвищення показників керованості та енергоефективності ЕТС засобами електроприводу, визначає мету дослідження.

Метою роботи є підвищення керованості транспортного засобу шляхом застосування 4-х приводних установки, що дозволяє перерозподіляти крутний момент між приводними колесами.

З метою максимальної реалізації переваг електроприводу, як основний силовий установки транспортного засобу, сформульовані основні вимоги до системи автоматичного керування (САК) силової установки і до транспортного засобу: високі показники керованості і прохідності транспортного засобу; забезпечення максимального рівня безпеки водія і пасажирів, що знаходяться в транспортному засобі і учасників руху; мінімізація витрат енергії в різних режимах їзди; відповідність показника ціна / якість ситуації, що склалася на ринку електромобілів; економічно обгрунтоване використання електроприводу і мікропроцесорних систем управління замість механічних вузлів управління моментом; максимально можливий облік в конструкції транспортного засобу вимог по компоновці елементів електроприводу.

Досвід багатьох світових автовиробників показує, що повнопривідні системи краще справляються із зазначеними вимогами в порівнянні з окремо заднім і окремо переднім приводом.

Завдяки габаритними показниками сучасних електромоторів можливе використання на транспортному засобі кілька силових установок, що дозволяє зменшити кількість механічних вузлів, реалізуючи їх функції передачі моменту від двигуна до коліс засобами автоматизованого

електроприводу. Підтвердженням цьому служить тенденція збільшення кількості приводів в сучасних електромобілях. Останні моделі мають мінімум двома силовими установками.

Прагнення автовиробників керувати обертовим моментом кожного колеса окремо дозволить їм в результаті отримати продукт, який має найкращі показники в керованості, прохідності, безпеки, комфорту і витрати енергії, а значить бути передовим на сучасному ринку електромобілів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: визначення структури САК розподілу моментом; визначення залежності допустимих моментів коліс від швидкості руху і радіуса повороту автомобіля; вибір тягових двигунів в залежності від конструкційних особливостей, потужних показників і енергетичних витрат.

Структура САК розподілу крутного моменту 4-и приводної силової установки представлена на рис. 1., де K_A - положення педалі акселератора, K_B - положення педалі гальма, φ_S - кут повороту рульового колеса, Torque control system (TCS) - мікропроцесорна система керування розподілом моменту, Drive - електропривод, Wheel - колесо.

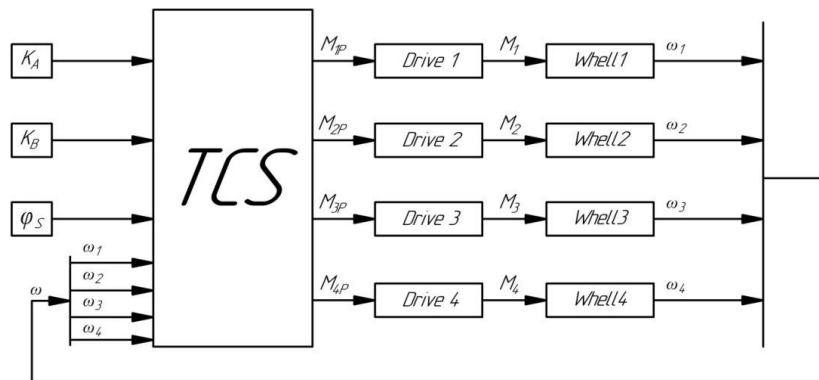


Рис. 1. Структурна схема САК.

При математичному описі об'єкта прийняті наступні допущення: центр мас знаходиться в геометричному центрі ТЗ, каркас ТС абсолютно жорсткий, коефіцієнт тертя спокою між колесом і дорожнім покриттям відомий і однаковий для всіх коліс.

На рис. 2 представлені сили, що діють на транспортний засіб в повороті, де A - поперечне відстань між центрами коліс ТЗ (колія), B - поздовжнє відстань між центрами коліс ТЗ (база), C - відстань від внутрішнього колеса до центру повороту ТЗ, висота центру мас - H .

Необхідно вивести формули сил, тягнуть транспортний засіб в поворот ($F_{p1}, F_{p2}, F_{p3}, F_{p4}$), Визначити максимальну силу тяги (F_{Tmax}), Яку можна подавати на колесо до моменту пробуксовки, з урахуванням перерозподілу реакцій опор (N_1, N_2, N_3, N_4) в повороті.

