

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ДЛЯ МІСЬКОГО ТРОЛЕЙБУСА

В.В. Гребеніков^{1*}, докт. техн. наук, **Р.В. Гамалія^{1**}**, канд. фіз.-мат. наук,
С.А. Дадичин^{1*}**, **В.С. Попков²**

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

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

E-mail: elm1153@gmail.com

Наведено результати чисельного дослідження та порівняльного аналізу тягових електроприводів для міських тролейбусів, що базуються на асинхронних двигунах та синхронних двигунах з постійними магнітами, а також комбінації високошвидкісних двигунів з постійними магнітами та магнітних редукторів. 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 неодимовими магнітами для чотирьох конфігурацій магнітної системи ротора та визначено оптимальну з точки зору питомих показників. Результати теплових розрахунків з урахуванням ізодового циклу показали, що застосування рідинного охолодження забезпечує підтримання температури неодимових магнітів і обмоток нижче критичних значень навіть за навантажень, близьких до граничних. Додатково розглянуто можливість зменшення габаритів і маси електропривода шляхом використання високошвидкісного двигуна з магнітним редуктором. Розрахунки електромагнітних і теплових характеристик виконано в програмних пакетах Simcenter Magnet і Simcenter MotorSolve. Бібл. 9, рис. 9, табл. 3

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

Вступ. На даний момент для приводу тролейбусів переважно використовують асинхронні двигуни (АД). Висока ефективність і надійність асинхронного тягового двигуна порівняно з тяговим двигуном постійного струму забезпечила йому широке застосування для приводу транспортних засобів. Однак із підвищенням споживчих якостей тролейбуса таких, як підвищена пасажиромісткість, високі динамічні характеристики, зросли вимоги до тягового приводу. Асинхронний тяговий двигун має низку недоліків: недостатня ефективність за невеликої швидкості, недостатньо жорстка механічна характеристика в діапазоні великих швидкостей, схильність до значних теплових втрат, особливо в роторі, під час частих циклів розгону і гальмування.

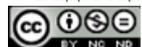
Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є перспективною альтернативою АД завдяки своїм чудовим технічним характеристикам. СДПМ здатні забезпечувати значні перевантаження за крутним моментом, що робить їх ідеальними для застосування в тролейбусах, де потрібна часта зміна швидкості. Питомі характеристики СДПМ у разі використання рідинного охолодження такі, як відношення крутного моменту і потужності до маси, істотно перевершують аналогічні показники АД [1]. За рахунок варіацій геометрії магнітної системи ротора СДПМ, запропонованої в даній роботі, можливо створювати більш компактні та легкі двигуни з покращеними питомими характеристиками. Наразі в галузі створення СДПМ накопичено великий досвід, розроблено ефективні електромагнітні структури з внутрішніми постійними магнітами (ІРМ), які можуть бути особливо придатними завдяки їхній здатності забезпечувати широкий діапазон швидкостей за допомогою ослаблення поля [2]. Показано, що впровадження передових методів керування тягового двигуна з постійними магнітами забезпечує високі динамічні характеристики електропривода колісного транспортного засобу [3]. Однак широкого застосування СДПМ для приводу тролейбуса поки що не знайшли. Але слід відзна-

© Гребеніков В.В., Гамалія Р.В., Дадичин С.А., Попков В.С., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>; ** <https://orcid.org/0000-0002-5729-7891>;

*** <https://orcid.org/0009-0000-6589-9887>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



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

чити, що СДПМ з рідинним охолодженням вже застосовуються. Наприклад, можна виділити концерн HESS AG (Швейцарія), у тролейбусах якого використовуються СДПМ потужністю 250 кВт з водяним або масляним охолодженням [4].

Ще одним перспективним напрямком розвитку тягового приводу тролейбусів є використання магнітного редуктора (МР) з високошвидкісним двигуном з постійними магнітами (ВШПМ). Такий підхід вже використовується в тяговому приводі трамвая [5]. В даній роботі також наведено розрахунки та порівняльний аналіз тягового приводу з МР.

Таким чином, останніми роками відзначається зростання кількості розробок (досліджень) тягового двигуна з постійними магнітами для приводу транспортних засобів і тролейбусів, зокрема, при цьому все частіше застосовується рідинне охолодження. Це свідчить про перспективність напряму зі створення тягового двигуна з постійними магнітами та підвищеними питомими характеристиками.

Метою дослідження є підвищення питомих характеристик тягових електродвигунів, призначених для міського тролейбуса і проведення порівняльного аналізу конструктивних варіантів (СДПМ), виконаних у габаритних розмірах існуючого асинхронного тягового двигуна, та зіставлення електромеханічних параметрів СДПМ з рідинним охолодженням із відповідними характеристиками серійних асинхронних двигунів (АД) з повітряним охолодженням, що використовуються у тролейбусах. Крім того, проводиться порівняння СДПМ з високошвидкісним двигуном на постійних магнітах (ВШПМ), оснащеним магнітним редуктором (МР), з метою оцінки їхньої ефективності та доцільності застосування в міському електротранспорті.

Однак ефективне проектування тягових електроприводів тролейбусів на основі електродвигунів з постійними магнітами потребує проведення фундаментальних досліджень, спрямованих на створення параметричних спеціалізованих комп'ютерних моделей, які побудовані з використанням методу кінцевих елементів і враховують взаємодію електромагнітних та теплових процесів.

Їздовий цикл тролейбуса. Розроблення тягового електроприводу тролейбуса передбачає аналіз роботи двигуна з урахуванням їздового циклу тролейбуса, який моделює режим руху в широкому діапазоні зміни швидкості, тривалості розгону і гальмування. Типовий їздовий цикл міського тролейбуса – це профіль швидкості в часі, що відображає характерні режими руху в міських умовах: часті зупинки, розгони, гальмування і періоди руху з постійною швидкістю. Такі цикли важливі для оцінки енергоспоживання, ефективності рекуперації та теплових навантажень на обладнання.

Режим розгону тролейбуса прийнято на основі загальних вимог до технічних характеристик тролейбусів [5–8]. Під час аналізу режиму роботи двигуна прийнято їздовий цикл тролейбуса, який складається з наступних семи ділянок: 1 – стоянка – 15 сек; 2 – розгін до 40 км/год – 15 сек; 3 – розгін від 40 км/год до 50 км/год – 5 сек; 4 – рух із постійною швидкістю 50 км/год – 15 сек; 5 – гальмування від 50 км/год до 40 км/год – 5 сек; 6 – гальмування від 40 км/год до зупинки – 15 сек; 7 – стоянка – 15 сек. Далі ці цикли повторюються.

