УДК 621.313.8 **doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.01**

Б.Г. Любарський, Л.В. Овер'янова, Є.С. Рябов, Д.І. Якунін, О.О. Островерх, Ю.В. Воронін

ОЦІНКА ГОЛОВНИХ РОЗМІРІВ ТЯГОВОГО СИНХРОННО-РЕАКТИВНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

У статті розглянуті питання проектування тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами потужністю 180 кВт для приводу коліс тролейбуса. Запропоновано спосіб визначення головних розмірів електродвигуна, який поєднує аналітичний вибір параметрів статора та чисельно-польові розрахунки для вибору параметрів ротора. Показана необхідність перевірки механічної міцності ротора, в якому розташовано постійні магніти NdFeB у потокових бар'єрах. У результаті дослідження визначено розміри активних частин, обмоткові дані статора та конструктив ротора електродвигуна. Бібл. 17, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: **синхронно-реактивний двигун з постійними магнітами, тяговий електропривод, постійний магніт, енергоефективність.**

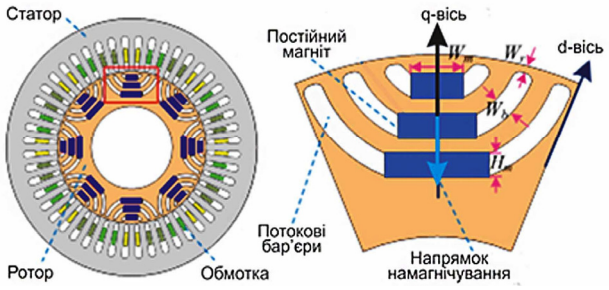
В статье рассмотрены вопросы проектирования тягового синхронно-реактивного электродвигателя с постоянными магнитами мощностью 180 кВт для привода колес троллейбуса. Предложен способ определения главных размеров электродвигателя, который сочетает аналитический выбор параметров статора и численно-полевые расчеты для выбора параметров ротора. Показана необходимость проверки механической прочности ротора, в котором расположено постоянные магниты NdFeB в потоковых барьерах. В результате исследования определены размеры активных частей, обмоточные данные статора и конструктив ротора электродвигателя. Библ. 17, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: **синхронно-реактивный двигатель с постоянными магнитами, тяговый электропривод, постоянный магнит, энергоэффективность.**

Вступ. На теперішній час загальносвітовою практикою є застосування на рухомому складі залізниць, промислового та міського транспорту тягових електроприводів з асинхронними електродвигунами [1-3]. В Україні у широких масштабах тягові асинхронні електроприводи застосовуються на рухомому складі міського електротранспорту та магістральних залізниць [4]. Головними перевагами тягового асинхронного електроприводу вважаються високі енергетичні та масо-габаритні показники, високий рівень надійності, простота конструкції, великі терміни між обслуговуванням [5]. Проте вимоги щодо зменшення енерго- та ресурсоспоживання рухомим складом транспорту ставлять перед науково-технічною спільнотою задачі як щодо подальшого удосконалення тягових асинхронних електроприводів, так і розробку та дослідження інших типів електроприводів [6]. Альтернативним підходом для підвищення ефективності тягового електроприводу є використання синхронних двигунів зі збудженням від постійних магнітів [7], але велика маса висококоерцитивних постійних магнітів значно збільшує затрати на виробництво таких електродвигунів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Специфічною особливістю тягового електроприводу є широкий діапазон регулювання частоти обертання та моменту, а отже, важливим є забезпечення високих енергетичних показників тягового приводу у різних режимах роботи. За оцінками різних авторів, такі характеристики забезпечують синхронно-реактивні електродвигуни з постійними магнітами (СРДПМ) (permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor – PMSynRM, PMA-SynRel) [8-12]. При цьому масогабаритні показники та вартість двигуна такого типу є порівняними з асинхронним електродвигуном, а отже тяговий привід на основі синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами є «прямою альтернативою» тяговому асинхронному електроприводу.

СРДПМ − це синхронний реактивний двигун (Synchronous Reluctance Motors − SynRM) з постійними магнітами усередині ротора. Конфігурація типового СРДПМ наведена на рис. 1 [8-10].



