

ВИМІРЮВАННЯ КРУТНОГО МОМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЕЙ

БРИЛИСТИЙ В.В. аспірант кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e-mail: 77vitya77@gmail.com;

НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e-mail: nazarova16@gmail.com;

ОСАДЧИЙ В.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна , e-mail: w.osadchiy@gmail.com;

Мета роботи. Розробка вузла вимірювання крутного моменту, у складі лабораторного комплексу для дослідження енергетичних характеристик електроприводів з метою математичного моделювання динамічних режимів роботи приводу електричного транспортного засобу.

Методи дослідження. Фізичний експеримент, регресійний аналіз, інтерполяція.

Отримані результати. Розроблено вузол вимірювання крутного моменту у складі лабораторного комплексу дослідження енергетичних характеристик приводів електричних транспортних засобів, конструкція якого дозволяє створювати крутний момент на валу досліджуваного двигуна за допомогою навантажувального і вимірювати його тензометричним датчиком сили. Лабораторний стенд разом із розробленим вузлом вимірювання моменту відповідає необхідному діапазону та точності вимірювань. Отримані на стенді експериментальні дані дозволяють визначити залежність споживаної електроприводом енергії від механічної потужності на валу досліджуваного двигуна, що дає можливість аналітично описати досліджуваний привод і провести математичне моделювання в контексті дослідження впливу механічних параметрів на спожиту енергію в динамічних режимах роботи.

Наукова новизна. Розроблено спосіб вимірювання крутного моменту на валу двигуна для дослідження енергетичних характеристик приводів електричних транспортних засобів. Вказаний спосіб базується на контактному методі вимірювання, який використовує 2 двигуна (навантажувальний і досліджувальний) та тензометричний датчик сили, відрізняється від інших конструкцією, що створює момент на валу досліджуваного двигуна. Результатом обробки експериментальних даних, отриманих даним способом, є аналітична залежність споживаної приводом енергії від значення механічної потужності на валу, параметрами якої є кутова швидкість і крутний момент двигуна. Зазначена енергетична характеристика приводу дозволяє шляхом математичного моделювання визначити електромеханічні параметри приводу, що мінімізують його енергоспоживання у динамічних режимах роботи.

Практична цінність. Запропоновано спосіб вимірювання моменту на валу двигуна, за допомогою якого визначена в аналітичному вигляді залежність енергії, що споживається приводом, від механічної потужності на валу двигуна. Це дозволяє шляхом математичного моделювання знайти електромеханічні параметри системи, що підвищують енергоефективність приводу електричного транспортного засобу.

Ключові слова: електропривод; вимірювання моменту; електромобіль; енергетична характеристика; лабораторний стенд.

I. ВСТУП

Підвищення попиту електричних транспортних засобів сприяє зростанню конкуренції у відповідному сегменті автомобільного ринку.

Актуальними питаннями є підвищення безпеки керування та збільшення запасу ходу електротранспорту. Як і в економічному розвитку, існують 2 шляхи вирішення зазначених проблем: екстенсивний та інтенсивний.

Екстенсивний шлях характеризується, так званим, збільшенням обсягів, масштабів чогось, тобто

кількісне поліпшення. З погляду електротранспорту екстенсивним і методами можна назвати збільшення обсягу батареї, як спосіб підвищити запас ходу або збільшення маси транспортного засобу, з метою добитися стійкого керування, тим самим підвищивши безпеку водіння.

Інтенсивний шлях розвитку – метод якісного вдосконалення. Під цю категорію потрапляють методи, у яких досліджуються особливості об'єктів керування та виходячи з отриманих даних розробляються заходи щодо поліпшення досліджуваних параметрів/критеріїв.

У цій роботі пропонується інтенсивний шлях розвитку технологій електротранспорту, а саме дослідження енергетичних характеристик приводів електромобілів, шляхом експериментального визначення функції приводу, що відображає залежність споживаного приводом струму від значення актуальної механічної потужності на валу двигуна.

Відомо, що в динаміці ефективність перетворення електричної енергії на механічну різна через перерозподіл електричних та електромагнітних втрат при зміні частоти обертання ротора [1]. З метою дослідження енергоефективності приводу в динамічних режимах роботи розроблено лабораторний стенд з вузлом вимірювання та створення моменту навантаження на валу досліджуваного двигуна, що дозволяє експериментальним шляхом визначити аналітичну характеристику приводу (системи ПЧ – Д), в досліджуваному діапазоні роботи двигуна.

