

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Ісаєва Євгена Вікторовича
«Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах»,
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за галуззю знань 14
«Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Актуальність роботи

Дисертаційна робота присвячена актуальній науково-технічній задачі — дослідженню втрат від вихрових струмів у безпазових магнітоелектричних машинах з масивним ярмом статора та в конструкціях із двома обертовими ярмами, а також оцінюванню впливу цих втрат на електромагнітний момент і тепловий стан критичних вузлів, зокрема постійних магнітів та обмоток. Тема є особливо актуальною для електроприводів спеціального призначення та машин малої потужності, для яких важливими вимогами є низький рівень пульсацій моменту, висока точність формування характеристик та технологічність конструкції.

Застосування висококоерцитивних постійних магнітів на основі рідкісноземельних елементів створило передумови для ефективного використання безпазових конструкцій статора. В умовах сучасних вимог до швидкості розроблення та підготовки виробництва спеціалізованих моментних двигунів особливого значення набуває можливість спрощення технології виготовлення їх магнітопроводів. Використання масивного (нешихтованого) магнітопроводу статора дає змогу виключити трудомісткі операції виготовлення шихтованого магнітопроводу. Водночас така конструкція призводить до виникнення вихрових струмів, додаткових електромагнітних втрат та нагрівання елементів магнітної системи.

У зв'язку з цим науково-прикладне завдання оцінювання, розрахунку та мінімізації втрат від вихрових струмів у масивних елементах магнітної системи безпазових магнітоелектричних машин, а також визначення їх впливу на механічні характеристики та тепловий стан є актуальним для розроблення безпазових двигунів малої потужності.

Актуальність дисертаційної роботи підтверджується її виконанням у межах фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Інституту електродинаміки НАН України: «Розробити наукові засади та принципи побудови керованих n -ступеневих магнітоелектричних систем з екстремальними характеристиками» (шифр «Екстремум», 2019–2023 рр., № ДР 0119U001279) та «Розробити наукові основи та принципи побудови магнітоелектричних мехатронних модулів для спеціалізованих систем автоматичного керування» (шифр «МЕХАТРОН», 2024–2028 рр., № ДР 0124U000396).

Нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати

Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні актуальної науково-практичної задачі розроблення та проєктування безпазових магнітоелектричних двигунів з масивним ярмом статора та двигунів із двома обертовими ярмами.

Найбільш вагомими науковими результатами дослідження є:

- визначено електромагнітний обертовий момент, рівень його пульсацій та розподіл температурного поля в новому типі безпазового магнітоелектричного двигуна радіальної конструкції з двома обертовими ярмами, що дало змогу оцінити переваги такої конструкції в інтенсивних режимах експлуатації порівняно з традиційними аналогами. Зокрема, показано зниження амплітуди пульсацій обертового моменту у 7,1 раза та зменшення швидкості нагрівання магнітів в інтенсивному режимі майже на порядок ($1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ проти $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 60 с);

- дістав подальший розвиток метод визначення втрат від вихрових струмів у масивній конструкції ярма статора безпазового двигуна, який, на відміну від відомих підходів, враховує специфіку геометрії моментних двигунів аксіальної конструкції, зокрема наявність концентричних прорізів у ярмі та фрагментацію магнітів. Це дає змогу більш повно

враховувати особливості реальних конструкцій під час оцінювання втрат та гальмівного моменту;

– розроблено спосіб обчислення обертового моменту аксіального моментного двигуна на основі модернізованих коефіцієнтів скінченної активної довжини, що дає змогу зменшити потребу у складних і ресурсоємних тривимірних розрахунках на етапі попереднього проєктування;

– уперше розроблено метод визначення еквівалентного гальмівного (паразитного) моменту двигуна з масивним ярмом статора шляхом інтегрування втрат від вихрових струмів за об'ємом масивного ярма в системі координат ротора. Такий підхід дає змогу спростити розрахунок та покращити збіжність ітераційного процесу.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

– створенні спрощеної методики розрахунку та оцінювання характеристик безпазових моментних двигунів з масивним статором, що дає змогу скоротити терміни та зменшити витрати на етапах їх попереднього проєктування;

– розробленні рекомендацій щодо зменшення втрат від вихрових струмів шляхом виконання концентричних прорізів у масивному ярмі та фрагментації постійних магнітів полюсів; зокрема, встановлено залежність питомих втрат від кількості фрагментів магнітів;

– отриманні кількісних критеріїв та оціночних співвідношень у відносних одиницях для проєктування перспективних безпазових двигунів із двома обертовими ярмами в умовах інтенсивного теплового навантаження та примусового повітряного охолодження;

– визначенні раціонального числа пар полюсів у межах досліджених конструкцій циліндричних моментних двигунів, що дає змогу зменшити втрати при збереженні достатнього рівня обертового моменту.