а *б*

Рис. 1. Конфігурація СРДПМ (*а*) і секція ротора (*б*). Позначено: W_r, W_b, W_m, H_m – тангенціальні ребра, потокові бар'єри, ширина та висота постійних магнітів ротора відповідно

У цьому двигуні, як правило, застосовують розподілену обмотку статору [10, 11]. Для підвищення використання реактивного обертаючого моменту в радіальному напрямку ротора розміщені один за одним канали потокових бар'єрів. Особливістю ротора є наявність постійних магнітів (рідкоземельні магніти типу NdFeB, феррит Y30), вставлені в його потокові бар'єри [11-13]. Постійні магніти рівномірно намагнічені і утворюють q-вісь ротора. Оскільки постійні магніти мають приблизно таку ж проникність, що і повітря, вони створюють шлях з високим опором і магнітною анізотропією в напрямку вісі q. Сталева частина ротора утворена невеликими сегментами, ізольованими один від одного потоковими бар'єрами. Ці сегменти забезпечують шлях з малим опором потоку по вісі d. Для забезпечення міцності конструкції

© Б.Г. Любарський, Л.В. Овер'янова, Є.С. Рябов, Д.І. Якунін, О.О. Островерх, Ю.В. Воронін

ротору необхідно, щоб феромагнітні сегменти були внутрішньо пов'язані один з одним, тому в конструкції ротора використовуються тангенціальні ребра поблизу повітряного проміжку товщиною W_r [14]. Завдяки встановленню постійних магнітів тангенціальні ребра насичуються при нормальній роботі двигуна і тому магнітно ізолюють різні сталеві сегменти [14]. З точки зору створення обертаючого моменту, розсіювання потоку, викликане тангенціальними ребрами, повинно бути мінімальним [11].

Огляд публікацій [10-14] показує, що визначення розмірів та параметрів електродвигунів здійснюється шляхом чисельно-польових розрахунків у поєднанні з багатокритеріальною оптимізацією. Варійованими параметрами, як правило, є геометричні розміри елементів магнітопроводу. Водночас, оскільки статор СРДПМ подібний до статору електродвигуна змінного струму, то очевидно, можна спростити оптимізаційну модель, застосувавши для статора класичні методи розрахунку магнітного кола електричних машин, а чисельні розрахунки застосовувати тільки для визначення конфігурації ротора електродвигуна. Крім того, така декомпозиція дозволяє провести оцінку розмірів активних частин електродвигуна та його вписування у відведений монтажний простір без чисельних розрахунків магнітного поля, внаслідок чого визначиться множина допустимих геометричних параметрів статора.

Метою роботи є розробка алгоритму вибору головних розмірів тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами.

Задачею дослідження є адаптація методик вибору головних розмірів електричних машин для їх застосування щодо СРДПМ.

Методика вибору головних розмірів СРДПМ. Головними розмірами електричної машини називають діаметр якоря або діаметр розточки статора та їх осьову довжину. Ці розміри залежать від потужності, частоти обертання та ряду показників, які характеризують використання активних частин електричної машин [5]. Особливостями тягових електричних машин є, по-перше, регулювання частоти обертання у широкому діапазоні (відношення максимальної частоти обертання до номінальної може складати від 3 до 5 разів, а відношення найбільшого моменту до номінального – до 2 разів), а, по-друге, обмеження габаритних розмірів, пов'язане з розміщенням електричної машини на транспортному засобі та її компонуванням у трансмісію. Це у більшості випадків унеможливлює використання постійної Арнольда для визначення головних розмірів тягових електричних машин, тому для них розроблені спеціальні процедури [3, 5]. З урахуванням цього доцільним є застосування такого підходу і для вибору головних розмірів СРДПМ.

Кількість пар полюсів визначається з умови забезпечення максимальної частоти обертання при найбільшій частоті напруги живлення:

$$p = \frac{60 f_{\max}}{n_{\max}}, \qquad (1)$$

де $f_{\max}$ – найбільша частота живлення; $n_{\max}$ – найбільша частота обертання.