Отримана характеристика дозволить провести математичне моделювання динамічних режимів роботи електричного транспортного засобу [2], [3] та здійснити пошук коефіцієнтів редукторів та потужностей двигунів, що забезпечують при розгоні від 0 до 100 км/год мінімальне споживання енергії, що визначає актуальність поставленого завдання.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Враховуючи стрімкий розвиток технологій на даний момент існує безліч різних способів вимірювання крутного моменту на валу двигуна, незважаючи на складність такого роду вимірювання. Здебільшого, рішення полягають у створенні виробниками спеціалізованих датчиків, що відрізняються високою вартістю на ринку та складним принципом роботи. У той же час при обранні датчиків доводиться шукати компроміс між необхідним діапазоном вимірювання та чутливістю через зменшення діапазону зі збільшенням чутливості і навпаки [4]. Багато розробок призначені для вузької спеціалізації, так у роботах [5]-[8] розроблені датчики для медичних цілей в джерелі [9] розроблений датчик з 6-ма ступенями свободи, для мікроманіпуляцій та визначення сили у хірургічних швах. У роботі [10] автори використовують оптичні прилади для вимірювання моменту на валу, уникаючи механічного втручання. Немалу кількість різноманітних варіацій конструкцій датчиків демонструє роботехнічна галузь. Автори робіт [11]-[12] застосували ідею платформи Г'ю-Стюарта та розробили багатоосовий датчик. У роботах [13]-[14] розроблений датчик застосовано до гідравличного чотирилапого роботу. Також існують датчики низької вартості, на думку авторів [15], розроблених для станку з числовим програмним забезпеченням. Роботи [16]-[17] описує переваги безконтактних методів вимірювання крутного моменту та їх зразки.

З огляду на характерну вузьку спрямованість при розробці методу вимірювання моменту або вибору відповідного датчика, актуальним є розробка методу вимірювання моменту з точки зору дослідження енергетичної характеристики приводу.

Що стосується розгляду приводу з погляду витрат енергії, з проведеного аналізу можна дійти висновку, що досліди мають галузеву специфіку і розглядаються у межах області застосування та рідко афішуються. Що стосується автомобільної галузі, подібні дослідження відображаються в [18], що описують, характеристики приводів вже серійних транспортних засобів.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробити вузол вимірювання моменту у складі лабораторного стенду дослідження енергетичних характеристик приводів.

На базі розробленого стенду, експериментальним шляхом визначити функцію приводу ЕТС, що відображає залежність енергії, що витрачається, на одиницю механічної потужності, з метою визначення значення коефіцієнта редуктора, що забезпечує мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год, шляхом математичного моделювання.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Об'єкт дослідження – електропривод 4-х приводного електромобіля, структура якого представлена на рисунку 1.

Основні елементи – батарея як джерело електричної енергії; електропривод, що складається з: системи ПЧ – Д, редуктор – як перетворювач електричної енергії в механічну та колесо як виконавчий орган.

Запропоноване рішення підвищення енергоефективності приводу, полягає у визначенні функції приводу, яка як частина математичної моделі, дозволить визначити споживання енергії при розгоні транспортного засобу від 0 – 100 км/год. Аналітичний вид цієї функції представлений (1)

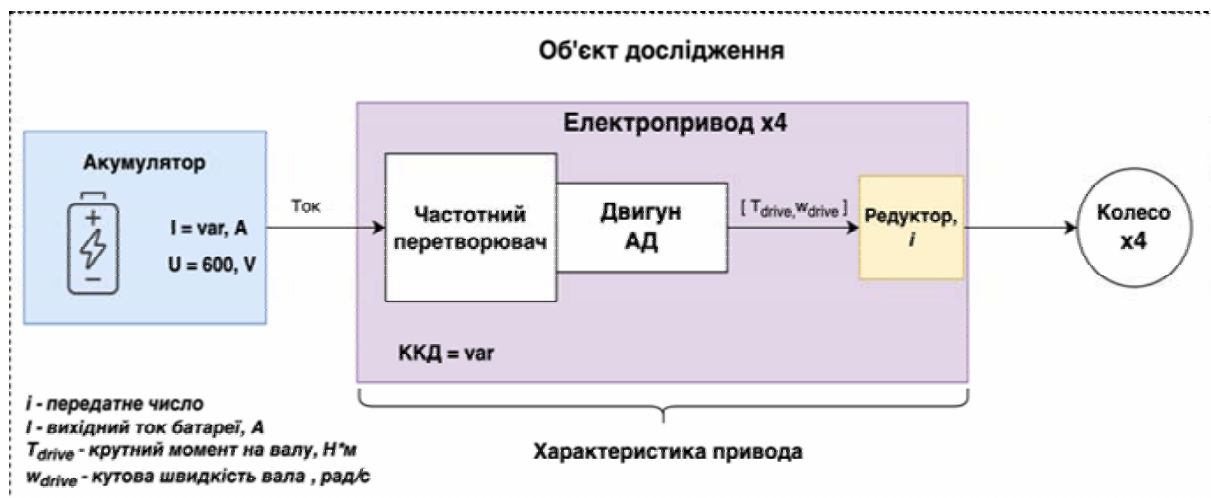
$$I = f(T_{drive}, \omega_{drive}), \quad (1)$$

де I - значення споживаного струму приводом, А;

T_{drive} - значення моменту на валу досліджуваного двигуна Н·м;

ω_{drive} - значення кутової швидкості валу досліджуваного двигуна рад/с.

Далі за допомогою математичного моделювання буде побудовано залежність споживаної електричної енергії від коефіцієнтів редукторів та визначено мінімум зазначеної залежності. Структура описаного рішення представлена на рисунку 2.