За відомих загальних конструктивних характеристик тролейбуса (маса, діаметр колеса, коефіцієнт редуктора передачі моменту колесам, площа поперечного перерізу та інше) можна визначити момент опору руху тролейбуса. Розрахунок моменту опору, що діє на колеса тролейбуса, заснований на відомій залежності

$$M(\text{Н} \cdot \text{м}) = \frac{1}{gr} \left(\frac{wd}{1000} \right) 0,5 \cdot (g_{vw} \cdot v_a + 0,5 Ad \cdot Cd \cdot A (v_s - w_s)^2 + 9,80665 \cdot Cr \cdot g_{vw} + 9,80665 \cdot g_{vw} \cdot \alpha),$$

де $gr = 9,84$ – передавальне число механічного редуктора; $wd = 1084$ мм – діаметр колеса; $g_{vw} = 18000$ кг – повна маса тролейбуса; v_a – прискорення транспортного засобу, $\text{м}/\text{с}^2$; $Ad = 1,23$ – густина повітря; $Cd = 0,4$ – коефіцієнт аеродинамічного опору; $A = 7,4$ м^2 – ефективна площа поперечного перерізу; v_s – швидкість тролейбуса, $\text{м}/\text{с}$; w_s – швидкість вітру, $\text{м}/\text{с}$; $Cr = 0,018$ – коефіцієнт опору коченню; α , % – коефіцієнт кута нахилу дороги.

На рис. 1 показано прийнятий графік їздового циклу тролейбуса в межах руху трьох циклів. На цьому рисунку також зображено графік частоти обертання ротора електродвигуна та момент опору руху тролейбуса. За максимальної швидкості руху 50 км/год частота обертання ротора – $n = 2408$ об/хв. Графік їздового циклу наочно показує, що крутний момент електродвигуна визначено з умови забезпечення розгону тролейбуса. Під час розгону на ділянці 2 момент опору дорівнює $M = 921$ Н·м, на ділянці 3 – $M = 744$ Н·м. Під час рівномірного руху тролейбуса момент опору незначний і дорівнює 194 Н·м.

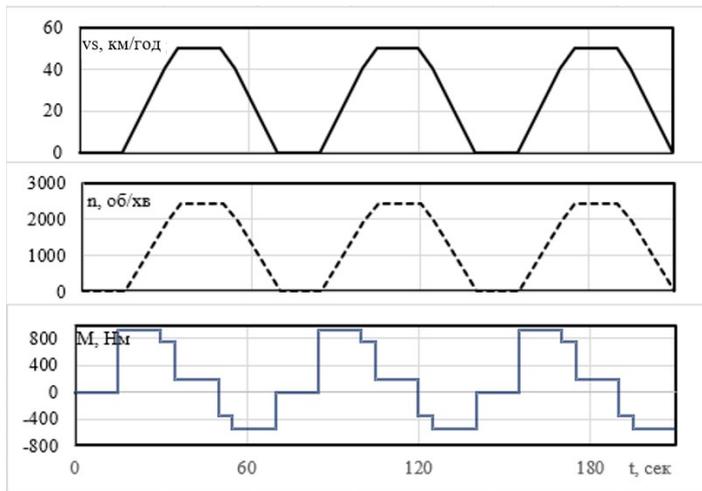


Рис. 1

разі ухилу дороги $\alpha = 6\%$ розгін за часом істотно більший і становить 50 сек, а момент опору не перевищує $M=920$ Н·м.

Результати розрахунку асинхронного двигуна. Як вихідний обрано існуючий асинхронний двигун приводу тролейбуса типу АД903 У1 виробництва харківського заводу «Електроважмаш» або ДТА-1У1, основні параметри якого наступні: номінальна потужність $P_n = 180$ кВт; номінальна лінійна напруга (зірка) $U_n = 450$ В; номінальний лінійний струм $I_n = 276$ А; частота обертання номінальна $n_n = 1500$ об/хв; частота обертання максимальна $n_{max} = 4000$ об/хв; ковзання 2%; ККД 93%; коефіцієнт потужності 0,9; діаметр корпусу $D_a = 550$ мм; довжина корпусу $L = 860$ мм; маса активних матеріалів $m_{a.m.} = 640$ кг, загальна маса двигуна $m_{з.м.} = 840$ кг. Таким чином коефіцієнт питомої потужності цього двигуна дорівнює $K_p = P_n/m_{з.м.} = 180/840 = 0,21$.

На рис. 2 показано графік зміни моменту тягового асинхронного двигуна під час розгону тролейбуса. Режим розгону забезпечує тяговий перетворювач. Розрахунок характеристик АД виконано в пакеті Simcenter MotorSolve. Процес розгону можна представити механічною характеристикою (виділеною червоним кольором), яку отримано безліччю механічних характеристик за різних частот тягового перетворювача (на рисунку умовно показано тонкими лініями).

Шляхом регулювання напруги і частоти контролером тяги тягового перетворювача забезпечується постійний режим тяги, що встановлюється педаллю. Момент опору згідно з їздовим циклом на рис. 1 виділено синім кольором.

В результаті визначення ККД електродвигуна для безлічі механічних характеристик, можна оцінити (визначити) залежність ККД тягового АД у процесі розгону (табл. 1). ККД кожної механічної

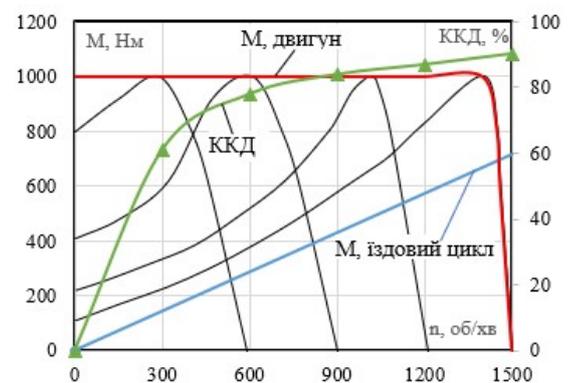


Рис. 2

Таблиця 1

Швидкість км/год	Швидкість обертання об/хв	Критичне ковзання. %	Момент Н·м	Напруга. В	Струм А	ККД %
5,9	300	20	1000	78	386	61
11,7	600	10	1000	145	386	78
17,6	900	7	1000	212	390	84
23,4	1200	5.6	1000	279	405	87
29,3	1500	4.0	1000	345	389	90,3

характеристики визначено за постійного моменту 1000 Н·м, який забезпечується за критичного ковзання. Дані табл. 1 показують недолік АД – незначний ККД за невеликої швидкості обертання. Під час руху тролейбуса з незначною швидкістю (до 15 км/год) відбувається значне нагрівання ротора АД. Під час розгону

Під час гальмування тролейбуса тяговий електропривод працює тільки проти інерції тролейбуса, тому момент тягового електродвигуна під час гальмування менший, ніж під час розгону, і дорівнює 560 Н·м. Аварійне гальмування тролейбуса забезпечується традиційною незалежною системою гальмування.

