УДК 62-83:681.2.083

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ 4 - ПРИВОДНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ

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

Мета роботи. *Визначити для розробленої електромеханічної системи керування 4-приводного електричного транспортного засобу потужності приводів та коефіцієнти редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.*

Методи дослідження. *Математичний аналіз та моделювання.*

Отримані результати. *Запропоноване рішення полягає у визначенні, для заданої динаміки транспортного засобу (розгін від 0 до 100 км/год за 5 с), шляхом математичного моделювання, значень потужностей приводів та коефіцієнтів редукторів, що сприяють підвищенню ККД електромеханічної системи. Умовою підвищення ККД є мінімізація витрат електричної енергії на розгін. Розроблена комп'ютерна модель електромеханічної системи керування 4 - приводного електричного транспортного засобу дозволяє провести дослідження щодо визначення електромеханічних параметрів системи керування, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.Визначення споживаного приводами струму проводилось шляхом дослідження енергетичних характеристик приводів, які отримано на розробленому раніше лабораторному стенді. Знайдено коефіцієнти редукторів та потужність приводу, що забезпечує мінімальне споживання електричної енергії при розгоні 4-приводного електричного транспортного засобу. З отриманих даних видно, що для кожної досліджуваної потужності існують мінімуми на проміжку коефіцієнтів редукторів 1-3,4. Також у процесі дослідження виявлено, що серед досліджуваних потужностей30-160 кВт існує привод, який витрачає меншу кількість енергії. Для досліджуваного електричного транспортного засобу– це чотири привода по 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3.Наявність мінімумів на проміжку коефіцієнтів редукторів і проміжку досліджуваних потужностей приводів, пояснюється мінливістю ККД двигуна в діапазонах навантаження, що варіюються від 0,3 до 2 разів та частот обертання валу двигуна 0-3000 об/хв, обумовлене різним ступенем впливу втрат, що виникають у динамічних режимах роботи приводу.*

Наукова новизна.*При дослідженні енергетичних характеристик на основі розробленої системи керування 4- приводним транспортним засобом знайдено електромеханічні параметри системи, що забезпечують мінімум споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.*

Практична цінність. *Отримані в результаті дослідження електромеханічні параметри системи керування 4-х приводним електричним транспортним засобом дозволяють в межах однієї дослідної номінальної потужності двигуна отримати економію електричної енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с в 2-3%.*

Ключові слова: система керування; електропривод; електромобіль; енергетична характеристика; електромеханічні параметри

I. ВСТУП

Сучасна тенденція на зниження шкідливих викидів від транспортних засобів, що працюють на двигунах внутрішнього згорання, що відображається на законодавчому рівні вже в багатьох країнах, сприяє підвищенню попиту на електричні транспортні засоби (ЕТЗ), тим самим збільшуючи та посилюючи конкуренцію у сфері електромобільної галузі.

Будь-який транспортний засіб повинен мати стійке керування, що впливає на безпеку водіння і бути енергоефективним, за що, власне, ведеться боротьба у сфері розробок систем керування транспортними засобами. Ці критерії стосуються і електричних транспортних засобів.

У роботі [1] обґрунтовано, з погляду сталого керування транспортним засобом, використання 4 - приводного компонування, з електромеханічною системою керування розподілом крутного моменту.

Для підвищення конкурентоспроможності на ринку ЕТЗ дана 4 - приводна електромеханічна система керування повинна мати енергоефективність.

Тому дослідження енергоефективності даного компонування, що дозволяє визначити параметри електромеханічної системи керування, які сприяють мінімізації втрат енергії в динамічних режимах їзди, є актуальним завданням.

