

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

В.В. Гребеніков^{1*}, докт. тех. наук, **В.Б. Павлов^{1**}**, докт. тех. наук,
Р.В. Гамалія^{1*}**, канд. ф-мат. наук, **В.С. Попков²**, **С.Г. Бондаренко³**

¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: elm1153@gmail.com.

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Академіка Кржижановського, 3, Київ, 03142, Україна.

³ТОВ «Водород ТМ»,

пр. Берестейський, 52/2, Київ, 03057, Україна.

Наведено результати чисельного дослідження електричних двигунів з постійними магнітами циліндричного типу. Показано, що заміна в стандартному асинхронному двигуні короткозамкненого ротора на ротор з постійними магнітами дає можливість отримати істотне збільшення питомої потужності електричної машини. Проведено чисельні дослідження та аналіз характеристик електродвигуна з тангенціально намагніченими неодимовими магнітами для п'яти конфігурацій магнітної системи ротора. Показано, що задля забезпечення максимальних питомих характеристик в електродвигунах для електромобілів необхідно враховувати їздовий цикл та здійснювати рідинне охолодження електродвигуна. Також виконано теплові розрахунки з урахуванням їздового циклу NEDC і встановлено, що застосування рідинного охолодження дає змогу забезпечити охолодження неодимових магнітів і обмоток до температури нижче критичної у разі підвищеного струму в обмотках. Характеристики досліджуваних електродвигунів розраховано в пакетах програм Simcenter MagNet і Simcenter MotorSolve. Бібл. 4, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: чисельне моделювання, електродвигун для електромобіля, постійні магніти, їздовий цикл, робочі характеристики, тепловий розрахунок.

Вступ. Сьогоднішній рівень розвитку технологій дає змогу створювати та серійно виробляти практично повний спектр електромобілів, що охоплює всі сторони авторинку, зокрема: персональні засоби пересування; легкові електромобілі та позашляховики; мікроавтобуси; автобуси; вантажні автомобілі; спецтехніка.

Найважливішим агрегатом електромобіля є електродвигун і системи його живлення та управління. Електродвигуни електромобілів постійно вдосконалюються з погляду споживання електроенергії, надійності, зниження витрат на експлуатацію. Отже, поряд з розробкою нових джерел первинної енергії – акумуляторних батарей, суперконденсаторів і електрохімічних генераторів – світові виробники значну увагу приділяють підвищенню ефективності електродвигунів.

Відзначимо також, що великий різновид електротранспортних засобів накладає специфічні умови на електрообладнання, яке застосовується для їхнього створення. Зокрема, для застосування в транспортних засобах подвійного призначення (цивільного та військового) потрібні високопродуктивні електродвигуни з високим питомим крутним моментом, високою ефективністю в широкому діапазоні робочих швидкостей [1–4], а також високоефективні силові транзисторні перетворювачі та комп'ютерні системи управління. Для управління електродвигуном розроблено інвертор на основі трифазного транзисторного модуля фірми *Infineon* зі стрічковими охолоджувачими структурами. Перемикання транзисторів інвертора здійснюється за сигналами датчика положення ротора, несуча частота – 10кГц.

Жорсткі експлуатаційні та технічні вимоги, що пред'являються для тягових електродвигунів як легкових, так і великовантажних електромобілів, викликають необхідність ретельного вивчення поведінки електродвигуна протягом усього їздового циклу. Зокрема, основна проблема в процесі проектування тягового двигуна електромобіля полягає в тому, що максимальний крутний момент

© Гребеніков В.В., Павлов В.Б., Гамалія Р.В., Попков В.С., Бондаренко С.Г., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>; ** <https://orcid.org/0000-0003-0565-265X>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-5729-7891>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