Виходячи з рис. 2, можна визначити кути поворотів колеса 1 (1) і колеса 2 (2), кут між вектором центроспрямованої сили і віссю задніх коліс (3), а також обчислити радіус повороту (4) за формулами:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{B}{C}, \quad \varphi_2 = \arctan \frac{B}{A+C}, \quad \varphi_0 = \arctan \frac{B/2}{A/2+C}, \quad R = \sqrt{\left(\frac{A}{2}+C\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (1)$$

З метою знаходження сил $F_{p1}, F_{p2}, F_{p3}, F_{p4}$, Необхідно перерозподілити доцентрову силу на передню вісь (F_{p12}) і задню (F_{p34}), Що представлено на рис. 2.

Необхідно знайти сили F_{p12} і F_{p34} , Які є геометричній сумою $F_{Cp.F.}$ і визначити кут φ_{12} - як кут між вектором $\overline{F_{p12}}$ і віссю задніх коліс (2).

$$\overline{F_{Cp.F.}} = \overline{F_{p12}} + \overline{F_{p34}}, \quad \varphi_{12} = \arctan \frac{B}{A/2+C} \quad (2)$$

Складемо систему рівнянь, де перше рівняння системи відображає проекцію сил на вісь X, а друге – на вісь Y (3):

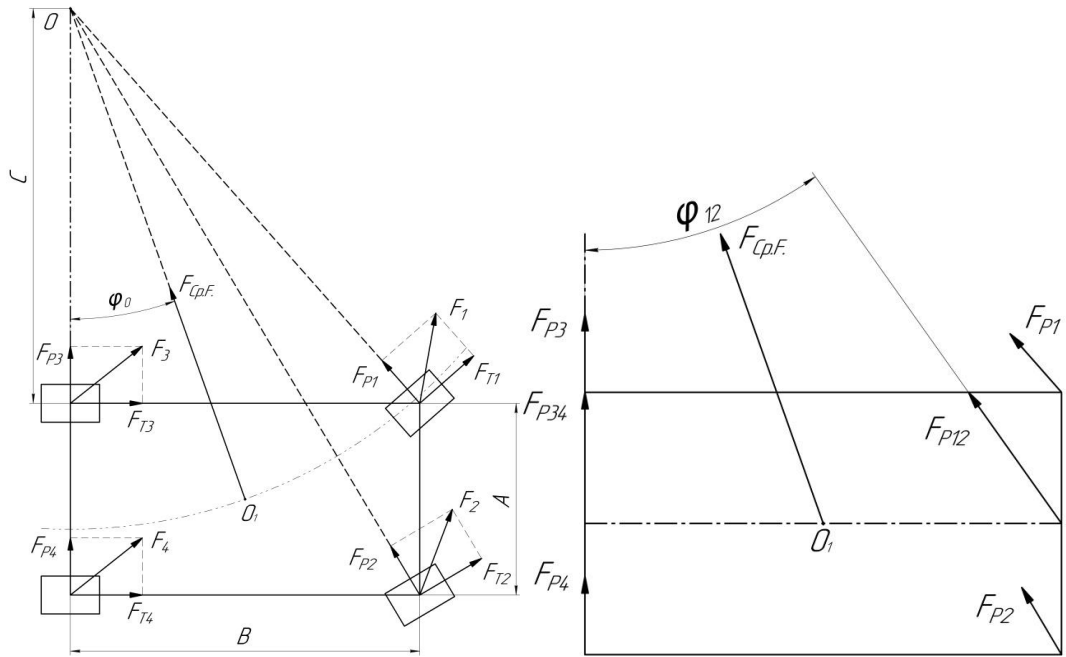


Рис. 2. Сили, що діють в повороті.

$$\begin{cases} -\sin \varphi_0 \cdot F_{CP.F.} = -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} + 0 \\ \cos \varphi_0 \cdot F_{CP.F.} = \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} + F_{P34} \end{cases} \quad (3)$$

Рішенням системи рівнянь (3) є матриця (5), отримана з (4):

$$X_1 = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{12} & 0 \\ \cos \varphi_{12} & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi_0 \cdot F_{CP.F.} \\ \cos \varphi_0 \cdot F_{CP.F.} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$X_1 = \begin{pmatrix} F_{P12} \\ F_{P34} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Так як F_{P12} - геометрична сума сил F_{P1} і F_{P2} (6), можна знайти F_{P1} і F_{P2} за допомогою системи рівнянь (7).