© Брилистий В.В., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-2-3

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Існують різні підходи щодо досягнення енергоефективності приводів електричних транспортних засобів. У статті [2] аналізуються технології, що сприяють енергозбереженню приводів електричних транспортних засобів. Автор зазначає неефективний метод збереження енергії шляхом встановлення батареї підвищеної ємності. Проводиться аналіз алгоритмів керування потоком потужності для електричних транспортних засобів [3]. У галузі синтезу систем керування приводами з погляду економії енергії виділяються роботи, що базуються на методиці Energy Macroscopic Representation (EMR). Автори робіт [4], [5] показують можливості декомпозиції автомобіля відповідно до фізичних законів та синтезу схеми керування на базі методики EMR . З її допомогою також досліджуються гібридні транспортні засоби [6]. Дана методика добре себе зарекомендувала при дослідженні електронних диференціалів електричних транспортних засобів з двопровідною силовою установкою [7], [8]. Проведено дослідження [9], в якому порівнюється дві конфігураційні системи: одномоторний і модульно-каскадна, що представляє собою пару двигунів однакової потужності, але з різною кількістю пар полюсів, на основі методики EMR . У результаті дослідження автор визначив переваги модульно-каскадної схеми керування. Автори [10] провели дослідження модульно-каскадної схеми керування на фізичному експерименті. У статті [11] представлені результати дослідження впливу геометричних властивостей ТЗ на його тягові та енергетичні показники. В результаті розроблений метод оцінки впливу конструкційних параметрів, пройшов експериментальну перевірку та визнаний адекватним. Схоже дослідження проведено [12] де класифікують фактори, що впливають на витрати електричної енергії ЕТЗ. Та в результаті зазначені рекомендації щодо енергоефективного керування ЕТЗ.

Представлені роботи стосуються визначення енергоефективних електромеханічних параметрів одноприводних (або двоприводних) компонувань, проте недостатня кількість розглядає 4-приводну систему, що і обумовлює актуальність дослідження.

III. МЕТА РОБОТИ

Визначити для розробленої електромеханічної системи керування 4-приводного ЕТЗ потужності приводів та коефіцієнти редукторів, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ЗДОБУТИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Вибір потужностей приводів електричних транспортних засобів часто ґрунтуються на тяговому розрахунку [13], що враховує в собі лише механічні параметри транспортного засобу. Аналогічним способом роблять вибір коефіцієнтів редукторів, що забезпечують досягнення максимальної швидкості (прискорення) транспортним засобом [14], [15].Зазначений вибір потужності приводу та коефіцієнту редуктора призведе до зниження енергоефективності всієї електромеханічної системи.

Запропоноване рішення полягає у визначенні, для заданої динаміки транспортного засобу (розгін від 0 до 100 км/год за 5 с), шляхом математичного моделювання, значень потужностей приводів та коефіцієнтів редукторів, що сприяють підвищенню ККД електромеханічної системи. Умовою підвищення ККД є мінімізація витрат електричної енергії на розгін, згідно:

$$\eta_{сист} = \frac{E_{мех}}{E_{ел}} \cdot 100\% , \begin{cases} E_{мех} = const \\ E_{ел} \to min \end{cases}, \qquad (1)$$

де $\eta_{сист}$ - ККД системи,%; $E_{мех}$ - повна механічна енергія розгону від 0 до 100 км/год за 5 с, кДж; $E_{ел}$ - витрати електричної енергії розгону від 0 до 100 км/год за 5 с, кДж.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система керування 4-х приводним електричним транспортним засобом. Комп'ютерна модель даної системи представлена рисунку 1.Підсистема «SDA» визначає ступінь натискання на педаль акселератора (АР) для заданого розгону (100% до досягнення заданої швидкості).

Рисунок 1. Загальний вигляд комп'ютерної моделі дослідження енергетичних витрат 4-х приводного ЕТС

«TCS» - підсистема, що формує задані крутні моменти, на двигуни 4-приводного ЕТЗ, з урахуванням перерозподілу крутного моменту, що виключає пробуксовку, на підставі даних про геометрію ТЗ, положення центру мас, значення поточного прискорення. «VEHICLE» - підсистема, що описує зміну швидкості 4-приводного ЕТЗ з такими характеристиками: маса m =1750 кг; радіус колеса R = 0,3 м; максимальний крутний момент на колесах $M_{\max}$ = 925 Н·м. «DRIVE» – підсистема, що описує привод з точки зору механіки процесу розгону та розрахунку витрат електричноїенергії. Структура підсистеми представлена рис. 2.