потрібен під час розгону з низькою швидкістю обертання, в той час як двигун працює в звичайному режимі за більш низьких значеннях крутного моменту та більш високій швидкості обертання. Крім того, під час типового їздового циклу у процесі руху під ухилом вгору суттєво зростає момент на валу електродвигуна. Щоб забезпечити цей підвищений момент, необхідно збільшувати струм в обмотках електродвигуна, а отже необхідно виконувати тепловий розрахунок електродвигуна з урахуванням повітряної або рідинної системи охолодження та підвищеної щільності струму в обмотках. При цьому система охолодження має бути спроектована так, щоб забезпечувати ефективне охолодження активних елементів конструкції електродвигунів, забезпечуючи їхній нагрів не вище за допустиме. Особливо це важливо для постійних магнітів, нагрівання яких вище за допустиму температуру призводить до їхнього розмагнічування. Наприклад, магніти марки N40 втрачають свої властивості у разі нагрівання понад 80°C, магніти марки N40SH мають температурну стабільність до 150°C. У результаті потрібен ретельний розрахунок електродвигуна, включаючи умови руху згідно з заданим їздовим циклом та з урахуванням нагріву елементів конструкції двигуна.

За об'єкт дослідження обрано електродвигун з постійними магнітами для невеликого транспортного засобу (електромобіля), який може експлуатуватися в міських та замських умовах. У трансмісії використовується один електродвигун, з'єднаний із передніми або задніми колесами через диференціал. Диференціальне передатне відношення досить високе, щоб збільшити необхідний момент електродвигуна, що приводить до зменшення його розмірів та маси. Однак такий вибір диференціального передавального числа збільшує потребу в широкому діапазоні робочих швидкостей двигуна задля досягнення максимальної швидкості транспортного засобу. Необхідний крутний момент двигуна та робоча швидкість розраховуються за допомогою фундаментальних аналітичних рівнянь навантаження транспортного засобу [5].

Метою роботи є аналіз характеристик електричної машини в режимі двигуна з найпоширенішою конфігурацією магнітної системи ротора, а саме з постійними магнітами тангенціальної намагніченості; визначення основних параметрів електродвигуна з постійними магнітами (розміри магнітної системи статора та ротора, число витків обмоток статора, напруга живлення, електромагнітний момент), що забезпечують рух електромобіля із заданими габаритними розмірами та масою з урахуванням їздового циклу; розрахунок температури нагріву елементів електродвигуна з урахуванням системи охолодження для оптимального варіанта конструкції. Конфігурація магнітної системи виконана на базі статора стандартного асинхронного двигуна AIP132MB8 з висотою осі обертання 132 мм та кількістю пар полюсів $p = 4$.

Розрахунок параметрів електродвигуна з урахуванням їздового циклу. Їздовий цикл, який описує рух транспортного засобу в місті та за містом – робота двигуна в режимі мінімальної частоти обертання, рушання з місця та розгін до певної швидкості, гальмування двигуном з однієї швидкості до іншої. Європейський їздовий цикл NEDC (*New European Driving Cycle*) складається із двох частин. Перша частина циклу – міський їздовий цикл UDC (*Urban Driving Cycle*) складається з чотирьох однакових блоків кожен тривалістю 195 с. Відповідно до цього циклу транспортний засіб на певних ділянках розганяється до швидкості 18-32-50 км/год. Замський рух описується окремим блоком EUDC (*ExtraUrban Driving Cycle*) тривалістю 400 с із чергуванням швидкості руху 70-50-100-120 км/год [5].

Як вхідні дані для розрахунку електродвигуна прийнято параметри автомобіля середнього класу. Розрахунок обертаючого моменту на валу електродвигуна та частота обертання ротора мають визначатися для двох значень маси електромобіля: $m = 1800$ кг, $m = 2000$ кг і двох значень передаточного відношення редуктора: $G_r = 5.33$ та $G_r = 7.33$. Для коефіцієнта редукції $G_r = 5.33$ прийнято значення діаметра колеса $D_v = 700$ мм, що відповідає маркуванню шин 215/65R16. Для коефіцієнта редукції $G_r = 7.33$ застосовується шини 225/75R16 з діаметром колеса $D_v = 755$ мм. З урахуванням наведених параметрів та сил, що діють на електромобіль під час руху, було визначено максимальну частоту обертання ротора та максимальний момент на валу ротора електродвигуна для кутів нахилу дороги $\alpha = 0$ та $\alpha = 12\%$. У всіх розрахунках коефіцієнт аеродинамічного опору прийнятий рівним 0.33, ефективна площа поперечного перерізу електромобіля – 1.9 м², коефіцієнт опору коченню – 0,018.