Під час розробки тягового електроприводу тролейбуса також важливо провести порівняльний аналіз механічної характеристики тягового електродвигуна і моментної характеристики опору руху тролейбуса. На рис. 1 наведено циклограму моменту опору під час ухилу дороги $\alpha = 0\%$. У

трати електроенергії тягового АД під час розгону тролейбуса. Середня споживана потужність тягового АД під час розгону тролейбуса склала 113 кВт. Витрата електричної енергії під час розгону тролейбуса до невеликої швидкості 30 км/год за 10 сек склала 0,316 кВт-год.

Двигун із постійними магнітами навпаки під час розгону тролейбуса забезпечує високу ефективність. Постійні магніти ротора забезпечують великий магнітний потік ротора під час пуску і номінальної швидкості. Під час пуску момент двигуна з постійними магнітами прямо пропорційний струму обмотки статора. Відповідно, можливо створити великий пусковий момент двигуна, який обмежується лише допустимим струмовим навантаженням обмотки двигуна. Під час розгону тролейбуса ККД тягового електродвигуна з постійними магнітами змінюється від 90% до 96%, середній ККД становить близько 94%. Середня споживана потужність СДПМ тролейбуса становить 100 кВт. Витрата електричної енергії під час розгону тролейбуса до невеликої швидкості 30 км/год за 10 сек склала 0,288 кВт-год. Таким чином економія електричної енергії під час розгону тролейбуса СДПМ порівняно з тяговим АД становитиме 0,028 кВт-год.

На перший погляд економія електричної енергії під час розгону тролейбуса в разі використання СДПМ становить невелику величину, однак, з огляду на їздовий цикл руху тролейбуса з численними зупинками, економія електроенергії за рік може скласти значну величину. Протягом робочого дня тролейбус здійснює близько 200 зупинок. З урахуванням технічного обслуговування тролейбуса тривалість експлуатації тролейбуса протягом року становитиме близько 330 днів. За цих умов економія електроенергії за рік у разі використання СДПМ порівняно з АД становитиме приблизно 1848 кВт-год. Тому доцільно розглянути застосування СДПМ для тролейбуса більш детально.

Результати розрахунку синхронних електродвигунів з постійними магнітами (СДПМ).

Під час проектування СДПМ за основу було взято статор тягового асинхронного електродвигуна АД-4, основні технічні характеристики якого такі: номінальна потужність 90 кВт; номінальна лінійна напруга 400 В; номінальний лінійний струм 160 А; частота обертання номінальна 2100 об/хв; частота обертання максимальна 4800 об/хв; ковзання 1,7%; кількість фаз 3; момент на валу за номінальної частоти обертання 318 Н·м; коефіцієнт потужності 0,9; маса електродвигуна 350 кг.

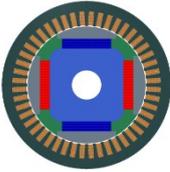
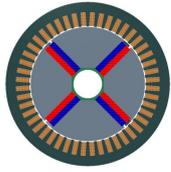
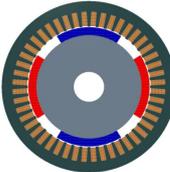
Під час проведення досліджень обрано такі варіанти конструкцій СДПМ:

- двигун (TR1) із вбудованими (інкорпорованими) ПМ усередині ротора;
- двигун (TR2) із внутрішньою установкою ПМ і тангенціальним намагнічуванням ПМ;
- двигун (TR3) з поверхневою установкою ПМ на роторі;
- двигун (TR4) із внутрішньою установкою ПМ у кілька шарів.

Варіанти конструкцій синхронних двигунів із постійними магнітами охоплюють найперспективніші типи двигунів, які нині набули широкого поширення. Для всіх варіантів двигунів із ПМ прийнято однакові габаритні розміри: діаметр зовнішній статора $D_a = 345$ мм; довжина статора і ротора $L_a = 270$ мм. Досліджувані двигуни з ПМ гарантовано можуть бути встановлені в тролейбус замість наявного тягового асинхронного двигуна. Під час розрахунку характеристик чотирьох варіантів щільність струму в обмотках і величина магнітної індукції магнітного поля в сталі статора прийняті однаковими. Усі варіанти двигунів із ПМ повинні мати момент не менше $M_{max} = 990$ Н·м, який гарантовано забезпечує рух тролейбуса відповідно до прийнятого їздового циклу. Таким чином, за заданих умов результати розрахунку двигунів із ПМ мають підтвердити можливість їхнього застосування як тягового електроприводу тролейбуса.

Розрахунок СДПМ виконувався в програмі Simcenter MotorSolve. Розрахунок у цій програмі електричних машин з ПМ у попередніх дослідженнях показав, що розбіжність розрахункових та експериментальних залежностей для кількох значень частоти обертання ротора становить не більше 4% [9]. Основні конструктивні параметри різних варіантів двигунів (діаметр ротора, розміри магнітів, розміри паза статора, числа витків) було визначено з умови одержання максимального моменту в усьому діапазоні зміни швидкості та прийнятих електромагнітних навантажень (густина струму, величина індукції в сталі статора). Відповідно, для кожного з варіантів двигунів із постійними магнітами було виконано низку розрахунків, які дали змогу визначити оптимальний варіант конструкції двигуна. Вихідні дані для розрахунку всіх варіантів: напруга живлення $U_n = 600$ В; номінальний струм $I_n = 600$ А; номінальна частота обертання $n = 2500$ об/хв; зовнішній діаметр статора $D_a = 345$ мм; діаметр корпусу 400 мм; активна довжина статора $L = 270$ мм; величина повітряного зазору $\delta = 1$ мм; тип постійних магнітів N45SH. Основні параметри досліджуваних двигунів із постійними магнітами наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметр	TR1	TR2	TR3	TR4
				