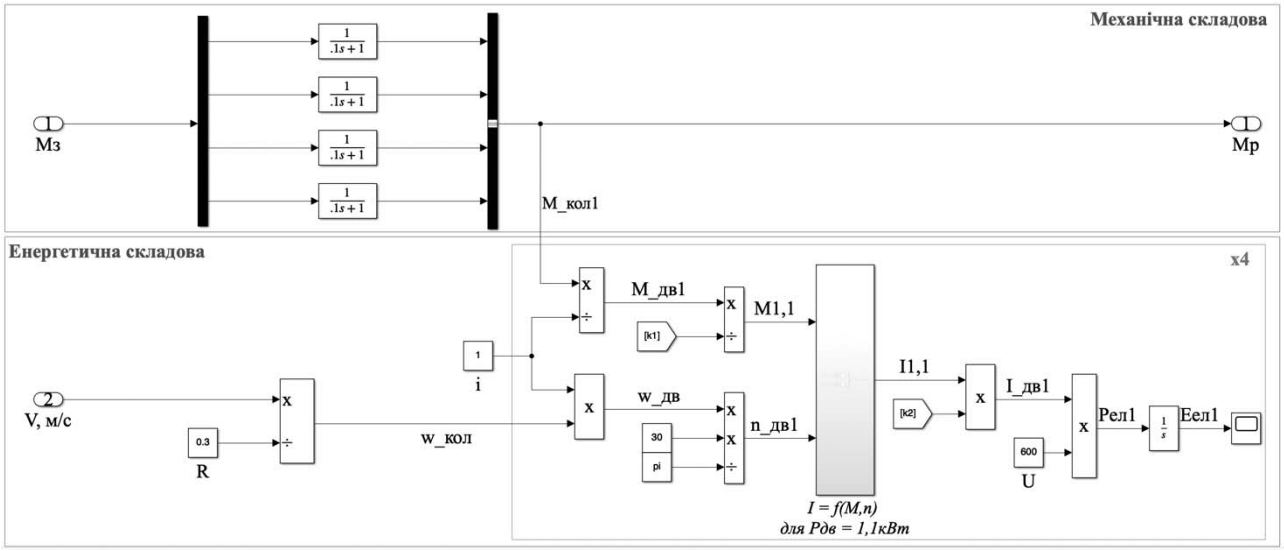

Рисунок 2. Загальний вид підсистеми «DRIVE», в якій енергетична складова представлена для одного з 4-х приводів.

Механічна частина підсистеми реалізована як аперіодична ланка з постійною часу 0,1 с. Таке уявлення моделює затримку відпрацювання впливу завдання на привод.

Енергетична складова визначає витрачену електричну енергію приводом кожного колеса за час розгону t =5 с :

$$E_{ел_j} = \int_0^t U \cdot I_{ДВ_j}(t) \cdot dt, \qquad (2)$$

де $E_{ел_j}$ -значення споживаної приводом j електричної енергії, кДж; t - час розгону ЕТЗ від 0 до 100 км/год, с; U - напруга живлення, В; $I_{ДВ_j}(t)$ – значення споживаного приводом j струму, А.

Сума витрат електричної енергії 4-х приводів, визначає витрати енергії електричним транспортним засобом, згідно:

$$E_{ел} = \sum_{j=1}^{4} E_{ел_j}. \qquad (3)$$

Рисунок 3. Фото стенду дослідження енергетичних властивостей приводів .

Визначення споживаного приводами струму проводилось шляхом дослідження енергетичних характеристик приводів, які отримано на розробленому раніше лабораторному стенді (рис 3) [16]. Дослідження проводилося шляхом варіювання моменту опору на валу досліджуваного двигуна за допомогою навантажувального. При цьому фіксувалися показання тензометричного датчика сили, що визначають момент опору на валу та показання амперметра на ланці постійного струму перетворювача частоти досліджуваного двигуна. В результаті отримана залежність споживання струму стендовим приводом від механічної потужності на валу двигуна згідно:

$$I_{1,1} = f(M_{1,1}, n_{1,1}), \quad (4)$$

де $I_{1,1}$ - значення споживаного струму приводом, А; $M_{1,1}$ – крутний момент на валу досліджуваного двигуна Н ·м; $n_{1,1}$ – частота обертання валу досліджуваного двигуна об/ хв.

