

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Львівська політехніка»

**МАКАРЧУК Олександр Володимирович**

УДК 621.313.84

**МЕТОДИ І ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ  
ВИСОКОШВИДКІСНИХ БЕЗКОНТАКТНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

05.09.01 — електричні машини і апарати

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Щур Ігор Зенонович**,  
професор кафедри електроприводу та  
комп'ютеризованих електромеханічних систем  
Національного університету «Львівська політехніка»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Гребеніков Віктор Володимирович**,  
провідний науковий співробітник відділу  
електромеханічних систем  
Інституту електродинаміки НАН України

доктор технічних наук, професор  
**Римша Віталій Вікторович**,  
професор кафедри електричних машин  
Одеського Національного політехнічного університету

доктор технічних наук, професор  
**Ставинський Андрій Андрійович**,  
завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки Миколаївського Національного  
аграрного університету

Захист відбудеться « 02 » червня 2017 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів–13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « 27 » квітня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент



Коруд В. І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Вступ.** Енергозбереження та економія природних ресурсів, що безпосередньо пов'язані з екологічною безпекою, — основний виклик перед нашою технократичною цивілізацією.

Робота сучасних промислових підприємств, машин та механізмів, як правило, супроводжується викидом значної кількості тепла. Використання його ускладнено внаслідок низького температурного потенціалу. Роботи з утилізації низькопотенціальної теплової енергії проводяться практично в усіх розвинутих країнах світу й, безперечно, сприймаються як актуальна науково-технічна задача.

Розробка енергетичних установок малої потужності (кілька сотень кіловат) для використання низькопотенціального тепла, наприклад, на основі когенерації, потребує застосування високошвидкісних електрогенераторів (частота обертання 30 – 250 тис. об/хв) як типового технічного рішення. Газотурбінні когенераційні станції для малої енергетики на базі високошвидкісних турбогенераторів мають переваги, за низкою показників, над великими електростанціями, перш за все, за рахунок швидкості введення в експлуатацію та зменшення необхідного об'єму інвестицій. Також вони повністю відповідають сучасній концепції про необхідність децентралізації електропостачання.

Іншим прикладом промислового застосування високошвидкісних електричних машин (ЕМ) є турбодетандер-електрогенераторні агрегати (турбодетандери) на базі струминно-реактивних або вихрових турбін — пристрої, призначені для отримання електричної енергії шляхом утилізації енергії стисненого газу або пари, що в даний час безповоротно втрачається у регуляторах і редукторах тиску.

Використання високошвидкісних ЕМ не обмежується лише задачами генерування електроенергії. Установка, яка має безпосереднє відношення до проблем енергоефективності, — система буферизації та накопичення енергії (англ. *Flywheel Storage System*), що містить високошвидкісний двигун/генератор, маховик та систему керування. Пристрій для підвищення потужності з одночасним зменшенням витрати палива двигунів внутрішнього згоряння за рахунок збагачення паливної суміші стисненим повітрям — автомобільний турбокомпресор (англ. *Automotive Turbocharger*), який містить між привідною турбіною та турбіною компресора високошвидкісний двигун/генератор, забезпечуючи повний контроль над процесом турбонаддуву. Приводи сучасних високопродуктивних верстатів з числовим програмним керуванням, призначені для високошвидкісної обробки різанням (англ. *High Speed Cutting* – HSC – прогресивна технологія металообробки).

Про постійне зацікавлення дослідженнями високошвидкісних електричних машин свідчать регулярні огляди тенденцій розвитку даного напрямку у світовій науковій періодиці, що акцентують увагу на перевагах застосування високошвидкісних ЕМ зі збудженням від постійних магнітів (ВБПМ).

**Актуальність тематики.** Виробництво ВБПМ може розглядатися як самостійний напрям електромашинобудування. Широке коло технічних задач, розв'язання яких потребує застосування ВБПМ, диктує підвищені вимоги до їх показників та характеристик. Намагання забезпечити ці вимоги виявляє всю багатомірність проблеми та охоплює задачі удосконалення методик проектування,

розробку й впровадження новітніх конструкційних рішень, технологічних процесів та ін.

Аналіз проблематики показав, що даний напрям електромеханіки не використовує єдиний комплексний методичний підхід до створення ВБПМ. Розробки таких машин проводяться, як правило, за технічними вимогами окремих споживачів, що не узгоджені між собою, питання уніфікації не розглядаються в принципі. Як результат — розробка методів розрахунку та розв'язання технологічних завдань, що супроводжують виготовлення ВБПМ, з урахуванням переходу на якісно новий рівень енергоощадності та надійності, є актуальною проблемою сучасної електромеханіки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися у Національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності». Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були використані в процесі виконання держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт, під керівництвом або за безпосередньої участі автора:

- науково-дослідна робота «Створення математичних моделей та автоматизованої системи дослідження вентильних двигунів постійного струму: реактивних та зі збудженням від постійних магнітів», (з 01.01.2008 по 31.12.2009, № держреєстрації 0107U005256);
- науково-дослідна робота «Електромеханотронна система перетворення енергії для безредукторних вітроустановок з вертикальною віссю обертання», (з 01.01.2010 по 31.12.2010, № держреєстрації 0109U001155);
- науково-дослідна робота «Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії» (з 01.01.2011 по 31.12.2012, № держреєстрації 0111U001212);
- науково-дослідна робота «Гібридні автономні вітроенергоустановки, що генерують теплову та електричну енергії» (з 01.01.2013 по 31.12.2014, № держреєстрації 0113U001358);
- госпдоговір №0210/165/11 від 28.11.2007 з НВО «Эрга» (Росія) «Расчет электрогенератора для газовой турбины мощностью 350 Вт»;
- госпдоговір №0280 від 02.03.2009 з НВО «Эрга» (Росія) «Расчет и физическое моделирование генератора ГТК-100»;
- госпдоговір №0280 від 02.03.2009, доп. угода від 28.01.2010 з НВО «Эрга» (Росія) «Расчет обратимой электрической машины для турбокомпрессора ТКР-10»;
- госпдоговір №041 від 24.04.2014 з СП «Електронтранс» (Україна) «Розробка електричного двигуна для прямого привода низькопідлогового трамвая».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка нових і розвиток існуючих методів створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів та обґрунтування теоретичних й методологічних засад побудови математичних моделей процесів у цих машинах.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- здійснити аналіз конструкційних виконань магнітопроводів статора та ротора з ПМ для електричних машин з підвищеною частотою обертання;
- розробити методи розрахунку статичних характеристик ВБПМ, які враховуватимуть основні чинники, що у своєму взаємозв'язку впливають на техніко-економічні показники таких машин;
- виконати аналіз розподілу втрат потужності у ВБПМ, удосконалити існуючі методи їх розрахунку та розробити нові;
- виконати аналіз проблем методології та принципів побудови математичних моделей процесів, притаманних ЕМ, на основі методу скінченних елементів (МСЕ);
- розробити нові математичні моделі для розрахунку електромагнітних, механічних та теплових процесів у ВБПМ;
- дослідити механічні міцність та жорсткість роторів ВБПМ для забезпечення їх працездатності в запропонованих у дисертації конструкційних виконаннях;
- здійснити аналіз типів підшипникових опор, систем змащування для напрацювання рекомендацій щодо застосування їх у ВБПМ;
- теоретично обґрунтувати зв'язок головних розмірів ВБПМ з максимально допустимими механічними напруженнями в роторі та вібраційною надійністю машини;
- провести аналіз систем та способів охолодження ЕМ для напрацювання рекомендацій щодо їх вибору та застосування у ВБПМ;
- розробити та удосконалити аналітичні методи розрахунку стаціонарних теплових процесів у ВБПМ;
- експериментально перевірити запропоновані методи розрахунку ВБПМ.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітні, механічні та теплові процеси у високошвидкісних безконтактних електричних машинах зі збудженням від постійних магнітів.

**Предмет дослідження** – методи, математичні моделі й алгоритми розрахунку, призначені для створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів, а також вплив будови та технологічних особливостей виготовлення на основні показники таких машин.

**Методи дослідження.** Основні теоретичні положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних засадах класичної електродинаміки, теорії пружності та теорії теплопередачі.

Теоретичні дослідження процесів перетворення енергії здійснювалися з використанням аналітичних та чисельних методів. Аналітичні методи базувалися на математичному апараті лінійної алгебри, диференційному та інтегральному численні, теорії інваріантного наближення функцій. Чисельне розв'язання задач магнітостатики, електродинаміки, теорії пружності і теорії теплопередачі здійснювалося з використанням МСЕ. Чисельне інтегрування систем алгебро-диференційних рівнянь (САДР) за часом виконувалося неявним методом Ейлера. Розв'язання нелінійних систем алгебричних рівнянь (САР) проводилося методом

Ньютона, лінійні САР високих порядків розв'язувалися релаксаційним методом або методом LDL-факторизації.

Для прийняття низки технічних рішень застосовувалася структурна та параметрична оптимізація, а також евристичний аналіз.

Для аналітичного розв'язування задач електротехніки, електромеханіки, гідрогазодинаміки і теплопередачі використовувався багатofункційний математичний пакет MathCAD, для потреб геометричного моделювання — AutoCAD. Чисельне розв'язування задач електродинаміки, розрахунок напружено-деформованого стану роторів та розрахунок температурних полів проводився з використанням пакету скінченно-елементного аналізу Ansys Multiphysics та мови програмування APDL (англ. *Ansys Parametric Design Language*).

Результати теоретичних досліджень підтверджувалися відповідними експериментальними перевірками.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

У дисертаційній роботі вперше вирішено важливу науково-технічну проблему з розробки теоретичних засад та методологічних основ створення ВБПМ як системи з розподіленими параметрами, що, у порівнянні з відомими підходами, підвищує адекватність результатів проектного синтезу таких машин й позбавляє від необхідності виготовлення дороговартісних фізичних макетів та проведення їх експериментальних випробувань.

У результаті вирішення цієї проблеми одержано такі нові наукові результати:

1. Отримано й обґрунтовано функціональні залежності головних розмірів ВБПМ від частоти обертання з огляду на допустимі механічні напруження в роторі та з урахуванням значення 1-ої критичної частоти обертання, що гарантують механічну міцність та жорсткість машини.

2. Вперше запропоновано метод розрахунку додаткових втрат у полюсній системі ротора ВБПМ на підставі розв'язку рівняння Гельмгольца для провідного напівпростору в двовимірній постановці, що дозволяє оцінити енергоефективність ВБПМ вже на початкових етапах проектно-конструкторських робіт.

3. Запропоновано метод та алгоритм розрахунку додаткових втрат у пазовій частині обмотки статора на підставі опису електромагнітного поля в двовимірному формулюванні, що дає змогу врахувати вплив потоку пазового розсіювання, основного магнітного потоку та насичення магнітопроводу в їх взаємозв'язку.

4. Отримано аналітичні вирази для розрахунку еквівалентних коефіцієнтів теплопровідності анізотропних у тепловому відношенні тіл, зокрема для обмотки й осердя статора ВБПМ, з використанням яких розроблено методи теплового розрахунку ВБПМ, що відповідають системам охолодження IC15 та IC37 та дають можливість оцінити правильність вибору основних електромагнітних навантажень машини та ефективності обраного способу її охолодження.

5. Отримали подальший розвиток методи розв'язання фундаментальних для нелінійної теорії електричних машин задач розрахунку явної магнітно-механічної характеристики та магнітно-механічних параметрів у двовимірній польовій постановці, й на основі отриманих розв'язків удосконалено математичні моделі для розрахунку перехідних процесів і статичних характеристик з урахуванням особливостей конструкції ВБПМ, що дає змогу врахувати насичення

магнітопроводу, вищі просторові гармоніки магнітного поля в повітряному проміжку та вплив реакції якоря у взаємозв'язку цих чинників.

6. Удосконалено математичну модель для розрахунку електромеханічних перехідних процесів у електромеханотронній системі, що складається з ВБПМ, напівпровідникового комутатора та давача положення ротора, й дає змогу врахувати взаємозв'язок дійсної форми поперечного перерізу магнітопроводу, його насичення, двовимірного просторового розподілу векторного магнітного потенціалу, нелінійності вольт-амперних характеристик напівпровідникових елементів силових кіл.

**Практичне значення результатів** полягає в наступному:

Здійснено програмну реалізацію системи аналізу проектних рішень створення ВБПМ, яка передбачає інтерактивний вибір властивостей активних матеріалів, конструкції та типу обмотки статора, конструкцій ротора та підшипникових опор, систем змащування та охолодження, а також проведення розрахунків розмірів, обмоткових даних, статичних робочих характеристик та попередню оцінку теплового стану машини.

Розроблено прикладне програмне забезпечення для оперативного аналізу показників створюваної ВБПМ й проведення параметричної та структурної оптимізації її конструкції.

Здійснено програмну реалізацію математичних моделей, призначених для розрахунку:

- електромеханічних перехідних процесів у електромеханотронній системі, що складається з ВБПМ, напівпровідникового комутатора та давача положення ротора;
- повних втрат в пазовій частині обмотки статора;
- додаткових втрат в полюсній системі ротора;
- поля механічних напружень в роторі, навантаженому відцентровими силами;
- критичних частот обертання ротора;
- поля температур у ВБПМ з системами повітряного охолодження типу IC0145 (0146, 0147), IC15 (16, 17) та рідинного охолодження — ICW37 (97) або ICU37 (97).