Оскільки тяговий двигун повинен мати високий ступінь захисту, який прийнято з метою унеможливити потрапляння бруду у повітряний проміжок між статором і ротором, охолодження електродвигуна можливе тільки через аксіальні вентиляційні канали у статорі. При безкорпусній конструкції аксіальні канали виконуються безпосередньо у листі статора, наприклад, методом штампування. При корпусній конструкції статора аксіальні вентиляційні канали статора утворюються корпусом електродвигуна, до якого приварені ребра для шихтування осердя статора, та зовнішньою поверхнею осердя статора. Незалежно від способу утворення аксіальних вентиляційних каналів їх радіальний розмір (діаметр або висота) може бути прийнятий рівним 12…20 мм (менші значення – при корпусній конструкції). Додавши до цього розміру товщину корпусу 8…10 мм та технологічні запаси на виготовлення отворів, отримаємо зовнішній діаметр магнітопроводу статора (розрахунковий діаметр активної частини). Ця величина підлягає уточненню за результатами розрахунків та конструкторського опрацювання електродвигуна.

Внутрішній діаметр статора D_i (діаметр «розточки») визначається за виразом

$$D_i = K \cdot D_a, \qquad (2)$$

де K – коефіцієнт, який дорівнює, наприклад, 0,55…0,65 при $2p = 4$, p – кількість пар полюсів, D_a – розрахунковий діаметр.

Для оцінки довжини магнітопроводу статора розрахуємо виліт лобових частин обмотки статора за виразом

$$L_v = (0{,}12 + 0{,}15p) \cdot \tau_k + 10, \qquad (3)$$

де τ_k – середня ширина котушки статора.

Орієнтовно середня ширина котушки статора може бути визначена за виразом

$$\tau_k = \beta \frac{Z}{2p} t_{av1}, \qquad (4)$$

де β – скорочення кроку обмотки (орієнтовно приймаємо рівним 0,8); Z – кількість пазів у статорі; t_{av1} – зубцевий крок на середині висоти паза.

Найбільша кількість пазів визначається з виразу

$$Z = \frac{(0{,}3\ldots0{,}4)\pi D_i}{b_z}, \qquad (5)$$

де b_z – ширина зубця статора, яка повинна бути не менше 5…7 мм;

$$t_{av1} = \frac{\pi(D_i + h_n)}{Z}, \qquad (6)$$

де h_n – висота пазу, яка визначається за виразом

$$h_n = (3\ldots4) b_n, \qquad (7)$$

де b_n – ширина пазу, яка дорівнює

$$b_n = t_{z1} - b_z, \qquad (8)$$

де t_{z1} – зубцевий крок по внутрішньому діаметру статора

$$t_{z1} = \frac{\pi D_i}{Z}. \qquad (9)$$

Розмір осьової довжини статора по лобовим частинам

$$L_l = (0{,}7\ldots0{,}8) L_k, \qquad (10)$$

де L_k – довжина корпусу (відстань між площинами підшипникових щитів).

Осьова довжина магнітопроводу статора визначається за виразом

$$L_i = L_l - L_v . \quad (11)$$

Фазний струм двигуна попередньо визначається за виразом

$$I_{ph} = \frac{P \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ph} \cdot \eta \cdot \cos\varphi}, \quad (12)$$

де P – номінальна потужність; U_{ph} – номінальна фазна напруга; η – коефіцієнт корисної дії (орієнтовно 0,93…0,95 в.о.); cos φ – коефіцієнт потужності (орієнтовно 0,8...0,9).

Магнітний потік електродвигуна попередньо визначається за виразом

$$\Phi = \alpha B_\delta \tau L_i , \quad (13)$$

де α – коефіцієнт полюсної дуги (приймаємо рівним $2/\pi$); B_δ – індукція у повітряному проміжку (приймаємо не більше 1 Тл); τ – полюсний поділок.