Враховуючи, що дослідження енергетичної характеристики проведено для двигуна малої потужності (1,1 кВт) прийнято рішення про приведення отриманої характеристики до характеристики двигуна більшої потужності на підставі формул (5) - (8) та припущення про те, що втрати в АД пропорційно збільшуються із зростанням потужності:

$$M_{1,1_j} = \frac{M_{ДВ_j}}{k_1}, \quad (5)$$

$$I_{ДВ_j} = I_{1,1_j} \cdot k_2, \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{M_{ном_j}}{M_{ном_{1,1}}}, \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\eta_{ДВ_j} / \eta_{1,1_j}}, \quad (8)$$

де $M_{1,1_j}$ - приведене значення заданого моменту на привід потужністю 1,1 кВт, Н·м; $M_{ДВ_j}$ - заданий момент на привод, Н·м; k_1 - коефіцієнт приведення заданого моменту досліджуваного приводу до стендового приводу, ум.од;

k_2 - коефіцієнт приведення споживаного струму стендового приводу до досліджуваного приводу, ум.од; $I_{1,1_j}$ - струм споживання стендового приводу, А; $M_{ном_j}$ - номінальний момент досліджуваного двигуна, Н·м; $M_{ном_{1,1}}$ - номінальний момент стендового двигуна, Н·м; $\eta_{ДВ_j}$ - ККД досліджуваного двигуна, ум.од; $\eta_{1,1_j}$ - ККД стендового двигуна, ум.од.

Таким чином, механічна потужність на валу двигуна більшої потужності трансформується в механічну потужність стендового двигуна, як і споживання електричної енергії стендовим приводом перетворюються на витрати електричної енергії двигуном більшої потужності.

Таблиця 1. Таблиця параметрів досліджуваних двигунів.

Рдв, кВт	Мн, Н· м	КПД, %
30	196	84
37	241	84
45	293	84
55	355	84
75	485	84
90	582	84
110	711	84
132	849	85
160	1030	85

Отримана електромеханічна система керування 4-приводним електричним транспортним засобом вирішує завдання забезпечення заданої динаміки, виключаючи при цьому буксування (блок «TCS») і

виконує аналіз енергетичних витрат приводів (підсистема «DRIVE»).

Як досліджувані двигуни обрані двигуни сімейства Leroy в діапазоні номінальних потужностей [30; 160] кВт. У таблиці 1 наведено параметри досліджуваних двигунів із числом пар полюсів2.

Зазначений діапазон потужностей дозволяє досліджувати двигун з різною перевантажувальною здатністю, в межах знятої експериментальної характеристики реального приводу. Тобто двигуни меншої потужності використовуються для дослідження споживання енергії двигунів перевантажених щодо номінального моменту до 2 разів, а більшої потужності – недовантажених. У комп'ютерній моделі зміна потужності приводу відображається у зміні параметрів номінального моменту та ККД двигуна (7), (8).

Таблиця 2. Витрати електричної енергії 4-х приводним транспортним засобом в залежності від номінальної потужності двигуна та коефіцієнта редуктора.

P, кВт/i, ум.од.	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4
30	1341,6	1338,8	1337,6	1338,2	1340,2	1343,2	1347,2	1351,6
37	1269,8	1266,4	1264,4	1263,8	1264,2	1265,8	1268,6	1272,2
45	1221,8	1218	1215,6	1214,2	1213,6	1214	1215,6	1218,6
55	1191,8	1188,4	1185,4	1183,2	1181,4	1180,8	1181,6	1184,2
75	1177,6	1174	1170,4	1167	1164	1162	1161,4	1163,6
90	1188,4	1184,8	1181	1176,6	1173	1170,2	1169,4	1171,4
110	1216,8	1213,4	1209,2	1204,4	1199,8	1196,4	1195,2	1197,4
132	1243	1239,6	1235,2	1230	1224,8	1220,8	1219,4	1221,8
160	1305,2	1302	1297,2	1291,4	1285,4	1281	1279,2	1282,2

Діапазон варіювання коефіцієнтів редукторів дорівнює [1]; [3], [4]. Граничне значення 3,4 обумовлено значенням максимальної швидкості транспортного засобу (100 км/год) із заданим радіусом колеса (R) та значенням обмеження максимальної частоти обертання валу двигуна (3000 об/хв).Проведено математичне моделювання розгону 4-приводного ЕТЗ від 0 до 100 км/год за 5 с. При цьому розгін здійснюється приводами однакової потужності та однаковими коефіцієнтами редукторів. По досягненню заданої швидкості фіксується кількість витраченої енергії приводом кожного з коліс, сума яких дає витрати електричної енергії всього транспортного засобу (3).