Обґрунтованість та достовірність результатів

Обґрунтованість наукових положень та достовірність отриманих результатів забезпечено комплексним використанням сучасних методів математичного моделювання, аналітичних оцінок та експериментальної перевірки.

Зокрема, розрахунки виконувалися в середовищах COMSOL Multiphysics 5.4 та Simcenter Motorsolve 2021.1, які широко застосовуються для мультифізичного моделювання електромагнітних і теплових процесів. Для врахування нелінійності магнітного середовища застосовано апроксимацію кривої намагнічування дробово-раціональною функцією, похибка якої не перевищує 2 % у діапазоні індукції 1,5–1,8 Тл, тобто саме в тій області, де вплив насичення на розподіл магнітного поля та вихрових струмів є найбільш значним. Заслугує на схвалення послідовна увага автора до монотонності та гладкості апроксимуючої залежності як передумови збіжності ітераційного процесу розв'язання нелінійної польової задачі.

Важливим аспектом забезпечення достовірності результатів є зіставлення двовимірного та тривимірного моделювання для оцінювання впливу кінцевих ефектів. Для циліндричного двигуна з відносною довжиною $L_a/D\delta \approx 0,57$ поправка на скінченність активної довжини становить близько 2 %, що підтверджує можливість використання двовимірних моделей на етапах попереднього проєктування. Водночас автор коректно зазначає, що для коротких машин двовимірний розрахунок дає завищення втрат від вихрових струмів на 15–25 %, і в таких випадках необхідним є тривимірне моделювання.

Експериментальну перевірку здійснено на фізичній моделі методом тарованої машини — за різницею електричної потужності, споживаної приводом за наявності та за відсутності досліджуваного масивного осердя. Для оцінювання втрат від гістерезису використано формулу Штейнмеца з урахуванням властивостей сталі магнітопроводу. Характер розрахункової та експериментальної залежностей втрат від швидкості обертання узгоджується, що підтверджує адекватність застосованих моделей.

Достовірність результатів також підтверджується узгодженістю оцінок максимальної температури магнітів, отриманих із використанням різних програмних засобів — COMSOL Multiphysics та Simcenter Motorsolve.

Оцінка структури, змісту роботи та її оформлення

Дисертацію Ісаєва Є. В. викладено на 128 сторінках, обсяг основного тексту становить 102 сторінки. Робота має чітку логічну структуру та містить вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел і додаток.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено використані методи, зазначено особистий внесок здобувача та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану розвитку магнітоелектричних двигунів малої потужності, зокрема безпазових машин та моментних двигунів із масивним ярмом статора. Проведений аналіз дає змогу визначити основні напрями досліджень та обґрунтувати актуальність задачі визначення втрат у масивних магнітопроводах. Приділено увагу розробкам двигунів зі збудженням від постійних магнітів, що створені в Інституті електродинаміки НАН України, де здобувач проходив навчання.

Другий розділ містить опис математичних моделей, необхідних для розрахунку електромагнітного поля, втрат та теплових процесів. Особливу увагу приділено моделюванню нелінійних властивостей магнітопроводу, представлення обмотки як гомогенізованого середовища та моделюванню турбулентного обтікання поверхонь охолоджувальним потоком повітря.

Третій розділ присвячено розрахунковому та експериментальному дослідженню двох типів двигунів: аксіального (дискового) двигуна з масивним ярмом статора та циліндричного моментного двигуна. Наведено послідовність розрахунків, результати моделювання, їх аналіз та зіставлення з даними вимірювань на фізичній моделі.

Четвертий розділ містить порівняльний аналіз безпазової та пазової конструкцій двигунів одного типорозміру за такими показниками, як обертовий момент, пульсації моменту та нагрівання магнітів, а також дослідження впливу фрагментації магнітів на втрати від вихрових струмів. Окремо розглянуто конструкцію двигуна з двома обертовими ярмами та її тепловий стан в інтенсивному режимі за примусового повітряного охолодження.

