

## ВІДГУК

офіційного опонента

старшого наукового співробітника, д.т.н. Гребенікова В. В.  
на дисертаційну роботу Макарчука Олександра Володимировича  
на тему «Методи та засади створення високошвидкісних безконтактних  
електричних машин з постійними магнітами», що подана  
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.09.01 – електричні машини і апарати

### Актуальність обраної теми

Енергозбереження, економія природних ресурсів та екологічна безпека — одні з основних проблем людства, що безпосередньо пов'язані з промисловим виробництвом, а їх вирішення лежить у площині техніки та технологій.

Наприклад, промислові підприємства, як правило, являються джерелами тепла. Використання цього тепла ускладнено внаслідок його низького температурного потенціалу. Роботи з утилізації низькопотенціальної теплової енергії проводяться практично в усіх розвинутих країнах світу й, безперечно, сприймаються як актуальна науково-технічна задача. Високошвидкісні електричні машини, в свою чергу, це невід'ємний елемент енергоустановок середньої та малої потужності, для розв'язання вищезгаданих задач.

Створення електричних машин традиційної конструкції загальнопромислового призначення досягло високого рівня досконалості, методи їх аналізу пройшли довгий шлях розвитку, розроблена теорія і методи проектування. Натомість, для створення високошвидкісних машин не існує єдиного підходу, теорія і методи проектування практично не розроблені. Фізичні процеси в них набагато складніші, мають низку особливостей, а тому застосування до них загальної теорії електричних машин не гарантує достовірності результатів розрахунку. Потребують свого розвитку і вдосконалення методи їх як електромагнітного, так і механічного та теплового розрахунків. Як свідчать літературні джерела, в Україні питання розроблення методів розрахунку та вирішення технологічних проблем, що супроводжують виготовлення високошвидкісних електричних машин знаходяться в початковій стадії розвитку.

У зв'язку з цим проблема розроблення основ теорії та методів дослідження процесів у високошвидкісних електричних машинах має

важливе практичне значення. Отже розроблення ефективних методів їх аналізу як у перехідних, так і в усталених режимах є актуальною задачею сучасної електромеханіки.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень і достовірність результатів**

Наукові положення, висновки за результатами досліджень та рекомендації щодо застосування отриманих результатів теоретично обґрунтовані автором й експериментально підтверджені. Поставлені в дисертації завдання вирішувалися із застосуванням фундаментальних засад класичної електродинаміки, теорії пружності та теорії теплопередачі. Теоретичні дослідження процесів перетворення енергії здійснювалися з використанням математичного апарату лінійної алгебри, диференційного та інтегрального числення. Чисельне розв'язання задач магнітостатики, електродинаміки, теорії пружності й теорії теплопередачі проводилося з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) за допомогою спеціалізованого програмного пакету скінченно-елементного аналізу. Достовірність отриманих результатів підтверджена перевіркою запропонованих методів розрахунку, шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Вперше розроблено комплекс алгоритмів, практичних рекомендацій та програмного забезпечення, призначений для створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів (ВБПМ). Виконано наукове обґрунтування його структури та наповнення.

2. Розроблено та оптимізовано за швидкодією алгоритм математичної моделі розрахунку електромеханічних перехідних процесів у електромеханотронній системі, що складається з ВБПМ, сполученої з навантаженням інерційного характеру, напівпровідникового інвертора напруги та давача положення ротора (ДПР). Математичне формулювання даної моделі побудовано за квазістаціонарного наближення магнітного поля, що дало змогу врахувати всі найважливіші чинники, які впливають на перебіг процесів у такій системі, в їх взаємозв'язку, а саме: реальну форму поперечного перерізу та насичення магнітопроводу, нелінійність вольт-амперних характеристик напівпровідникових елементів силових кіл

інвертора; дійсний гармонічний склад магніторушійної сили якірної обмотки; реактивний момент, спричинений зубчатою формою магнітопроводу.

4. Вперше запропоновано метод розрахунку додаткових втрат у полюсній системі ротора ВБПМ на підставі аналітичного розв'язку рівняння Гельмгольца для провідного напівпростору в 2-вимірній постановці.