На рис. 1 наведено залежності моменту від частоти обертання валу електродвигуна під час руху електромобіля згідно з їздовим циклом (NEDC), які розраховано під час руху автомобіля в гору з кутом нахилу дороги $\alpha = 12\%$ та на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$). Згідно з нормативними документами максимальний кут нахилу дороги не повинен перевищувати 12%. На рис. 1 наведено

графіки для варіантів (а), (б), (в) і (г). Аналізуючи дані графіків на рис. 1, слід зазначити, що максимальне значення моменту, що дорівнює $M_{\max} = 281.3$ Нм, спостерігається для варіанта (а), а

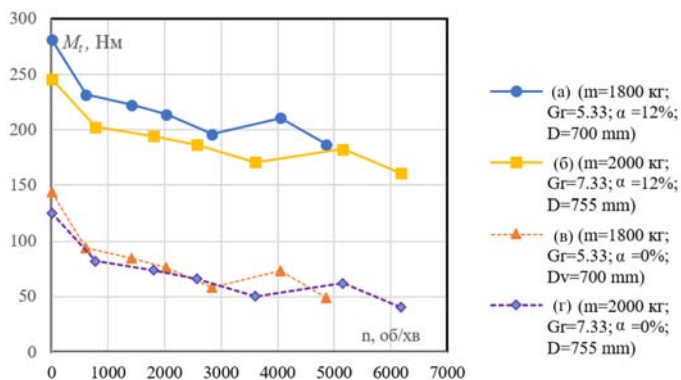


Рис. 1

використано статор стандартного асинхронного двигуна АР132МВ8, основні технічні характеристики якого такі: номінальна напруга під час з'єднання обмоток статора в «зірка/трикутник» $U_n = 380/220$ В, номінальний струм $I_n = 8/14$ А, номінальна потужність $P_n = 5.5$ кВт, номінальна частота обертання $n = 710$ об/хв, ККД = 78.5%, $\cos \varphi = 0,77$. Статор має такі розміри: зовнішній діаметр $D_a = 225$ мм,

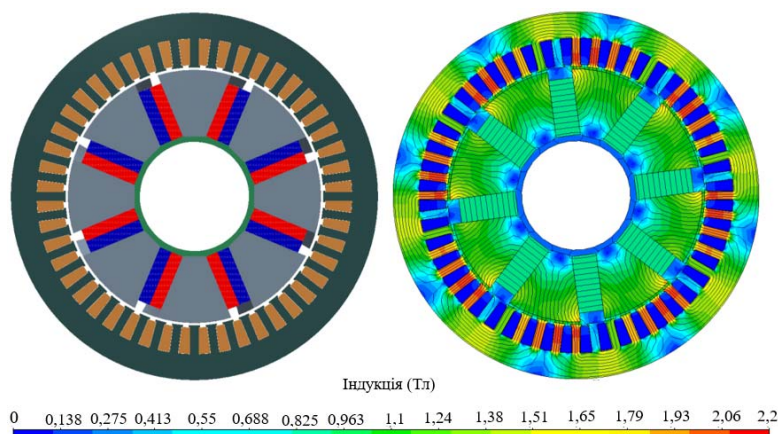


Рис. 2

розрахунок робочих характеристик електродвигуна: напруга живлення $U_n = 400$ В постійного струму (аккумуляторна батарея); форма струму живлення – синусоїдальна, з'єднання обмоток – «трикутник». На рис. 3 показано робочі характеристики електродвигуна з розмірами магнітів (160×35×10 мм). На цьому рисунку також зображено графіки пікових моментів для їздового циклу NEDC. Щоб отримати значення електромагнітного моменту, що перевищує на 10% найбільше пікові значення моменту, яке для варіанта (в) за кута ухилу $\alpha = 0\%$ дорівнює $M = 143.6$ Нм, струм має дорівнювати $I_n = 190$ А. Щільність струму при цьому струмі дорівнює $J = 13$ А/мм².