Кут випередження (°) - γ	40	40	10	40
Маса осердя ротора (кг) - m_p	60,9	67,8	64,3	67,1
Маса магнітів (кг) - $m_{пм}$	16,2	16,2	16,2	16,2
Маса осердя статора (кг) - m_c	68,3			
Маса обмотки статора (кг) - $m_{об}$	26,4			
Загальна маса актив. частин (кг) - m_{Σ}	171,8	178,8	175,3	178
Швидкість обертання (об/хв) - n	2500			
Крутний момент (Н·м) - M_{ou}	1094,5	1203,5	993,5	1229,3
Вихідна потужність (кВт) - P_{ou}	286,5	315,1	260,1	321,8
ККД (%) - η	97,0	97,3	97,4	97,4
Середньоквадратичний струм (А)	591,3	600,1	586,2	597,5
Втрати - загальні (кВт)	8,7	8,7	6,9	8,5
Втрати - обмотка (кВт)	5,6	5,7	5,8	5,7
Втрати - залізо (кВт)	3,2	3,0	1,1	2,8
Щільність струму (А/мм ²)	9,7	9,9	9,7	9,8
$K_M = M_{ou} / m_{\Sigma}$ (Н·м/кг)	6,37	6,73	5,67	6,91
$K_P = P_{ou} / m_{\Sigma}$ (кВт/кг)	1,67	1,76	1,48	1,81

Аналізуючи розрахункові параметри досліджуваних моделей СДПМ, слід зазначити, що максимальний питомий момент (K_M) і питома потужність (K_P) отримано для двигуна TR4 ($K_M = 6,91$ і $K_P = 1,81$), другий результат – для двигуна TR2 ($K_M = 6,73$ і $K_P = 1,76$). Найменше значення питомих коефіцієнтів одержано для конфігурації магнітної системи двигуна TR3 ($K_M = 5,67$ і $K_P = 1,48$).

Для варіантів двигунів (TR1, TR2, TR3 та TR4) на рис. 3, а наведено залежності електромагнітного моменту від частоти обертання ротора, а на рис. 3, б – залежності вихідної потужності від частоти обертання ротора. Задля зменшення пульсацій моменту у всіх моделях виконано скоси полюсів ротора на один зубцевий поділ.

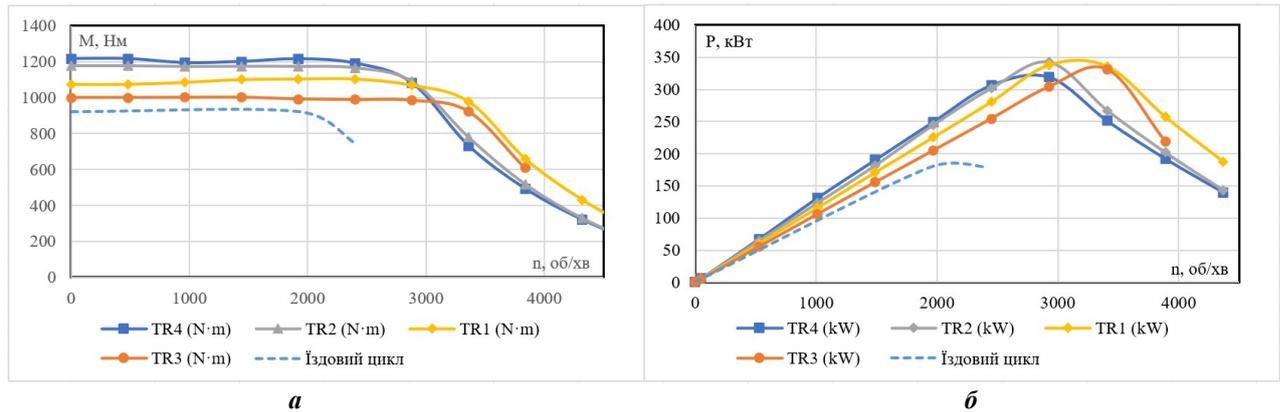


Рис. 3

На рис. 3, а пунктирною лінією наведено також залежність моменту опору, що діє на колеса тролейбуса відповідно до їздового циклу; на рис. 3, б – пунктирною лінією показано потужність, необхідну для переміщення тролейбуса відповідно до їздового циклу.

Оскільки максимальна швидкість переміщення тролейбуса відповідно до їздового циклу дорівнює 50 км/год і цій швидкості відповідає частота обертання ротора двигуна 2409 об/хв, то з графіків, наведених на рис. 3, випливає, що всі досліджувані моделі мають момент і потужність, що перевищують значення моменту опору і потужність, необхідну для переміщення. Найменше значення моменту

для номінальної частоти обертання отримано для моделі TR3, що дорівнює 993,5 Н·м. Для варіанта TR4 значення моменту для номінальної частоти 1229,3 Н·м, тобто величину струму для цього варіанта може бути зменшено приблизно на 20%. Тоді модель двигуна TR4 за номінальної частоти обертання $n = 2500$ об/хв має наступні характеристики (параметри): момент номінальний $M_n = 1000$ Н·м; номінальний струм $I_n = 495$ А; номінальна потужність $P_n = 256$ кВт.; щільність струму – $J = 8,1$ А/мм².

Слід зазначити, що розрахункові зовнішні характеристики досліджуваних двигунів з ПМ отримано з урахуванням оптимального керування двигуном. Під час розрахунку двигунів залежно від частоти обертання визначено оптимальний кут випередження комутації обмоток статора двигуна з урахуванням положення ротора, за якого забезпечується максимальний момент.

Положення ротора, за якого відбувається комутація обмоток статора, задається кутом випередження комутації, що дорівнює куту між MPC (магніторушійною силою) статора і полем ротора. Для двигунів TR1, TR2, TR4 оптимальний кут випередження в діапазоні частоти обертання $n = 0 \div 2500$ об/хв дорівнює $\gamma = 40^\circ$, для двигуна TR3 оптимальний кут $\gamma = 10^\circ$. Таким чином, отримані характеристики двигунів з ПМ визначено як конструктивними параметрами двигунів, так і режимом роботи системи керування двигуном за допомогою інвертора.

На рис. 4 наведено картини магнітного поля для двигунів TR2 і TR4 для номінального струму, з яких випливає, що для TR2 максимальне значення індукції в спинці статора дорівнює $B_c = 2,09$ Тл, у зубцях – $B_z = 2,04$ Тл.; для двигуна TR4 відповідні значення індукції такі: $B_c = 1,94$ Тл; $B_z = 2,02$ Тл.