Предмет дослідження:
 Енергоефективність привода електромобіля при розгоні від 0-100км/год за 5 секунд

Рисунок 1. Структурна схема об'єкта дослідження

Предмет дослідження:
 Енергоефективність привода електромобіля при розгоні від 0-100км/год за 5 секунд

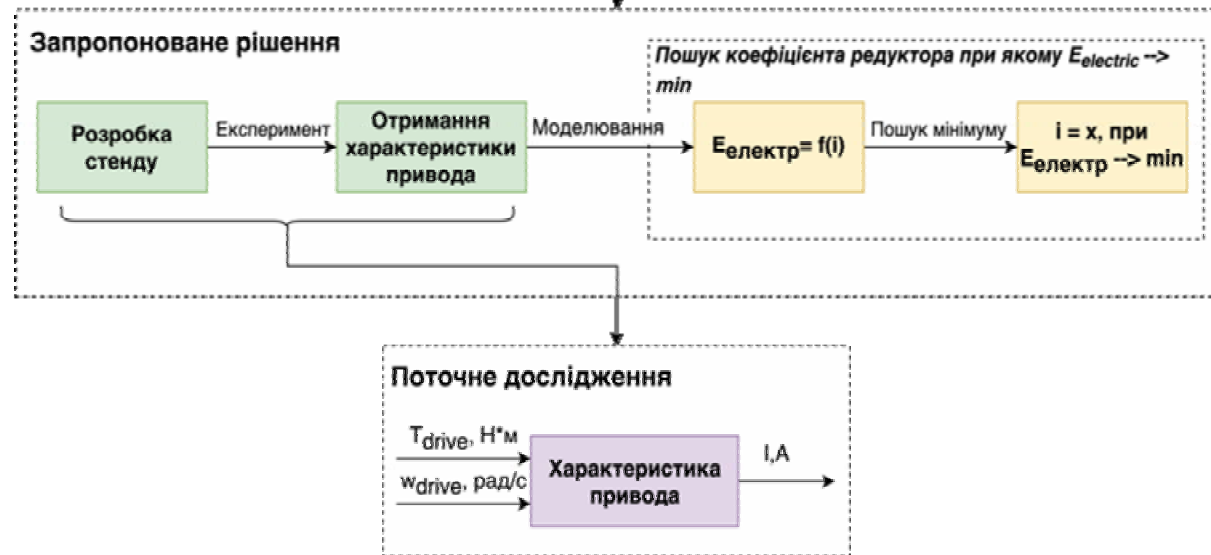


Рисунок 2. Структурна схема запропонованого рішення щодо підвищення енергоефективності привода ЕТС

З метою визначення шуканої функції розроблено лабораторний стенд, структура якого представлена на рисунку 3

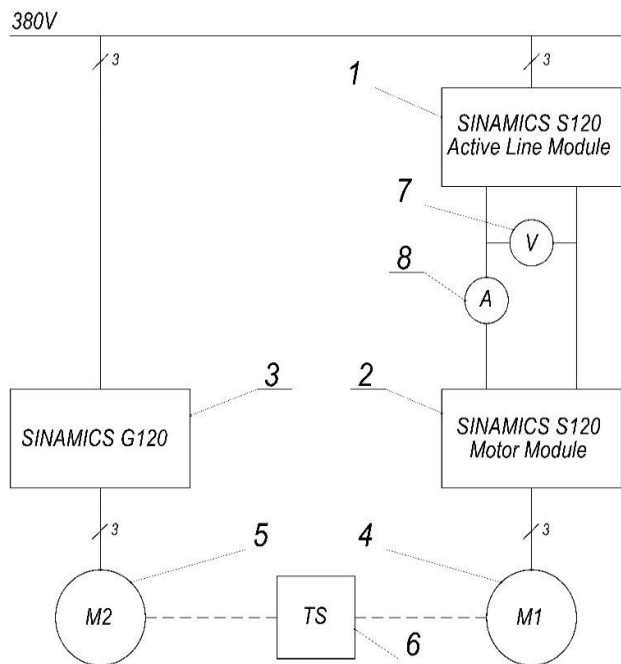


Рисунок 3. Структура лабораторного стенду дослідження енергетичних характеристик приводу

Основне завдання розробленого стенда – експериментальним шляхом, в досліджуваних діапазонах вимірювань, визначити залежність споживаного струму від крутного моменту і частоти обертання валу двигуна.

Розроблений стенд складається із трьох підсистем: управління (1, 2, 3); вимірювання (6, 7, 8); механічна (4, 5).

