

67-42-61/2  
23.05.17р.

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Макарчука Олександра Володимировича  
«Методи та засади створення високошвидкісних безконтактних  
електричних машин з постійними магнітами», подану на здобуття  
наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.09.01 – електричні машини і апарати

### Актуальність теми дисертації

Огляд вітчизняної та зарубіжної літератури за останні 10-15 років, опублікована інформація про низку патентів, презентації відповідних іміджевих проектів відомих світових фірм свідчать про постійну зацікавленість у розробці технічних систем, що в своєму складі містять високошвидкісні електричні машини. Ось неповний перелік таких систем, у яких використання високошвидкісних електричних машин, на мою думку, є технічно перспективним, особливо привабливим з економічного погляду та містить інноваційний потенціал:

- газотурбінні когенераційні електростанції;
- системи утилізації низькопотенціальної теплової енергії;
- системи накопичення та буферизації електроенергії;
- промислові системи аерації та водопідготовки;
- системи охолодження, кондиціонування й вентиляції;
- приводи холодильних агрегатів;
- ефективні відцентрові компресори і т.п.

Серед усіх різновидів високошвидкісних електричних машин особливе місце займають машини зі збудженням від постійних магнітів, завдячуючи своїм конструкційним та експлуатаційним перевагам.

Розробка методів розрахунку та розв'язання технологічних завдань, що супроводжують виготовлення високошвидкісних безконтактних машин зі збудженням від постійних магнітів (ВБПМ), з урахуванням новітніх вимог щодо енергоощадності та надійності, є актуальною проблемою сучасної електромеханіки.

Для розв'язання більшості задач, розглянутих у дисертації, автор використовує систему комп'ютерного аналізу, що ґрунтується на застосуванні

методу скінченних елементів (МСЕ). Це дало змогу проводити теоретичні дослідження взаємозв'язаних електромагнітних, механічних і теплових процесів, що мають місце в конструкційних елементах ВБПМ, на принципово вищому рівні відповідності.

Комплексне врахування на основі строгого математичного підходу практично всіх чинників, що впливають на процеси у ВБПМ, на рівні деталізації, що відповідає сучасному розвитку електромеханіки, також визначає актуальність даної роботи.

### **Ступінь обґрунтованості й достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій**

Адекватність розробленого в роботі методу створення високошвидкісних безконтактних машин зі збудженням від постійних магнітів забезпечено використанням фундаментальних положень класичної електродинаміки, теорії пружності та теорії теплопередачі, застосуванням сучасного програмного забезпечення, комплексним характером досліджень, узгодженістю отриманих результатів із результатами опублікованими іншими авторами, обговоренням висунутих наукових положень та висновків на багатьох міжнародних і національних наукових конференціях, симпозіумах та семінарах, натурними експериментами. Результати експериментальних досліджень не суперечать фізиці явищ, що відбуваються в ВБПМ, а їх кількісний аналіз підтверджує правомірність висунутих теоретичних положень.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

У дисертаційній роботі вперше вирішено важливу науково-прикладну проблему з розроблення комплексу алгоритмів, практичних рекомендацій та програмного забезпечення, призначеного для створення ВБПМ. Виконано наукове обґрунтування його структури та наповнення.

У роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Розроблено алгоритми розрахунку явної магнітно-механічної характеристики (ММХ) ВБПМ як залежності повних поточкозчеплень електричних контурів статора й електромагнітного моменту від струмів у цих контурах і кута повороту ротора, та магнітно-механічних параметрів ВБПМ як повної похідної явної ММХ, за квазістаціонарного наближення магнітного поля

машини у двовимірній постановці, на підставі теорії інваріантного наближення функцій.

2. Розроблено математичне формулювання та алгоритм математичної моделі для розрахунку електромеханічних перехідних процесів у електромеханотронній системі, що складається з ВБПМ, сполученої з навантаженням інерційного характеру, напівпровідникового інвертора напруги та давача положення ротора. Створений алгоритм однаково придатний для розрахунку режимів як двигуна, так і генератора та враховує всі найважливіші чинники, що 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.

3. Розроблено математичне формулювання та алгоритм розрахунку статичної зовнішньої характеристики високошвидкісного безконтактного генератора зі збудженням від постійних магнітів, що враховує насичення магнітопроводу, вищі просторові гармоніки магнітного поля в повітряному проміжку та вплив реакції якоря, у взаємозв'язку цих чинників.

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. Науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору головних розмірів ВБПМ з огляду на допустимі механічні напруження в роторі та з урахуванням значення 1-ої критичної частоти обертання.