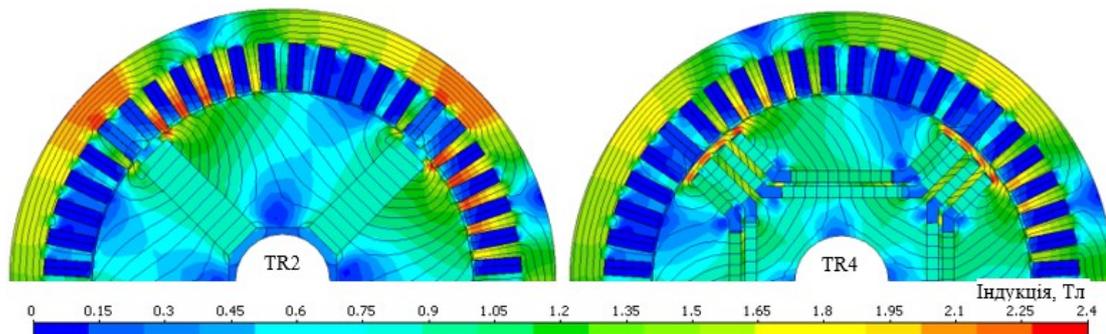


Рис. 4

Результати розрахунку показують, що за прийнятих умов роботи досліджуваних двигунів усі варіанти забезпечують задані момент і потужність тягового електроприводу тролейбуса, проте оптимальним є варіант TR4.

Двигуни з ПМ мають можливість збільшення обертального моменту. Перевантаження двигуна обмежується лише нагріванням статорної обмотки. У разі використання ефективної системи охолодження двигуна з постійними магнітами можлива тривала робота з перевантаженням.

Розрахунок температури елементів конструкції досліджуваних електричних машин TR2 і TR4 (обмоток, магнітів, заліза статора і ротора, валу, корпусу, підшипникових щитів) здійснювався в пакеті Simcenter MotorSolve з рідинною системою охолодження.

Тепловий розрахунок виконувався з урахуванням їздового циклу тролейбуса (рис. 1). На рис. 5 показано графіки нагрівання ПМ і обмоток, а також картини температурного поля для центрального перерізу електродвигунів TR2 і TR4. Рідинна система охолодження складається з каналів, розташованих рівномірно зовні зовнішнього корпусу електричної машини і зорієнтованих уздовж осі обертання ротора. Вихідні дані для теплового розрахунку такі: тип каналів, вбудованих у корпус; кількість каналів охолодження $n_k = 60$; форма каналів охолодження – кругла; діаметр каналів охолодження $d_k = 10$ мм; продуктивність циркуляційного насоса $Q = 10$ л/хв; початкова температура на вході в канали охолодження 20 °С.

Під час розрахунку температури елементів конструкції насамперед необхідно контролювати нагрівання постійних магнітів. Із графіків нагрівання магнітів, наведених на рис. 5, випливає, що за рідинного охолодження для номінального струму $I = 600$ А магніти нагріваються до температури 110 °С, що нижче критичного нагрівання для магнітів типу N45SH. Максимальна температура, за якої магніти N45SH зберігають свої властивості без значних втрат, дорівнює 150 С.

Перевантаження тягового електродвигуна регулюється інвертором, який обмежує струм до номінального рівня на всьому діапазоні швидкостей. Під час розгону тролейбуса напруга зменшується

ся для контролю струму, а у разі перевищення номінальної швидкості струм обмежується зростанням проти-ЕРС.

Таким чином застосування електродвигуна з постійними магнітами та рідинним охолодженням для приводу тролейбуса дає змогу суттєво підвищити питому потужність порівняно з асинхронним двигуном. Питома потужність асинхронного електродвигуна $K_p = 0,21$, питома потужність оптимального варіанта двигуна TR4 – $K_p = 0,92$, тобто $0,92/0,21=4,38$.

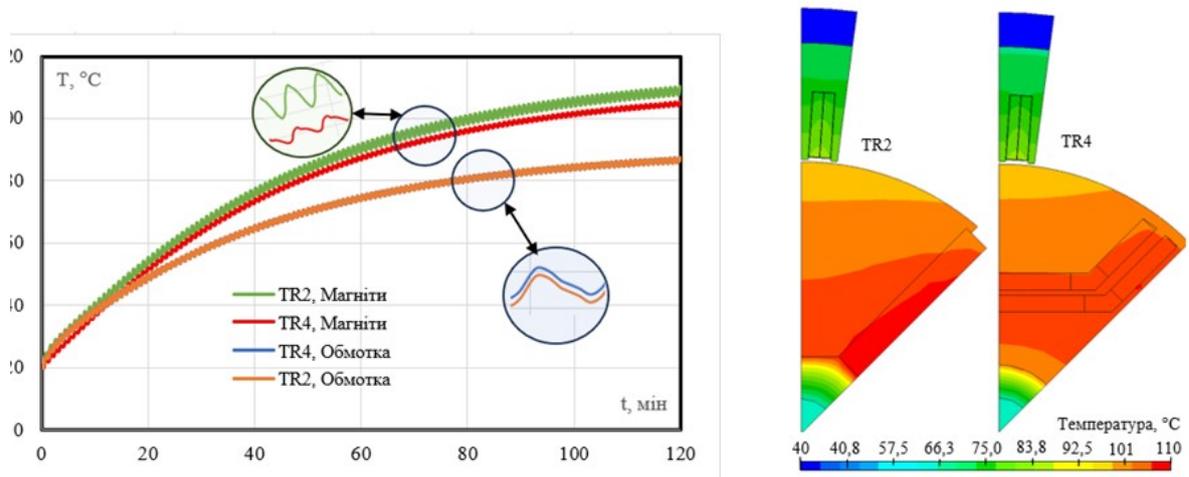


Рис. 5

Результати розрахунку тягового приводу з високошвидкісним двигуном з постійними магнітами (ВШПМ) і магнітного редуктора (МР). Зі збільшенням швидкості обертання електродвигуна з постійними магнітами зменшується його питома вага, водночас забезпечується можливість значного зменшення ваги постійних магнітів, мідних обмоток і електротехнічної сталі – найдорожчих елементів двигуна. Технології виробництва високошвидкісних двигунів із постійними магнітами удосконалюються. Можна відзначити використання композитних матеріалів на основі вуглеволокна для виготовлення бандажа ротора. Реалізовано ефективні технічні рішення з управління двигунів з постійними магнітами, відзначається постійне зростання випуску двигунів з постійними магнітами зі швидкістю обертання понад 10000 об/хв.