Полюсний поділок визначається за виразом

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} . \quad (14)$$

Кількість витків у фазі обмотки статора визначається за виразом

$$w = \frac{(0{,}95\ldots0{,}98)U_{ph}}{4{,}44\Phi f_{nom} k_{w1}}, \quad (15)$$

де U_{ph} – фазна напруга; k_{w1} – обмотковий коефіцієнт (приймаємо рівним 0,9); f_{nom} – номінальна частота напруги

$$f_{nom} = \frac{p n_{nom}}{60}, \quad (16)$$

де n_{nom} – номінальна частота обертання електродвигуна.

Кількість ефективних провідників у пазу

$$s_n = \frac{2maw}{Z}, \quad (17)$$

де m – кількість фаз електродвигуна (дорівнює 3); a – кількість паралельних гілок (струм паралельної гілки не повинен перевищувати 400 А).

Доцільно кількість паралельних гілок вибирати з умови забезпечення цілої кількості пазів на полюс та фазу

$$q = \frac{Z}{2pma} . \quad (18)$$

Попередня оцінка конфігурації ротора (кількість потокових бар'єрів, геометричні розміри постійних магнітів) здійснюється шляхом розрахунку магнітного кола електродвигуна з використанням схем заміщення. Критерієм вибору варіанту конфігурації є забезпечення номінального обертаючого моменту при номінальному фазному струмі. При цьому аналізуються значення індукції у частинах магнітопроводу і, при необхідності, коригуються його геометричні розміри.

При розрахунках параметри постійних магнітів приймаються згідно даних, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри постійних магнітів

Найменування	Одиниця вимірювання	Значення
Матеріал магнітів		NdFeB
Залишкова магнітна індукція	Тл	1,0
Коерцитивна сила	кА/м	850

Наступним етапом є розрахунок магнітного поля електродвигуна у середовищі FEMM, що уточнює результати попереднього розрахунку [15-17].

Допоміжними критеріями при виборі конфігурації ротора є забезпечення його механічної міцності, а також задовільні результати теплового розрахунку електродвигуна.

У якості прикладу розглянемо процедуру вибору головних розмірів СРДПМ для приводу коліс тролейбуса з технічними параметрами, наведеними у табл. 2. Технічні параметри відповідають тяговим асинхронним електродвигунам, які застосовуються на тролейбусах.

Таблиця 2

Технічні параметри СРДПМ

Найменування	Одиниця вимірювання	Значення
Потужність	кВт	180
Лінійна напруга	В	400
Фазний струм	А	350
Номінальна частота обертання	об/хв	1500
Момент	Нм	1110
Найбільша частота обертання	об/хв	4000
Максимальна частота живлення	Гц	150

Критерієм вибору є забезпечення моменту 1100 Нм при фазному струмі 350 А. З аналізу конструкцій аналогічних асинхронних двигунів (АД903, ДТА-1, 6ДТА.002.1) знаходимо, що зовнішній діаметр електродвигуна не повинен перевищувати 500 мм, осьова довжина по корпусу – 700 мм.

Процедура визначення головних розмірів тягового СРДПМ являє собою серію розрахунків, які складаються з розрахунків за аналітичними виразами (1) – (17), розрахунків магнітного поля у середовищі FEMM (рис. 2) та розрахунків ротора на міцність (рис. 3). Розрахунки проводилися для декількох значень кількості пазів статора, після чого визначалася кількість ефективних провідників у пазу. Після цього виконувалися розрахунки магнітного кола статора для оцінки індукції у зубцях та ярмі (допустимі значення – не більше 1,7 Тл. У разі перевищення – коригувалися геометричні розміри пазів). Далі розроблявся ескіз поперечного перетину електродвигуна для розрахунку магнітного поля у середовищі FEMM. Розрахунки проводилися для варіантів конфігурації ротора з двома та трьома парами потокових бар'єрів. Товщина потокового бар'єру приймалась рівною 10 мм. Відстань між потоковими бар'єрами в одному шарі – 5 мм. У всіх потокових бар'єрах містяться постійні магніти з параметрами відповідно до табл. 1. Розрахунок магнітного поля електродвигуна виконується для

струму статора 350 А, відповідно до якого з урахуванням схеми обмотки статора розраховується магніторушійна сила провідників обмотки статора. Розрахунки проводяться для декількох положень ротора. Для розрахункових варіантів, де електромагнітний момент сягає понад 1100 Нм, виконуються розрахунки ротора на міцність при частоті обертання 4800 об/хв. Якщо механічна міцність ротора забезпечується (прийнято, що коефіцієнт запасу міцності повинен бути більше 2), то варіант приймається у якості робочого.

