

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»

Актуальність роботи

Дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича присвячена дослідженню магнітоелектричних машин з безпазовою конструкцією статора, які використовуються в малопотужних тихохідних спеціалізованих електроприводах. В роботі, з огляду на тихохідність зазначених двигунів, пропонується їх удосконалення шляхом застосування масивного електропровідного магнітопроводу статора замість шихтованого, що на думку автора сприяє здешевленню машин внаслідок більш простої технології їх виготовлення. Але відмова від шихтованого магнітопроводу призводить до виникнення вихрових струмів, додаткових втрат і зниження обертового моменту. Тому прийняття такого рішення потребує оцінки втрат у масивному ярмі і їх впливу на нагрів та електромагнітний момент машини.

Таким чином, дослідження втрат в безпазових магнітоелектричних машинах з масивним ярмом статора з метою обґрунтування доцільності використання масивного ярма статора замість шихтованого формує актуальність теми дисертації.

Нові науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати

У дисертаційній роботі отримано низку результатів, які мають наукову новизну.
До найбільш суттєвих результатів слід віднести:

1. Розроблено метод визначення гальмівного моменту двигуна з масивним ярмом статора на основі інтегрування втрат від вихрових струмів за об'ємом ярма.
2. Дістав подальшого розвитку метод визначення втрат у масивному ярмі статора безпазового моментного двигуна з урахуванням конструктивних особливостей, зокрема наявності прорізів у ярмі та фрагментації постійних магнітів.
3. Розроблено спосіб визначення обертового моменту аксіального двигуна на основі модернізованих коефіцієнтів скінченної активної довжини, що дозволяє зменшити потребу у повному тривимірному моделюванні магнітного поля.
4. Вперше визначено обертовий момент, його пульсації та температурне поле нового типу безпазового магнітоелектричного двигуна радіальної конструкції з двома обертовими ярмами.

Слід відзначити поєднання розрахункового та експериментального підходів. Для циліндричного моментного двигуна виконано експериментальне вимірювання та порівняння отриманого обертового моменту з результатами математичного моделювання. При цьому врахування гістерезисних втрат дозволило отримати узгодження результатів із експериментом із похибкою до 2 % за умов належного визначення властивостей сталі магнітопроводу.

Важливим результатом є також дослідження впливу конструктивних заходів на втрати. Зокрема, показано можливість істотного зменшення паразитного моменту шляхом виконання прорізів у масивному ярмі. Для дослідженої конструкції із шістьма прорізами отримано зменшення паразитного моменту майже у п'ять–шість разів залежно від використаної моделі та параметрів розрахунку; результати наближеної методики перевірено за допомогою тривимірного моделювання.

Наукову цінність має встановлення залежності показників циліндричного безпазового моментного двигуна від числа пар полюсів та оцінка похибки двовимірного моделювання. Для дослідженої конструкції похибка визначення моменту за двовимірною моделлю порівняно з тривимірною оцінена приблизно у 2 %.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у можливості їх використання під час проектування та розрахунку характеристик безпазових магнітоелектричних двигунів.

Розроблені та досліджені методики дозволяють:

- оцінювати вплив вихрових втрат у масивному ярмі статора на зменшення обертового моменту моментного двигуна;
- визначати допустимий діапазон швидкостей обертання двигуна з масивним магнітопроводом статора;
- оцінювати ефективність виконання прорізів у масивному ярмі статора для зменшення вихрових втрат;
- визначати вплив фрагментації постійних магнітів на втрати в них;
- виконувати попереднє порівняння безпазової та пазової конструкцій магнітоелектричних двигунів;
- оцінювати тепловий стан постійних магнітів та обмоток у режимах інтенсивної роботи;
- використовувати отримані у відносних одиницях залежності для попередньої оцінки характеристик машин близьких типорозмірів.

Обґрунтованість та достовірність результатів

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задач, обґрунтуванням прийнятих припущень, використанням сучасних засобів математичного моделювання, зокрема програмних комплексів COMSOL Multiphysics та Simcenter Motorsolve.

