

Рецензія

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

Актуальність роботи

Стрімкий розвиток автоматизації, роботизації, а також систем спеціального призначення висуває підвищені вимоги до швидкодії, надійності та питомих показників електроприводів. У сегменті керованих електромеханічних перетворювачів малої потужності дедалі ширше застосовуються безконтактні магнітоелектричні двигуни з висококоерцитивними постійними магнітами.

Застосування висококоерцитивних постійних магнітів сприяє використанню безпазових конструкцій статора, які мають низку переваг: відсутність зубцевих моментів, низький рівень пульсацій обертового моменту, високу лінійність характеристик та конструктивну простоту. Водночас використання масивного магнітопроводу статора дозволяє спростити технологію його виготовлення, але пов'язано із виникненням вихрових струмів, збільшенням рівня додаткових електромагнітних втрат та підвищенням нагрівання окремих елементів конструкції.

Для моментних двигунів, у яких робочі швидкості обертання порівняно невеликі, застосування масивного магнітопроводу може бути конструктивно та технологічно доцільним. Проте для обґрунтованого вибору такого рішення необхідно оцінювання втрат в масивному ярмі, їх вплив на обертовий момент та визначення допустимих режимів роботи.

Окремий інтерес становлять безпазові магнітоелектричні машини з двома обертовими ярмами. У такій конструкції змінюються умови виникнення електромагнітних втрат і тепловідведення, що потребує комплексного аналізу електромагнітних та теплових процесів.

У зв'язку з цим науково-прикладне завдання визначення та оцінювання вихрових втрат у масивних елементах магнітної системи безпазових магнітоелектричних машин, а також дослідження їх впливу на механічні та теплові характеристики є актуальним.

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

Наукове завдання роботи полягає у розв'язанні актуальної науково-практичної задачі дослідження та проектування безпазових магнітоелектричних двигунів з масивним ярмом статора та двигунів з двома обертовими ярмами.

Найбільш вагомими результатами дослідження 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 ярами, що дозволило оцінити можливості використання такої конструкції в інтенсивних режимах експлуатації.

2. **Дістав подальший розвиток** метод визначення втрат від вихрових струмів у масивній сталевій конструкції з урахуванням особливостей геометрії моментних двигунів аксіальної конструкції, зокрема наявності концентричних прорізів у ярі та фрагментації постійних магнітів.
3. **Розроблено новий спосіб** обчислення обертового моменту аксіального моментного двигуна на основі модернізованих коефіцієнтів скінченної активної довжини, що дозволяє зменшити потребу у складних тривимірних розрахунках на етапі попереднього проектування.
4. **Уперше розроблено** метод визначення еквівалентного гальмівного (паразитного) моменту двигуна з масивним яром статора шляхом інтегрування втрат від вихрових струмів за об'ємом масивного яра в системі координат ротора.

Отримані результати доповнюються аналізом теплових процесів та оцінкою впливу конструктивних заходів на втрати й характеристики досліджуваних машин.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у можливості їх використання під час попереднього проектування та оцінювання характеристик безпазових моментних двигунів з масивним статором.

Розроблені методики дозволяють оцінювати вплив вихрових втрат у масивному ярі на обертовий момент, визначати допустимий діапазон швидкостей обертання, досліджувати ефективність виконання прорізів у масивному ярі та фрагментації постійних магнітів, а також оцінювати тепловий стан магнітів і обмоток.

Практичний інтерес становлять також отримані кількісні критерії та оціночні співвідношення у відносних одиницях для перспективних безпазових двигунів з двома обертовими ярами, зокрема для режимів із високою густиною струму в обмотці та примусовим повітряним охолодженням.

Обґрунтованість та достовірність результатів

Отримані в дисертації результати є достатньо обґрунтованими. Для вирішення поставлених задач автором використано сучасний математичний апарат теорії електромагнітного поля, методи скінченних елементів, а також чисельно-аналітичні підходи до оцінювання поверхневого ефекту та втрат на гістерезис.

Чисельне моделювання виконувалося із застосуванням програмних комплексів COMSOL Multiphysics та Simcenter Motorsolve. У моделях враховано нелінійні характеристики намагнічування сталі, електропровідність масивних елементів, вихрові втрати, втрати на гістерезис та теплові процеси.

Достовірність результатів підтверджується їх зіставленням із даними експериментальних досліджень, виконаних методом тарованої машини на спеціальному фізичному макеті статора в обертовому полі постійних магнітів. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними результатами не перевищує 2 % для розглянутого режиму.

Додатковим підтвердженням достовірності є порівняння результатів дво- та тривимірного моделювання. Результати роботи пройшли апробацію на міжнародній науково-технічній конференції та на наукових семінарах.

Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертація викладена на 128 сторінках, включаючи додатки, і складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено положення наукової новизни та практичного значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану розвитку та конструктивних виконань магнітоелектричних двигунів малої потужності. Розглянуто переваги та особливості безпазових машин, проаналізовано вплив повітряного проміжку та особливості застосування масивного магнітопроводу в моментних двигунах.

Другий розділ містить опис математичних моделей електромагнітних та теплових процесів. Розглянуто рівняння змінного магнітного поля в провідному середовищі, враховано нелінійні характеристики намагнічування сталі та моделі гістерезису. Наведено математичний апарат гомогенізації структури багатовиткових обмоток для теплового розрахунку та моделі конвективного теплообміну.

Третій розділ присвячений дослідженню електромагнітних втрат та обертового моменту в моментних двигунах. Розглянуто аксіальну («дискову») та циліндричну конструкції з масивним ярмом статора. Запропоновано алгоритм розрахунку гальмівного моменту через інтегрування втрат у системі координат ротора. Наведено результати експериментальної перевірки розрахункових методик.

Четвертий розділ містить порівняльний аналіз безпазового та пазового циліндричних двигунів зворотного виконання. Досліджено нагрівання постійних магнітів, вплив їх фрагментації, а також тепловий режим нової конструкції безпазового двигуна з двома обертовими ярмами в умовах примусового повітряного охолодження.

Загалом матеріал дисертації викладено послідовно, логічно та технічно грамотно. Структура роботи відповідає поставленій меті та завданням, а отримані результати достатньо аргументовані.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ісаєва Є.В. є завершеним науковим дослідженням, у якому послідовно розглянуто поставлені наукові та практичні завдання.

Результати роботи свідчать про особистий внесок здобувача у виконання досліджень, пов'язаних із моделюванням електромагнітних і теплових процесів у безпазових магнітоелектричних машинах, визначення втрат та оцінювання їх впливу на характеристики двигунів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича є результатом самостійних досліджень здобувача. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела. За наданою інформацією, ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів не встановлено.

Повнота опублікування результатів

Основні результати дисертаційної роботи оприлюднені у наукових публікаціях автора. За темою роботи опубліковано наукові праці у фахових виданнях України та статтях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних.

Результати досліджень доповідалися та обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки-2024» (м. Київ) та на наукових семінарах Відділу електромеханічних систем ІЕД НАН України.

Таким чином, основні результати дисертаційної роботи знайшли належне відображення в опублікованих працях та були представлені для обговорення науковій спільноті.

Зауваження до дисертації

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

1. При розв'язанні питань щодо визначення гальмівного моменту двигуна з масивним ярмом статора доцільно більш докладно обґрунтувати припущення, що всі вихрові струми, які створюють втрати, приймають участь у формуванні електромагнітного моменту, та чи впливають втрати на гістерезис на величину гальмівного моменту.
2. Питання щодо формулювань наукової новизни:
 - 2.1. Щодо п.1, стосовно визначення обертового моменту, його пульсацій та температурного поля в новому типі безпазового магнітоелектричного двигуна радіальної конструкції з двома обертовими ярмами: бажано відтінити, що є новацією (чим відрізняється від відомих) у визначенні обертового моменту. Яка достовірність результатів за таким підходом?
 - 2.2. Щодо п.2, стосовно подальшого розвитку метода визначення втрат в масивному ярмі статора безпазового моментного двигуна: бажано відтінити, чим саме даний метод відрізняється від відомих.
3. У роботі значну увагу приділено технологічним перевагам застосування масивного ярма статора. Було б корисно доповнити дослідження більш детальним порівнянням технології виготовлення масивного ярма з прорізами та традиційного шихтованого магнітопроводу для відповідного типорозміру двигуна.
4. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються окремі стилістичні та граматичні неточності, а також поодинокі описки в оформленні рисунків і математичних позначень.

Зазначені зауваження та побажання не є визначальними, не зменшують наукової новизни та практичної значущості отриманих результатів і загалом не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича «Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах» є завершеним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають практичне та наукове значення для розвитку безпазових магнітоелектричних машин.

Робота характеризується актуальністю теми, наявністю наукової новизни, достатньою обґрунтованістю та достовірністю отриманих результатів, а також практичною спрямованістю проведених досліджень.

За рівнем актуальності, наукової новизни, практичної значущості та повнотою оприлюднення результатів дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на

здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Вважаю, що Ісасв Євген Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 «Електрична інженерія».

Рецензент:

провідний науковий співробітник
відділу електромеханічних систем,
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України,
доктор техн. наук, ст. наук. співр.



Олександр ПОПОВИЧ

Підпис Олександра ПОПОВИЧА засвідчую:

Вчений секретар
Інституту електродинаміки
Національної академії наук України



Марина ГУТОРОВА