Виконавши у вищезазначений спосіб серію розрахунків було визначено конфігурацію СРДПМ, який задовольняє технічним параметрам, зазначеним у табл. 2.

Дані статора наведено у табл. 3, результати розрахунку магнітного поля – на рис. 2, результати розрахунку ротора на міцність – на рис. 3. Ескіз ротора показано на рис. 4, залежність моменту електродвигуна від кута повороту ротора – на рис. 5.

Таблиця 3

Дані статора

Найменування	Значення
Кількість пазів	36
Кількість ефективних провідників у пазу	6
Кількість паралельних гілок	1
Коефіцієнт скорочення кроку	0,778
Кількість елементарних провідників у ефективному	3 (по висоті)
Крок по пазам	1-8-19
З'єднання фаз – «зірка»	
Розрахунковий зовнішній діаметр статора, м	0,46
Діаметр розточки, м	0,3
Осьова довжина магнітопроводу, м	0,3
Односторонній повітряний проміжок, м	0,001
Розміри провідника обмотки статора (без ізоляції), мм	1,6×12,5
Висота пазу, м	0,040
Ширина пазу, м	0,0145

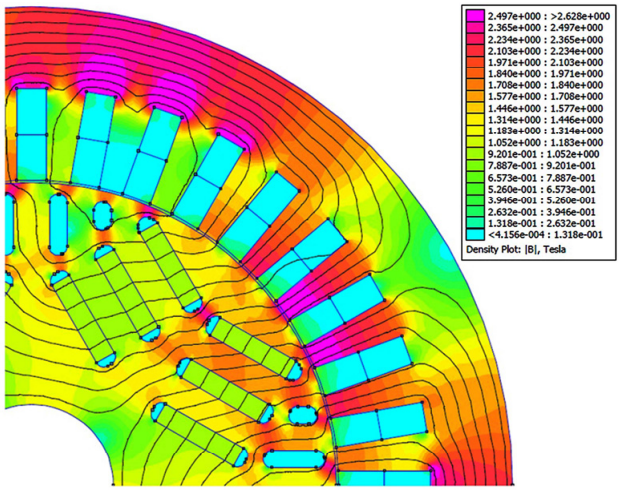


Рис. 2. Результати розрахунку магнітного поля у FEMM

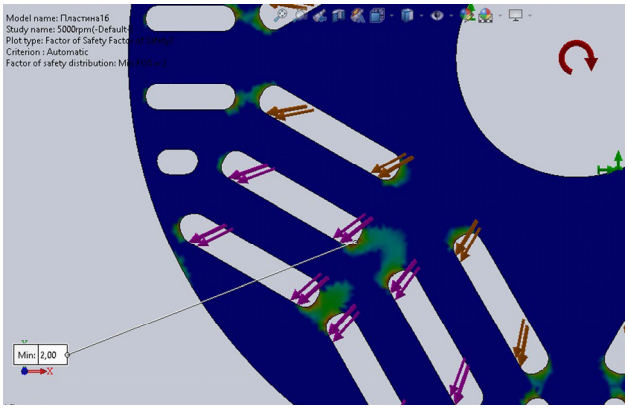


Рис. 3. Результати розрахунку ротора на міцність у SolidWorks Simulation

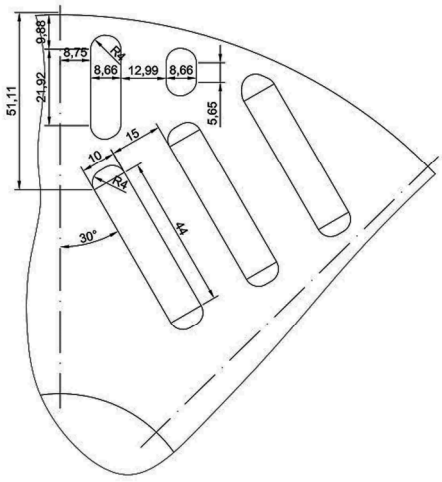


Рис. 4. Ескіз ротору СРДПМ

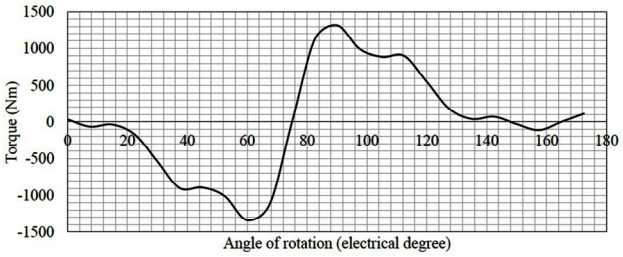


Рис. 5. Залежність моменту від кута повороту ротора

Як бачимо з рис. 5, необхідний момент, який дорівнює 1100 Нм, досягається при розрахованій конфігурації активних частин електродвигуна. Втім слід зазначити, що у наведеному прикладі конфігурації СРДПМ максимальний момент електродвигуна несуттєво перевищує номінальний момент, що може негативно вплинути на працездатність тягового електроприводу тролейбусу.

Обговорення результатів. Запропонована методика дозволила визначити параметри статора СРДПМ аналітично, що зменшило кількість варіантів для чисельно-польових розрахунків. Методику апробовано при розрахунку СРДПМ потужністю 180 кВт для приводу коліс тролейбуса. З метою подальшого зменшення чисельно-польових розрахунків доцільне аналітичне визначення параметрів для оцінки робочих характеристик електродвигуна. Необхідним є визначення та застосування у розробленій методиці критеріїв, що враховують частотне керування електродвигуном.

Висновки.

1. У статті запропоновано алгоритм вибору головних розмірів тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами, який поєднує в собі аналітичні вирази для вибору параметрів статора та чисельно-польові розрахунки для вибору параметрів ротора. Методику апробовано при визначенні конфігурації СРДПМ потужністю 180 кВт.