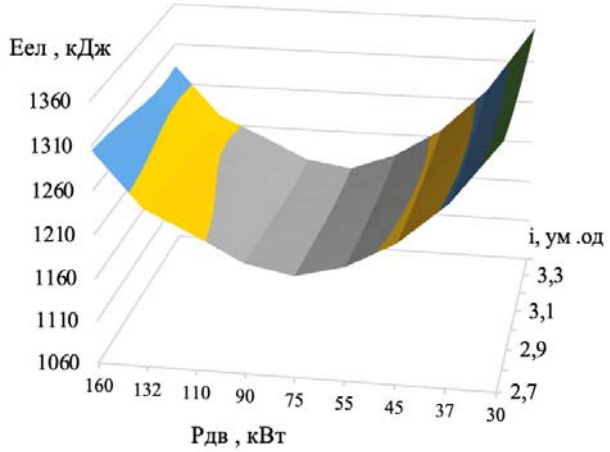

Рисунок 4. Графік споживання енергії транспортним засобом в залежності від номінальної потужності двигуна та коефіцієнтів редукторів

Так відбувається для кожного досліджуваного коефіцієнта редуктора. Після фіксації витрат електричної енергії в діапазоні досліджуваних коефіцієнтів редукторів змінюється потужність приводів, згідно з формулами масштабування (5) – (8) і виконуються аналогічні дії.

В результаті дослідження отримано значення сумарної витраченої енергії 4-приводним електричним транспортним засобом залежно від коефіцієнтів редукторів та потужності двигунів (таблиця 2).

Для фокусування уваги на отримані мінімуми представлені дані в діапазоні редукторів [2], [7]; [3], [4].

Даній таблиці відповідає тривимірний графік на рисунку 4. З отриманих даних видно, що при розгоні 4- приводного ЕТЗ від 0 до 100 км/год за 5 с, для кожної з досліджуваної потужності існують мінімуми на проміжку коефіцієнтів редукторів (1-3,4).Також у процесі дослідження виявлено, що серед досліджуваних потужностей (30-160) кВт існує привод, який витрачає меншу кількість енергії. Для досліджуваного ЕТЗ– це 4 привода по 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3.

V. ВИСНОВКИ

Розроблена комп'ютерна модель електромеханічної системи керування 4-приводного електричного транспортного засобу дозволяє провести дослідження щодо визначення електромеханічних параметрів системи керування, що забезпечують мінімальне споживання енергії при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 с.

Наявність мінімумів на проміжку коефіцієнтів редукторів (1-3,4) і проміжку досліджуваних потужностей (30-160) кВт приводів, пояснюється мінливістю ККД двигуна в діапазонах навантаження, що варіюються (0,3 – 2) $M_{ном_j}$ та частот обертання валу двигуна (0-3000) об/хв, обумовлене різним ступенем впливу втрат, що виникають у динамічних режимах роботи приводу.Для 4-х приводного електричного транспортного засобу масою 1750 кг при розгоні від 0 до 100 км/год за 5 секунд потужність двигуна, що забезпечує мінімальне споживання енергії, становить 75 кВт з коефіцієнтом редуктора 3,3.

Подальші кроки плануються у напрямку дослідження енергетичних витрат під час руху з постійними швидкостями, що дозволить провести пошук оптимального, з погляду витрат енергії, закону керування 4 - приводним електричним транспортним засобом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Nazarova, O. S. Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics / O. S. Nazarova, V. V. Osadchyy,V. V. Brylystyi // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020. – pp. 1-4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240824.