$$\overline{F_{P12}} = \overline{F_{P1}} + \overline{F_{P2}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} = -\sin \varphi_1 \cdot F_{P1} - \sin \varphi_2 \cdot F_{P2} \\ \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} = \cos \varphi_1 \cdot F_{P1} + \cos \varphi_2 \cdot F_{P2} \end{cases} \quad (7)$$

Система рівнянь (7) так само має матричне рішення представлене (8).

$$X_2 = \begin{pmatrix} -\sin \varphi_1 & -\sin \varphi_2 \\ \cos \varphi_1 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi_{12} \cdot F_{P12} \\ \cos \varphi_{12} \cdot F_{P12} \end{pmatrix}, \quad X_2 = \begin{pmatrix} F_{P1} \\ F_{P2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

для сил F_{P3} , F_{P4} і F_{P34} знаходяться на одній осі, приймаємо, що сили F_{P3} , F_{P4} рівні і обчислюються за формулою (9):

$$\overline{F_{P3}} = \overline{F_{P4}} = \frac{\overline{F_{P34}}}{2} \quad (9)$$

Відомо, що в повороті на колеса, які їдуть по зовнішньому радіусу сила впливу більше, ніж на внутрішні. Це пов'язано з перекидаючим моментом, створюваним відцентровою силою ($F_{CF.F.}$). Що представлено на рис. 3.

Внаслідок цього, на зовнішні колеса можна подавати момент більше, а з внутрішніх знімати, так як зчеплення з покриттям зовнішніх коліс краще. З метою внесення цієї закономірності в САК, необхідно представити у вигляді формул (10-13), що відображають зміни сил реакцій опор в повороті.

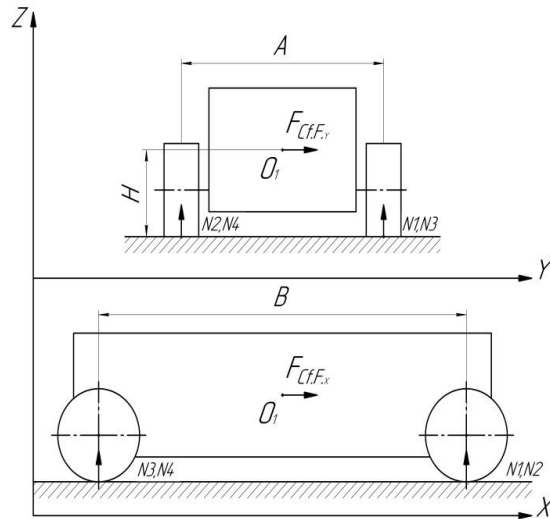


Рис. 3. Вплив відцентрової сили на транспортний засіб.

$$N_1 = \frac{mg}{4} + F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} + F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{B} \quad (10)$$

$$N_2 = \frac{mg}{4} + F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} - F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{B} \quad (11)$$

$$N_3 = \frac{mg}{4} - F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} + F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{A} \quad (12)$$

$$N_4 = \frac{mg}{4} - F_{Cf.F.x} \cdot \frac{H}{B} - F_{Cf.F.y} \cdot \frac{H}{A} \quad (13)$$

Виходячи з отриманих даних, визначимо сили (F_1, F_2, F_3, F_4) як геометрична сума сили тяги (F_{T_i}) і сили тягне в поворот (F_p) за формулою (14)

$$F_i^2 = F_{T_{max_i}}^2 + F_p^2 \quad (14)$$

Для знаходження максимальної можливої сили тяги, яку можна подати на колесо без пробуксовки необхідно записати результуючу силу через умова пробуксовки виражене у формулі (15).

$$F_{T_i} \geq N_i \mu \quad (15)$$

Максимальна сила тяги на колесі дорівнює (16):

$$F_{T_{max_i}} = \sqrt{(N_i \mu)^2 - F_{T_i}^2} \quad (16)$$

Максимальний момент на колесі визначимо за формулою (17), де D - діаметр колеса.

$$M_{\max_i} = \frac{F_{T\max_i} \cdot D}{2} \quad (17)$$

Отже, запропонована структура САК розподілу крутного моменту і аналітичні вирази, що визначають допустимі значення моментів коліс є основою для математичного моделювання електромеханічних процесів в автоматизованому електроприводі.