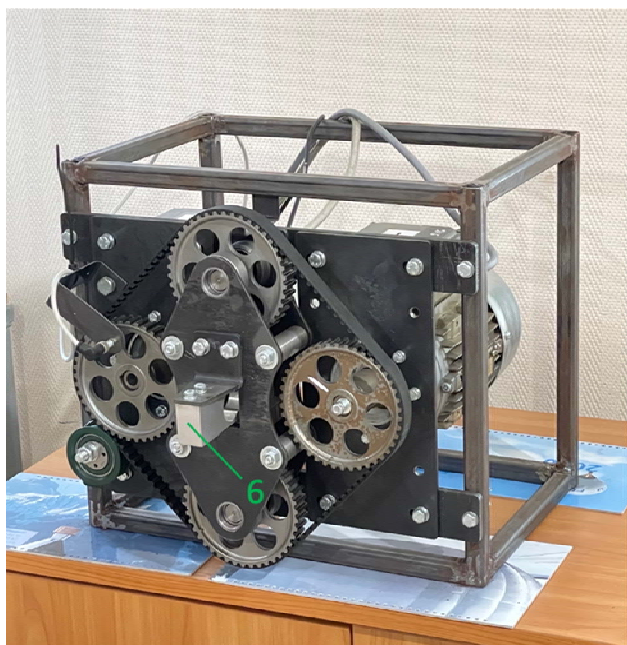


Рисунок 4. Фото механічної підсистеми із вузлом вимірювання моменту

Механічна підсистема, за допомогою розробленої конструкції, згідно з існуючими способами вимірювання моменту, [19] реалізує функцію створення навантажувальним двигуном (5) моменту опору на валу досліджуваного двигуна (4) через вузол вимірювання моменту (6), що включає два зубчасті колеса, осі яких жорстко пов'язані між собою і через тензометричний датчик кріпляться до основи. Тип досліджуваного та навантажувального двигуна - TS8034 B14, 1,1 кВт. На рисунку 4 представлено фото механічної підсистеми.

Регулювання моменту опору на валу досліджуваного двигуна забезпечується підсистемою керування. За допомогою органів керування змінюється значення заданих частот обертання, які подаються на регулятори швидкості частотних перетворювачів фірми Siemens навантажувального та досліджуваного приводів. Управління навантажувальним двигуном здійснюється ПЧ SINAMICS G120 (3), а досліджуваним – SINAMICS S120 (1, 2).

Вимірювальна підсистема фіксує показання приладів, що визначають споживану електричну енергію та механічну потужність на валу двигуна. Елементи 7 і 8 відповідають за вимірювання напруги та струму в колі постійного струму ПЧ досліджуваного двигуна відповідно. Це дає інформацію про споживану електричну енергію.

Дані про частоту обертання валу двигуна реєструються за допомогою програмного забезпечення фірми Siemens STARTER, що дозволяє режимі реального часу стежити за параметрами системи керування.

Інформація про момент на валу досліджуваного двигуна формується на підставі даних тензометричного датчика сили (6), що є частиною конструкції механічної підсистеми, яка вимірює зусилля на валу досліджуваного двигуна. Сигнали з датчика обробляються за допомогою PLC S 7-300 модулем SIWAREX U.

Розузгодження частот обертання магнітних полів статорів навантажувального та досліджуваного приводу при однаковій швидкості обертання роторів обох двигунів формує базовий принцип, що лежить в основі створення моменту на досліджуваному приводі.

Розглянемо докладніше методику вимірювання моменту на валу досліджуваного двигуна. Механічна частина стенду сконструйована таким чином, що при виникненні моменту опору на валу, в наслідок неузгодженості частот обертання магнітних полів статорів навантажувального та досліджуваного двигуна, відбувається перерозподіл сил натягу ремня ($F_1 - F_8$) і результуючі сили (F_{12}, F_{36}), які показано на рисунку 5.

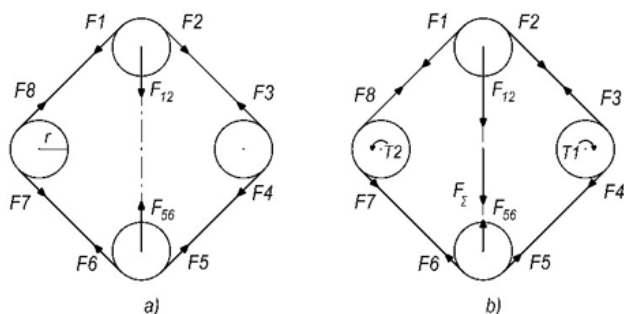


Рисунок 5. Схема розподілу сил датчика моменту

Сили F_1-F_8 і $F_{12} F_{56}$ скомпенсовані за відсутності моменту опору (рисунок 5 а). У разі моменту опору на навантажувальному двигуні T_2 (малюнок 5 б) виникає перерозподіл сил натягу ремня, у якому $F_1 = F_2 = F_3 = F_8$ і $F_4 = F_5 = F_6 = F_7$. Аналітичні вирази, що описують результуючі сили $F_{12} F_{56}$ і F_{Σ} представлені (2-4) відповідно.

$$F_{12} = F_3 \cdot \sqrt{2}, \quad (2)$$

$$F_{56} = F_4 \cdot \sqrt{2}, \quad (3)$$

$$F_{\Sigma} = F_{12} - F_{56} = (F_3 - F_4) \cdot \sqrt{2}. \quad (4)$$

Виходячи з балансу моментів (5) і розподілу сил (2-4) слідує (6), залежність результуючого моменту навантаження T_1 від сумарної сили F_{Σ} , що визначається тензOMETричним датчиком сили (TS)

$$F_3 \cdot r - F_4 \cdot r - T_1 = 0, \quad (5)$$

$$T_1 = \frac{F_{\Sigma} \cdot r}{\sqrt{2}}. \quad (6)$$

При аналізі показань тензOMETричного датчика використовується отримана дослідним шляхом регресійна функція (7), що описує поведінку датчика сили на досліджуваному діапазоні вимірювань.

$$F_{\Sigma} = a \cdot X + b, \quad (7)$$

де $a - 3,35 \cdot 10^{-4}$

$b - (-4,36)$

X – дані з датчика, од. АЦП

На рисунку 6 представлена характеристика датчика у графічному вигляді.