2. Визначено, що потребують розвитку аналітичні методи розрахунку магнітного кола з метою скорочення часу на вибір головних розмірів електродвигуна.

3. Потребують розвитку методи тепловентиляційних розрахунків тягового синхронно-реактивного електродвигуна з постійними магнітами та методи розрахунку його характеристик, за результатами яких приймається рішення про відповідність електродвигуна технічним вимогам.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лувишис А.Л. Асинхронный привод: начало пути. *Локомотив*, 2017, № 1(721), С. 44-46.

2. Лувишис А.Л. Новые локомотивы железных дорог США. *Железнодорожный транспорт*, 2018, № 8, С. 70-77.

3. Любарський Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: дис. докт. техн. наук: 05.22.09. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – 368 с.

4. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Jan. 2019, vol. 1, no. 9 (97), pp. 48-57. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520.

5. Безрученко В.М., Варченко В.К., Чумак В.В. Тягові електричні машини електрорухомого складу : навч. посібник. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2003. – 252 с.

6. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 848-858. Available at : https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf (Accessed 15.08.2020).

7. Liubarskyi B., Demydov A., Yeritsyan B., Nuriiev R., Iakunin D. Determining electrical losses of the traction drive of electric train based on a synchronous motor with excitation from permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Apr. 2018, vol. 2, no. 9 (92), pp. 29-39. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127936.

8. Stipetic S., Zarko D., Kovacic M. Optimised design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor series using combined analytical–finite element analysis based approach. *IET Electric Power Applications*, May 2016, vol. 10, no. 5, pp. 330-338. doi: https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0245.

9. Haataja J., Pyrhönen J. Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor: an alternative motor in variable speed drives. In: Parasiliti F., Bertoldi P. (eds) *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, 2003. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-55475-9_16.

