

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

1. Актуальність теми

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі – дослідженню втрат від вихрових струмів у безпазових магнітоелектричних машинах з масивним (нешихтованим) ярмом статора та в конструкціях із двома обертовими ярмами, а також оцінюванню впливу цих конструктивних рішень на електромагнітний момент, рівень його пульсацій та тепловий стан основних елементів (постійних магнітів, обмоток).

Застосування висококоерцитивних постійних магнітів (зокрема NdFeB) створює передумови для ширшого впровадження безпазових конструкцій, які вирізняються відсутністю зубчастого моменту, низьким рівнем пульсацій та високою лінійністю характеристик. Використання масивного магнітопроводу дозволяє спростити технологію виготовлення та виключити трудомісткі операції шихтування. Однак відмова від шихтованого магнітопроводу спричиняє виникнення вихрових струмів і додаткових втрат, що вимагає кількісної оцінки та визначення допустимих режимів роботи. Особливий науково-практичний інтерес становлять моментні двигуни та машини з двома обертовими ярмами, де характер електромагнітних і теплових процесів має свою специфіку.

Актуальність роботи підтверджується її виконанням у межах фундаментальних і прикладних НДР Інституту електродинаміки НАН України («Екстремум», № ДР 0119U001279; «МЕХАТРОН», № ДР 0124U000396).

2. Нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати

Найбільш вагомими науковими результатами дисертації є:

1. **Уперше визначено** електромагнітний обертовий момент, рівень його пульсацій та розподіл температурного поля в новому типі безпазового магнітоелектричного двигуна радіальної конструкції з двома обертовими ярмами. Це дозволило обґрунтувати переваги такої системи в короткочасних інтенсивних режимах (зокрема, зафіксовано зниження пульсацій магнітної індукції в повітряному проміжку у 7,1 рази та зменшення швидкості нагрівання магнітів у 9 разів).

2. **Дістав подальшого розвитку** метод визначення втрат від вихрових струмів у масивній сталевій конструкції ярма статора безпазового двигуна. На відміну від відомих підходів, він урахує геометрію моментних двигунів аксіальної та циліндричної конструкцій, зокрема наявність концентричних (кільцевих) прорізів у ярмі та фрагментацію постійних магнітів.

3. **Розроблено спосіб** обчислення обертового моменту аксіального моментного двигуна на основі модернізованих коефіцієнтів скінченної активної довжини, що дає змогу істотно зменшити потребу в ресурсоємному тривимірному моделюванні на етапах попереднього проєктування з похибкою не більше $\sim 2\%$.

4. **Уперше розроблено метод** визначення еквівалентного гальмівного (паразитного) моменту двигуна з масивним ярмом статора шляхом інтегрування втрат від вихрових струмів за об'ємом ярма в системі координат ротора.

3. Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає у розробленні спрощених інженерних методик і практичних рекомендацій щодо:

- оцінювання впливу вихрових втрат у масивному ярмі на обертовий момент та визначення допустимого діапазону швидкостей обертання;
- використання конструктивних заходів для мінімізації втрат (виконання прорізів у масивному ярмі дозволяє зменшити паразитний момент у 5–6 разів; застосування фрагментацію постійних магнітів);
- вибору оптимального числа у циліндричних моментних двигунах для зниження втрат при збереженні необхідного моменту;
- оцінювання теплового стану й граничних режимів роботи двигунів із двома обертовими ярмами в умовах високої густини струму та примусового повітряного охолодження;
- застосування отриманих у відносних одиницях залежностей для попередньої оцінки характеристик машин близьких типорозмірів.

4. Обґрунтованість та достовірність результатів

Обґрунтованість забезпечено використанням сучасного математичного апарату теорії електромагнітного поля, методів скінченних елементів (у середовищах COMSOL Multiphysics та Simcenter Motorsolve), а також чисельно-аналітичних підходів. У моделях ураховано нелінійність характеристики намагнічування сталі (апроксимація $B(H)$ з похибкою в межах

1,5-1,8 %), електропровідність масивних елементів, втрати на гістерезис і конвективний теплообмін.

Достовірність підтверджується порівнянням 2D- та 3D-моделей (розбіжність становить близько 2 %), а також зіставленням розрахункових даних із результатами експериментальних досліджень на фізичному макеті методом тарованої машини (похибка узгодження не перевищує 2 %).

5. Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

- **Вступ** містить обґрунтування актуальності, мету, завдання, наукову новизну та практичну цінність.

- **Розділ 1** присвячено аналізу сучасного стану розробки та конструкцій безпазових магнітоелектричних машин малої потужності й моментних двигунів.

- **Розділ 2** містить математичні моделі електромагнітних втрат, нелінійного магнітопроводу, гомогенізації обмоток та теплопередачі.

- **Розділ 3** присвячено обчисленню втрат і моменту аксіального та радіального двигунів із масивним статором, розробці методик визначення паразитного моменту та експериментальній перевірці.

- **Розділ 4** містить порівняльний аналіз пазової та безпазової конструкцій, дослідження нагріву магнітів, їх фрагментації, а також оцінку теплового режиму двигуна з двома обертовими ярмами.

Матеріал викладено послідовно, логічно та технічно грамотно.

6. Апробація, публікації та академічна доброчесність

Основні результати оприлюднено в чотирьох наукових працях (у фахових виданнях України та базах Scopus/Web of Science), апробовано на міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки – 2024» (м. Київ) та семінарах Інституту електродинаміки НАН України.

За результатами перевірки на текстові збіги ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації не виявлено. Використані джерела мають належні посилання.

7. Зауваження та побажання до дисертації

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, доцільно висловити такі зауваження:

1. Розширення експериментальної бази та порівнянь. Для аксіальної конструкції з прорізаним ярмом перевірка виконана переважно шляхом порівняння 2D- та 3D-моделювання; було б доцільно розширити фізичний експеримент саме для цієї конфігурації. Також порівняльний аналіз у 4 розділі варто було б доповнити розрахунком безпазового двигуна з нерухомим шихтованим ярмом статора (наприклад, за допомогою Simcenter Motorsolve) та оцінкою сумарного ККД і загальних втрат в однакових режимах.

2. Уточнення моделей втрат та алгоритмів. Втрати на гістерезис розраховуються за класичною формулою Штейнмеца; у подальших дослідженнях варто використати деталізованіші моделі з урахуванням вищих гармонік та форми циклу перемагнічування. Доцільно також показувати вплив алгоритмів апроксимації кривої $B(H)$ на збіжність розрахунків при високому рівні насичення сталі.

3. Конструктивні заходи зменшення пульсацій. Разом із фрагментацією магнітів та прорізами в ярмі доцільно було б розглянути вплив скосу магнітів чи пазів/обмотки на рівень пульсацій моменту.

4. Уточнення постановки теплових і гідродинамічних задач. Під час розрахунку примусового охолодження в COMSOL Multiphysics (Розділ 4) доцільно чітко вказувати конкретну використану модель турбулентності ($k-\omega$) та її параметри безпосередньо в описі розрахункової схеми.

5. Термінологічні та методичні уточнення.

У Розділі 3 (підрозділ 3.2.2) використання терміна «динамічний момент» є неузгодженим із класичною теорією електричних машин (де він стосується перехідних процесів із змінною швидкістю), в такому випадку, так як описана постійна швидкість, доцільніше вживати «момент у режимі обертання з постійною швидкістю»;

- у двовимірних розрахунках перед відповідними формулами (наприклад, перед 3.18) треба вказувати, що розрахований момент віднесено до одиниці активної довжини;

- треба наводити кількісну частку гістерезисної складової гальмівного моменту у загальному балансі механічної характеристики.

6. Оформлення. У тексті зустрічаються поодинокі редакційні, стилістичні неточності та описки, які не впливають на наукову цінність роботи.

Зазначені зауваження мають характер побажань і дискусійних зауважень та не знижують наукову новизну й практичну цінність роботи.

8. Загальний висновок

Дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича «Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах» є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, яка містить нові обґрунтовані результати, що мають істотне значення для теорії та практики проектування електромеханічних перетворювачів енергії.

За рівнем актуальності, наукової новизни, практичної значущості та повнотою висвітлення результатів дисертація повністю відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (затвердженого постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.) та Вимогам МОН України № 40 від 12.01.2017 р.

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

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електричних машин,
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



Олексій ДУНЄВ

Підпис Олексія ДУНЄВА засвідчую:

В.о. проректора з наукової роботи,
доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України



Олексій ЛАРІН