Робота ілюстрована 69 рисунками та містить 6 таблиць цифрових даних, які наочно демонструють отримані результати. Список використаних джерел налічує 98 найменувань, з них 15 кирилицею та 83 латиницею, що свідчить про ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджуваної проблеми.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу літературних джерел, побудові двовимірних і тривимірних геометричних та розрахункових моделей, виконанні розрахунків обертового моменту й теплового стану, обробленні результатів експериментальних вимірювань, а також у пропозиції виконувати розрахунок втрат від вихрових струмів у системі координат ротора.

Апробація результатів роботи здійснювалася на міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки – 2024» (м. Київ), а також на наукових семінарах Інституту електродинаміки НАН України.

Зауваження до дисертації

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу загалом, вважаю за доцільне висловити такі зауваження та побажання.

1. У підрозділі 3.1 ефективність кільцевих прорізів у масивному ярмі статора оцінено за моделлю, в якій знехтувано «перемичками» (п. 3.1.3), хоча за п. 3.1.1 вони є необхідними за умовами механічної міцності. Оскільки перемички електрично шунтують прорізи, отримана оцінка зменшення гальмівного моменту у 4–5 разів є верхньою межею, а вплив їхньої кількості та ширини не оцінено навіть наближено. Крім того, значення емпіричного коефіцієнта $k_{CR} =$

0,5 у виразі (3.1) обрано за зіставленням саме з тривимірним розрахунком, тобто методика потребує калібрування за 3D-моделлю і в такому вигляді не «дає змогу відмовитись від тривимірного моделювання магнітного поля», як сформульовано у п. 3 наукової новизни.

2. Експериментальна частина роботи (п. 3.2.4–3.2.6) потребує додаткових пояснень.

По-перше, у переліку завдань дослідження (Вступ) зазначено «проведено експериментальне вимірювання обертового моменту циліндричної моделі двигуна і успішне порівняння з результатами моделювання». Фактично ж вимірювалася різниця електричної потужності, споживаної приводом за наявності та за відсутності досліджуваного масивного осердя (вираз (3.19)), причому фізична модель не має обмотки, а обертовий момент двигуна отримано розрахунковим шляхом за припущення про синусоїдний розподіл МРС еквівалентної обмотки. Отже, експериментально перевірено розрахунок втрат у масивному осерді, а не механічну характеристику двигуна, і відповідне формулювання завдання доцільно уточнити.

По-друге, не наведено оцінки похибки вимірювання: не вказано ані абсолютних значень потужностей P та P_{Drive} , ані класу точності використаних приладів, ані кількості повторних дослідів. Оскільки шукана величина визначається як різниця двох близьких за значенням величин, точність такої оцінки має принципове значення для підтвердження відповідності розрахункових та експериментальних результатів. Не обговорено також вплив нагрівання масивного осердя під час досліду на його питомий опір (у таблиці 3.3 наведено значення для $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), хоча цей чинник безпосередньо впливає на втрати від вихрових струмів.

По-третє, значення коефіцієнта η у формулі Штейнмеца (3.24) фактично підбрано за результатом. За наведеним у роботі джерелом для вуглецевих сталей діапазон η становить $0,008\dots 0,025$, і сталь 20 як низьковуглецева мала б потрапляти саме в цей діапазон, натомість прийнято $\eta = 0,0015$, тобто значення, ближче до діапазону трансформаторних сталей. За такого підходу збіг сумарних розрахункових та вимірних втрат (рис. 3.26) значною мірою забезпечується самим вибором η і не може розглядатися як цілком незалежне підтвердження моделі. Бажано було б обґрунтувати значення η за незалежними даними (наприклад, за окремим вимірюванням у квазістатичному режимі) або навести чутливість кінцевого результату до цього коефіцієнта.

3. У третьому розділі перед формулою (3.18) доцільно було б уточнити, що йдеться про обертовий момент, віднесений до одиниці активної довжини машини: у двовимірній постановці втрати від вихрових струмів інтегруються за площею поперечного перерізу масивного ярма, тому й обчислена за ними величина моменту відповідає одиниці активної довжини.

4. У підрозділі 3.2.2 «Обчислення статичного та динамічного моменту» термін «динамічний момент» видається не зовсім коректним з точки зору усталеної термінології теорії електричних машин, оскільки термін «динамічний» зазвичай пов'язують із перехідними процесами та режимами зі змінною швидкістю обертання. У розглянутому випадку йдеться про момент, визначений у режимі обертання за заданої сталої швидкості. Тому доцільніше було б використовувати, наприклад, термін «момент в усталеному режимі обертання». Це дозволило б уникнути термінологічної неоднозначності при розмежуванні статичного та рухомого режимів роботи.