10. Krause P.C., Wasynczuk O., Pekarek S.D. *Electromechanical Motion Devices*. *2nd ed*. 2012, Wiley-IEEE, 544 p.

11. Viego-Felipe P.R., Gómez-Sarduy J.R., Sousa-Santos V., Quispe-Oqueña E.C. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por iman permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. *Ingeniería, investigación y tecnología*, Jul. 2018, vol. 19, no. 3, pp. 269-279. doi: https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n3.023.

12. Wu W., Zhu X., Quan L., Du Y., Xiang Z., Zhu X. design and analysis of a hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor considering magnetic saliency and PM usage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, April 2018, vol. 28, no. 3, pp. 1-6, art no. 5200306. doi: https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2775584.

13. Reza R. Moghaddam. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications – Theoretical and Experimental Reevaluation. Doctoral Thesis*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2011, 260 p. Available at : http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:417890/FULLTEXT01.pdf (Accessed 21.09.2020).

14. Dehghani Ashkezari J., Khajeroshanaee H., Niasati M., Jafar Mojibian M. Optimum design and operation analysis of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*, 2017, vol. 25, pp. 1894-1907. doi: https://doi.org/10.3906/elk-1603-170.

15. Juergens J., Fricassè A., Marengo L., Gragger J., De Gennaro M., Ponick B. Innovative design of an air cooled ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for automotive traction application. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 803-810. doi: https://doi.org/10.1109/icelmach.2016.7732618.

16. Trancho E., Ibarra E., Arias A., Kortabarria I., Jurgens J., Marengo L., Fricasse A., Gragger J.V. PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Flux Weakening Control for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, April 2018, vol. 65, no. 4, pp. 2986-2995. doi: https://doi.org/10.1109/tie.2017.2748047.

17. *Finite Element Method Magnetics*. Available at: https://www.femm.info/wiki/HomePage (accessed 15.06.2020).

REFERENCES

1. Luvishis A.L. Asynchronous drive: the beginning of the path. *Lokomotiv*, 2017, no. 1 (721), pp .44-46. (Rus).

2. Luvishis A.L. New locomotives of the US railways. *Railway transport*, 2018, no. 8, pp. 70-77. (Rus).

3. Lyubarsky B.G. *Teoretychni osnovy dlia vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorennia enerhii elektrorukhomoho skladu: dys. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical bases for a choice and an estimation of perspective systems of electromechanical conversion of energy of an electric rolling stock: Dr. tech. sci. dissertation]. Kharkiv, NTU «KhPI», 2014. 368 p. (Ukr).

4. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Jan. 2019, vol. 1, no. 9 (97), pp. 48-57. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520.

5. Bezruchenko V.M., Varchenko V.K., Chumak V.V. *Tiahovi elektrychni mashyny elektrorukhomoho skladu* [Traction electric machines of electro-rolling stock]. Dnipropetrovsk, DNUZT Publ., 2003. 252 p. (Ukr).

6. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 848-858. Available at: https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/9143/pdf (Accessed 15.08.2020).

7. Liubarskyi B., Demydov A., Yeritsyan B., Nuriiev R., Iakunin D. Determining electrical losses of the traction drive of electric train based on a synchronous motor with excitation from permanent magnets. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies, Apr. 2018, vol. 2, no. 9 (92), pp. 29-39. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127936.

8. Stipetic S., Zarko D., Kovacic M. Optimised design of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor series using combined analytical–finite element analysis based approach. *IET Electric Power Applications*, May 2016, vol. 10, no. 5, pp. 330-338. doi: https://doi.org/10.1049/iet-epa.2015.0245.

9. Haataja J., Pyrhönen J. Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor: an alternative motor in variable speed drives. In: Parasiliti F., Bertoldi P. (eds) *Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, 2003. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-55475-9_16.

10. Krause P.C., Wasynczuk O., Pekarek S.D. *Electromechanical Motion Devices*. *2nd ed*. 2012, Wiley-IEEE, 544 p.

11. Viego-Felipe P.R., Gómez-Sarduy J.R., Sousa-Santos V., Quispe-Oqueña E.C. Motores sincrónicos de reluctancia asistidos por iman permanente: Un nuevo avance en el desarrollo de los motores eléctricos. *Ingeniería, investigación y tecnología*, Jul. 2018, vol. 19, no. 3, pp. 269-279. doi: https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n3.023. (Esp).