З іншого боку, відзначається розвиток напряму зі створення магнітних редукторів (МР) завдяки появі на ринку високотемпературних постійних магнітів, електротехнічної сталі з низькими питомими втратами за високої частоти і композитних матеріалів, що дає змогу створювати магнітні редуктори з високою питомою величиною переданого моменту.

Поєднання високошвидкісного двигуна з постійними магнітами і МР дає змогу зменшити габарити і вагу електропривода тролейбуса порівняно з наявним асинхронним приводом або приводом на основі постійних магнітів без МР.

У роботі розглядається високошвидкісний двигун TR5 (рис. 6) з постійними магнітами в поєднанні з МР, передавальне число якого становить $i = 6,33$, і, таким чином, номінальна частота обертання валу електродвигуна відповідно до їздового циклу тролейбуса (за $v_s = 50$ км/год) становить $n = 15850$ об/хв, що створює умови для зменшення габаритних розмірів і ваги. Максимальний момент опору з МР дорівнює $M = 145$ Н·м. Крім того, у двигуні застосовується рідинне охолодження, що дає змогу збільшити струмові навантаження двигуна. Радіатор системи охолодження може бути встановлений на даху тролейбуса.

Було спроектовано високошвидкісний електродвигун і розраховано його характеристики в пакеті Simcenter MotorSolve. Попередні розрахунки декількох конфігурацій магнітної системи ротора виявили, що оптимальною є конфігурація з внутрішнім V-подібним розміщенням ПМ. Під час розрахунку характеристик ВДПМ основні параметри магнітної системи підбирали таким чином, щоб забезпечити максимальний момент понад $M = 145$ Н·м у діапазоні частоти обертання $n = 0 \div 12200$ об/хв і понад $M = 115$ Н·м – у діапазоні $n = 12200 \div 15200$ об/хв, що відповідає їздовому циклу із коефіцієнтом редукції МР $I = 6,33$.

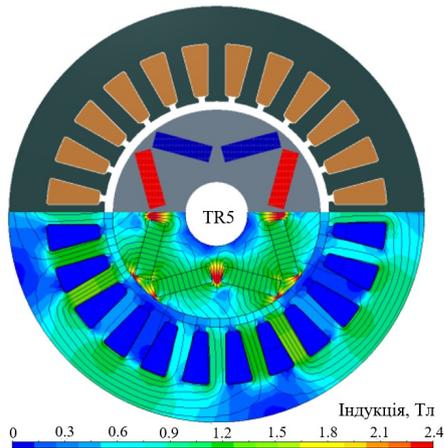


Рис. 6

На рис. 6 показано магнітну систему досліджуваного високошвидкісного двигуна TR5 та картину магнітного поля. Ротор виконано з інкорпорованими постійними магнітами N45SH, розміри яких такі: товщина – 8 мм, довжина – 28 мм. Двигун з ПМ і магнітним редуктором дає змогу забезпечити більшу потужність за високої швидкості обертання порівняно зі стандартним тяговим асинхронним двигуном. Шляхом регулювання кута комутації обмоток двигуна, що визначає кут між МРС (магніторушійною силою) статора і полем ротора, можна забезпечити великий момент у широкому діапазоні частоти обертання ротора.

Основні технічні характеристики спроектованого високошвидкісного двигуна з постійними магнітами наступні: номінальна потужність 250 кВт; напруга живлення 600 В; номінальний лінійний струм 400 А; номінальна частота обертання 15850 об/хв; максимальна частота обертання 25000 об/хв; номінальний ККД 98,9 %; діаметр статора 200 мм; довжина статора 350 мм; число полюсів ротора 4; число пазів статора 36; число витків у пазу обмотки статора 4; число паралельних гілок котушок кожної фази 2; товщина бандажа ротора 3 мм; величина робочого зазору 1 мм; загальний зазор з урахуванням товщини бандажа 4 мм. Маса осердя ротора $m_p = 19,1$ кг; маса магнітів $m_{им} = 4,7$ кг; маса осердя статора $m_c = 42,6$ кг; маса обмотки статора $m_{об} = 10,9$ кг; загальна маса активної частини $m_{\Sigma} = 77,3$ кг. Загальна вага активної частини високошвидкісного двигуна TR5 в 2,3 рази менша за вагу активної частини електродвигуна TR4 - $m_{\Sigma} = 178$ кг.

Міцність ротора за великої швидкості обертання забезпечує бандаж, виконаний із композитного матеріалу – вуглеволокна. Під час виконання розрахунків двигуна прийнято, що межа міцності на розрив передбачуваного композитного матеріалу має становити щонайменше 1500 МПа, що явно менше за межу міцності 2420 МПа композитного матеріалу CFRP DW260 компанії CirComp. За діаметра ротора 100 мм товщина бандажної оболонки становитиме не більше 3 мм. На даний момент технологія намотування вуглеволокна з натягом на ротор електродвигуна є найефективнішою і доступною для широкого застосування.

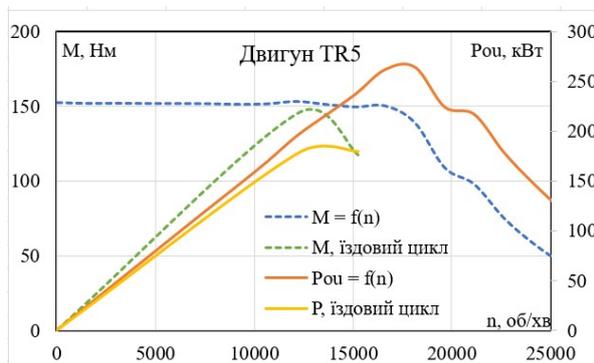


Рис. 7

но до їздового циклу. Частоті обертання $n = 2500$ об/хв для низькошвидкісного двигуна TR4 відповідає частота обертання $n = 15850$ об/хв для високошвидкісного двигуна TR5.