Запропоновано спосіб опису вольт-амперних характеристик напівпровідникових елементів силового комутатора, який може використовуватися для моделювання процесів у електронних схемах, що містять напівпровідникові ключі на основі біполярних, MOSFET, IGBT транзисторів або тиристорів.

З використанням розроблених методів та створених математичних моделей запропоновано та захищено патентами України нові типи пристроїв на базі безконтактних електричних машин зі збудженням від ПМ.

Створене математичне та методичне забезпечення відповідає сучасному світовому рівню розвитку електромеханіки й може впроваджуватися як ефективний дидактичний інструмент для підготовки студентів-електромеханіків.

Окреслено напрями подальшого розвитку теорії ВБПМ: розробка підходів до оцінювання ефективності застосування магнітного екранування ротора з метою зниження поверхневих втрат і температури полюсної системи, використання нових

матеріалів та удосконалення конструкції ротора з метою зниження його маси, впровадження методів обчислювальної гідрогазодинаміки для створення довершених алгоритмів розв'язання задач тепломасопереносу в ВБПМ.

Розроблені рекомендації та прикладне програмне забезпечення використані за виконання ряду госпдоговірних й держбюджетних тем та впроваджені у розробках ТзОВ СП «Електронтранс» (м. Львів), КБ «Квант» (м. Київ), Львівського науково-дослідного радіотехнічного інституту (м. Львів), ВАТ «Електромаш» (м. Херсон), ВАТ "Західенерго" (м. Львів), НВО «Эрга» (м. Калуга, Росія), а також у навчальному процесі для підготовки спеціалістів та магістрів електромеханіки з дисциплін «Основи моделювання електромеханотронних перетворювачів», «Програмні засоби моделювання електричних машин та апаратів». Матеріали дисертації покладено в основу дисципліни «FEM-аналіз в задачах електромеханіки» для підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії.

**Особистий внесок автора.** Теоретичні положення, технічні рішення, розрахунки та інші результати, які представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [8,9] – постановка задачі, розрахунок магнітного поля, аналіз отриманих результатів; [15,21,22] – програмна реалізація алгоритмів, розрахунок магнітного поля, аналіз результатів; [1] – розділ 10 «Математична модель вентильного двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів»; [19,26] – математичне формулювання задач, розробка алгоритмів та програмна реалізація математичних моделей; [23,27,28] – ідея способу перевірки рівня адекватності, розробка методик розрахунку, програмна реалізація; [20,24,25] – постановка задач, їх математичне формулювання та програмна реалізація; [2,5,22] – аналіз існуючих методів дослідження, програмна реалізація, проведення математичних експериментів; [4] – програмна реалізація, аналіз результатів; [13] – концептуальні пропозиції та інформаційне забезпечення для проведення класифікації стратегій керування; [29,30] – обґрунтування прийнятих рішень, аналіз конструкційних виконань, розробка математичних моделей та їх програмна реалізація.

**Апробація роботи.** Основні результати наукових досліджень та конструкторських розробок доповідалися, обговорювалися та отримали схвальні відгуки на міжнародних і національних наукових конференціях, симпозіумах та семінарах, серед яких: X-а та XI-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизированного электропривода. Теория и практика», м. Алушта, 2002, 2003 р.; IV-а та VI-а Міжнародна наукова конференція «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці», м. Львів, 2003, 2009 р.; IV-а Міжнародна науково-технічна конференція «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», м. Кременчук, 2006 р.; Україно-Польській семінар «Проблеми альтернативної енергетики», м. Львів, 2010 р.; XXI, XXIV, XXV Seminarium Techniczne «Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych» PEMINE, Ryto, (Польща), 2012, 2015, 2016 р.; XXII, XXIII, XXV Sympozjum Srodowiskowe PTZE «Zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce», Sandomierz, 2012, Mikolajki, 2013, Warszawa, 2015, (Польща); семінар НАН України «Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем», м. Львів, 2015 р.



**Публікації результатів роботи.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 30 наукових працях (10 без співавторів), серед яких 1 монографія, 17 статей в наукових фахових виданнях України (з них 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.

**Структура й об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, 6-ти розділів, висновків до роботи, списку використаної літератури, переліку використаних позначень та додатків. Повний обсяг становить 395 стор. Робота містить: 135 ілюстрацій, 34 таблиці, список використаних джерел із 331 найменування. Обсяг основного тексту становить 285 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблематики, що розглядається у дисертації та викладено її загальну характеристику.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд фахових видань, дотичних до проблем створення високошвидкісних електричних машин та безконтактних машин зі збудженням від постійних магнітів. Обґрунтовано специфічні проектні рішення, що не мають за собою чіткого теоретичного підґрунтя, а приймаються на підставі попереднього досвіду, технічної чи технологічної доцільності, економічної кон'юнктури та ін.

Аналіз публікацій здійснювався за чотирма напрямками: проблеми та особливості визначення основних показників номінального режиму; втрати потужності та способи їх зменшення; механічна міцність та жорсткість конструкції ротора; способи охолодження та оцінка теплового стану ВБПМ.

Розгляд такої, на перший погляд, тривіальної задачі електромеханіки як розрахунок механічної характеристики вентильного двигуна, стосовно ВБПМ, показав неправомірність застосування теорії двох реакцій, а натомість виявив очевидні переваги формулювання даної задачі у фазних координатах. Для високошвидкісних генераторів зі збудженням від ПМ, навпаки, розрахунок статичної зовнішньої характеристики доцільно проводити з використанням перетворення Парка та концепції диференційних параметрів.

З'ясовано, що дискретна 6-тактова комутація (комутаційна зона  $120^\circ$  ел.) зі зворотним зв'язком за положенням ротора є найбільш прийнятним способом керування ВБПМ.

Виявлено принципові відмінності в перерозподілі втрат енергії, притаманних ВБПМ, у порівнянні з безконтактними машинами з ПМ, розрахованими на роботу з частотою обертання до 3000 об/хв. Це дозволило з'ясувати наступне: додаткові втрати в обмотці статора ВБПМ, як правило, перевищують основні; аналітичні методи розрахунку додаткових втрат (поверхневих та пульсаційних) в полюсній системі ВБПМ ґрунтуються на порівняно грубих допущеннях або не відображають фізичної природи явища й по суті є емпіричними.

Обґрунтовано необхідність перерахунку нормованих величин питомих втрат в осерді статора для довільних значень частоти перемагнічування, магнітної індукції та товщини листа осердя й обирається метод розрахунку додаткових втрат в обмотці статора. Виявлені основні чинники, що впливають на величину додаткових втрат в обмотці, а саме: розмір провідника, форма паза, насичення магнітопроводу та інтенсивність поля збудження.

Розглянено причини виникнення коливань роторів та фактори, що впливають на критичні частоти обертання. Показана необхідність у адекватних розрахунках напружено-деформованого стану роторів ВБПМ різних конструкцій та їх власних частот поперечних коливань.

На основі аналізу показника швидкохідності підшипникових опор провідних виробників, виявлено границю області застосування підшипників кочення. Здійснено порівняльний аналіз підшипників різних типів, наведені рекомендації щодо їх вибору.

Серед основних систем та способів охолодження ЕМ обрано такі, що потенційно здатні забезпечити ефективний відбір тепла від ВБПМ. Знайдено методологічний підхід до оцінки теплового стану ВБПМ на початковому етапі проектування — теплові заступні схеми, структура яких генерується на підставі аналізу результатів розрахунку стаціонарного поля температури у 3-вимірному формулюванні. Крайові умови цих задач вирішено формувати на основі теорії подібності. Окреслено шляхи подолання проблем розрахункового характеру, властивих чисельним методам розв'язання крайових задач теорії стаціонарної теплопередачі.

Завершується розділ формулюванням проблем створення ВБПМ та пошуком ймовірних шляхів їх розв'язання.

**Другий розділ** присвячено особливостям 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 так званої природної (англ. *Natural*) системи координат (СК).

Вирази функції форми для 2-та 3-вимірних випадків виведені аналітично у природній СК, що визначає положення точки всередині скінченного елемента (СЕ) за допомогою безрозмірного параметра, абсолютна величина якого не перевищує одиницю (рис. 1). Так, для 3-вимірного 8-вузлового СЕ функція форми зображеться як вектор

$$\begin{aligned} \vec{N} &= \|N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4 \quad N_5 \quad N_6 \quad N_7 \quad N_8\| = \\ &= \frac{1}{8} \| (1-s)(1-t)(1-r) \quad (1+s)(1-t)(1-r) \quad (1+s)(1+t)(1-r) \quad (1-s)(1+t)(1-r) \\ &\quad (1-s)(1-t)(1+r) \quad (1+s)(1-t)(1+r) \quad (1+s)(1+t)(1+r) \quad (1-s)(1+t)(1+r) \|, \quad (1) \end{aligned}$$

де  $s, t, r$  — координати довільної точки у природному базисі  $(s, t, r)$ .

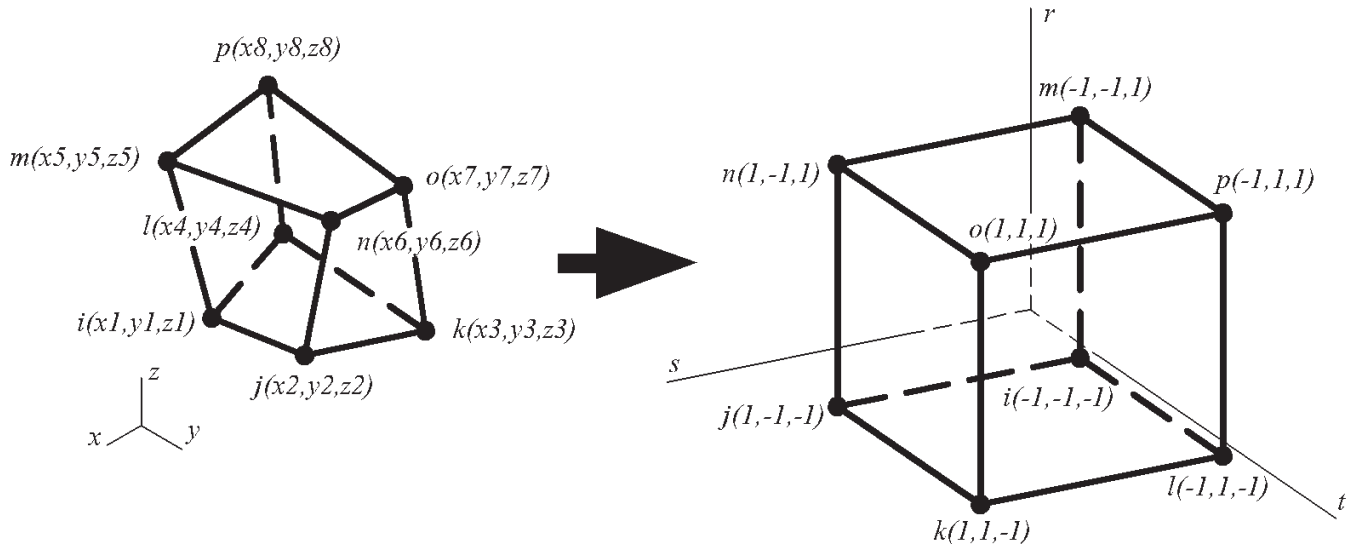


Рис. 1. Координати вузлів 3-вимірного СЕ у глобальній та природній СК

Матриця з частинними похідними функції форми за координатами  $s, t, r$  теж отримана аналітично у вигляді

$$\mathbf{N}^{<s,t,r>} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial s} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial s} \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial t} \\ \frac{\partial N_1}{\partial r} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial r} \end{pmatrix} = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1+t+r-tr & 1-t-r+tr & -1-t+r+tr \\ -1+s+r-rs & -1-s+r+rs & 1+s-r-rs \\ -1+t+s-st & -1+t-s+st & -1-t-s-st \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} -1+t+r-tr & -1+t-r+tr & 1-t+r-tr & 1+t+r+tr & -1-t-r-tr \\ -1+s+r-rs & -1+s-r-rs & -1-s-r-rs & 1+s+r+rs & 1-s+r-rs \\ -1+t+s-st & 1-t-s+st & 1-t+s-st & 1+t+s+st & 1+t-s-st \end{pmatrix} \quad (2)$$

Доведено, що частинні похідні функції форми у глобальному та природному базисах пов'язані виразом

$$\mathbf{N}^{<x,y,z>} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \mathbf{N}^{<s,t,r>}, \quad (3)$$

де

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{N}^{<x,y,z>} = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_8}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (5)$$

– матриця Якобі та матриця розміру (3x8) з частинними похідними функції форми у базисі  $(x, y, z)$ , відповідно.

Отже, частинні похідні довільної функції  $\xi$  у глобальному базисі  $(x, y, z)$ , які задовольняють вимогу про міжелементну неперервність, знаходяться як

$$\left\| \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad \frac{\partial \xi}{\partial z} \right\|_* = \mathbf{N}^{<x,y,z>} \bar{\xi}, \quad (6)$$

де  $\bar{\xi}$  – вектор дискрет цієї довільної функції на множині вузлів одного СЕ.