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 та наукове значення роботи**

На основі отриманих теоретичних результатів та розроблених методів створено програмне забезпечення, що дає змогу здійснювати інтерактивний вибір властивостей активних матеріалів, конструкції та типу обмотки статора, конструкцій ротора та підшипникових опор, систем змащування та охолодження, а також проведення проектних розрахунків розмірів, обмоткових даних, статичних робочих характеристик та попередню оцінку теплового стану машини. Це дозволяє проводити параметричну та структурну оптимізацію конструкції для оперативного аналізу характеристик створюваної ВБПМ.

Практичну цінність створеного програмно-конструкторського комплексу підтверджують результати його використання за виконання низки госпдоговірних, науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт на замовлення підприємств, зокрема ТзОВ СП «Електронтранс» (м. Львів), КБ «Квант» (м. Київ), Львівського науково-дослідного радіотехнічного інституту (м. Львів), ВАТ «Електромаш» (м. Херсон), ВАТ "Західенерго" (м. Львів), ООО «Эрга» (м. Калуга, Росія).

### **Повнота викладення результатів у опублікованих матеріалах**

За основними результатами роботи опубліковано 30 наукових праць, серед яких 1 розділ у колективній монографії, 17 статей в наукових фахових виданнях України, 9 в періодичних фахових виданнях інших держав; 1 в матеріалах і тезах доповідей міжнародних конференцій, 2 патенти України на винаходи та корисні моделі.

Матеріали дисертації пройшли достатню апробацію, вони доповідалися автором на наукових семінарах та конференціях. Автореферат вірно і достатньо повно відображає основний зміст дисертації. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності до вимог МОН України. Виклад матеріалу дисертації супроводжується всіма необхідними посиланнями в тексті роботи на першоджерела та запозичення з праць інших дослідників.

### **Структура та зміст дисертації**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, показано зв'язок із науковими програмами,

планами, темами, висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд фахових видань, дотичних до проблем створення високошвидкісних електричних машин та безконтактних машин зі збудженням від постійних магнітів. Обґрунтовано прийняття характерних технічних рішень.

Аналіз публікацій здійснювався автором за чотирма напрямками: проблематика проектування ВБПМ; втрати потужності та способи їх зменшення; механічна міцність та жорсткість конструкції ротора; способи охолодження та оцінка теплового стану.

У **другому розділі** розкриті особливості застосування методу скінченних елементів для розрахунку полів різної фізичної природи. Теоретичні засади цього методу розглядаються в двох формулюваннях — варіаційному та на основі методу Галеркіна. Варіаційний підхід використано для розв'язання задач теорії пружності. Для задач теорій електромагнетизму та теплопередачі застосовано метод Галеркіна. Для наближення залежної змінної вводиться поняття функції форми. Показані переваги використання перетворення координат.

У **третьому розділі** розглядаються особливості процедури проектного синтезу ВБПМ, яка завершується розрахунком статичних характеристик. Особлива увага приділена визначенню втрат потужності різних видів та алгоритмізації процесів розрахунку статичних характеристик. Завершується розділ розглядом математичної моделі для розрахунку перехідних процесів у ВБПМ як елементі електромеханотронної системи, яка, крім електромеханічного перетворювача енергії, містить напівпровідниковий комутатор, що синхронізується за положенням ротора.

У **четвертому розділі** розкриті проблеми механіки обертових частин ВБПМ. На підставі аналітичних та чисельних досліджень отримано загальні рекомендації щодо вибору допустимого діаметру ротора та віддалі між підшипниковими опорами, які забезпечують міцність та жорсткість конструкції. Особливу увагу приділено класифікації вимог до підшипникових опор, вибору їх типу, конструкції підшипникових вузлів, методам їх змащування та експлуатаційним вимогам.

Розглядаються конструкції роторів ВБПМ двох типів — суцільні та складені. Звертається увага на види бандажування складених роторів та особливості його виготовлення.

У **п'ятому розділі** описані дослідження спрямовані на створення методів аналізу, придатних для оцінювання теплового стану ВБПМ. Вони передбачають розробку математичних моделей для розрахунку температурного поля машини у 3-вимірній постановці, аналіз отриманого розподілу теплових потоків та синтез на його основі теплових заступних схем.

В роботі розглянуто три системи охолодження: система двоконтурного повітряного охолодження IC0145 (0146,0147); система аксіального повітряного охолодження IC15 (16,17); система рідинного охолодження ICW37 (97).

У **шостому розділі** здійснена комплексна перевірка адекватності розроблених математичних моделей на основі МСЕ та методики проектування ВБПМ шляхом порівняння результатів, отриманих розрахунковими та експериментальними шляхами. Результати фізичних експериментів відібрані під час проведення випробувань двох дослідних взірців ВБПМ, що розроблялися автором, а також запозичені з низки публікацій у періодичних наукових виданнях. Дослідні взірці високошвидкісного генератора номінальною потужністю 97 кВт, розрахованого на частоту обертання 24000 об/хв, який входить до складу турбодетандерного автономного енергоагрегату, а також двигун/генератора потужністю 10 кВт за частоти обертання 70000 об/хв, що використовується в складі гібридного турбокомпресора системи турбонаддуву серійних дизельних двигунів марки ЯМЗ 7511, на яких проводилися експериментальні дослідження, створювалися за проектами автора.