5. Розроблено математичне формулювання та алгоритм математичної моделі для розрахунку додаткових втрат у пазовій частині обмотки статора. Модель побудована на підставі опису електромагнітного поля у 2-вимірному формулюванні, враховує вплив потоку пазового розсіювання, основного магнітного потоку та насичення магнітопроводу, у взаємозв'язку цих чинників.

6. Отримано й обґрунтовано функціональні залежності головних розмірів ВБПМ від частоти обертання з огляду на допустимі механічні напруження в роторі.

7. На підставі аналізу результатів розрахунку поля температур у 3-вимірному формулюванні, запропоновано аналітичні методи теплового розрахунку ВБПМ з системами охолодження IC15 та IC47, що ґрунтуються на використанні теплових заступних схем.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Основними практичними результатами дисертаційної роботи є:

1. Можливість проведення параметричної та структурної оптимізації конструкції створюваної ВБПМ, оперативного аналізу її характеристик, попередньої оцінки теплового стану.

2. Можливість проведення розрахунків:

- електромеханічних перехідних процесів у вищезгаданій електромеханотронній системі ВБПМ – ДПР – комутатор;
- втрат в пазовій частині обмотки статора;
- додаткових втрат у полюсах індуктора;
- поля механічних напружень в роторі, навантаженому відцентровими силами;
- критичних частот обертання ротора;
- поля температур у ВБПМ з системами повітряного охолодження типу IC0145, IC015 та рідинного охолодження — ICW47, ICW97,

на порівняно вищому рівні адекватності.

Отримані у дисертаційній роботі результати можуть успішно використовуватися в науково-дослідних та дослідно-конструкторських установах, які займаються проектуванням електричних машин зі збудженням від постійних магнітів.

### Структура та зміст дисертації

В цілому дисертація є завершеним науковим дослідженням, побудована за класичною схемою та складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг становить 395 сторінок, а обсяг основного тексту 285 сторінок. Робота містить 135 ілюстрацій, 34 таблиці, список використаних джерел із 331 найменування та 5 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і напрямки дослідження. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність, показано взаємозв'язок розв'язуваних завдань з науковими програмами. Надано відомості про публікації та апробацію роботи.

У першому розділі на основі аналізу наукових публікацій за темою дисертації досліджено існуючі методи створення високошвидкісних безконтактних машин з постійними магнітами. Виконано детальний аналіз джерел втрат у високошвидкісному електродвигуні і показано істотна відмінність цих втрат від загальнопромислових двигунів.

Виявлено низку питань теоретичного і прикладного плану, що вимагають вирішення. Використовуючи результати такого аналізу сформульовано наукові та технічні проблеми, які супроводжують процес створення ВБПМ та окреслено можливі шляхи їх розв'язання.

Другий розділ повністю присвячено особливостям застосування МСЕ до розв'язання прикладних задач математичної фізики.

Автор акцентує увагу на постановках типових задач теорій електромагнетизму, пружності, теплопередачі та їх алгоритмізації. Коротко характеризує теоретичні засади МСЕ, вводить поняття функцій форми та описує переваги застосування локальної системи координат (СК). Вирази функції форми для 2-та 3-вимірних випадків виведені аналітично у цій СК. Математично строго доведено, зв'язок частинних похідних функції форми у глобальній та локальній СК. Різновиди класичних крайових умов розглядаються з прив'язкою до конкретних прикладних задач.

У третьому розділі показано особливості електромагнітного перетворення енергії у ВБПМ.

Запропоновано підхід для отримання початкових значень розмірів та обмоткових даних, які вирізнятимуть конкретну ВБПМ серед множини можливих варіантів. Цей етап логічно завершується виконанням перевіркового аналізу — розрахунком характеристик (статичних чи динамічних), що свідчать про відповідність проекту вимогам ТЗ. Стверджується, що зв'язок між головними розмірами та електромагнітними навантаженнями, який враховує формула Арнольда, у високошвидкісних машинах не може вважатися самодостатнім.

Специфіка перебігу електромагнітних процесів у ВБПМ, наприклад, вплив способу керування безконтактною машиною, особливості утворення втрат та ін. чинники потребують внесення суттєвого коректування в методики розв'язання таких задач. Висновок про ефективність процесу перетворення енергії у ВБПМ можна зробити лише після адекватного розрахунку та систематизації усіх видів втрат, що і робить автор у цьому розділі.