Можливе аналітичне знаходження об'ємного інтегралу, в межах одного СЕ, за виразом

$$\int_{V^{[e]}} \xi[x, y, z] dx dy dz = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \xi[s, t, r] |\mathbf{J}| ds dt dr, \quad (7)$$

де  $|\mathbf{J}| = \det \mathbf{J}$ .

Запропонований математичний апарат є спільним для всіх типів польових задач та використовується в подальшому викладі за розробки відповідних алгоритмів.

### Задачі електромагнетизму

Визначальне рівняння електродинаміки, отримане на підставі системи рівнянь Максвела, матеріальних рівнянь та калібрування Кулона, формулюється в термінах векторного магнітного потенціалу  $\bar{A}$ . В інваріантних позначеннях це рівняння має вигляд

$$\nabla \times (\mathbf{k} \nabla \times \bar{A}) - \nabla (\mathbf{k} \nabla \cdot \bar{A}) + \sigma \nabla U + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \bar{v} \times \sigma \nabla \times \bar{A} = 0, \quad (8)$$

де  $\nabla$  – диференційний оператор Гамільтона;  $U$  – скалярний електричний потенціал зовнішнього поля;  $\bar{v}$  – вектор швидкості руху;  $\mathbf{k}$ ,  $\sigma$  – відповідно обернена матриця магнітної проникності та матриця питомої електричної провідності середовища.

Саме (8) разом з крайовою умовою складає зміст математичного формулювання задачі розрахунку нестационарного магнітного поля з урахуванням навантажень електромагнітного та механічного походження.

Для лінійного середовища, ізотропного в електричному відношенні, у випадку 2-вимірної постановки задачі та у декартовій прямокутній СК (8) перетворюється на

$$-\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \left( \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) + \sigma \left( v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial A_z}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial t} \right) = J_{sz}. \quad (9)$$

Для задачі магнітостатики (9) суттєво спрощується до вигляду

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_{sz}, \quad (10)$$

де  $\mu = \mu_0 \mu_r$  – абсолютна магнітна проникність середовища;  $J_{sz}$  – проекція вектора густини струму стороннього джерела.

Алгоритм МСЕ продемонстровано на прикладі розв'язання (10). Дискретизація розрахункової області  $S$  скінченними елементами та застосування методу Галеркіна породжують рівняння

$$\sum_{e=1}^E \int_{S^{[e]}} N \left( \frac{\partial^2 \tilde{A}_z^{[e]}[x, y]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{A}_z^{[e]}[x, y]}{\partial y^2} + \mu J_{sz}^{[e]} \right) dS = 0, \quad (11)$$

де  $\tilde{A}_z^{[e]}$  – інтерпольоване (наближене) значення проекції  $A_z$  для СЕ з поточним номером  $e$  ( $e = \overline{1, E}$ ).

Вимога про неперервність інтерполянти  $\tilde{A}_z$ , та застосування формули Стокса перетворюють (11) у матричне рівняння

$$\sum_{e=1}^E \left( -\mathbf{K}_1^{[e]} \tilde{A}_z^{[e]} + \vec{K}_2^{[e]} + \vec{K}_3^{[e]} \right) = 0, \quad (12)$$

де  $\mathbf{K}_1^{[e]} = \int_{S^{[e]}} \left[ \frac{\partial \vec{N}^*}{\partial x} \cdot \frac{\partial \vec{N}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{N}^*}{\partial y} \cdot \frac{\partial \vec{N}}{\partial y} \right] dx dy$  – характеристична матриця СЕ, зумовлена

його магнітною провідністю;  $\vec{K}_2^{[e]} = - \int_{S^{[e]}} \vec{N}^* \mu \vec{N} dx dy \cdot \vec{J}_{sz}^{[e]}$  – вектор правих частин, що

відповідає заданому розподілу густини струму;  $\vec{K}_3^{[e]} = \oint_{L^{[e]}} \vec{N}^* \left( \frac{\tilde{A}_z^{[e]}}{\partial x} n_x^{[e]} - \frac{\partial \tilde{A}_z^{[e]}}{\partial y} n_y^{[e]} \right) dL$  – міжелементний вектор, зумовлений крайовою умовою Неймана або Коші.

Враховуючи (3), (6), (7), матриця  $\mathbf{K}_I^{[e]}$  визначатиметься як

$$\mathbf{K}_1^{[e]} = \int_{S^{[e]}} \mathbf{N}_*^{<x,y>} \mathbf{N}^{<x,y>} dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{N}_*^{<x,y>} \mathbf{N}^{<x,y>} |\mathbf{J}| ds dt. \quad (13)$$

Стовпець правих частин —

$$\vec{K}_2^{[e]} = -\mu \int_{S^{[e]}} \vec{N}^* \vec{N} dx dy \cdot \vec{J}_{sz}^{[e]} = \mu \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \vec{N}[s,t]^* \vec{N}[s,t] |\mathbf{J}| ds dt \cdot \vec{J}_{sz}^{[e]}. \quad (14)$$

Міжелементний вектор, який задає паралельність або перпендикулярність вектора магнітної індукції на границі області, можна розділити на дві частини, в залежності від того має даний елемент зовнішню границю чи ні. Застосування інтерполяційної формули до вектора  $\vec{K}_3^{[e]}$ , з урахуванням його приналежності до зовнішньої границі, дає

$$\vec{K}_3^{[e]} = \mathbf{K}_{31}^{[e]} \tilde{A}_z^{[e]}, \quad \text{де} \quad \mathbf{K}_{31}^{[e]} = \oint_{L^{[e]}} \vec{N}^* \vec{N} dL. \quad (15)$$

Отримані в такий спосіб характеристичні матриці  $\mathbf{K}_1^{[e]}$ ,  $\mathbf{K}_{31}^{[e]}$  та вектор  $\vec{K}_2^{[e]}$  об'єднані в повні матрицю коефіцієнтів та вектор правих частин. Для цього, формально, елементні матриці розміру  $4 \times 4$  розширені до розмірів повної матриці  $P \times P$ , де  $P$  – загальна кількість вузлів у розрахунковій області. Описано алгоритм виконання такої операції.

Після сумування всіх розширених матриць та стовпців

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^E \left( \mathbf{K}_{1p}^{[e]} + \mathbf{K}_{31p}^{[e]} \right); \quad \vec{Q} = \sum_{e=1}^E \left( \vec{K}_{2p}^{[e]} \right) \quad (16)$$

отримано повну лінійну САР

$$\mathbf{K} \vec{A}_z = \vec{Q} \quad (17)$$

де  $\vec{A}_z$  – вектор проєкцій векторного магнітного потенціалу.

На цьому етапі у систему (17) вводиться крайова умова. Розв'язавши отриману таким способом САР, порядок якої становить  $P-G$ , де  $G$  – кількість вузлів із заданими значеннями  $A_z$ , отримано шукане поле векторного магнітного потенціалу.

Після цього визначаються вузлові значення проєкцій магнітної індукції та напруженості магнітного поля. Для  $i$ -го вузла елемента з номером  $e$  це

$$\begin{pmatrix} B_{xi}^{[e]} \\ B_{yi}^{[e]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{N}[s_i, t_i]^{[e] \langle x, y \rangle} \vec{A}_z^{[e]}, \quad \begin{pmatrix} H_{xi}^{[e]} \\ H_{yi}^{[e]} \end{pmatrix} = \frac{1}{\mu_0} \begin{pmatrix} 1/\mu_{rx} & 0 \\ 0 & 1/\mu_{ry} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{xi}^{[e]} \\ B_{yi}^{[e]} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

### Задачі механіки

Математичне формулювання задачі розрахунку полів зміщень та механічних напружень у пружних конструкціях довільної форми побудовано на підставі варіаційного принципу мінімуму потенціальної енергії. В даному випадку цей принцип формулюється так: *серед усіх можливих зміщень конструкції ті, що задовольнятимуть умовам рівноваги, забезпечуватимуть стаціонарне значення потенціальної енергії.*

Прийнято, що потенціальна енергія конструкції  $\Pi_K$  складається з енергії деформації конструкції  $U$  та потенціальної енергії зовнішніх сил  $W$ . Для забезпечення рівноваги повна потенціальна енергія повинна приймати стаціонарне значення. Іншими словами — варіація енергії деформації повинна дорівнювати варіації потенціальної енергії зовнішнього навантаження

$$d(\Pi_K) = d(U + W), \quad \text{або} \quad d(U) = d(W). \quad (19)$$

Після дискретизації розрахункової області сукупністю СЕ та за умови наявності зовнішніх зосереджених сил, які діють безпосередньо на вузли СЕ, потенціальна енергія всієї розрахункової області дорівнюватиме сумі енергій окремих СЕ:

$$\Pi_K = \frac{1}{2} \vec{\delta}_* \left( \sum_{e=1}^E \mathbf{K}^{[e]} \right) \vec{\delta} - \vec{\delta}_* \left( \sum_{e=1}^E \vec{F}^{[e]} - \vec{F}_N \right) + \frac{1}{2} \left( \sum_{e=1}^E \int_{V^{[e]}} \vec{\varepsilon}_{n*}^{[e]} \mathbf{D} \vec{\varepsilon}_n^{[e]} dV \right), \quad (20)$$

де  $\mathbf{K}^{[e]} = \int_{V^{[e]}} \mathbf{B}_*^{[e]} \mathbf{D} \mathbf{B}^{[e]} dV$  – матриця жорсткості елемента з номером  $e$ ;  $\mathbf{B}^{[e]}$  –

матриця деформацій елемента;  $\mathbf{D}$  – матриця пружності;

$\vec{F}^{[e]} = \vec{F}_Q^{[e]} + \vec{F}_P^{[e]} + \vec{F}_{\varepsilon_n}^{[e]} - \vec{F}_{\sigma_n}^{[e]}$  – вектор навантажень, що складається з інерційних

сил  $\vec{F}_Q^{[e]}$  (викликають прискорення тіла), сил гідростатичного тиску  $\vec{F}_P^{[e]}$  та сил, що

відповідають початковим залишковим деформаціям  $\vec{F}_{\varepsilon_n}^{[e]}$  та напруженням  $\vec{F}_{\sigma_n}^{[e]}$ .

Сумування у (20) передбачає розширення елементних матриць до розмірів глобальної.

Повна потенціальна енергія, у випадку використання лінійного пружного матеріалу, не лише стаціонарна, а й мінімальна. Тобто за варіаційного формулювання МСЕ знаходимо мінімум  $\Pi_K$  серед множини можливих зміщень. Мінімізація повної потенціальної енергії передбачає знаходження похідної виду

$$\frac{\partial \Pi_K}{\partial \vec{\delta}} = \left\| \frac{\partial \Pi_K}{\partial \vec{\delta}^{[1]}} \quad \frac{\partial \Pi_K}{\partial \vec{\delta}^{[2]}} \quad \dots \quad \frac{\partial \Pi_K}{\partial \vec{\delta}^{[E]}} \right\|_* = 0, \quad (21)$$

яка, в загальному вигляді, зводиться до виразу

$$\mathbf{K} \vec{\delta} = \vec{F}, \quad (22)$$

де  $\mathbf{K} = \sum_{e=1}^E \mathbf{K}^{[e]}$  – глобальна матриця жорсткості системи;  $\vec{F}$  – глобальний вектор

вузлових навантажень.

Після отримання розв'язку у вигляді вузлових зміщень напруження в межах елемента визначаємо як

$$\vec{\sigma}^{[e]} = \mathbf{D} \mathbf{B}^{[e]} \vec{\delta}^{[e]} - \mathbf{D} \vec{\varepsilon}_n^{[e]} + \vec{\sigma}_n^{[e]}. \quad (23)$$

Для оцінювання рівня навантаження конструкційного елемента, що одночасно знаходиться під дією механічних напружень різного виду — розтяг, зсув, згин і т.п., використовуємо поняття еквівалентного напруження за Мізесом  $\sigma_e$ . У декартовій СК еквівалентне напруження визначаємо як

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]}, \quad (24)$$

де  $\sigma_i, \tau_{ij}$  – нормальні та тангенціальні складові вектора напруження, відповідно.

### Задачі теплопередачі

Задача стаціонарної теплопередачі формулюється на підставі рівняння теплопровідності Фур'є у 3-вимірній декартовій СК

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + p_v = 0, \quad (25)$$

разом з крайовою умовою Діріхле та/або Коші на границі розрахункової області

$$T_L = \xi(x, y, z); \quad \lambda \frac{\partial T_L}{\partial \bar{n}} + \alpha(T_L - T_0) + \zeta(x, y, z) = 0, \quad (26)$$

де  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – сталі коефіцієнти теплопровідності середовища в напрямках осей СК;  $p_v$  – інтенсивність внутрішнього тепловиділення на одиницю об'єму;  $\bar{n}$  – нормаль до границі області розрахунку;  $\xi(x, y, z), \zeta(x, y, z)$  – довільні функції положення точки.

Рівняння (25), подібне за структурою до (10), за виключенням розмірності базису, а тому особливості застосування методу Галеркіна та дискретизація розрахункової області 3-вимірними СЕ виконується аналогічно до вже описаної.