ВИСНОВКИ

Запропонована структура системи керування 4-и приводної силової установки, що дозволяє перерозподіляти крутний момент між приводними колесами. Отримано аналітичні вирази для визначення максимального моменту на колесі, що враховують колію, базу, висоту центру мас і радіус повороту, що забезпечують максимальне прискорення транспортного засобу, виключаючи пробуксовку коліс.

Подальші дослідження плануються в напрямку розробки системи автоматичного керування 4-и приводною силовою установкою електромобіля, отримання і оцінки кількісних показників енергоефективності та керованості транспортного засобу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Veer Singh, Krishna & Bansal, Hari & Singh, Dheerendra. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. Journal of Modern Transportation, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331623927_A_comprehensive_review_on_hybrid_electric_vehicles_architectures_and_components (Accessed 25.03.2019)
2. El Idrissi Z & El Fakil, Hassan & Giri, Fouad. Nonlinear control of salient-pole PMSM for electric vehicles traction. 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). 2018, pp. 231-236.
3. Shumov Yu.N. Energosberigayushchiye elektricheskkiye mashiny [Energy saving electric machines]. Elektrichestvo, 2015-ro, no.4, pp. 45-47. (In Russian).
4. Ahmad, Furkan & Alam, Mohammad & M. Shariff, Samir. A Cost-efficient Energy Management System for Battery Swapping Station. IEEE Systems Journal, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331506460_A_Cost-efficient_Energy_Management_System_for_Battery_Swapping_Station (Accessed 25.03.2019)
5. Nazari, Shima & Stefanopoulou, Anna & Martz, Jason & J. Middleton, Robert. The elusive consequences of slow engine response on drive cycle fuel efficiency, 2018. Available at: https://www.researchgate.net/publication/325661803_The_elusive_consequences_of_slow_engine_response_on_drive_cycle_fuel_efficiency (Accessed 25.03.2019)
6. Jandura, Pavel & Břoušek, Josef & Bukvic, Martin. The concept of a highly efficient powertrain for an electric vehicle with respect to vehicle driving dynamics. International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. The High Tatras, 2015, pp. 422-429.
7. Břoušek, Josef & Zvolský, Tomáš. Experimental study of electric vehicle gearbox efficiency. MATEC Web of Conferences, 2018. Available at: https://www.researchgate.net/publication/329097934_Experimental_study_of_electric_vehicle_gearbox_efficiency (Accessed 25.03.2019)
8. Klepikov VB, Gonchar AS, Semikov AV, Moiseyev AN, Kastornyy PM, Timoshchenko AV, Pshenichnikov DA, Kovtun VV, Banev Ye.F., Khoreva AV Iz opyta sozdaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [From the experience of creating an electric drive electromotive with a supercondenser energy storage device]. Visnyk NTU "KHPI", 2015, no.12, pp. 195-198.
9. Gur'yanov DI Optimizatsiya upravleniya elektromobilyami maloy gruzopod "yemnosti s privodami postoyannogo toka. Avtoref. Diss. Kand. Tekhn. Nauk. [Optimization of control of low-capacity electric vehicles with direct-current drives. Author. Diss. Candidate of Technical Sciences.] Moscow, 1992. p. 19.
10. Carlos Montero, David Marcos, Carlos Bordons, Miguel A. Ridaó, EF Camacho, Elena Gonz'alez and Alejandro Oliva [Modeling and Torque Control for a 4-Wheel-Drive Electric Vehicle]. Department of Systems Engineering and Automatic Control University of Seville, Spain, pp2650-2655 doi: 10.1109 / ICIT.2015.7125488.
11. De Pinto S., Camocardi P, Sornioti A., Mantriota G., Perlo P., Viotto F. [A Four-Wheel-Drive Fully Electric Vehicle Layout with Two-Speed Transmissions] Department of Mechanical Engineering Sciences. University of Surrey. Guildford, United Kingdom. Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management. Politecnico di Bari. Bari, Italy. Interactive Fully Electrical Vehicles (IFEVS). Torino e-District. Torino, Italy. EV & HEV Transmissions - Automotive Applications. Oerlikon Graziano SpA. Torino, Italy. Conference Paper, December 2014 doi: 10.1109 / VPPC.2014.7006997.