Для частоти обертання ротора $n = 15850$ об/хв і кута випередження $\gamma = 30^\circ$ розрахункові характеристики високошвидкісного двигуна такі:

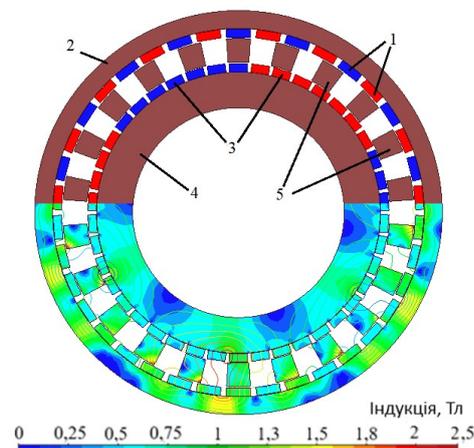


Рис. 8

крутний момент $M_{ou} = 151,1$ Н·м; вихідна потужність $P_{ou} = 250,8$ кВт; ККД $\eta = 98,9$ (%); середньоквадратичний струм $I = 400$ А; втрати загальні $P_{\Sigma} = 2,7$ кВт; втрати в обмотках $P_{об} = 1,6$ кВт; втрати в залізі $P_3 = 1,1$ кВт; щільність струму $J = 8,4$ А/мм²; питомий коефіцієнт – відношення крутного моменту до маси активної частини $K = M_{ou}/m_{\Sigma} = 1,95$ Н·м/кг.

Задля спільної роботи з високошвидкісним двигуном був розроблений і розрахований МР. На рис. 8 показано конфігурацію магнітної системи і картину магнітного поля циліндричного магнітного редуктора з модулятором магнітного потоку для

електроприводу тролейбуса. Розроблено комп'ютерну параметричну модель, що дає змогу варіювати такими параметрами: числом полюсів високошвидкісного і низькошвидкісного ротора, розмірами постійних магнітів, висотами ярм обох роторів, розмірами полюсів модулятора, величинами повітряних зазорів, а також параметрами матеріалів, що використовуються. У результаті серії розрахунків визначено оптимальну конфігурацію та розміри магнітної системи редуктора, за якої отримано задані значення максимального моменту на високошвидкісному і низькошвидкісному роторі за мінімальної маси МР.

Магнітний редуктор складається з трьох основних конструктивних елементів: зовнішнього низькошвидкісного ротора, нерухомого модулятора магнітного потоку і внутрішнього високошвидкісного ротора. Низькошвидкісний ротор складається з ярма 2 магнітного потоку із зовнішнім діаметром $D_n=340$ мм і товщиною $h_{ни}=15$ мм, на внутрішній поверхні якого закріплено 38 постійних магнітів 1 радіальної намагніченості і полярністю, що чергується. Ширина магнітів 20 мм, товщина 7 мм, довжина 170 мм. Модулятор магнітного потоку являє собою набір із 22 полюсів 5 шихтованої електротехнічної сталі висотою 20 мм, які закріплені у сепараторі з електрично непровідного матеріалу.

Високошвидкісний ротор складається з ярма 4 із шихтованої електротехнічної сталі заввишки 30 мм із закріпленими на ньому постійними магнітами 3. Кількість пар полюсів високошвидкісного ротора 3. Кожен полюс набраний з 7 рядів постійних магнітів завширшки 15 мм, заввишки 7 мм, завдовжки 170 мм. Величина повітряних зазорів між роторами магнітного редуктора і модулятором 1 мм. Коефіцієнт редукції магнітного редуктора становить $i = 6,33$ і дорівнює відношенню числа пар полюсів роторів МР. Загальна маса магнітів редуктора становить $m_{пм} = 12$ кг, маса електротехнічної сталі $m_c = 55$ кг, тобто маса активних частин $m_{а.ч.} = 67$ кг, а загальна маса МР $m_{мр} = 100$ кг. Картина магнітного поля МР, представлена на рис. 9, показує, що розміри магнітної системи МР обрано таким чином, щоб сталеві елементи конструкції перебували не в насиченому стані. Величина магнітної індукції в основному (крім окремих кутових точок) не перевищує значень: у замкачі високошвидкісного ротора 1,6 Тл, у замкачі низькошвидкісного ротора 1,8 Тл, в елементах модулятора 1,75 Тл.

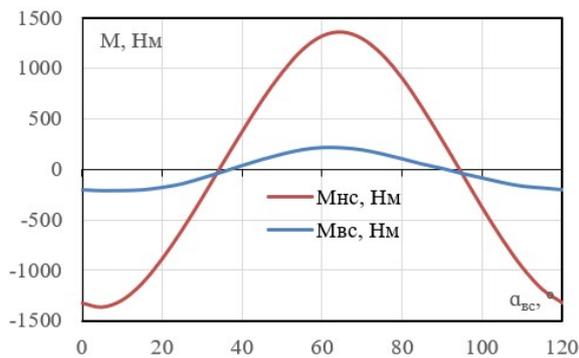


Рис. 9

низькошвидкісного ротора – 1362 Н·м. Слід зазначити, що з урахуванням динамічних навантажень реальний максимальний передавальний момент редуктора нижчий на 20% ÷ 30%.

Використання високошвидкісного двигуна з постійними магнітами в поєднанні з магнітним редуктором є перспективним напрямком зі створення тягового приводу для тролейбуса. Однак задля зниження вихрових втрат у магнітах треба застосовувати їхню сегментацію, що ускладнює та здорожчує виробництво. Крім того, пульсації моменту навіть на рівні 5–10% помітні пасажирам, що потребує застосування інженерних рішень, таких, наприклад, як скіс полюсів на високошвидкісному роторі. Тому застосування МР великої потужності вимагатиме подальших додаткових досліджень. У даному випадку розглянуто МР як перший етап розроблення приводу з високошвидкісним двигуном і редуктором. Розвитком цього напрямку є дослідження нових електромагнітних конфігурацій, у яких двигун і МР являють собою одну об'єднану конструкцію. Ці нові конфігурації будуть досліджені надалі.

У табл. 3 наведено основні показники різних типів тягового електроприводу тролейбуса. Питомий момент порівняно зі стандартним асинхронним двигуном збільшується в 2 рази під час застосування двигунів СДПМ і в 3,65 рази – у разі використання ВСДПМ з МР. При цьому забезпечуються можливість значно зменшити загальну вагу приводу.

Технології виробництва високошвидкісних двигунів із постійними магнітами удосконалюються. Можна відзначити використання композитних матеріалів на основі вуглеволокна для виготовлення бандажа ротора. Реалізовано ефективні технічні рішення з управління двигунів з постійними магнітами.