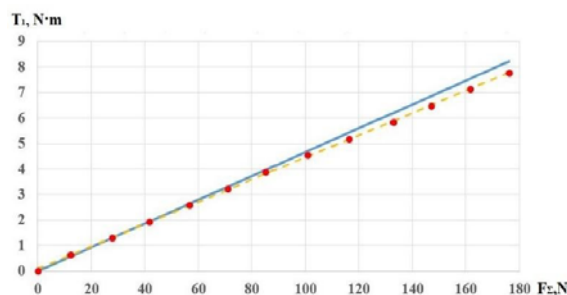


Рисунок 6. Характеристика тензOMETричного датчика сили

У ході експерименту спочатку проходив синхронний розгін досліджуваного та навантажувального приводів, потім за допомогою зменшення значення заданої швидкості обертання навантажувального двигуна створювався момент опору для приводу, що досліджується.

Таблиця 1. Експериментальні дані споживання приводом струму для швидкості 1000 об/хв

U, В	M, Н·м	I, А	Pel, Вт	Pmech, Вт	η, %
600	1	0,56	336,67	104,67	31
600	1,5	0,65	389,54	157	40
600	2	0,74	442,41	209,33	47
600	2,5	0,85	507,51	261,67	52
600	3	0,96	574,66	314,00	55
600	3,5	1,07	643,15	366,33	57
600	4	1,19	712,43	418,67	59
600	4,5	1,31	784,21	471	60
600	5	1,43	858,92	523,33	61
600	5,5	1,56	935,82	575,67	62
600	6	1,69	1015,39	628	62
600	6,5	1,82	1094,65	680,33	62
600	7	1,96	1173,66	732,67	62
600	7,5	2,10	1257,86	785,00	62
600	8	2,24	1344,65	837,33	62
600	8,5	2,39	1436,17	889,67	62
600	9	2,54	1526,79	942,00	62
600	9,5	2,69	1614,67	994,33	62
600	10	2,84	1706,95	1046,67	61
600	10,5	3,00	1802,44	1099,00	61
600	11	3,18	1908,43	1151,33	60

При цьому фіксуються показання амперметра та тензометричного датчика сили. Зазначені дії виконували для синхронних частот обертання від 500 до 2250 об/хв з кроком 250 об/хв. Отримані експериментальні дані представлені у таблиці 1.

На підставі даних побудовано сімейство кривих для різних частот обертання, що відображають залежність ККД від крутного моменту (рисунок 7) і сімейство кривих для різних моментів, що відображають залежність ККД від частоти обертання (рисунок 8).

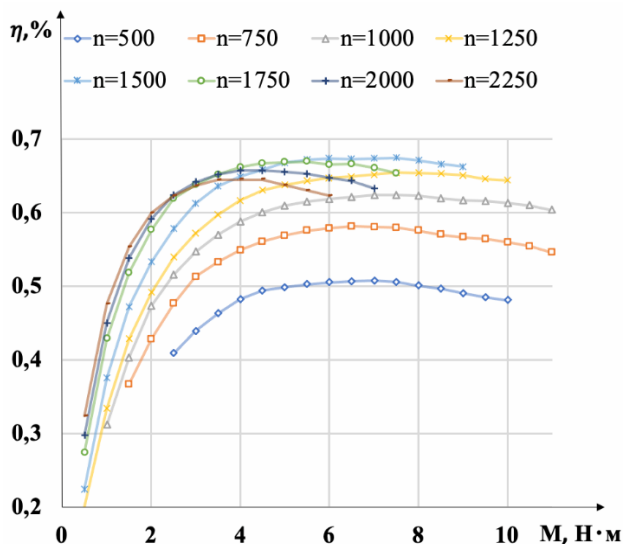


Рисунок 7. Сімейство кривих для частоти обертання досліджуваного двигуна (500 – 2250 об/хв)

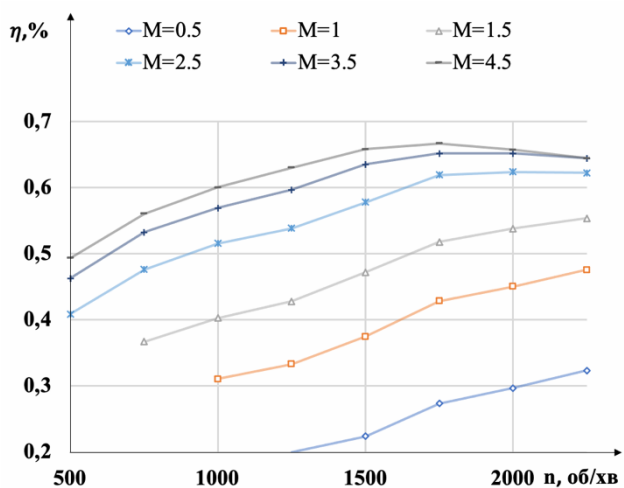


Рисунок 8. Сімейство кривих для моментів досліджуваного двигуна (0,5-4,5 Н·м)

V. ВИСНОВКИ

Розроблений стенд, що має вузол вимірювання крутного моменту на валу досліджуваного двигуна, дозволяє визначити характеристику електроприводу у

виді з залежності споживання електричної енергії від моменту і частоти обертання ротора двигуна.