Максимальне пікове значення електромагнітного моменту за кута нахилу дороги $\alpha = 12\%$ дорівнює $M = 281.3$ Нм для варіанту (а). Щоб отримати значення електромагнітного моменту, який дещо перевищує це значення, лінійний струм має дорівнювати $I_n = 350$ А, що відповідає щільності струму $J = 19$ А/мм². Результати розрахунку показують, що робочі характеристики електродвигуна забезпечують рух електромобіля відповідно до заданого їздового циклу як під час руху на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$), так і під час руху з максимальним ухилом ($\alpha = 12\%$). Щоб отримати значення електромагнітного моменту, яке перевищує значення моменту навантаження для всього їздового циклу, необхідно, щоб число витків в пазу кожної обмотки було рівним $W = 3$ за з'єднання обмоток у "трикутник". Однак при цьому числі витків проти-ЕРС порівнюється з напругою живлення, що дорівнює $U_n = 400$ В за частоти обертання $n = 5000$ об/хв.

максимальне значення частоти обертання, що дорівнює $n = 6180.7$ об/хв, – для варіантів (б) і (г). Під час проєктування електродвигуна для електромобіля ці значення параметрів приймають за базові, тобто електродвигун має забезпечувати момент не нижче $M_{\max} = 290$ Нм, а кількість витків обмоток статора має бути підібрана так, щоб зниження потужності й моменту було після частоти обертання ротора $n = 6200$ об/хв.

Чисельні дослідження електродвигуна із постійними магнітами на базі статора асинхронного двигуна.

Під час проєктування було використано статор стандартного асинхронного двигуна АР132МВ8, основні технічні характеристики якого такі: номінальна напруга під час з'єднання обмоток статора в «зірка/трикутник» $U_n = 380/220$ В, номінальний струм $I_n = 8/14$ А, номінальна потужність $P_n = 5.5$ кВт, номінальна частота обертання $n = 710$ об/хв, ККД = 78.5%, $\cos \varphi = 0,77$. Статор має такі розміри: зовнішній діаметр $D_a = 225$ мм, внутрішній діаметр статора $D_i = 158$ мм, число пазів $Z_p = 48$, висота пазів $h_s = 17.6$ мм, довжина активної частини осердя $l_{Fe} = 160$ мм. Величина повітряного проміжку між статором і ротором дорівнює $\delta = 1.5$ мм. Конфігурацію магнітної системи однієї із досліджуваних моделей (розміри магнітів $D \times B \times Ш$ (160×35×15 мм) та картина магнітного поля за щільності струму $J = 10$ А/мм² показано на рис. 2. Для зменшення зубцевого моменту на роторі виконується скіс полюсів на одну зубцеву поділку [6].