Таблиця 3

Найменування параметра	АД (ДТА-1У1)	СДПМ (TR4)	ВСДПМ (TR5) +MP
Номінальний момент, Н·м	1150	1000	1000
Вихідна потужність, кВт	180	321,8	250
Частота обертання, об/хв			
Номінальна,	1500	2500	2500
Максимальна	4000	4000	4000
Діаметр корпусу, мм	550	400	340
Довжина корпусу (без валу), мм	860	580	570
Загальна вага, кг	840	350	200
Питома потужність, кВт/кг	0,21	0,92	1,25
Питомий момент, Н·м/кг	1.37	2.85	5.0

швидкостях і схильність до нагрівання ротора в динамічних режимах роботи. Застосування СДПМ обумовлено їхнім високим ККД (в середньому 94% під час розгону в порівнянні з 80% у АД), що призводить до економії електроенергії, високим пусковим моментом, прямо пропорційним струму статора і значною здатністю до перевантажень по крутному моменту, що критично важливо для динамічного міського циклу руху з частими пусками і гальмуванням.

2. Застосування постійних магнітів та рідинного охолодження у СДПМ дають змогу значно поліпшити питомі характеристики (відношення крутного моменту і потужності до маси) порівняно з АД типу ДТА-1У1, який використовується в тролейбусах. В роботі представлено результати, які можна розглядати як оцінку можливості створення СДПМ у габаритах статора тягового АД типу АТД-4 шляхом збільшення струму обмотки статора та рідинного охолодження, що дає змогу створювати більш компактні та легкі двигуни, зберігаючи при цьому високу продуктивність. Наприклад, питома потужність оптимального варіанта СДПМ (TR4) становить 0,92 кВт/кг, що в 4,3 рази вище, ніж у асинхронного двигуна типу ДТА-1У1 (0,21 кВт/кг). Крім того, використання СДПМ призводить до економії електроенергії до 1848 кВт-год на рік для тролейбуса, що працює в міському циклі.

3. Подальше підвищення питомих характеристик тягового приводу тролейбуса можливе за рахунок використання високошвидкісних двигунів із постійними магнітами у поєднанні з магнітними редукторами. Таке поєднання дає змогу істотно зменшити габарити і вагу електропривода. Наприклад, загальна вага високошвидкісного двигуна TR5 з MP становить не більше ніж 200 кг, що в 1,75 рази менше за вагу СДПМ TR4 (350 кг), водночас забезпечуючи вищий питомий момент.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України – проект «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для енергетики, технологій і транспорту», 2024-2025 рр.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRACTION MOTORS FOR URBAN TROLLEYBUSES

V.V. Grebenikov¹, R.V. Gamaliya¹, S.A. Dadychyn¹, V.S. Popkov²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 56, Beresteysky Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

²I.M. Frantzevych Institute of Materials Science National Academy of Sciences of Ukraine, 3, Akademika Krzhizhanovskoho Str., Kyiv, 03142, Ukraine.

E-mail: elm1153@gmail.com.

The article presents the results of a numerical study and comparative analysis of traction electric drives for urban trolleybuses based on induction motors and synchronous permanent magnet motors, as well as a combination of high-speed permanent magnet motors and magnetic reducers. It is shown that the replacement of short-circuited rotor with a permanent magnet rotor in a standard induction motor can significantly increase the specific power of the electric machine. Numerical studies and analysis of the characteristics of an electric motor with neodymium magnets for four configurations of the rotor magnetic system have been carried out and the optimal one in terms of specific performance has

Таким чином поєднання високошвидкісного двигуна з постійними магнітами та магнітного редуктора дає змогу зменшити габарити та вагу електроприводу тролейбуса порівняно з наявним асинхронним приводом або приводом на основі постійних магнітів.

Висновки.

1. Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є перспективною альтернативою традиційним асинхронним двигунам (АД) у тягових приводах тролейбусів, оскільки АД демонструють недостатній ККД на низьких

been determined. It is established that in order to ensure maximum specific characteristics in traction electric motors, it is necessary to take into account the peculiarities of the driving cycle and use liquid cooling. The results of thermal calculations taking into account the driving cycle showed that the use of liquid cooling ensures that the temperature of neodymium magnets and windings is maintained below critical values even at loads close to the limit. Additionally, the possibility of reducing the size and weight of the electric drive by using a high-speed motor with a magnetic gearbox was considered. Calculations of electromagnetic and thermal characteristics were performed in the Simcenter Magnet and Simcenter MotorSolve software packages. References 9, figures 9, tables 3.

Keywords: numerical simulation, electric motor for trolleybus, permanent magnets, driving cycle, operating characteristics, thermal calculation

1. Tudor E., Arsene M.; Berca Iu., Alexandru-Ionel C., Dumitru C., Ionuț V. Case Study of a Newly Developed Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Buses. 13th International Symposium on *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bucharest, Romania, 23-25 March 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATEE58038.2023.10108323>.
2. Lianbo Niu. Optimization design and torque performance research of interior permanent magnet synchronous motor. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No 1. Pp. 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93285-x>.
3. Dini P., Saponara S., Chakraborty S., Hegazy O. Modeling, Control and Monitoring of Automotive Electric Drives. *Electronics*. 2025. Vol. 14(19): 3950. Pp. 2-54. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14193950>
4. Hess AG. URL: <https://www.hess-ag.ch/> (accessed at 05.07.2025).
5. Jo I-H., Lee J., Lee H-W., Lee J-B., Lim J-H., Kim S-H., Park C-B. A Study on MG-PMSM for High Torque Density of 45 kW-Class Tram Driving System. *Energies*. 2022. No 15. 1749. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051749>.
6. Wirasanti P., Kammuang-Lue N., Kitthamkesorn S. Feasibility Study of Electric Rubber-Tire Bus Potential in Chiang Mai - Electrification Planning. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. Bangkok, Thailand, 06-09 June 2018. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2018.8433282>.
7. Stana G., Brazis V. Trolleybus motion simulation by dealing with overhead DC network energy transmission losses. 18th International Scientific Conference on *Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 17-19 May 2017. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967229>.
8. Mei Yan, Menglin Li, Hongwen He, Jiankun Peng, Chao Sun. Rule-based energy management for dual-source electric buses extracted by wavelet transform. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 189. Pp. 116-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.054>.
9. Grebenikov V.V., Pavlov V.B., Gamaliia R.V., Popkov V.S. Comparative analysis of electric machines characteristics with permanent magnets for electric vehicles and wind turbines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 4. Pp. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.021>.

Надійшла 08.07.2025
Прийнята 27.10.2025