Зазначені залежності враховують варіативність ККД двигуна в динамічних режимах роботи математичної моделі електричного частотно-керованого приводу.

Подальші дослідження будуть продовжені у напрямку пошуку за допомогою математичного моделювання значень потужностей двигунів та передавальних чисел редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за заданий час.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Osadchyy, V.V. Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives / O.S. Nazarova, V.V. Osadchyy, V.V. Brylysty / 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. – pp. 1-4. doi: 10.1109 / MEES52427.2021.9598661
- [2] Nazarova, O.S. Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center / O.S. Nazarova, V.V. Osadchyy, V.V. Brylysty // Applied Aspects of Information Technology, 2020. - Vol.3. - No.3. - P. 154–164. DOI: 10.15276/aait.01.2020.4
- [3] Осадчий, В.В. Структура системы управления 4-х приводной силовой установки для электрических транспортных средств / В.В. Осадчий, Е.С. Назарова, В.В. Брылстый // Проблемы региональной энергетики (специальный выпуск), 2019. – № 1-2(41) 2019. – С. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150
- [4] Suh, J. Development and Application of Motor-Equipped Reaction Torque Sensor with Adjustable Measurement Range and Sensitivity / J. Suh, J. Lee, D.-E. Lee // Appl. Sci., 2020. –Vol. 10 (24). – P. 8770. DOI: 10.3390/app10248770
- [5] Joubair, A. Use of a Force-Torque Sensor for Self-Calibration of a 6-DOF Medical Robot / A. Joubair, L.F. Zhao, P. Bigras, I.A. Bonev // Sensors, 2016. – Vol. 16. – P. 798. DOI: 10.3390/s16060798.
- [6] Hashimdeen, S.H. The Design and Construction of an Electrohydrodynamic Cartesian Robot for the Preparation of Tissue Engineering Constructs / S.H. Hashimdeen, M. Miodownik, M.J. Edirisinghe // PLoS ONE, 2014. – Vol. 9(11): e112166. DOI: 10.1371/journal.pone.0112166
- [7] Schwalb, W. A force-sensing surgical tool with a proximally located force/torque sensor / W. Schwalb, B. Shirinzadeh, J. Smith // Int. J. Med Robot. Comput. Assist. Surg. 2017. – Vol. 13, e1737. DOI: 10.1002/rcs.1737.
- [8] Horeman, T. Force sensing in surgical sutures / T. Horeman, E.J.Meijer, J.J. Harlaar, J.F. Lange, J.J. van

- den Dobbelssteen, J. Dankelman // PLoS ONE 2013. – Vol. 8, e84466.
- [9] Estevez, P. 6 DOF force and torque sensor for micro-manipulation applications / P. Estevez, J.M. Bank, M. Porta, J. Wei, P.M. Sarro, M. Tichem, U. Staufer // Sens. Actuators A Phys., 2012. – Vol. 186. – pp. 86-93. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.037
- [10] Zappalá, D. Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes / D. Zappalá, M. Bezziccheri, C. J. Crabtree, N. Paone // Measurement Science and Technology, 2018. – Vol. 29. – Num. 6. Sci. Technol. 29 065207. DOI: 10.1088/1361-6501/aab74a
- [11] Kerr, D.R. Analysis, properties, and design of a Stewart-platform transducer / D.R. Kerr // ASME J. Mech. Transm. Autom. Des., 1989. – Vol. 111. – pp. 25–28.
- [12] Dwarakanath, T.A. Design and development of a Stewart platform based force–torque sensor / T.A. Dwarakanath, B. Dasgupta, T.S. Mruthyunjaya, // Mechatronics, 2001. Vol. 11. pp. 793–809.
- [13] Khan, H. An innovative torque sensor design for the lightest hydraulic quadruped robot / H. Khan, F. Cannella, D.G. Caldwell, C. Semini // Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR; World Scientific: Singapore, 2015.
- [14] Khan, H. Towards Scalable Strain Gauge-Based Joint Torque Sensors / H. Khan, M. Imperio, F. Cannella, D.G. Caldwell, A. Cuschieri, C. Semini, // Sensors, 2017. – Vol. 17. – 1905. DOI: 10.3390/s17081905
- [15] Ubeda, R.P. Design and manufacturing of an ultra-low-cost custom torque sensor for robotics / R.P. Ubeda, S.C. Gutiérrez Rubert, R. Zotovic Stanisic, Á. Perles Ivars // Sensors 2018. – Vol. 18, 1786.
- [16] Ul Islam, M. N. Method of torque measurement based on volumetric strain / M. N. Ul Islam, P. Cheng, B. Oelmann // 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2016. – pp. 116-123. DOI: 10.1109/SICE.2016.7749205.
- [17] Толмачов, С.Т. Система безконтактного виміру моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації / С.Т. Толмачов, І.М. Бурчак // Вісник Криворізького національного університету, 2017. - Вип. 44. – С. 131-137.
- [18] Назарова, Е. С. Исследование энергетических характеристик электроприводов электрических транспортных средств / Е. С. Назарова, В. В. Осадчий, В. В. Брылистый // Энергия – Тбилиси, 2021. - № 2(98). – С. 19-23.
- [19] ДСТУ ІЕС 60034-2-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 2-1. Стандартні методи визначення втрат та коефіцієнта корисної дії під час випробувань (за винятком машин для тягових транспортних засобів). Чинний з 2019-08-01. – ІЕС 60034-2-1:2014, IDT