[2] Shabanov, A.V. Energy saving technologies and energy efficiency of motor transport power plants /A. V. Shabanov, V. K. Vanin, A. E. Yesakov // Izvestiya MGTU MAMI, 2021. – Vol. 15 – No. 4. –pp. 83-91. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91

[3] Kumar, L. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review / L. Kumar, S. Jain. //Renewable and Sustainable Energy Reviews29, 2014. – pp. 924-940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014.

[4] Lhomme, W. Teaching electric vehicle drive control using Energetic Macroscopic Representation / W. Lhomme, A. Bouscayrol // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013. – pp. 1-8.DOI: 10.1109/EVS.2013.6914831.

[5] Depature, C. IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 / C. Depature, S. Jemei, L Boulon, A. Bouscayrol, N. Marx, S. Morando, A. Castaings// Energy Management of a Fuel Cell/Battery Vehicle," 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2016. – pp. 1-6.DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791701.

[6] Lhomme, W. Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation / W. Lhomme, A. Bouscayrol and P. Barrade // 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2004. – Vol. 2 – pp. 1525-1530.DOI: 10.1109/ISIE.2004.1572040.

[7] Draou, A.A Simplified Sliding Mode Controlled Electronic Differential for an Electric Vehicle with Two Independent Wheel Drives / A. Draou // Energy and Power Engineering, 2013. – Vol. 5 – pp. 416-421. DOI: 10.4236/epe.2013.56044.

[8] Shchur, I. Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation / I. Shchur, I. Havdo, Y. Biletskyi// Energy engineering and control systems, 6, 2020. – pp. 51-60. DOI: 10.23939/jeecs2020.01.051.

[9] Shchur, I. Efficiency Evaluation of Single and Modular Cascade Machines Operation in Electric Vehicle / I. Shchur, L. Kasha, M. Bukavyn // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020. – pp. 156-161.DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235413.

[10] Shouliang Han. The Modular Cascade Machines in electric vehicles / Shouliang Han, Shumei Cui, Xinxin Zhang, Hao Ge, Bingliang Xu // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012. – pp. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422660.

[11] Antoshchenkov, R. Determining The Influence of Geometric Parameters of The Traction-Transportation Vehicle's Frame on Its Tractive Capacity and Energy Indicators / R. Antoshchenkov,I. Galych, F. Nykyforov, H. Cherevatenko,I. Chyzhykov, S. Sushko, N. Ponomarenko, S. Diundik, I. Tsebriuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (7 (116)), 2022. – pp. 60–67. DOI:10.15587/1729-4061.2022.254688

[12] Дембіцький, В.М. Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричнимприводом / В.М. Дембіцький // Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія, 2022. –т. 1 – с. 77-114.

[13] Салимоненко,Г. Н. Методика выбора тягового электродвигателя для электромобиля / Г. Н. Салимоненко,М. В. Назаров,А. В. Лопухов, А. А. Союстов // Инновации и инвестиции, 2017.– №11.

[14] Наджафова,Г. А. Оптимальное передаточное число редуктора в быстродействующих следящих системах / Г. А. Наджафова // Авто-мат. и телемех., 1962. – т. 23– №3–с. 342-348.

[15] Козлова, Т.А. Методика поиска рациональных конструктивных параметров тягового привода электромобиля /Т. А. Козлова //Интернет-журнал «Науковедение», 2016. – т. 8 – №5.

[16] Osadchyy, V. Laboratory Stand for Research ofEnergy Characteristics of Electric Vehicle Drives / V. Osadchyy, O. Nazarova, V. Brylystyi// 2021 IEEE International Conference onModern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021. – pp. 1-4.DOI:10.1109/MEES52427.2021.9598661.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2022

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 4-Х ПРИВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

БРЫЛИСТЫЙ В.В. аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e - mail: 77vitya77@gmail.com;

Цель работы. *Определить, для разработанной электромеханической системы управления 4-х приводного электрического транспортного средства, мощности приводов и коэффициенты редукторов, обеспечивающих минимальное потребление энергии при разгоне от 0 до 100 км/ч за 5 секунд.*