Всі етапи алгоритмів, що описані у другому розділі дисертації, розглянуті на порівняно простих числових прикладах застосування FEM-аналізу (англ. *Finite Element Method*) для розрахунку магнітного поля, поля зміщень та поля температури й наведені у додатках до неї.

У **третьому розділі** розглядаються особливості процедури проектного синтезу ВБПМ, яка завершується розрахунком статичних характеристик. Особлива увага приділяється визначенню втрат потужності різних видів та алгоритмізації процесів розрахунку статичних характеристик — робочих, зовнішньої генераторів та механічної двигунів. Завершується розділ розглядом математичної моделі для розрахунку перехідних процесів у ВБПМ як елементі електромеханотронної системи, яка, крім електромеханічного перетворювача енергії, містить напівпровідниковий комутатор, що в режимах інвертора напруги або випрямляча синхронізується за положенням ротора.

Наголошується, що зв'язок між головними розмірами та електромагнітними навантаженнями, який враховує формула Арнольда, у високошвидкісних машинах не може вважатися самодостатнім.

Запропоновано для зменшення додаткових втрат в обмотці радіальний розмір  $h_p$  елементарного провідника узгоджувати з глибиною проникнення поля у мідь  $\delta_{Cu}$ . За відомої частоти  $f_n$  струму в статорі  $h_p = (0,6 \div 0,8) \delta_{Cu}$ , де

$$\delta_{Cu} = \sqrt{\frac{\rho_{Cu}}{\pi \cdot f_n \cdot \mu_0}}, \text{ а } \rho_{Cu} \text{ — питомий опір матеріалу провідників.}$$

До традиційного переліку можливих форм пазів на статорі — напівзакритий трапецієподібний (грушоподібний), відкритий прямокутний, додано ще одну — напівзакритий прямокутний, що передбачає використання хвильових двошарових обмоток, стрижньових за своєю конструкцією.

Величина робочого повітряного проміжку визначається з умови запобігання незворотного розмагнічування полюсів ротора струмом перевантаження.

Параметри машини — активний опір фази, власна та взаємна індуктивності розсіювання фази та магнітна провідність розсіювання полюса індуктора розраховуються традиційними способами, притаманними теорії кіл.

Характеристики намагнічування елементів магнітопроводу пропонується визначати за методиками, відомими з теорії проектування електричних машин загальнопромислового призначення й отримувати у вигляді таблично заданих функцій.

Підготовлена таким способом інформація про розміри, обмоткові дані та властивості активних матеріалів ВБПМ слугує вхідними даними для розрахунку характеристик машини.

Зовнішня характеристика генератора як залежність фазної напруги від струму навантаження формалізована нелінійною САР й передбачає розв'язання з використанням комп'ютера. Задіяно  $d, q$  перетворення координат, що дозволяє позбутися залежності фазних поточкозчеплень статора від кута повороту ротора. Задача формулюється для діючих значень фазних напруг та струмів, а рівняння електричної рівноваги не містять похідних по часу. В основу математичного



формулювання цієї задачі покладено традиційні для теорії кіл допущення про розділ магнітного поля на робоче поле та поля розсіювання статора і ротора, заміну зубчастої структури осердя статора гладкою, відсутність втрат у сталі та ін.

Математичне формулювання задачі містить рівняння електричної рівноваги для зведених взаємоортогональних електричних контурів статора

$$-\omega\psi_q + R_p I_d + U_d = 0; \quad \omega\psi_d + R_p I_q + U_q = 0, \quad (27)$$

де  $\omega$  – колова частота струму в обмотці статора;  $R_p$  – активний опір фази статора;  $U_d, U_q$  – амплітуди проекцій фазної напруги на осі рухомої СК  $d, q$ ;  $I_d, I_q$  – амплітуди проекцій фазного струму.

Перехід від діючих значень напруги  $U_p$  та струму  $I_p$  до амплітуд  $d, q$ -проекцій здійснено за виразами

$$U_d = -\sqrt{2}U_p \sin \Theta; \quad U_q = -\sqrt{2}U_p \cos \Theta; \quad I_d = -\sqrt{2}I_p \sin \alpha; \quad I_q = -\sqrt{2}I_p \cos \alpha, \quad (28)$$

де  $\Theta$  – кут вибігу;  $\alpha$  – кут між струмом та віссю  $-q$ .

Зв'язок між цими кутами та кутом навантаження  $\varphi$

$$\alpha = \varphi + \Theta. \quad (29)$$

Для отримання виразів проекцій потокощеплень, на повітряний проміжок накладено одновимірну сітку, що складається з  $N$  вузлів. Для кожного вузла шукається значення індукції у робочому проміжку  $B_{\delta 1}, \dots, B_{\delta N}$ . Проекції повного потокощеплення контурів статора за осями  $d, q$  знайдено як

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_{\sigma a} I_d + C_{\psi} (B_{\delta 1} \cos \eta_1 + \dots + B_{\delta N} \cos \eta_N); \\ \psi_q &= L_{\sigma a} I_q + C_{\psi} (B_{\delta 1} \sin \eta_1 + \dots + B_{\delta N} \sin \eta_N), \end{aligned} \quad (30)$$

де  $C_{\psi} = \frac{4l_{\delta} \tau k_w l w_p}{\pi N}$  – розрахунковий коефіцієнт;  $\eta_1, \dots, \eta_N$  – кутові координати вузлів розрахункової сітки.

Рівняння за законом повного струму:

$$\begin{aligned} -C_H I_d \cos \eta_1 - C_H I_q \sin \eta_1 + 2F_m + 2F_{z1} + 2F_{\delta 1} + F_j + F_a &= 0; \\ \vdots & \\ -C_H I_d \cos \eta_N - C_H I_q \sin \eta_N + 2F_m + 2F_{zN} + 2F_{\delta N} + F_j + F_a &= 0, \end{aligned} \quad (31)$$

де  $C_H = \frac{3w_p k_w l}{\pi \cdot p}$  – розрахунковий коефіцієнт;  $F_{\delta n} = \frac{k_{\delta}}{\mu_0} \delta_n B_{\delta n}$  – магнітна напруга повітряного проміжку в околі вузла з поточним номером  $n$ ;  $F_{z1}, \dots, F_{zN}$  – магнітні напруги зубців в околі відповідних вузлів розрахункової сітки;  $F_m, F_j, F_a$  – магнітні напруги полюса, ярем ротора та статора, відповідно.

Для врахування потоків розсіювання між полюсами індуктора використано рівняння

$$\Phi_m - \Phi_{\delta} + \lambda_{\sigma f} (2F_m + F_j) = 0, \quad (32)$$

де  $\Phi_m$  – магнітний потік полюса;  $\lambda_{\sigma f}$  – магнітна провідність розсіювання полюса.

Потік через робочий проміжок визначено так

$$\Phi_{\delta} = C_{\Phi}(B_{\delta 1} + \dots + B_{\delta N}), \quad (33)$$

де  $C_{\Phi} = \frac{l_{\delta}\tau}{N}$  – розрахунковий коефіцієнт.

Характеристики намагнічування ділянок магнітопроводу, а саме полюса ротора, ярма ротора, ярма статора та зубцевого шару разом з проміжком, відповідно

$$\begin{aligned} F_m &= F_m(\Phi_m); & F_{z1} &= F_z(B_{\delta 1}); \\ F_j &= F_j(\Phi_m); & \vdots & \\ F_a &= F_a(\Phi_{\delta}); & F_{zN} &= F_z(B_{\delta N}). \end{aligned} \quad (34)$$

Такому наближенню магнітного кола ВБПМ відповідає заступна схема на рис. 2.

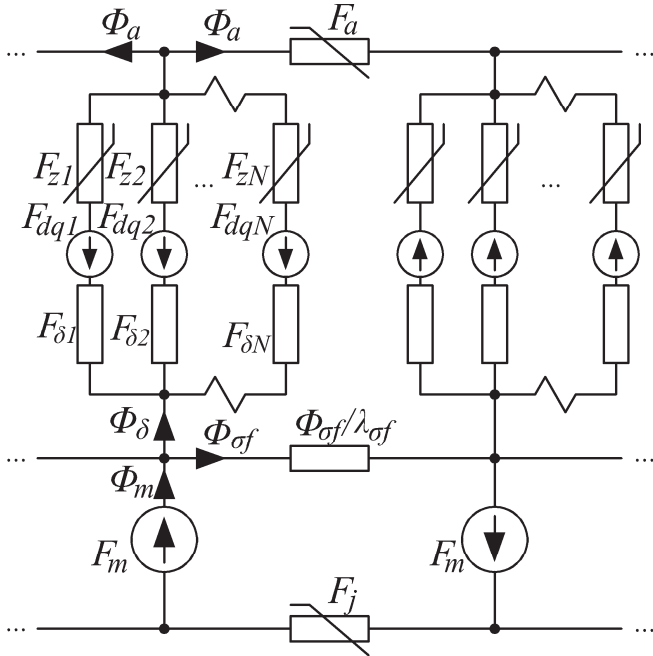


Рис. 2. Заступна схема магнітного кола ВБПМ

одне зі значень напруги  $U_p$ . Його використано для отримання зовнішньої характеристики генератора  $U_p(I_p)$ .

Механічна характеристика двигуна як залежність частоти обертання від моменту на валі теж формалізована системою алгебричних рівнянь. Вона передбачає урахування особливостей комутаційного процесу безконтактного двигуна та використання дискретної 6-тактової комутаційної послідовності.

Диференційні рівняння рівноваги для даного випадку записані за наступних допущень: магнітопровід двигуна не насичений; власні та взаємні індуктивності обмоток постійні та не залежать від кута повороту ротора; комутація напівпровідникових ключів відбувається миттєво.

Формули, що входять до математичного формулювання даної задачі отримані на підставі часткових розв'язків рівнянь рівноваги. В результаті розв'язання нелінійної САР отримується одне зі значень частоти обертання  $n$ , яке використовується для механічної характеристики двигуна як функції  $n(M_e)$  або  $n(I_p)$  за  $U_{DC} = \text{const}$ .

Окремий підрозділ присвячено розробці алгоритму розрахунку робочих характеристик ВБПМ як сукупності залежностей фазного струму  $I_p$ , споживаної потужності  $P_1$ , моменту  $M$ , ККД  $\eta$  та частоти обертання  $n$  (для двигунів) від корисної потужності  $P_2$ .

Показано, що величина додаткових втрат в обмотці статора, ефективні провідники якої складаються з великої кількості елементарних, розрахована на підставі функцій Емде, істотно менша (>30%) порівнюючи зі значенням, отриманим чисельним способом з використанням математичної моделі. Такий висновок отримано на підставі розподілу поля вектора густини струму в перерізі провідників, що розташовані у феромагнітному пазу довільної форми та знаходяться в сторонньому магнітному полі заданої інтенсивності. Модель враховує спосіб

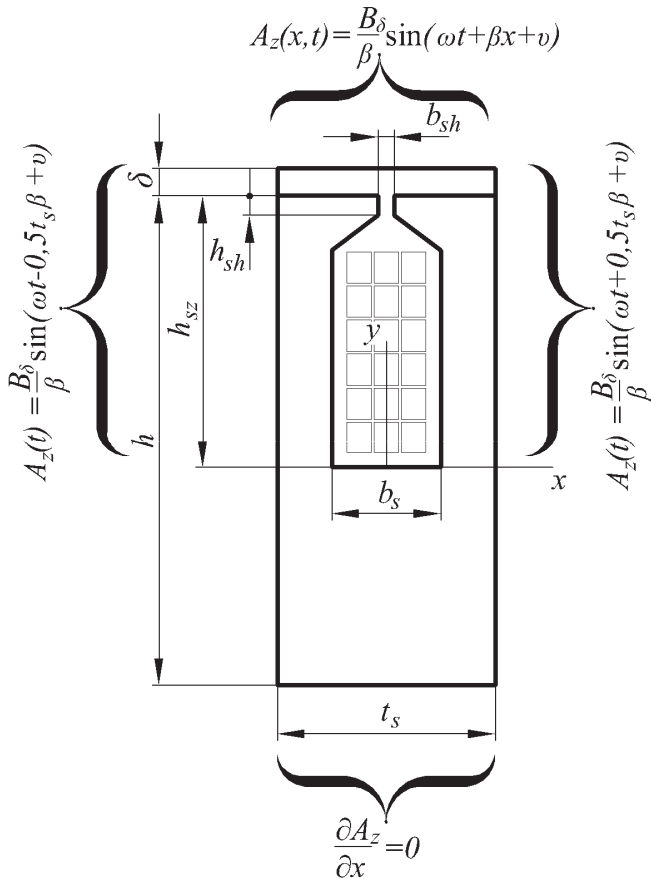
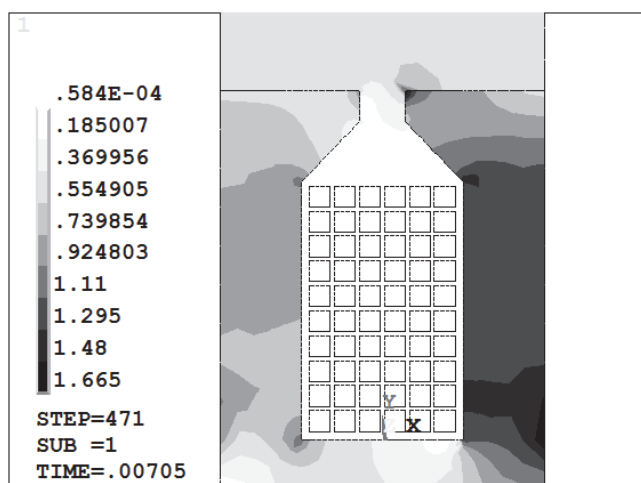