Стаття надійшла до редакції 10.11.2021

ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

- БРЫЛИСТЫЙ В.В.** аспирант кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: 77vitya77@gmail.com ;
- НАЗАРОВА Е.С.** канд. техн. наук, доцент, кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- ОСАДЧИЙ В.В.** канд. техн. наук, доцент, кафедри електропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: w.osadchiy@gmail.com ;

Цель работы. Разработка узла измерения крутящего момента в составе лабораторного комплекса для исследования энергетических характеристик электроприводов с целью математического моделирования динамических режимов работ привода электрического транспортного средства.

Методы исследования. Физический эксперимент, регрессионный анализ, интерполяция.

Полученные результаты. Разработан узел измерения крутящего момента в составе лабораторного комплекса исследования энергетических характеристик приводов электрических транспортных средств, конструкция которого позволяет создавать крутящий момент на валу исследуемого двигателя с помощью нагрузочного и измерять его тензометрическим датчиком силы. Лабораторный стенд совместно с разработанным узлом измерения момента соответствует требуемому диапазону и точности измерений. Полученные на стенде экспериментальные данные позволяют определить зависимость потребляемой приводом энергии от механической мощности на валу исследуемого двигателя, что дает возможность

аналитически описать исследуемый привод и провести математическое моделирование в контексте исследования влияния механических параметров на потребленную энергию в динамических режимах работы.

Научная новизна Разработан способ измерения крутящего момента на валу двигателя для исследования энергетических характеристик приводов электрических транспортных средств. Указанный способ базируется на контактном методе измерения, который использует 2 двигателя (нагрузочный и исследуемый) и тензометрический датчик силы и отличается от других конструкцией, что создает момент на валу исследуемого двигателя. Результатом обработки экспериментальных данных, полученных данным способом, является аналитическая зависимость потребляемой приводом энергии от значения механической мощности на валу, параметрами которой являются угловая скорость и крутящий момент двигателя. Указанная энергетическая характеристика привода позволяет путем математического моделирования определить электромеханические параметры привода, минимизирующие его энергопотребление в динамических режимах работы.

Практическая ценность. Предложен способ измерения момента на валу двигателя, с помощью которого определена в аналитическом виде зависимость потребляемой приводом энергии от механической мощности на валу двигателя, что позволяет путем математического моделирования найти электромеханические параметры системы, повышающие энергоэффективность привода электрического транспортного средства.

Ключевые слова: электропривод; измерение момента; электромобиль; энергетическая характеристика; лабораторный стенд.

TORQUE MEASUREMENT FOR RESEARCHING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC VEHICLE DRIVES

BRYLYSTYI V.V. Ph.D. student of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 77vitya77@gmail.com;

NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com;

OSADCHYY V.V. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department of electric drive and automation of industrial equipment, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: w.osadchiy@gmail.com.

Purpose. Development of a torque measuring unit as part of a laboratory complex for studying the energy characteristics of electric drives for the purpose of mathematical modeling of the dynamic operating modes of an electric vehicle drive.

Research methods. Physical experiment, regression analysis, interpolation.

Findings. A torque measuring unit has been developed as part of a laboratory complex for studying the energy characteristics of electric vehicle drives, the design of which allows creating a torque on the shaft of the engine under study using a load and measuring it with a strain gauge force sensor. The laboratory stand together with the developed torque measuring unit corresponds to the required range and measurement accuracy. The experimental data obtained at the test bench make it possible to determine the dependence of the energy consumed by the drive on the mechanical power on the shaft of the engine under study, which makes it possible to analytically describe the drive under study and carry out mathematical modeling in the context of studying the influence of mechanical parameters on the consumed energy in dynamic modes of operation.

Originality. A method for measuring torque on the motor shaft for studying the energy characteristics of electric vehicle drives has been developed. This method is based on the contact method of measurement, which uses 2 motors (loading and testing) and strain gauge force sensor and differs from others in the design that creates a moment on the shaft of the test motor. The result of processing the experimental data obtained by this method is the analytical dependence of the energy consumed by the drive on the value of the mechanical power on the shaft, the parameters of which are the angular speed and torque of the engine. The specified energy characteristic of the drive makes it possible, by means of mathematical modeling, to determine the electromechanical parameters of the drive, minimizing its energy consumption in dynamic modes of operation.

Practical value. A method for measuring the moment on the motor shaft is proposed, with the help of which the dependence of the energy consumed by the drive on the mechanical power on the motor shaft is determined in an analytical form, which allows by mathematical modeling to find the electromechanical parameters of the system that increase the energy efficiency of the drive of an electric vehicle.

Keywords: electric drive; torque measurement; electric car; energy characteristic; laboratory stand.