Методыисследования. *Математический анализ имоделирование.*

Полученные результаты. *Предложенное решение состоит в определении для заданной динамики транспортного средства (разгон от 0 до 100 км/ч за 5 с) путем математического моделирования, значений мощностей приводов и коэффициентов редукторов, способствующих повышению КПД электромеханической системы. Условием повышения КПД является минимизация расхода электрической энергии на разгон. Разработанная компьютерная модель электромеханической системы управления 4 - приводного электрического транспортного средства позволяет провести исследование определения электромеханических параметров системы управления, обеспечивающих минимальное потребление энергии при разгоне от 0 до 100 км/ч за 5 с. Определение потребляемого приводами тока проводилось путем исследования энергетических характеристик приводов, полученных на разработанном ранее лабораторном стенде. Обнаружены коэффициенты редукторов и мощность привода, обеспечивающая минимальное потребление электрической энергии при разгоне 4-приводного электрического транспортного средства. Из полученных данных видно, что для каждой изучаемой мощности существуют минимумы на промежутке коэффициентов редукторов 1-3,4. Также в процессе исследования обнаружено, что среди исследуемых мощностей 30-160 кВт существует привод, использующий меньшее количество энергии. Для исследуемого электрического транспортного средства это четыре привода по 75 кВт с коэффициентом редуктора 3,3. Наличие минимумов на промежутке коэффициентов редукторов и промежутке исследуемых мощностей приводов, объясняется изменчивостью КПД двигателя в диапазонах нагрузки, варьирующихся от 0,3 до 2 раз и частот вращения вала двигателя 0-3000 об/мин, обусловленное различной степенью воздействия потерь, в динамических режимах работы привода.*

Научная новизна.*Исследование энергетических характеристик на основе разработанной системы управления 4-х приводным транспортным средством позволяет найти электромеханические параметры системы, обеспечивающие минимум потребления энергии при разгоне от 0 до 100км/ч за 5 с.*

Практическая ценность. *Полученные, в результате исследования, электромеханические параметры системы управления 4-х приводным электрическим транспортным средством позволяют в пределах одной мощности двигателя получить экономию электрической энергии на разгон от 0 до 100 км/ч за 5 с в 2-3%.*

Ключевые слова: система управления; электропривод; электромобиль; энергетическая характеристика; электромеханические параметры.

INVESTIGATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEM OF 4-DRIVE ELECTRIC VEHICLE

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

Purpose. *To determine for the developed electromechanical control system of a 4-drive electric vehicle, the power of the drives and the coefficients of the gearboxes that ensure the minimum energy consumption during acceleration from 0 to 100 km / h in 5 s.*

Research methods. *Mathematical analysis and modeling.*

Findings. *The proposed solution is to determine, for a given vehicle dynamics (acceleration from 0 to 100 km / h in 5 s), by mathematical modeling, values of drive powers and gear ratios, which increase the efficiency of the electromechanical system. The condition for increasing the efficiency is to minimize the consumption of electrical energy for acceleration. The developed computer model of the electromechanical control system of the 4 - drive electric vehicle allows to carry out researches on definition of electromechanical parameters of the control system providing the minimum energy consumption at dispersal from 0 to 100 km / h for 5 s. The current consumed by the drives was determined by studying the energy characteristics of the drives obtained on a previously developed laboratory stand. Gear ratios and drive power have been found to provide minimum power consumption when accelerating a 4-wheel drive electric vehicle. From the obtained data it is seen that for each power studied there are minima in the range of gear ratios 1-3,4. Also in the course of the research it was found that among the studied powers of 30-160 kW there is a drive that uses less energy. For the studied electric vehicle, these are four drives of 75 kW with a reduction factor of*

3,3. The presence of minima in the interval between the gear ratios and the interval of the studied drive powers is explained by the variability of the engine efficiency in the load ranges varying from 0.3 to 2 times and the engine shaft speed of 0-3000 rpm, due to varying degrees of loss impact, the dynamic modes of the drive.