Рис. 3. Розрахункова область моделі

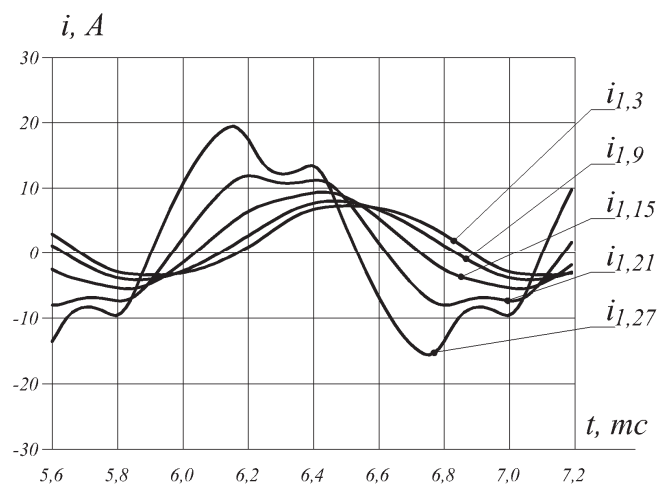
сполучення ефективних та елементарних провідників й насичення магнітопроводу. Задача формулюється у 2-вимірній постановці в термінах векторного магнітного потенціалу. Розрахункова область представляє собою зубцеву поділку осердя статора. Крайова умова формалізована виразами, показаними на рис. 3. Позначено:  $\beta = \pi/\tau$  – коефіцієнт пропорційності між координатою точки у кутових та лінійних одиницях вимірювання;  $\nu$  – фазовий зсув між струмом ефективного провідника та радіальними складовими вектора  $\overline{B_\delta}$  вздовж координати  $x$ . Вимушуючими силами виступають струм ефективного провідника та магнітна індукція у повітряному проміжку.

За допомогою низки математичних експериментів, проведених на віртуальній моделі, що за розмірами, обмотковими даними та характеристикою намагнічування матеріалу осердя відповідає високошвидкісному генератору потужністю 220 кВт з частотою обертання 50000 об/хв, здійснена кількісна оцінка розподілу густини струму в пазовій частині стрижнів під впливом потоку розсіювання, основного магнітного потоку та насичення магнітопроводу у взаємозв'язку всіх цих чинників. Результати одного з таких експериментів показані на рис. 4. Векторні поля магнітної індукції та густини струму у вигляді растрових зображень для моменту часу  $t = 7,05$  мс, показані на рис. 4, а, б, відповідно. Залежності від часу струмів елементарних провідників, розташованих у 3-му зліва стовпці, у стрижні, що лежить на дні паза, — рис. 4, в, а у стрижні, що знаходиться в околі шліца, — рис. 4, г.

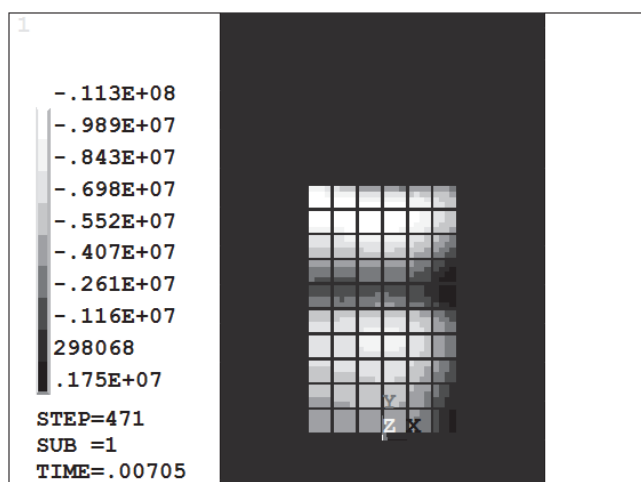
Для врахування додаткових втрат у магнітопроводі ВБПМ, до яких віднесено лише поверхневі та пульсаційні втрати у полюсах індуктора, спричинені просторовою гармонікою поля зубцевого порядку, пропонується аналітична методика, яка побудована на розв'язку рівняння Гельмгольца для провідного напівпростору.



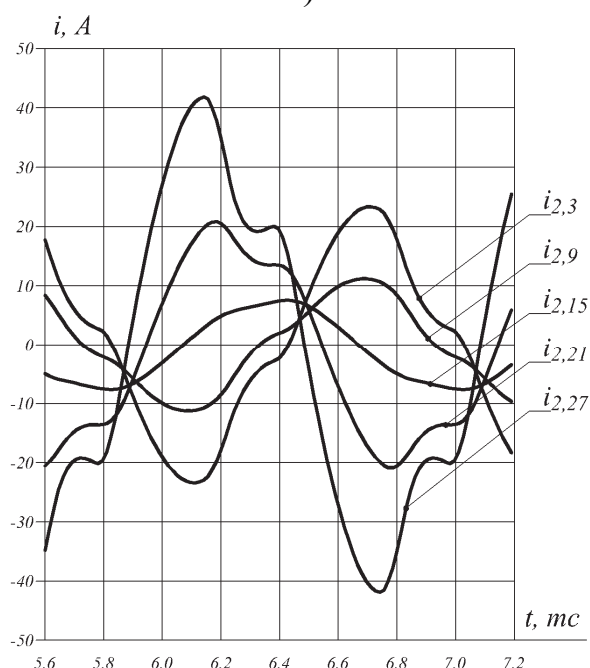
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Результати розрахунку: а) поля вектора магнітної індукції, Тл; б) поля вектора густини струму, А/м<sup>2</sup>. Залежності від часу струмів елементарних провідників, А: в) стрижень на дні паза; г) стрижень в околі шліца

Спосіб обчислення даного виду втрат спирається на наступні допущення: зовнішній діаметр ротора наближено дорівнює внутрішньому діаметру осердя статора; полюсна система ротора представляє собою суцільне кільце довжиною  $l_m$ , товщина якого перевищує глибину проникнення поля у матеріал постійних магнітів.

Для цього виду втрат отримано вираз

$$P_{PM} = \frac{\omega_s^2 B_{sm}^2 \cdot \sigma \cdot t_s \cdot Z \cdot l_m}{8 \operatorname{Re}(K) \beta^2}, \quad (35)$$

де  $B_{sm}$  – амплітуда пульсації індукції у повітряному проміжку, зумовлена зубчастістю осердя статора;  $K^2 = \alpha^2 + \beta^2$  – комплексна стала, причому,

$\alpha = (1 + j)\xi$ ;  $\xi = \sqrt{\frac{\omega_s \sigma \mu_0 \mu_r}{2}}$  – величина, обернена до глибини проникнення поля;

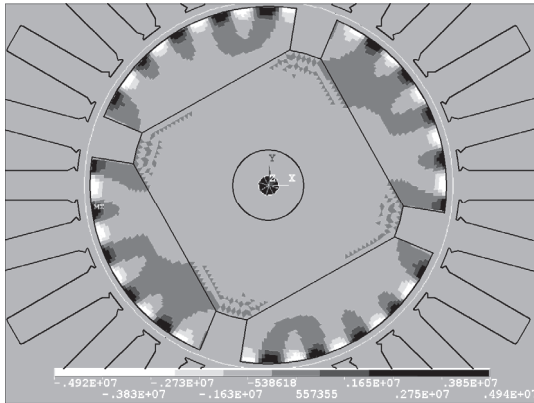
$\omega_s = \frac{2\pi n Z}{60}$  – колова частота зубцевої гармоніки поля;  $\beta = \frac{2\pi}{t_s}$  – її просторовий

період;  $\sigma$  – питома електрична провідність матеріалу ПМ.

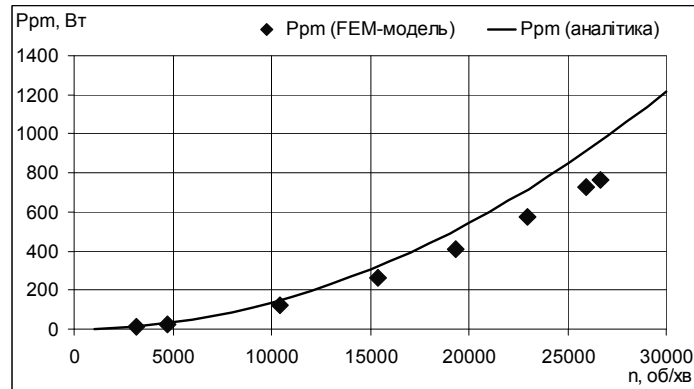
Аналітична методика (35) перевірена за допомогою створеної математичної моделі аналогічного призначення. Модель враховує нелінійні характеристики намагнічування матеріалів осердь статора й ротора та 2-вимірний розподіл магнітного поля, створеного ПМ довільної форми.

Математичні експерименти проводилися на віртуальній моделі магнітопровода високошвидкісного 3-фазного турбогенератора потужністю 100 кВА, частотою обертання 30000 об/хв, розрахованого на напругу 380 В.

На рис. 5, а показано поле  $z$ -проекції вектора густини струму в магніто- та електропровідних частинах ротора. На рис. 5, б середні значення відповідних втрат потужності для різних частот обертання  $n$  порівнюються з неперервними залежностями  $P_{PM}(n)$ , отриманими за (35).



а)



б)

Рис. 5. Результати математичного експерименту для машини з відкритим пазом: а) поле вектора густини струму  $[A/m^2]$ ; б) залежності середніх значень втрат в роторі від частоти обертання

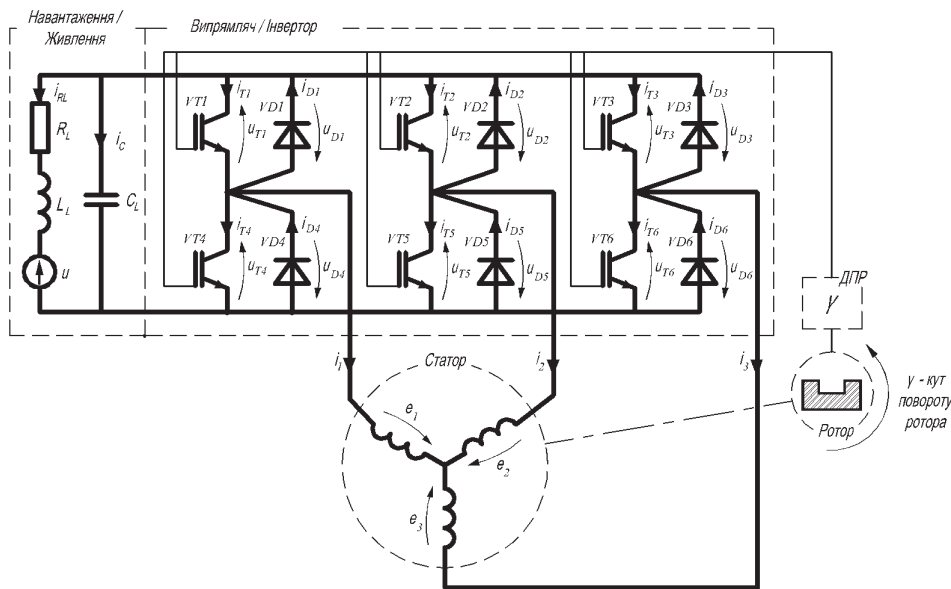
Для перевірки та уточнення проектних показників з урахуванням чинників, які здійснюють визначальний вплив на перебіг процесів у ВБПМ у їх взаємозв'язку, створено відповідну математичну модель електромеханотронної системи, яка, крім трифазної ВБПМ, містить напівпровідниковий комутатор, давач положення ротора (ДПР) та блок навантаження (в режимі генератора) або блок живлення (в режимі двигуна). Її принципова схема зображена на рис. 6.

Зауважимо, що магнітно-механічна характеристика (ММХ) ВБПМ —  $\psi_1 = \psi_1[i_1, i_2, i_3, \gamma]$ ;  $\psi_2 = \psi_2[i_1, i_2, i_3, \gamma]$ ;  $\psi_3 = \psi_3[i_1, i_2, i_3, \gamma]$ ;  $M_e = M_e[i_1, i_2, i_3, \gamma]$ , (36) де  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  – повні потокозчеплення контурів статора;  $i_1, i_2, i_3$  – струми у цих контурах;  $M_e$  – електромагнітний момент;  $\gamma$  – кут повороту ротора; визначається на підставі квазістаціонарного наближення магнітного поля машини як розв'язок двовимірної крайової задачі. Магнітно-механічні параметри (ММП) ВБПМ як повна похідна (36) за її аргументом розраховується чисельно, на підставі теорії інваріантного наближення функцій.