REFERENCES

- [1] Osadchyy, V.V., Nazarova, O.S., Brylysty, V.V. (2021). Laboratory Stand for Research of Energy Characteristics of Electric Vehicle Drives. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4. doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598661
- [2] Nazarova, O.S., Osadchyy, V.V., Brylysty, V.V. (2020). Computer simulation of electric vehicle acceleration processes with different positions of the mass center. Applied Aspects of Information Technology, 2020, Vol.3., No.3, pp. 154–164. DOI: 10.15276/aait.01.2020.4
- [3] Osadchyy, V.V., Nazarova, O.S., Brylysty, V.V. (2019). Struktura sistemy upravleniya 4-kh privodnoy silovoy ustanovki dlya elektricheskikh transportnykh sredstv [The structure of the control system of a 4-drive power plant for electric vehicles]. Problemele Energeticii Regionale, vol. 1-2 (41), pp. 65-73. DOI: 10.5281/zenodo.3239150 (in Russian)
- [4] Suh, J., Lee, J., Lee, D.-E. (2020). Development and Application of Motor-Equipped Reaction Torque Sensor with Adjustable Measurement Range and Sensitivity. Appl. Sci. 2020, 10, 8770. DOI: 10.3390/app10248770
- [5] Joubair, A., Zhao, L.F., Bigras, P., Bonev, I.A. (2016) Use of a Force-Torque Sensor for Self-Calibration of a 6-DOF Medical Robot. Sensors 2016, 16, 798. DOI: 10.3390/s16060798.
- [6] Hashimdeen, S.H., Miodownik M., Edirisinghe M.J. (2014). The Design and Construction of an Electrohydrodynamic Cartesian Robot for the Preparation of Tissue Engineering Constructs. PLoS ONE, vol. 9(11), e112166. DOI: 10.1371/journal.pone.0112166
- [7] Schwalb, W., Shirinzadeh, B., Smith, J. (2017). A force-sensing surgical tool with a proximally located force/torque sensor. Int. J. Med Robot. Comput. Assist. Surg. 2017, 13, e1737. DOI: 10.1002/rcs.1737.
- [8] Horeman, T., Meijer, E.J., Harlaar, J.J., Lange, J.F. van den Dobbelsteen, J.J., Dankelman, J. (2013). Force sensing in surgical sutures. PLoS ONE 2013, 8, e84466.
- [9] Estevez, P., Bank, J.M., Porta, M., Wei, J., Sarro, P.M. Tichem M., Staufer U. (2012). 6 DOF сили і torque sensor для micro-manipulation applications. Sens. Actuators A Phys. 2012, 186, 86-93. DOI: 10.1016/j.sna.2012.02.037
- [10] Zappalá, D., Bezziccheri, M., Crabtree, C. J., Paone, N. (2018). Non-intrusive torque measurement for rotating shafts using optical sensing of zebra-tapes. Measurement Science and Technology, Vol. 29, Number 6. Sci. Technol. 29 065207. DOI: 10.1088/1361-6501/aab74a
- [11] Kerr, D.R. (1989). Analysis, properties, and design of a Stewart-platform transducer. ASME J. Mech. Transm. Autom. Des. 1989, 111, 25–28.
- [12] Dwarakanath, T.A., Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (2001). Design and development of a Stewart platform based force–torque sensor. Mechatronics 2001, 11, 793–809.
- [13] Khan, H., Cannella, F., Caldwell, D.G., Semini, C. (2015). An innovative torque sensor design for the lightest hydraulic quadruped robot. In Assistive Robotics: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR; World Scientific: Singapore, 2015
- [14] Khan, H., D’Imperio, M., Cannella, F., Caldwell, D.G., Cuschieri, A., Semini, C. Towards Scalable Strain Gauge-Based Joint Torque Sensors. Sensors 2017, 17, 1905. DOI: 10.3390/s17081905
- [15] Ubada, R.P., Gutiérrez Rubert, S.C., Zotovic Stanisic, R., Perles Ivars, Á. (2018). Design and manufacturing of an ultra-low-cost custom torque sensor for robotics. Sensors 2018, 18, 1786.
- [16] Ul Islam, M. N., Cheng P., Oelmann B. (2016). Method of torque measurement based on volumetric strain. 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2016, pp. 116-123, DOI: 10.1109/SICE.2016.7749205.
- [17] Tolmachov, S.T. Burchak, I.M. (2017). Systema bezkontaktного vimiru momentu na valu elektrodviguniv v umovah ekspluatacii [Contactless moment measurement system on the shaft of electric motors in operating conditions]. Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu, vyp. 44, 2017.
- [18] Nazarova, E. S., Osadchyy, V.V., Brylysty, V.V. (2021). Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik elektroprivodov elektricheskikh transportnykh sredstv [Research of energy characteristics of electric drives of electric vehicles]. Energy - Tbilisi, 2021, 2 (98), pp. 19-23. (in Russian)
- [19] DSTU IEC 60034-2-1:2019. Mashyny elektrychni obertovi. Chastyna 2-1. Standartni metody vyznachennja vtrat ta koeficijenta korisnoi' dii' pid chas vyprobuvan' (za vynjatkom mashyn dlja tjavovyh transportnyh zasobiv). [Standard methods for determining losses and efficiency during tests (excluding traction vehicles)]. Chynnyj z 2019-08-01. – IEC 60034-2-1:2014, IDT