Достовірність результатів підтверджується їх порівнянням між різними способами розрахунку, зіставленням дво- та тривимірних моделей, а також експериментальною перевіркою на фізичній моделі.

Аналіз структури та змісту дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Основний текст має обсяг 102 сторінки, робота містить 69 рисунків і 6 таблиць, список використаних джерел включає 98 найменувань.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану розвитку магнітоелектричних двигунів малої потужності, розглянуто радіальні й аксіальні конструкції, безпазові машини та особливості застосування масивного магнітопроводу.

Другий розділ присвячено математичним моделям електромагнітних втрат і теплових процесів. Розглянуто моделі змінного магнітного поля в електропровідному середовищі, нелінійного магнітопроводу, постійних магнітів та моделі теплопередачі.

Третій розділ призначений розрахунку втрат і обертового моменту моментних двигунів із масивним осердям статора. Досліджено конструкції з аксіальним та радіальним напрямом магнітного потоку, запропоновано методики розрахунку паразитного моменту та проведено експериментальну перевірку.

У четвертому розділі виконано порівняльний аналіз безпазової та пазової конструкцій, досліджено нагрівання постійних магнітів, вплив їх фрагментації, а також тепловий режим безпазового двигуна з двома обертовими ярмами.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За змістом дисертаційна робота є завершеним дослідженням, у якому розв'язано поставлені наукові та практичні завдання. Особистий внесок здобувача є визначеним. Здобувачем виконано аналіз літературних джерел, побудовано дво- та тривимірні моделі досліджуваних двигунів, проведено розрахунки статичного моменту та моменту в процесі

руху з постійною швидкістю, виконано порівняльний аналіз результатів теплових процесів, оброблено результати експериментальних досліджень та запропоновано розрахунок втрат від вихрових струмів у рухомій системі координат. Роботи опубліковано у співавторстві, при цьому внесок здобувача в проведенні дослідження визначено в дисертації.

Дисертаційна робота має ознаки самостійної завершеної наукової праці. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів супроводжуються відповідними посиланнями на джерела. За результатами перевірки роботи на текстові збіги, згідно з наданою інформацією, ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації не встановлено.

Повнота опублікування результатів

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у наукових працях здобувача, виконаних як одноосібно, так і у співавторстві. Зокрема за темою дисертації опубліковано чотири наукові статті у науковому виданні “Технічна електродинаміка”, що входить до наукометричних баз даних.

Основні положення роботи апробовано на міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» у 2024 році та обговорювалися на наукових семінарах Інституту електродинаміки НАН України.

Зауваження до дисертації

По роботі можна зробити наступні зауваження.

1. Заявлена мета дисертації полягає в дослідженні впливу втрат від вихрових струмів у масивних елементах магнітної системи магнітоелектричних двигунів на електромагнітний момент та додатковий нагрів двигунів (стор. 19). З точки зору такої мети назва роботи - *“Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах”* є занадто загальною і не відображає пропозицію автора щодо удосконалення двигунів шляхом застосування масивного ярма статора замість шихтованого. Більш точною назвою могла би бути, наприклад, така назва: *“Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах з масивним ярмом статора”*.

2. В дисертації запис рівнянь (2.1) – (2.6), згідно з якими розраховувалися електромагнітне поле магнітоелектричних двигунів, є помилковим. В зазначених рівняннях єдиним джерелом поля є задані струми в обмотці статора, а джерело поля у вигляді магнітного потоку постійних магнітів відсутнє. В зазначені рівняння необхідно додати додатковий член із заданою величиною залишкової індукції постійного магніту.

3. В розділі 4 дисертації розглядаються швидкообертові магнітоелектричні двигуни із зовнішнім ротором або двома осердями, що обертаються. Внаслідок великої частоти вихрових струмів виконання масивного осердя статора в таких двигунах є неприйнятним. Тому цей розділ дещо випадає із загальної направленості роботи і не корелюється з поставленою метою дисертації.