Математичне формулювання даної задачі містить рівняння електричної рівноваги

$$\begin{aligned}
 u + R_L i_{LR} + L_L \frac{di_{LR}}{dt} - u_{LC} &= 0; & i_{LC} &= C_L \frac{du_{LC}}{dt}; \\
 u_{T1} - u_{T2} - R_2 i_2 - \frac{d\psi_2}{dt} + \frac{d\psi_1}{dt} + R_1 i_1 &= 0; & u_{T2} - u_{T3} - R_3 i_3 - \frac{d\psi_3}{dt} + \frac{d\psi_2}{dt} + R_2 i_2 &= 0; \\
 u_{T4} - u_{T5} - R_1 i_1 - \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{d\psi_2}{dt} + R_2 i_2 &= 0; & u_{T5} - u_{T6} - R_2 i_2 - \frac{d\psi_2}{dt} + \frac{d\psi_3}{dt} + R_3 i_3 &= 0; \\
 u_{LC} - u_{T1} - u_{T6} - R_1 i_1 - \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{d\psi_3}{dt} + R_3 i_3 &= 0; \\
 i_1 + i_2 + i_3 &= 0; \\
 i_{T1} - i_{D1} - i_{T4} + i_{D4} - i_1 &= 0; \\
 i_{T2} - i_{D2} - i_{T5} + i_{D5} - i_2 &= 0; \\
 i_{T3} - i_{D3} - i_{T6} + i_{D6} - i_3 &= 0; \\
 -i_{T1} + i_{D1} - i_{T2} + i_{D2} - i_{T3} + i_{D3} - i_{LR} - i_{LC} &= 0; \\
 u_{T1} + u_{D1} &= 0; \\
 u_{T2} + u_{D2} &= 0; \\
 u_{T3} + u_{D3} &= 0; \\
 u_{T4} + u_{D4} &= 0; \\
 u_{T5} + u_{D5} &= 0; \\
 u_{T6} + u_{D6} &= 0,
 \end{aligned} \tag{37}$$

де  $R_1, R_2, R_3$  – активні опори електричних контурів ВБПМ;  $L_L, C_L$  – індуктивність



навантаження та ємність фільтра;  $i_{LR}, i_{LC}$  – струми навантаження та через конденсатор фільтра;  $u_{LC}$  – напруга на конденсаторі фільтра;  $u_{T1}, \dots, u_{T6}, i_{T1}, \dots, i_{T6}$  – спади напруг та струми силових ключів комутатора;  $u_{D1}, \dots, u_{D6}, i_{D1}, \dots, i_{D6}$  – спади напруг та струми зворотних діодів.

Рис. 6. Принципова схема електромехатронної системи

Вольт-амперні характеристики напівпровідникових елементів комутатора

$$\begin{aligned}
 u_{T1} &= u_{T1}[i_{T1}]; & u_{D1} &= u_{D1}[i_{D1}]; \\
 \vdots & & \vdots & \\
 u_{T6} &= u_{T6}[i_{T6}]; & u_{D6} &= u_{D6}[i_{D6}],
 \end{aligned} \tag{38}$$

опис яких здійснюється кусково-неперервними функціями, такими, що забезпечують стійкість ітераційного процесу чисельного інтегрування.

Рівняння механічної рівноваги

$$-J \frac{d\omega}{dt} + M_e - M_s = 0; \quad \omega = \frac{d\gamma}{dt}, \tag{39}$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора;  $J$  – момент інерції обертової частини;  $M_s$  – момент статичного навантаження.

Система (37)-(39) доповнюється явною ММХ — сукупністю функцій (36) й містить 36 скалярних рівнянь й стільки ж невідомих:  $i_1, i_2, i_3, i_{LR}, i_{LC}, u_{LC}, \psi_1, \psi_2, \psi_3, i_{T1}, \dots, i_{T6}, u_{T1}, \dots, u_{T6}, i_{D1}, \dots, i_{D6}, u_{D1}, \dots, u_{D6}, M_e, \omega, \gamma$ . Разом з початковою умовою вона складає зміст задачі Коші.

Алгоритм її розв'язання побудований на методі формул диференціювання назад та реалізований у вигляді комп'ютерної програми. Для її відлагодження та з метою перевірки адекватності моделі проведено низку математичних експериментів на прикладі машини потужністю 100 кВА, номінальною частотою обертання 30000 об/хв. Результати розрахунку часових залежностей деяких з режимних величин показано на рис. 7.

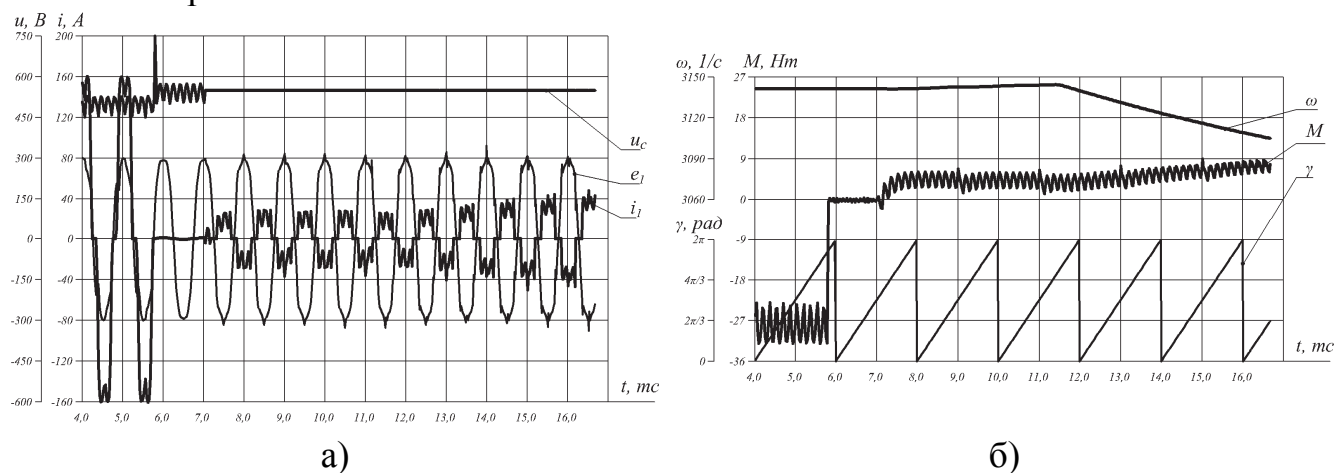


Рис. 7. Залежності від часу: а) фазного струму, фазної ЕРС та напруги DC; б) швидкості обертання, електромагнітного моменту, та кута повороту ротора

В часовому діапазоні 4,0÷5,8 мс машина перебувала в режимі генератора під навантаженням  $\approx 23$  кВА. Частота обертання в цьому режимі була незмінною й становила 30000 об/хв. Далі (5,8÷7,0 мс) здійснено скидання навантаження практично до неробочого ходу, частота обертання не змінювалася. В діапазоні 7,0÷12,0 мс відбувся перехід в режим двигуна. Навантаження на валі встановлено на рівні 3,2 Нм, а напруга живлення — 550 В (DC). Й, нарешті, в діапазоні 12,0÷17,0 мс імітувалося раптове навантаження двигуна до 16 Нм.

Отримані результати розрахунків перехідних електромеханічних процесів у електромеханотронній системі «ВБПМ–комутатор–ДПР» підтверджують коректність взаємодії алгоритмів розрахунку ММХ, ММП, диференційних параметрів напівпровідникових елементів комутатора з алгоритмом чисельного інтегрування САДР. Напрацьовані рекомендації щодо величини кроку інтегрування та необхідних обчислювальних ресурсів.

**Четвертий розділ** присвячений проблемам механіки обертових частин ВБПМ. На підставі аналітичних та чисельних досліджень отримано загальні рекомендації щодо вибору допустимого діаметру ротора та віддалі між підшипниковими опорами, які гарантовано забезпечують механічну 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. Такі, що виготовляються з одного матеріалу без застосування складальних операцій названі в подальшому суцільними (рис. 8, а), а ті, що складаються з окремих деталей — вала, полюсів та елементів кріплення, — складеними (рис. 8, б).

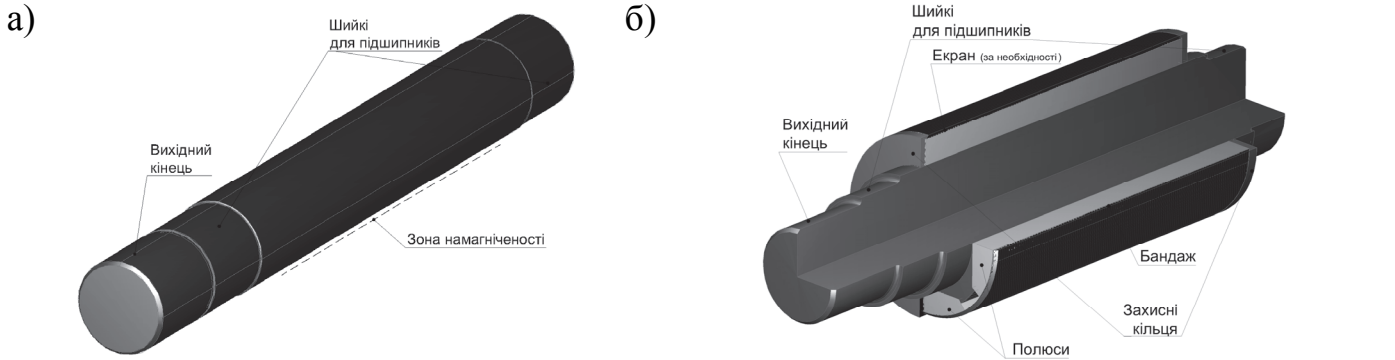


Рис. 8. Конструкції роторів: а) суцільного; б) складеного

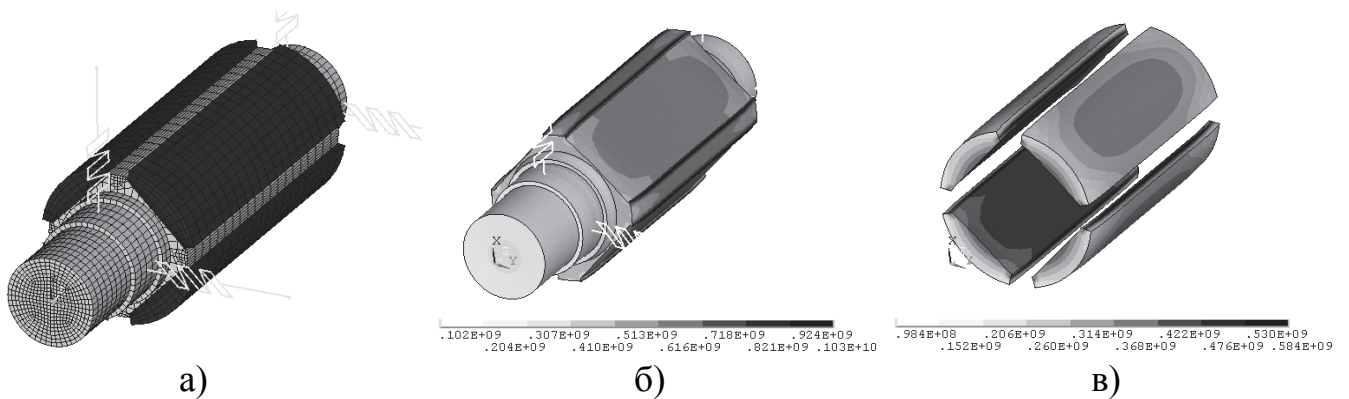


Рис. 9. Скінченно-елементна модель складеного ротора (а) та поле еквівалентного напруження, Па: б) у валі; в) у полюсах

Звертається увага на види бандажування складених роторів та особливості його виготовлення.

Створено математичні моделі, що дозволяють розраховувати поля механічних напружень в роторах довільних розмірів обидвох типів, що обертаються з довільною частотою. Задачі формулюються у 3-вимірній постановці як статичні й розв'язуються МСЕ. На рис. 9 показано рівень дискретизації складеного ротора сіткою СЕ та результати розрахунку поля напружень у його елементах.

Отримано сукупності залежностей максимального еквівалентного за Мізесом механічного напруження  $\sigma_e$  від частоти обертання  $n$  для різних зовнішніх діаметрів роторів у діапазоні розмірів  $D_j = 25 \div 250$  мм та частот обертання  $n = 5000 \div 200000$  об/хв. На рис. 10 вони відповідають складеному ротору. Граничне значення  $D_j$ , визначене на підставі залежності  $D_j(n)$ , приймається як один з головних розмірів на етапі первинного проектування ВБПМ й такий, що враховує необхідний запас міцності конструкції.

Адекватність цих моделей перевірялася шляхом порівняння з результатами аналітичного розрахунку механічних напружень у суцільному циліндрі, що



навантажений відцентровими силами.