12. Wu W., Zhu X., Quan L., Du Y., Xiang Z., Zhu X. design and analysis of a hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor considering magnetic saliency and PM usage. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, April 2018, vol. 28, no. 3, pp. 1-6, art no. 5200306. doi: https://doi.org/10.1109/tasc.2017.2775584.

13. Reza R. Moghaddam. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications – Theoretical and Experimental Reevaluation*. *Doctoral Thesis*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2011, 260 p. Available at : http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:417890/FULLTEXT01.pdf (Accessed 21.09.2020).

14. Dehghani Ashkezari J., Khajeroshanaee H., Niasati M., Jafar Mojibian M. Optimum design and operation analysis of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor. *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*, 2017, vol. 25, pp. 1894-1907. doi: https://doi.org/10.3906/elk-1603-170.

15. Juergens J., Fricassè A., Marengo L., Gragger J., De Gennaro M., Ponick B. Innovative design of an air cooled ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for automotive traction application. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 803-810. doi: https://doi.org/10.1109/icelmach.2016.7732618.

16. Trancho E., Ibarra E., Arias A., Kortabarria I., Jurgens J., Marengo L., Fricasse A., Gragger J.V. PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Flux Weakening Control for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, April 2018, vol. 65, no. 4, pp. 2986-2995. doi: https://doi.org/10.1109/tie.2017.2748047.

17. *Finite Element Method Magnetics*. Available at: https://www.femm.info/wiki/HomePage (accessed 15.06.2020).

Надійшла (Received) 22.12.2020
Прийнята (Accepted) 07.02.2021
Опублікована (Published) 05.04.2021

Любарський Борис Григорович[1], *д.т.н., проф.,*
Овер'янова Лілія Вікторівна[1], *к.т.н., доц.,*
Рябов Євген Сергійович[1], *к.т.н., с.н.с.,*
Якунін Дмитро Ігорович[1], *к.т.н., доц.,*
Островерх Олександр Олегович[1], *к.т.н.,*
Воронін Юрій Володимирович[2],
[1] Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
[2] АТ «Електромашина»,
61016, Харків, вул. Озерянська, 106,
e-mail: lboris1911@ukr.net, overanova@ukr.net,
riabov.ievgen@gmail.com, unicomber@ukr.net,
ostrov.sasha@gmail.com

B.G. Liubarskyi [1], *L.V. Overianova*[1], *Ie.S. Riabov* [1], *D.I. Iakunin* [1], *O.O. Ostroverkh* [1], *Y.V. Voronin*[2]
[1] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
[2] JSC «Electromashina»,
106, Ozeryanskaya Str., Kharkiv, 61016, Ukraine.

Estimation of the main dimensions of the traction permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor.

Goal. *The goal of the research is to develop an algorithm for selecting the main dimensions of a traction permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor.* ***Methodology.*** *A method for determining the main dimensions of the motor, which combines the analytical selection of stator parameters and numerical field calculations for the selection of rotor parameters. The need to check the mechanical strength of a rotor with permanent NdFeB magnets in flux barriers is shown.* ***Results****. The article proposes an algorithm for selecting the main dimensions of a traction permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor, which combines analytical expressions for selecting stator parameters and numerical field calculations for selecting rotor parameters. It is determined that analytical methods for calculating the magnetic circuit need to be developed in order to reduce the time to select the main dimensions of the motor.* ***Originality.*** *For the first time the sizes of active parts of the permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor with power of 180 kW for the drive of wheels of the trolleybus are defined.* ***Practical significance.*** *As a result of research the sizes of active parts, stator winding data and a design of a rotor of the electric motor are defined. The obtained results can be applied when creating an electric motor for a trolleybus.* References 17, tables 3, figures 5.

Key words: **permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor, traction electric drive, permanent magnet, energy efficiency.**