Розробляється оригінальна математична модель для розрахунку додаткових втрат в обмотці статора, ефективні провідники якої складаються з великої кількості елементарних. Модель враховує спосіб сполучення ефективних та елементарних провідників й насичення магнітопроводу. Задача формулюється у 2-вимірній постановці в термінах векторного магнітного потенціалу.

Для врахування додаткових втрат у магнітопроводі ВБПМ, до яких віднесено лише поверхневі та пульсаційні втрати у полюсах індуктора, пропонується аналітична методика, яка побудована на розв'язку рівняння Гельмгольца для провідного напівпростору.

Наявність дискретної системи керування та зворотного зв'язку за положенням ротора примушує приділяти особливу увагу динамічній поведінці ВБПМ. Для перевірки та уточнення проектних показників з урахуванням чинників, які здійснюють визначальний вплив на перебіг процесів у ВБПМ у їх взаємозв'язку, автором пропонується відповідна математичну модель електромеханотронної системи, яка, крім трифазної ВБПМ, містить напівпровідниковий комутатор, ДПР та блок навантаження (в режимі генератора) або блок живлення (в режимі двигуна).

Четвертий розділ присвячений механічним процесам, що супроводжують роботу ВБПМ.

З огляду на окреслені у першому розділі потенційні проблеми розробки конструкції ВБПМ, автор встановив залежності максимально можливих діаметрів роторів цих машин від частоти обертання, зважаючи на допустимі значення механічних напружень у них. Для роторів з ПМ різних типів виконано дослідження впливу віддалі між опорами на величину критичної частоти обертання. Вироблено рекомендації щодо початкового вибору головних розмірів ВБПМ.

Адекватність математичних моделей для розрахунку поля механічних напружень в роторах довільних розмірів обидвох типів, що розглядаються в роботі, перевірялася шляхом порівняння з результатами аналітичного розрахунку механічних напружень у суцільному циліндрі, що навантажений відцентровими силами. Ці задачі формулюються у 3-вимірній постановці.

Особлива увага приділяється автором проблемам вибору, експлуатації та розрахунку високошвидкісних підшипникових опор. Запропоновано створювати попередній осьовий натяг у підшипниках кочення для запобігання проковзування між тілами обертання й кільцями, збільшення осьової жорсткості підшипників та підвищення точності переміщення вала. Розроблена конструкція підшипникового вузла, що забезпечуватиме таку вимогу.

Дослідження викладені у п'ятому розділі стосуються опрацювання трьох систем охолодження, двох повітряних і однієї рідинної, що на думку автора мають переваги над іншими й можуть застосовуватися для ефективного охолодження ВБПМ.

Запропоновано, за розрахунку теплових процесів, обмотку та шихтоване осердя якоря розглядати як гомогенні тіла, що за своєю формою повторюють реальні. Дійсні значення коефіцієнтів теплопровідності замінено еквівалентними. Наведено спосіб їх отримання. Така заміна дає змогу істотно зменшити розмірність задачі розрахунку температурного поля практично без втрати точності.

Формулювання крайових умов, пов'язаних з процесом тепломасопереносу, здійснено з використанням апарату теорії подібності.

У шостому розділі проводиться оцінка адекватності математичних моделей розроблених на основі МСЕ та методики первинного проектування

ВБПМ на підставі порівняння результатів, отриманих розрахунковими та експериментальними методами.

Частина результатів фізичних експериментів отримана автором під час проведення лабораторних випробувань двох дослідних зрізів ВБПМ, що розроблялися їм особисто. Також експериментальний матеріал запозичувався з низки публікацій у періодичних наукових виданнях.

На підставі аналізу даних, отриманих розрахунковими та експериментальними способами, стверджується:

*«...методи аналізу проектних рішень в цілому забезпечують необхідний рівень точності у розв'язанні задач, пов'язаних зі створенням ВБПМ, визначенням її параметрів та розрахунком характеристик...».*

...