Створено математичні моделі для проведення модального аналізу роторів

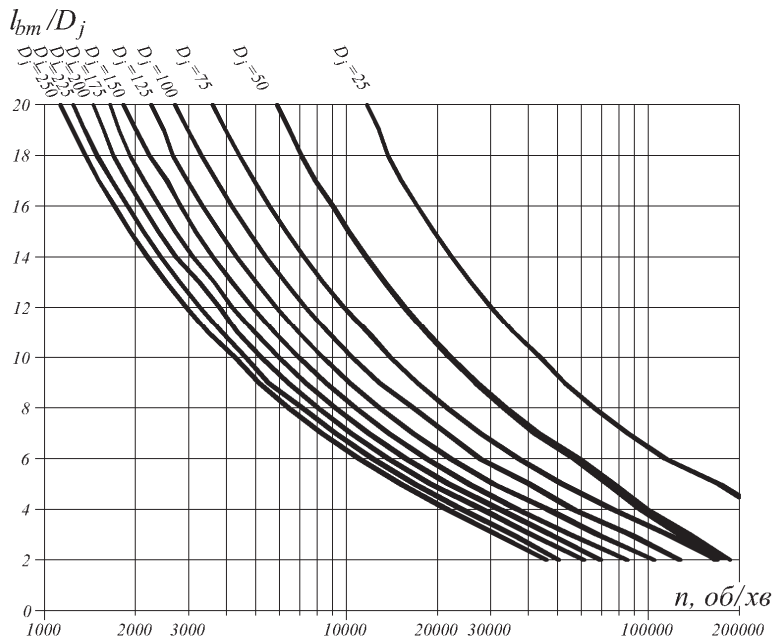


Рис. 10. Залежності максимальних напружень  $\sigma_e$  та граничного зовнішнього діаметра  $D_j$  від частоти обертання  $n$

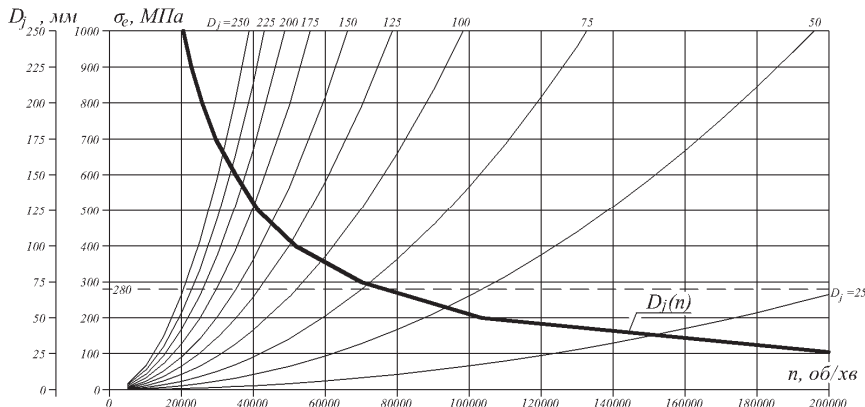


Рис. 11. Залежності 1-ї критичної частоти обертання від співвідношення  $l_{bm}/D_j$  для складених роторів

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 описані у **п'ятому розділі** «Системи охолодження та теплові процеси ВБПМ» спрямовані, насамперед, на створення методів аналізу, придатних для оцінювання теплового стану ВБПМ. Вони передбачають розробку високоадекватних математичних моделей для розрахунку температурного поля машини у 3-вимірній постановці, аналіз отриманого розподілу теплових потоків та синтез на його основі теплових заступних схем (ТЗС).

вищезгаданих типів на базі МСЕ. Отримані з їх допомогою результати дозволили побудувати сукупності залежностей співвідношення розмірів  $l_{bm}/D_j$  від критичної частоти обертання ( $l_{bm}$  – віддаль між опорами ротора). На рис. 11 показана така сукупність для складеного ротора та 1-ї критичної частоти.

Аналіз отриманих залежностей та результати аналітичного розрахунку критичних частот дозволили виявити чинники, які впливають на величини критичних частот обертання, а саме: матеріал вала ротора, його розміри, форма поперечного перетину та жорсткість опór. Інформація з рис. 11 надає можливість уникнути таких співвідношень головних розмірів ВБПМ, що призводитимуть до потрапляння у резонансні зони.

Особлива увага приділяється проблемам вибору, експлуатації та розрахунку високошвидкісних підшипникових опор. Запропоновано створювати попередній осьовий натяг у підшипниках кочення для

Детально опрацьовані три системи охолодження: система двоконтурного повітряного охолодження, що відповідає класифікації МЕК IC0145 (0146,0147); система аксіального повітряного охолодження IC15 (16,17); система рідинного охолодження ICW37 (97). Конструкцію останньої та напрям руху холодоагенту в ній показано на рис. 12.

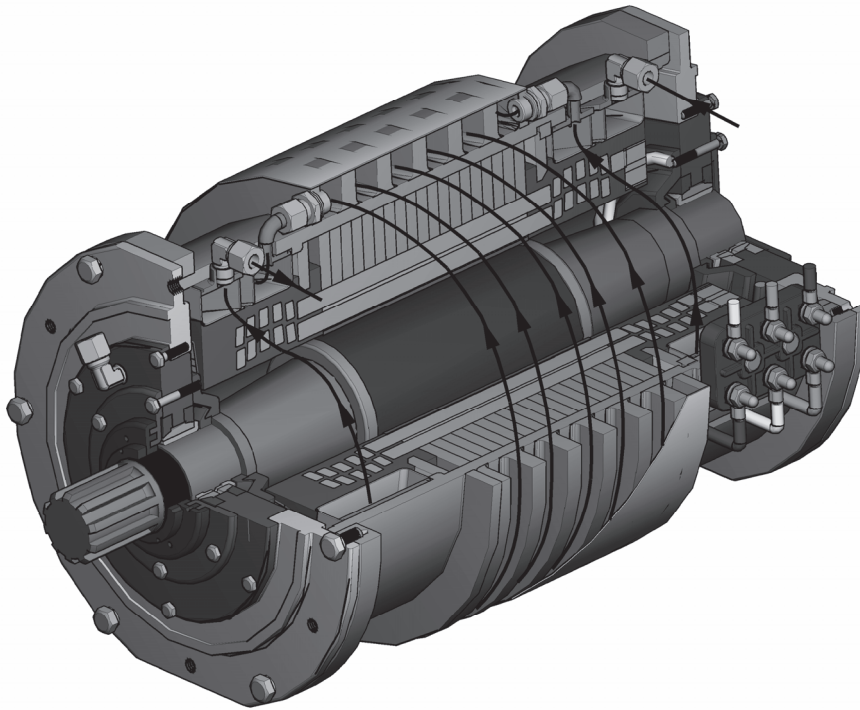


Рис. 12. Система рідинного охолодження зі спіральним каналом ICW37 (97)

Спираючись на аналітичні розв'язки рівняння теплопровідності в одновимірній постановці для пласкої та циліндричної стінок, формулюються вирази для розрахунку параметрів ТЗС — теплових опорів (ТО).

Запропоновано, за розрахунку теплових процесів, обмотку та шихтоване осердя якоря розглядати як гомогенні тіла, що за своєю формою повторюють реальні з еквівалентними коефіцієнтами теп-

лопровідності, різними в ортогональних напрямках розповсюдження тепла, та такими, що дорівнюють коефіцієнтам теплопровідності реальної обмотки чи осердя в цих напрямках. Зокрема, еквівалентний коефіцієнт теплопровідності шихтованого осердя вздовж листів в радіальному і тангенціальному напрямках визначається як

$$\lambda_{er\tau} = k_{zc} \lambda_{Fe} + (1 - k_{zc}) \lambda_{iz}, \quad (40)$$

де  $\lambda_{Fe}$ ,  $\lambda_{iz}$  — коефіцієнти теплопровідності матеріалу осердя та ізоляційного прошарку, відповідно;  $k_{zc}$  — коефіцієнт заповнення осердя сталлю.

Коефіцієнт теплопровідності шихтованого осердя поперек листів наближено, без урахування контактного теплообміну, рівний

$$\lambda_{eaa} = \frac{\lambda_{Fe} \lambda_{iz}}{k_{zc} \lambda_{iz} + (1 - k_{zc}) \lambda_{Fe}}. \quad (41)$$

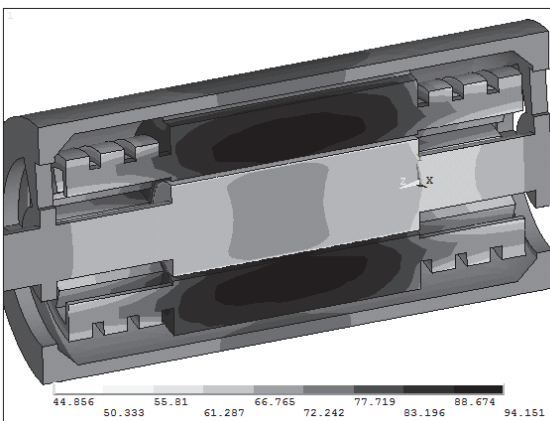
Подібним способом обчислюються еквівалентні коефіцієнти теплопровідності обмотки статора в радіальному, тангенціальному та осьовому напрямках.

Така заміна обмотки якоря та осердя статора гомогенними анізотропними, в тепловому відношенні, тілами з еквівалентними коефіцієнтами теплопровідності дає змогу істотно зменшити розмірність задачі розрахунку температурного поля практично без втрати точності.

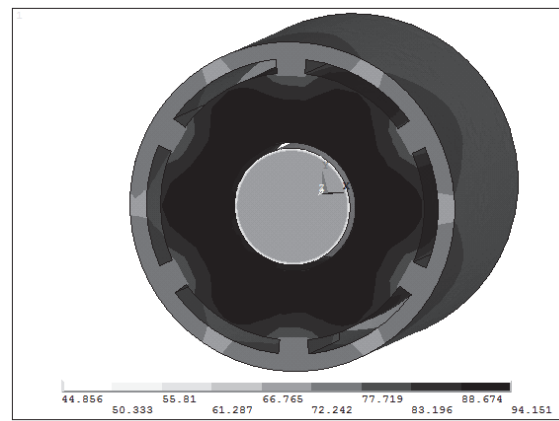
Формулювання крайових умов, пов'язаних з процесом тепломасопереносу, здійснено з використанням апарату теорії подібності.

Для всіх систем охолодження, які розглядаються у дисертації, створено відповідні математичні моделі для розрахунку стаціонарного поля температури. Аналіз отриманих з їх допомогою результатів виявив найбільш вірогідні шляхи розповсюдження теплового потоку від усіх теплогенеруючих ділянок машини та надав можливість розробити такі структури ТЗС, які, за умови допущення про одновимірний характер теплового поля, надають можливість розраховувати середні значення температур в цих ділянках з мінімальною похибкою по відношенню до їх дійсних фізичних значень.

Для прикладу, на рис. 13 показано розподіл поля температур у різних перерізах високошвидкісного генератора, розрахованого на номінальну потужність 100 кВА та частоту обертання 30000 об/хв (загальна кількість вузлів — 66524; кількість елементів — 298609). ТЗС, структура якої отримана на підставі аналізу цих результатів, показана на рис.14.



а)



б)

Рис. 13. Результати розрахунку поля температури ВБПМ ІС15 (16,17), °С :  
а) в осьовому перерізі; б) у поперечному перерізі

Теплові втрати потужності [Вт] та середні перевищення температур відповідних частин машини [К] на рисунку позначено з використанням наступних позначень:

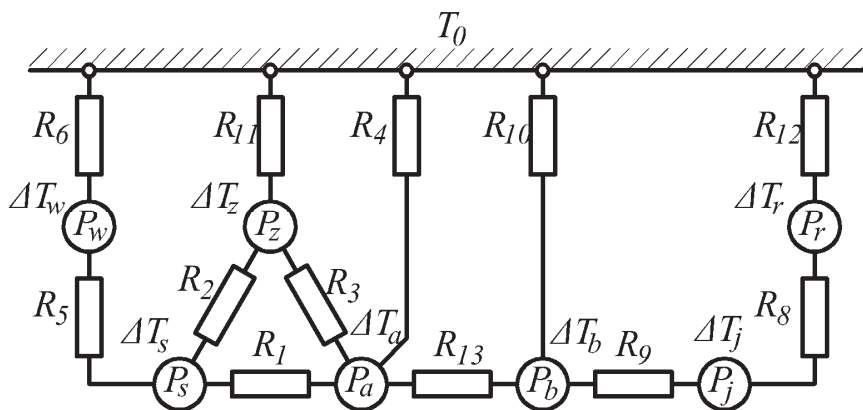


Рис.14. Теплова заступна схема ВБПМ з незалежним повітряним охолодженням ІС15 (16,17)

$\Delta T_b$  – у підшипникових опорах;  $T_0$  – абсолютна температура довкілля.

Теплові опори, К/Вт:  $R_1$  – між пазовою частиною обмотки та ярмом статора;  $R_2$  – між пазовою частиною обмотки та зубцями осердя статора;  $R_3$  – між зубцями

пазовій частині обмотки статора;  $P_w, \Delta T_w$  – у лобовій частині обмотки статора;  $P_z, \Delta T_z$  – у зубцях осердя статора;  $P_a, \Delta T_a$  – у ярмі осердя статора;  $P_r, \Delta T_r$  – на поверхні ротора (втрати зумовлені газодинамічним тертям);  $P_j, \Delta T_j$  – у полюсах індуктора;  $P_b,$

та ярмом статора;  $R_4$  – між ярмом статора, станиною та довкіллям;  $R_5$  – між пазовою частиною обмотки статора та лобовими;  $R_6$  – між лобовими частинами обмотки статора та довкіллям;  $R_8$  – між полюсами індуктора та бандажем;  $R_9$  – між полюсами індуктора, валом та підшипниками;  $R_{10}$  – між підшипниками, підшипниковими щитами та довкіллям;  $R_{11}$  – між зубцями осердя статора та довкіллям;  $R_{12}$  – між бандажем ротора та довкіллям;  $R_{13}$  – між ярмом осердя статора, станиною, підшипниковими щитами та підшипниками.