5. У підрозділі 2.2 слушно зазначено, що в безпазових машинах обмотку безпосередньо пронизує основний магнітний потік, унаслідок чого втрати від вихрових струмів у провідниках є помітно більшими, ніж у машинах із зубчастим статором, і наведено відповідну розрахункову формулу (2.7). Проте надалі ця формула в роботі не застосовується. Зокрема, у тепловому розрахунку безпазового двигуна з двома обертовими ярмами (підрозділ 4.5) прямо зазначено, що єдиним джерелом тепла вважалася обмотка, при цьому враховано, вочевидь, лише її електричні (омічні) втрати. Водночас за швидкості обертання 6000 об/хв і 14 полюсів частота поля становить близько 700 Гц , а втрати за (2.7) пропорційні квадрату частоти та четвертому степеню діаметра проводу; сам діаметр проводу обмотки в роботі не наведено, що не дає змоги читачеві оцінити цю складову самотійно. Оскільки саме тепловий стан обмотки

в інтенсивному режимі (20 А/мм^2) є ключовим результатом підрозділу 4.5 і покладений в основу висновку про достатність ізоляції класу F у тривалому режимі, відсутність оцінки цієї складової втрат помітно знижує обґрунтованість зазначеного висновку.

6. У четвертому розділі проведено порівняння безпазового двигуна з серійним двигуном із зубчастою конструкцією статора. Водночас для більш повного порівняння можливостей різних конструктивних виконань можна було б додатково розглянути безпазовий двигун із шихтованим ярмом статора, що не обертається, та порівняти його характеристики з досліджуваною конструкцією з масивним ярмом. Такий аналіз, зокрема з використанням можливостей програмного комплексу Simcenter Motorsolve, дав би змогу ширше оцінити вплив конструкції магнітопроводу на основні характеристики двигуна та відокремити ефект безпазовості від ефекту масивності магнітопроводу.

7. У роботі розглянуто фрагментацію постійних магнітів як один із заходів зменшення втрат від вихрових струмів. Водночас можна було б додатково розглянути можливість застосування скошу магнітів або скошу обмотки з метою зменшення пульсацій обертового моменту та відповідних пульсацій магнітної індукції, що є джерелом нагрівання магнітів. Навіть за відсутності відповідного чисельного моделювання доцільним було б навести оцінку можливого ефекту від застосування таких заходів на основі відомих літературних даних.

Висловлені зауваження стосуються повноти обґрунтування окремих положень та можливих напрямів подальшого розвитку проведених досліджень. Вони не мають принципового характеру, не знижують наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Повнота опублікування результатів

Основні наукові результати дисертації опубліковано у чотирьох статтях у науковому фаховому виданні України «Технічна електродинаміка» (категорія «А»), яке індексується міжнародною наукометричною базою даних Scopus.

Дві з наведених статей опубліковано англійською мовою. Таким чином, кількість та зміст опублікованих праць задовольняють вимогу щодо оприлюднення основних наукових результатів дисертації у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України та індексованих у міжнародних наукометричних базах даних. Зміст публікацій відповідає змісту розділів дисертації: результати розділу 3 відображено у публікаціях 1, 2 та 3, результати розділу 4 — у публікації 4.

Апробацію результатів здійснено на міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки — ПСЕ-2024» (м. Київ, 25–27 червня 2024 р., доповідь та публікація тез), а також на семінарі наукової ради «Наукові основи електроенергетики» за напрямом «Автоматизовані електромеханічні системи та генеруючі машинно-вентильні комплекси автономних енергоустановок» (червень 2026 р.) та на наукових семінарах Відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

У дисертаційній роботі та публікаціях здобувача ознак порушення академічної доброчесності, зокрема академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів, не виявлено. Використані результати та ідеї інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим нормам

Дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича «Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах» є актуальною, завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною особисто здобувачем на належному науково-методичному рівні. Робота характеризується єдністю змісту, логічністю викладення та містить нові наукові положення, що мають істотне значення для теорії та практики проектування магнітоелектричних машин.

За рівнем актуальності, наукової новизни, практичної значущості та повнотою висвітлення результатів дисертаційна робота відповідає вимогам спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», пунктам 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р., а також «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. (зі змінами).

Здобувач Ісаєв Євген Вікторович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (галузь знань 14 «Електрична інженерія»).

Рецензент:

Гребеніков Віктор Володимирович,

провідний науковий співробітник,

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник,

Інститут електродинаміки НАН України



[Гребеніков В.В.]