Початкові дані для

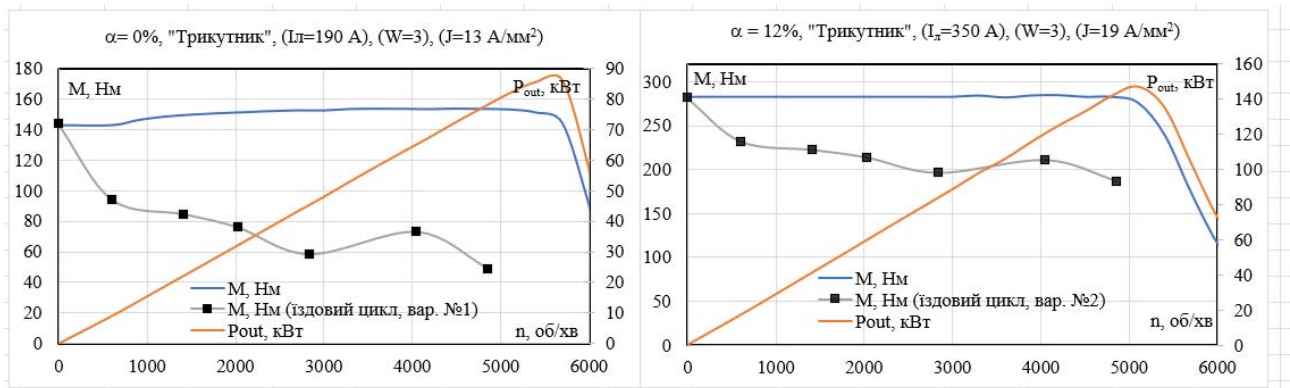


Рис. 3

Для з'єднання в «трикутник» було розраховано робочі характеристики електродвигунів ще для трьох значень розмірів постійних магнітів, а також для магнітів марки N38. Магніти цієї марки істотно дешевші, ніж магніти N40SH, проте верхня межа по температурі у цих магнітів становить 80°C, що недостатньо для двигуна, пікова потужність якого більша за 140 кВт. Тому не можна рекомендувати магніти цієї марки для значної пікової потужності. У таблиці наведено порівняльні характеристики електродвигунів на основі статора АР132МВ8 для трьох типорозмірів постійних магнітів. Для всіх варіантів число витків в пазу дорівнює $W = 3$. Кожен виток складається з декількох паралельних елементарних провідників.

Параметр	№1	№2 (оптим.)	№3	№4	№5
Тип магнітів	N40SH	N40SH	N38	N40SH	N40SH
Маса магнітів, кг	5.04	3.36	3.84	1.92	3.84
Розміри магнітів (Д×В×Т), мм	(160×35×15)	(160×35×10)	(160×40×10)	(160×40×5)	(160×40×10)
Максимальний момент, Нм	306	292	300	289	303
Потужність, кВт за $n = 3000$ об/хв	96.2	91.4	93.8	90.7	94.6
Потужність, кВт за $n = 4860$ об/хв	153	146	149	140	149
КПД, % за $n = 3000$ об/хв	96.1	96.3	96.1	95.6	96
Питома потужність ($P_{out}/m_{пм}$), кВт/кг за $n = 4860$ об/хв	30,3	43,5	38,8	72,9	38,8

Аналізуючи дані, наведені в таблиці і на рис. 3, слід зазначити, що всі варіанти забезпечують електромагнітний момент, що перевищує момент їздового циклу. Найбільша питома потужність (відношення потужності до маси магнітів) для варіанта № 4, однак за товщини магнітів $h_{пм} = 5$ мм важко забезпечити їхню міцність, тобто під час обертання ротора велика ймовірність руйнування магнітів (поява тріщини). Тому як рекомендований пропонується варіант № 2 з розмірами магнітів (160×35×10) мм. Слід зазначити, що варіант № 3 також забезпечує необхідний електромагнітний момент, проте магніти цієї марки втрачають свої властивості за температури 80°C, що не прийнятно для електричної машини, пікова потужність якої більше 140 кВт. Для оптимального варіанта № 2 за кута нахилу дороги $\alpha = 12\%$ і частоти обертання ротора $n = 4860$ об/хв необхідно забезпечити момент не менше $M = 285$ Нм. У цьому випадку лінійний струм має дорівнювати $I_{л} = 350$ А та щільність струму – $J = 19$ А/мм².

Чисельні дослідження температури нагріву електродвигуна. Розрахунок температури елементів конструкції електродвигуна здійснювався з урахуванням системи охолодження для оптимального варіанта № 2 з розмірами магнітів (160×35×10) мм. Тепловий розрахунок виконувався для їздового циклу NEDC для двох систем охолодження – повітряної та рідинної. У повітряній системі охолодження повітря за допомогою вентилятора направляється вздовж зовнішнього корпусу електричної машини. Вихідні дані для повітряного охолодження: орієнтація машини – горизонтальна; напрям примусової конвекції – аксіальний; швидкість охолоджувального потоку – $V_{flow} = 5$ м/с; початкова температура – $T = 20$ °C.