*«...математичні моделі, що застосовують FEM-аналіз, зокрема моделі для розрахунків додаткових втрат в обмотці статора, динамічних електромеханічних процесів у ВБПМ, температурного поля машини, є адекватними...».*

Ці тези підтверджуються кількісними оцінками показників шістьох дослідних зрізів ВБПМ в діапазоні потужностей від 2 до 110 кВт та частот обертання від 24000 до 220000 об/хв.

### **Повнота викладу основних матеріалів дисертації в опублікованих працях**

Робота пройшла обширну апробацію та обговорення на 13 міжнародних і національних наукових конференціях, симпозіумах та семінарах. Основні наукові положення достатньо повно викладено у 30 наукових працях, серед яких 1 монографія, 17 статей в наукових фахових виданнях України, де можуть публікуватися результати дисертаційних досліджень (з них 10 написано одноосібно, 3 у виданнях, що індексуються у Scopus), 9 у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 4 у виданнях, що індексуються у Scopus); 1 в матеріалах і тезах доповідей міжнародних конференцій, 1 патент України на винахід та 1 на корисну модель.

### **Зауваження по роботі**

1. Досить докладно викладено розділ 2.1.1. *Функції форми*, який слід було б перенести в Додаток, так як цей розділ не має відношення до спеціальності «електричні машини».

2. Прийнято занадто багато спрощуючих припущень в розділі 3.1.2 при математичному формулюванні завдання розрахунку зовнішніх характеристик, наприклад, використано  $d-q$  перетворення координат, втрати в сталі відсутні, зубчаста структура осердя статора замінена гладкою.

3. В розділі 3.3.2 стверджується, що «одним з основних понять в теорії є залежність повних потокочеплень електричних контурів і електромагнітного моменту від струмів і кута повороту ротора», проте ні для одного з досліджуваних електродвигунів ці характеристики наведені не були.

4. На моментні характеристики електродвигунів з постійними магнітами істотно впливає конфігурація постійних магнітів і їх розташування в роторі (тангенціальна або радіальна намагніченість, внутрішнє або зовнішнє розташування), проте в роботі ці фактори не досліджені.

5. В роботі розроблено математичні моделі для розрахунку явної магнітно-механічної характеристики та магнітно-механічних параметрів у двовимірній польовій постановці, проте не була поставлена і реалізована оптимізаційна задача, наприклад, у такій постановці: обмеження – габарити або маса високошвидкісного електродвигуна; варійовані параметри – геометрія магнітної системи; цільова функція – мінімальна вартість двигуна, або максимальний електромагнітний момент

6. Суттєво посилило б позитивне враження від роботи результати розрахунку і картини поля вектора магнітної індукції не тільки однієї електричної машини, а й інших, результати дослідження яких наведені в розділі 6.

7. В дисертаційній роботі не наведено інформації про час розрахунку характеристик досліджуваних двигунів методом кінцевих елементів.

8. У тексті дисертаційної роботи застосовуються аббревіатури, які нечасто використовуються в технічній літературі, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу. Деякі малюнки, наприклад, 1.4, 3.11, 3.13, 3.18, 4.15, 4.21, 5.8, 5.9, 5.10 слід було б зробити кольоровими, оскільки дані малюнки в відтінках сірого погано сприймаються.

Проте зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Макарчука О. В.



### Висновок

Дисертаційна робота Макарчука Олександра Володимировича є завершеною науковою працею в якій міститься розв'язок важливої наукової проблеми з формування та розвитку теоретичних основ системного дослідження високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів, що дозволяє виявляти нові закономірності у процесі перетворення енергії, знаходити нові варіанти конструкційних виконань та технічних рішень спрямованих на підвищення енергоефективності та надійності приводів на їх основі.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, мірою обґрунтованості наукових положень, достовірністю, новизною, теоретичною та практичною цінністю одержаних результатів повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій, зокрема, вимогам п.п. 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р., № 567 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р., № 656), а її автор Макарчук Олександр Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати.

### **Офіційний опонент**

старший науковий співробітник,  
доктор технічних наук,  
провідний науковий співробітник  
відділу електромеханічних систем,  
Інституту електродинаміки НАН України



Гребеніков В. В.

Гребенікова В. В.  
Підписав засвідчую  
Начальник  
Відділу кадрів Кривеняк С. В.

16.05.17р.