У **висновках** сформульовано основні наукові результати. На всі використані літературні джерела, у кількості 331 найменування, є посилання у тексті.

Дисертація має завершену логічну структуру, яка відповідає меті та поставленим і розв'язаним у роботі задачам. Мова та стиль викладення матеріалу є доступним для сприйняття. Вживання наукової термінології коректне. Робота виконана на високому теоретичному рівні, а її обсяг відповідає змістовному наповненню.

Автореферат відображає суть основних наукових положень, практичну значущість та висновки.

Тематика дисертації та отримані результати відповідають паспорту спеціальності 05.09.01 – електричні машини і апарати.

**Наукові положення та результати, які виносилися на захист кандидатської дисертації «Математичне моделювання електромеханічних перехідних процесів у явнополосних електричних машинах» (1996 рік) за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати, не використовуються у поданій докторській дисертації.**

### **Зауваження до роботи**

1. Не зрозуміло, чому у другому розділі дисертаційної роботи для розв'язання задач теорії пружності формулювання МСЕ здійснено у варіаційній постановці, а для розв'язання задач теорії електромагнетизму та теплопередачі застосовано метод Галеркіна. Адже відомо, що МСЕ у варіаційному формулюванні успішно використовується для вирішення задач електромагнетизму та теплопередачі в електромеханічних перетворювачах.

2. У п. 3.2.1 йдеться, зокрема, про додаткові втрати в обмотці статора ВБПМ й до основних чинників, що впливають на величину цих втрат, віднесено насичення зубцевої зони статора полем індуктора у взаємозв'язку з процесом пазового розсіювання. Розділення ефективного провідника обмотки на елементарні пропонується як єдиний шлях до зменшення цих втрат. Пропоновані автором підходи до кількісного вирішення цього питання не враховують наявність так званих циркуляційних струмів, вплив яких може виявитися визначальним за розгляду явища витіснення струму в обмотці статора ВБПМ.

3. У п. 3.1.2, 3.1.3 автор пропонує два різних підходи до розрахунку статичних характеристик ВБПМ — для зовнішньої характеристики генератора один, а для механічної двигуна інший. Впевнений, що варто об'єднати ці підходи в один метод або адаптувати одну з використаних моделей й зробити її універсальною, такою що підходить для розрахунку статичних характеристик як генераторів зі збудженням від ПМ так і відповідних двигунів.

4. Моделі для розрахунку поля механічних напружень, що пропонуються у розділі 4 й використовуються для визначення максимально допустимих діаметрів роторів, не враховують попередній натяг у сполученні деталей, з яких складається ротор. Наприклад: полюсів з валом, бандажного кільця з полюсами, тощо. Ймовірно, що врахування даної особливості конструкції роторів складеного типу змінить, на якісному рівні, розподіл еквівалентних механічних напружень та на кількісному — наведені автором рекомендації щодо вибору допустимих діаметрів роторів.

5. Нажаль, автор в роботі не аналізує випарні системи охолодження. На мою думку є всі підстави вважати їх кандидатами на застосування у високонапружених в тепловому відношенні машинах.

Зазначені зауваження мають, в основному, рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не зменшують її актуальності, наукової та практичної цінності.

#### **Загальний висновок щодо роботи**

Вважаю, що дисертаційна робота О.В. Макаруча «Методи та засади створення високошвидкісних безконтактних електричних машин з постійними магнітами», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати, є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані та практично важливі результати у вирішенні науково-прикладної проблеми — формування теоретичної бази, практичних рекомендацій та програмного забезпечення, призначених для створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів, що робить можливим розв’язання широкого кола задач, зокрема: дає змогу провести попереднє оцінювання відповідності отриманих показників машини вимогам технічного завдання; виконати підготовку вхідної інформації для подальшого використання у польових математичних моделях, чим істотно скоротити час багатоваріантних, можливо, оптимізаційних розрахунків; виконати уточнення проектних показників за допомогою адекватних математичних моделей з урахуванням чинників, які здійснюють визначальний вплив на перебіг процесів у ВБПМ у їх



взаємозв'язку; верифікувати результати ще на етапі прийняття проектних рішень.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п 9, 10, 12 положення про «Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо докторських дисертацій, а її автор, Макарчук Олександр Володимирович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Офіційний опонент,  
професор кафедри електричних машин  
Одеського Національного політехнічного  
університету, д.т.н., професор



В.В. Римша

*Підпис докт. техн. наук, професора Римши В.В. засвідчую:*

Секретар Вченої ради ОНПУ

В.І. Шевчук