Рідинна система охолодження складається з каналів, розташованих рівномірно всередині зовнішнього корпусу електричної машини та зорієнтованих уздовж осі обертання ротора. Вихідні дані для теплового розрахунку такі: тип каналів, вбудованих в корпус – аксіальні; кількість каналів охолодження – $n_k = 36$; форма каналів – кругла; діаметр каналів – 3 мм; продуктивність циркуляційного насоса – $Q = 2$ л/хв; початкова температура на вході до каналів охолодження – 20 °С. На рис. 4 показано графіки нагріву обмоток і магнітів для повітряного охолодження за значеннях лінійних струмів $I_{л} = 190$ А для їздового циклу NEDC і руху на прямолінійній ділянці дороги ($\alpha = 0\%$). Із цих графіків випливає, що усталена температура обмоток $T_{обм} = 48^\circ\text{C}$, магнітів – $T_{ПМ} = 47^\circ\text{C}$,

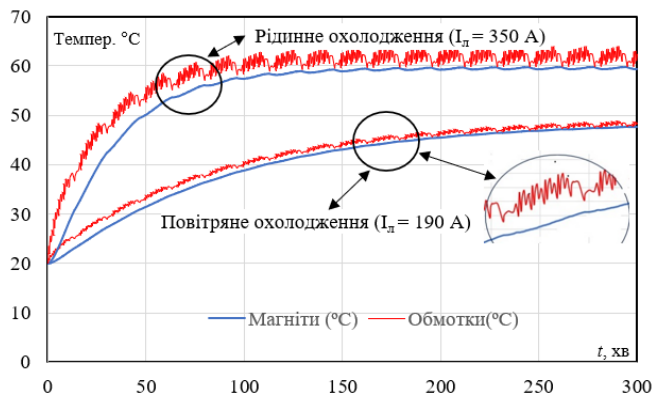


Рис. 4

тобто для цього режиму руху повітряне охолодження забезпечує нагрівання обмоток і магнітів не вище допустимого.

На рис. 4 також наведено графіки нагріву обмоток і магнітів для рідинного охолодження при значенні лінійних струмів $I_{л} = 350$ А, що відповідає щільності струму $J = 19$ А/мм² та їздовому циклу NEDC за кута нахилу дороги ($\alpha = 12\%$). Слід зазначити, що за рідинного охолодження ні обмотки, ні магніти не нагріваються понад допустиму температуру ($T_{обм} = 62^\circ\text{C}$, $T_{ПМ} = 59^\circ\text{C}$), хоча нагрів розраховано для випадку, коли електромобіль переміщується в гору з нахилом ($\alpha = 12\%$) протягом 120 хв.

На рис. 5 показано картину теплового поля для повітряного (рис. 5, а) та рідинного (рис. 5, б) охолодження електродвигуна, з якої випливає, що за значень лінійних струмів $I_{л} = 350$ А найбільш нагрітими елементами є обмотки та їхні лобові частини й постійні магніти. Таким чином, результати розрахунку показують, що за збільшеній щільності струму в обмотках можна реалізувати задане значення електромагнітного моменту, що забезпечує рух електромобіля відповідно до заданого їздового циклу та максимального кута нахилу дороги.