4. На стор. 44 роботи стверджується, що теплообмін у швидкообертових двигунах із зовнішнім ротором або двома осердями, що обертаються слід моделювати з урахуванням турбулентного характеру руху охолоджуючого повітря. Але обґрунтування щодо необхідності використання рівняння Нав'є Стокса в роботі немає. Слід зазначити, що турбулентний режим руху повітря виникає за умов перевищення критичного числа Рейнольдса, коли інерційні сили переважають над силами в'язкості і виникає хаотичний рух повітря із утворенням вихорів. Такої оцінки умов турбулентності в роботі не проведено. З іншого боку, для розглянутого двигуна навіть при швидкості обертання 6000 об/хв з урахуванням малого діаметра (дані в табл. 4.1) лінійна швидкість повітря відносно охолоджуваної поверхні буде дорівнювати лише біля 12 м/с. З достатньою достовірністю можна вважати, що з урахування округлої форми машини характер руху охолоджуючого повітря скоріше за все буде ламінарним, а розв'язок рівняння аеродинаміки для турбулентного руху повітря є зайвим.

5. З дисертації не в повній мірі зрозуміло, яким чином розраховувалися втрати в постійних магнітах від вихрових струмів. Якщо постійні магніти моделювалися як електропровідне середовище з заданою електропровідністю, то слід зазначити, що виробники постійних магнітів надають лише певний діапазон значень електропровідності магнітів, який суттєво залежить від використаної технології їх виготовлення (спечені, спресовані, вкраплені), хімічного складу тощо. Недостатня визначність величини електропровідності магнітів впливає на адекватність розрахунку їх нагріву. Тому краще говорити не про фіксовану розрахункову температуру, а про можливий вірогідний діапазон її значень.

6. І як загальна оцінка: кінцевою метою дослідження мають бути висновки щодо техніко-економічної доцільності застосування масивного ярма статора замість шихтованого в безпазових магнітоелектричних тихохідних двигунах. Але представлені в дисертації результати є лише проміжними і не дають чіткої відповіді на поставлену проблему. Застосування масивного ярма має як позитивні, так і негативні наслідки, а можливість його застосування суттєво залежить від заданого режиму роботи двигуна. В умовах одиничного або малосерійного виробництва таких двигунів виготовлення ярма статора шихтованим може залишатися прийнятним і тому у цілому питання залишається дискусійним.

7. У тексті дисертації зустрічаються редакційні та термінологічні неточності, однакові фрагменти змісту, наприклад, рівняння (3.2) і (3.5) ідентичні тощо.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Ісаєва Євгена Вікторовича «Втрати в безпазових магнітоелектричних машинах» є завершеною науковою працею, у якій отримано нові наукові результати щодо визначення втрат у безпазових магнітоелектричних машинах, їх впливу на обертовий момент та тепловий стан основних елементів конструкції.

Робота характеризується актуальністю теми, науковою новизною отриманих результатів, достатнім рівнем їх обґрунтованості та достовірності, практичною значущістю, а також підтвердженням особистим внеском здобувача.

За своїм змістом, науковим рівнем, завершеністю та характером отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам, що встановлюються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Вважаю, що Ісаєв Євген Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

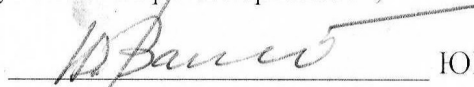
Офіційний опонент:

Професор кафедри електромеханіки

Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",

доктор технічних наук, професор



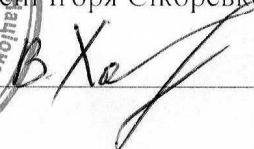
ЮРІЙ ВАСЬКОВСЬКИЙ

Підпис Юрія Васьковського засвідчую:

Вчений секретар

Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",



ВАЛЕРІЯ ХОЛЯВКО