***Originality**. The study of energy characteristics based on the developed control system for a 4-wheel drive vehicle makes it possible to find the electromechanical parameters of the system that provide a minimum of energy consumption during acceleration from 0 to 100 km/h in 5 s.*

***Practical value**. The electromechanical parameters of the control system of the 4-drive electric vehicle obtained as a result of research allow to receive economy of electric energy at dispersal from 0 to 100 km / h for 5 s in 2-3% within one experimental nominal power of the engine.*

Keywords: control system; electric drive; electric car; energy characteristic; electromechanical parameters

REFERENCES

[1] Nazarova,O.S., Osadchyy,V.V.,Brylystyi,V.V. (2020) Research on the Influence of the Position of the Electric Vehicles Mass Center on Their Characteristics. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020, pp. 1-4, DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240824

[2] Shabanov, A.V., Vanin, V.K., Yesakov, A.E. (2021) Energy saving technologies and energy efficiency of motor transport power plants.Izvestiya MGTU MAMI, 2021, vol. 15.No. 4, pp. 83-91. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-83-91

[3] Kumar, L., Shailendra, J. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, pp. 924-940. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.014

[4] Depature, C., Lhomme, W., Bouscayrol, A. (2013). Teaching electric vehicle drive control using energetic macroscopic representation. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). DOI: 10.1109/evs.2013.6914831

[5] Depature, C., Jemei, S., Boulon, L., Bouscayrol, A., Marx, N., Morando, S., Castaings, A. (2016). IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2017 - energy management of a fuel cell/battery vehicle. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). DOI: 10.1109/vppc.2016.7791701

[6] Lhomme, W., Bouscayrol, A., Barrade, P. (2004). Simulation of a series hybrid electric vehicle based on energetic macroscopic representation. 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1525-1530. DOI: 10.1109/isie.2004.1572040

[7] Draou, A. (2013). A simplified sliding mode controlled electronic differential for an electric vehicle with two independent wheel drives. Energy and Power Engineering, 05(06), pp. 416–421. DOI:10.4236/epe.2013.56044

[8] Shchur, I., Havdo, I., Biletskyi, Y. (2020). Modeling of two-motor front-wheel drive control for electric vehicle with electronic differential based on energetic macroscopic representation. Energy Engineering and Control Systems, 6(1), pp. 51–60. DOI: 10.23939/jeecs2020.01.051

[9] Shchur, I., Kasha, L.,Bukavyn, M. (2020). Efficiency evaluation of single and Modular Cascade Machines operation in Electric Vehicle. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), pp. 156–161. DOI: 10.1109/tcset49122.2020.235413

[10] Shouliang Han, Shumei Cui, Xinxin Zhang, Hao Ge, Bingliang Xu. (2012). The modular Cascade Machines in electric vehicles. 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1–6. DOI: 10.1109/vppc.2012.6422660

[11] Antoshchenkov, R., Halych, I., Nykyforov, A., Cherevatenko, H., Chyzhykov, I., Sushko, S., Ponomarenko, N., Diundik, S., Tsebriuk, I. (2022). Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(7) (116), pp. 60–67. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254688

[12] Dembitskyi, V.M. (2022). Doslidzhennia enerhetychnykh pokaznykiv transportnykh zasobiv z elektrychny mpryvodom [Study of energy performance of electric vehicles]. Naukovo-tekhnichni doslidzhennia u haluzitransportu: kolektyvna monohrafiia, 2022, vol. 1, pp. 77-114.(inUkrainian)

[13] Salimonenko, G. N., Nazarov, M. V., Lopukhov, A. V., Soyustov A. A. (2017).Metodikavy boratyagovogoelektr odvigatelyadlyae lektromobilya [The method of choosing a traction motor for an electric vehicle]. Innovaciiiinvesticii, 2017, No. 11.(inRussian)

[14] Nadzhafova G. A. (1962). Optimal gear ratio in high-speed servo systems. Auto-mat and telemech, 1962, vol. 23, No. 3, pp. 342-348.(inRussian)

[15] Kozlova T.A. (2016).Metodika poiskaraci onal'nyhkons truktivnyhparametro vtyagovogoprivod aelektromobilya [Method of searching for rational design parameters of the traction drive of an electric vehicle]. Internet-zhurnal Naukovedenie, vol. 8, No. 5.(inRussian)

Osadchyy, V., Nazarova, O., Brylystyi, V. (2021). Laboratory stand for research of energy characteristics of electric vehicle drives. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), pp. 1–4. DOI: 10.1109/mees52427.2021.9598661