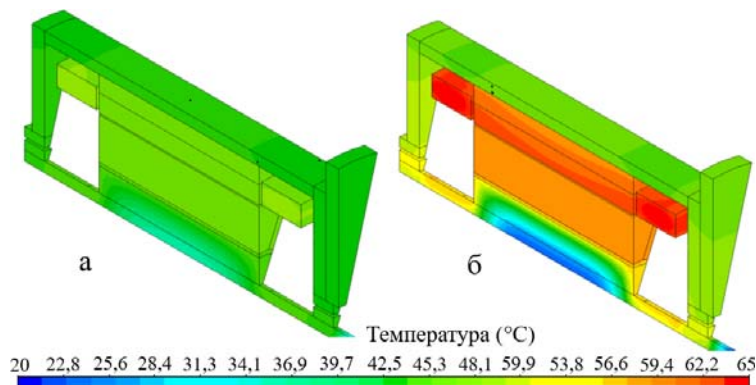


Рис. 5

Висновки. У результаті чисельних досліджень встановлено, що заміна короткозамкненого ротора на ротор з постійними магнітами дає змогу отримати суттєве збільшення питомої потужності порівняно зі стандартним асинхронним двигуном АР132МВ8 та застосувати

модернізований електродвигун як привод електромобіля середнього класу.

У результаті теплових розрахунків з урахуванням їздового циклу NEDC встановлено, що застосування рідинного охолодження дає змогу забезпечити охолодження неодимових магнітів і обмоток до температури нижче критичної за підвищеного струму в обмотках.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток наукових основ і розробка принципів побудови електромеханічних перетворювачів енергії з постійними магнітами та магнітними редукторами», (шифр МАГРЕД), державний реєстраційний номер 0120U002006, КПКВ 6541050.

1. Günther S., Ulbrich S., Hofmann W. Driving cycle-based design optimization of interior permanent magnet synchronous motor drives for electric vehicle application. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Ischia, Italy, 18-20 June 2014. Pp. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2014.6872108>.

2. Gobbi M., Sattar A., Palazzetti R., Mastinu G. Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency – A review. *Applied Energy*. 2024. Vol. 357. Art no 122496. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122496>.
3. Sarigiannidis A.G., Beniakar M.E., Kladas A.G. Fast Adaptive Evolutionary PM Traction Motor Optimization Based on Electric Vehicle Drive Cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014. Vol. 66. No 7. Pp. 5762-5774. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2631161>.
4. Ramesh P., Lenin N.C. High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles — Comprehensive Review Based on Material Technology. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55. No 11. Art no 0900121. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2929145>.
5. Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Qi M. Mathematical Modeling the Performance of an Electric Vehicle Considering Various Driving Cycles. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. Art no 2586. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11112586>.
6. Grebenikov V.V., Priymak M.V. Design of the electric motor with permanent magnets for electric vehicle according the driving cycle. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 5. Pp. 65-68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2018.05.065>.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF PERMANENT MAGNET MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLES

V.V. Grebenikov¹, V.B. Pavlov¹, R.V. Gamalia¹, V.S. Popkov², S.G. Bondarenko³

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: elm1153@gmail.com.

²Institute of Materials Science Problems named after I.M. Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine,

3, Akademika Krzhizhanovskoho Str., Kyiv, 03142, Ukraine.

³LLC "Vodorod TM",

52/2, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

The results of numerical investigation of electric motors with permanent magnets of cylindrical type are presented. It is shown that replacement of a squirrel-cage rotor in a standard induction motor by a rotor with permanent magnets allows to obtain a significant increase in the specific power of the electric machine. Numerical investigations and analysis of characteristics of the electric motor with tangentially magnetized neodymium magnets for five configurations of the rotor magnetic system are carried out. It is shown that to ensure maximum specific characteristics in electric motors for electric vehicles it is necessary to take into account the driving cycle and to carry out liquid cooling of the electric motor. Thermal calculations taking into account the driving cycle of NEDC are also performed and it is established that the use of liquid cooling allows to provide cooling of neodymium magnets and windings to a temperature lower than critical at increased current in the windings. Characteristics of the investigated electric motors are calculated in Simcenter MagNet and Simcenter MotorSolve software packages. References 4, figures 5, tables 1.

Keywords: numerical modeling, electric motor for electric car, permanent magnets, driving cycle, performance characteristics, thermal calculation.

Надійшла 25.04.2024
Остаточний варіант 06.06.2024