На підставі порівняльного аналізу результатів розрахунку середніх значень температур активних елементів ВБПМ, у випадках примусового повітряного та рідинного охолодження з використанням ТЗС та МСЕ виявлено, що розбіжність результатів для системи IC0145 (0146, 0147) не перевищує 14%; IC15 (16,17) — 9%; ICW37 (97) — 11%. Це свідчить на користь вірно обраних структур ТЗС та підтверджує правомірність методів розрахунку ТО.

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.

Першим розглядається дослідний взірець високошвидкісного генератора номінальною потужністю 97 кВт, розрахованого на частоту обертання 24000 об/хв,



*Рис. 15. Дослідний взірець статора генератора*

який входить до складу турбодетандерного автономного енергоагрегату, що утилізує енергію стисненого газу або пари. Фотографія фрагменту обмотаного осердя статора показана на рис. 15.

Порівняння величин діючого значення фазної напруги за неробочого ходу та під навантаженням, для різних частот обертання, виявило розбіжності з розрахунковими значеннями, що для колових методів не перевищують 8%, а для польових — 6%.

Аналогічні перевірки проводилися для дослідного взірця ВБПМ потужністю 10 кВт за частоти обертання 70000 об/хв, що використовується в складі гібридного турбокомпресора системи турбонаддуву серійних дизельних двигунів марки ЯМЗ 7511.

Обидва розрахункових підходи показали задовільну точність в обчисленні напруги в режимі генератора як під навантаженням, так і за неробочого ходу.

Експериментальний взірець ВБПМ номінальною потужністю 110 кВт, розрахований на частоту обертання 70000 об/хв працює в складі мінікогенераційної

установки. Її експериментальним дослідженням присвячено три публікації [1].

Порівняння результатів здійснено за величинами діючого значення фазної напруги, втрат потужності, ККД та показниками теплового режиму. Режим роботи генератора відповідає навантаженню у 85,3 кВт, коефіцієнту потужності  $\cos \varphi = 1$  й номінальній частоті обертання.

Така перевірка етапів розрахунку електромагнітних і теплових процесів дає право стверджувати наступне: розбіжність у визначенні фазних напруг не перевищує 3-5 % для методик системи аналізу проектних рішень й 2-3% для системи FEM-аналізу; розбіжність у визначенні повних втрат потужності, отриманих розрахунковим та експериментальним способом, не перевищує 17%; розрахунок залежності ККД від навантаження показав розбіжність з експериментальними даними на рівні 1,5%; розрахунок середніх значень температур на підставі ТЗС у частинах ВБПМ, в яких відбувається тепловиділення, демонструє максимальну розбіжність з результатами експерименту у 14 %; середньооб'ємні температури отримані з використанням 3-вимірної моделі на основі МСЕ, відрізняються від експериментальних значень не більше, ніж на 9%.

Наступним розглядається високошвидкісний двигун приводу турбокомпресора потужністю 15 кВт частотою обертання 120000 об/хв. Робота [2] містить не лише експериментальні дані про електромеханічні параметри — напруги, струми, втрати потужності, частоти обертання, і т.п., а й матеріали про розрахункові дослідження критичних частот обертання ротора, що підтверджені експериментально.

Розбіжність у визначенні повних втрат потужності, отриманих розрахунковим та експериментальним способом, в даному випадку не перевищує 2%, фазної напруги — менше 5%, а розбіжність у визначенні критичної частоти обертання ротора з використанням FEM-моделі, описаної у розділі 4, не перевищує 15%.

Перевірка методик визначення втрат потужності різного походження, ККД та розрахунку механічної характеристики здійснена порівнянням з результатами експериментальних досліджень високошвидкісного двигуна номінальною потужністю 5 кВт, розрахованого на частоту обертання 150000 об/хв, що використовується у металообробному верстаті. Вони опубліковані у [3], а результати порівняння зображено на рис. 16.

Останньою представлена машина, яка входить до складу автомобільного гібридного турбокомпресора [4]. В цьому випадку порівнюються миттєві усталені значення фазних напруги та струму. Їх розрахункові значення отримано з використанням розробленої математичної моделі, описаної у розділі 3.

<sup>1</sup> 1) Aglen O. Back-to-back tests of a high-speed generator / O. Aglen // Proc. of IEMDC. – 2003, pp 1084-1090. 2) Aglen O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator / O. Aglen // Proc. of IEMDC. – 2003, pp. 1117-1125. 3) Aglén O. Thermal analysis of a high-speed generator / O. Aglén, A. Andersson // Industry Applications Conference. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the vol.1. – 2003. pp. 547-554.

<sup>2</sup> Hong D. K. Ultra high speed motor supported by air foil bearings for air blower cooling fuel cells / D. K. Hong, B. C. Woo, J. Y. Lee, D. H. Koo // Magnetics, IEEE Transactions on, 48(2). – 2012. pp. 871-874.

<sup>3</sup> Takahashi I. A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter / I. Takahashi, T. Koganezawa, G. Su, K. Ohyama // Industry Applications, IEEE Transactions on, 30(3). – 1994. pp. 683-690.

<sup>4</sup> Noguchi T. 220,000-r/min, 2-kW permanent Magnet Motor Drive for Turbocharger / T. Noguchi, Y. Takata, Y. Yamashita, Y. Komatsu, S. Ibaraki // In International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005). – 2005. pp. 1-6.

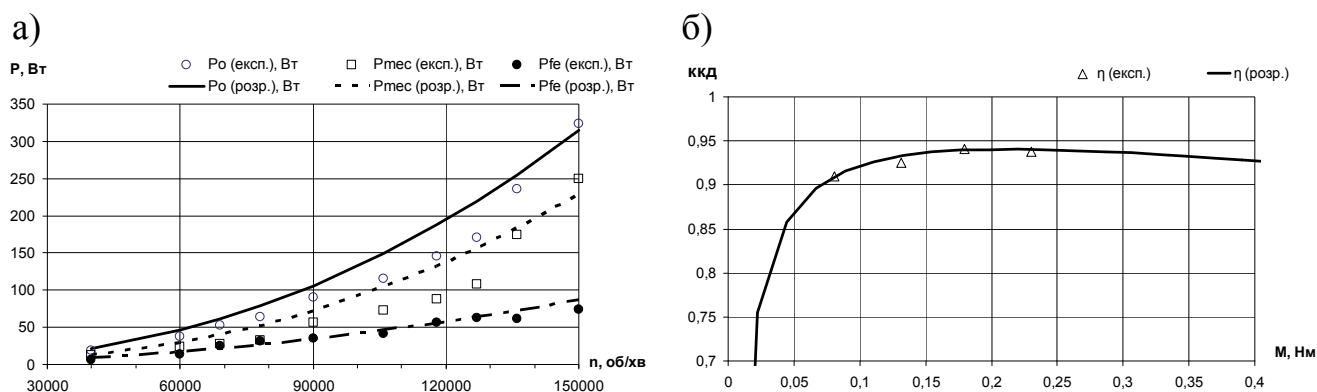


Рис. 16. Порівняння експериментальних та розрахункових даних: а) залежності втрат неробочого ходу від частоти обертання; б) залежності ККД двигуна від моменту навантаження на валі за сталої частоти обертання 60000 об/хв

На рис. 17 суміщено осцилограми експерименту з графіками відповідних розрахункових величин. Маштаб за координатними осями підібрано так, щоби отримати повне співпадіння координатних сіток. Величина моменту навантаження на валі враховує також механічні втрати двигуна. Розбіжність у визначенні діючих значень фазних напруг та струмів ВБПМ з використанням польової моделі для миттєвих значень не перевищує 8 %.

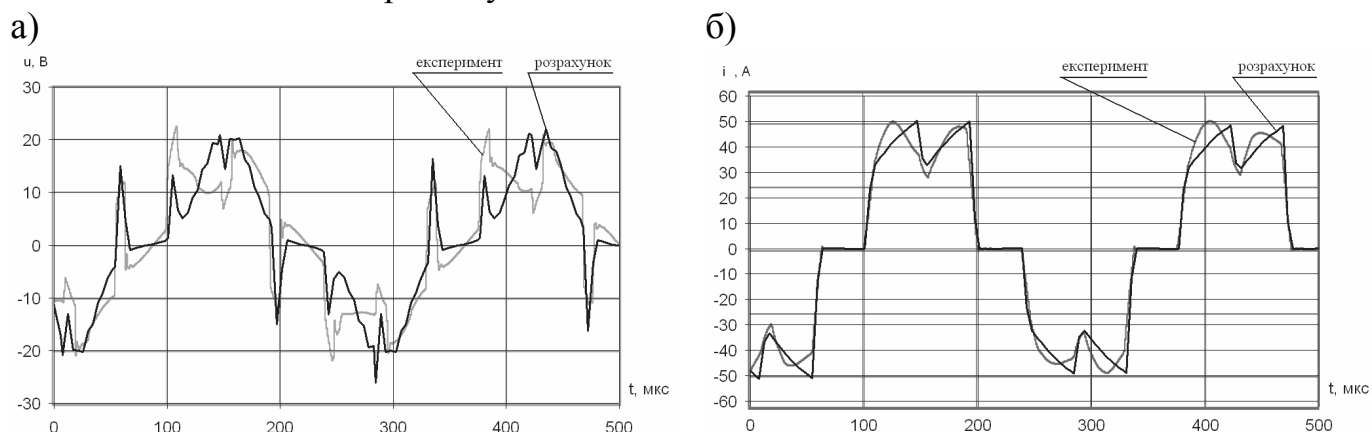


Рис. 17. Порівняння миттєвих значень фазних напруги (а) та струму (б) за навантаження моментом на валі 96 мНм та частоти обертання 220000 об/хв

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему формування теоретичної бази, практичних рекомендацій та програмного забезпечення, призначених для створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів (ВБПМ).

Науково обгрунтовані методи інформаційно-обчислювальної підтримки процесу створення ВБПМ, об'єднані в проектно-конструкторський комплекс, який 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.

За результатами роботи можна зробити такі висновки:

1. Розглянута сукупність науково обґрунтованих засобів інформаційно-обчислювальної підтримки процесу створення ВБПМ, за використання технології віртуальних цифрових прототипів, гарантує відповідність проекту вимогам технічного завдання й не потребуватиме виконання дороговартісних етапів виготовлення фізичних макетів та проведення їх експериментальних випробувань.

2. Здійснювати вибір головних розмірів ВБПМ необхідно, зважаючи на напружено-деформований стан ротора та на підставі результатів модального аналізу. Так, зовнішній діаметр ротора пропонується обмежувати з огляду на максимально допустиме механічне напруження, що виникає в ньому під дією відцентрових сил, а довжину ротора — зважаючи на значення 1-ої критичної частоти обертання.

3. Розроблено метод та алгоритм розрахунку статичної зовнішньої характеристики ВБПМ у режимі генератора, що в термінах діючих значень напруг та струмів надає можливість врахувати насичення магнітопроводу, вищі просторові гармоніки в розподілі магнітної індукції у повітряному проміжку та вплив реакції якоря на результуючий магнітний потік. Урахування взаємозв'язку вищезазначених чинників робить можливим, залишаючись на рівні теорії кіл, забезпечення точності обчислення напруги генератора під навантаженням на рівні 8 – 12% по відношенню до експериментально виміряного значення.

4. Розроблено математичну модель для розрахунку додаткових втрат в обмотці статора, спричинених дією вихрових струмів. Алгоритм придатний для осердь з довільною формою пазів, у яких розташовано довільну кількість ефективних та елементарних провідників. Він побудований на підставі опису електромагнітного поля у квазістаціонарному наближенні за двовимірною формулювання та враховує вплив потоку пазового розсіювання, основного магнітного потоку та насичення магнітопроводу у взаємозв'язку цих чинників. Величина додаткових втрат в обмотці ВБПМ, обчислена за допомогою даної моделі, в середньому на 25 – 30% більша за значення, отримані на підставі аналітичного методу класичної теорії електричних машин.

5. Для визначення додаткових втрат (поверхневих та пульсаційних) у полюсній системі ротора ВБПМ, доцільно застосувати розроблений порівняно простий метод, що ґрунтується на розв'язанні рівняння Гельмгольца для провідного напівпростору у двовимірному формулюванні. Розбіжність у величинах додаткових втрат в роторі ВБПМ, обчислених за допомогою цього методу та з використанням математичної моделі, що побудована на підставі опису електромагнітного поля у квазістаціонарному наближенні за двовимірною формулювання, не перевищує 20% і має тенденцію до зменшення за зростання частоти обертання.

6. Розроблений у роботі метод розрахунку магнітно-механічних параметрів електричних машин дає змогу підняти швидкодію обчислень, у задачах з дослідження динаміки складних електромеханотронних систем, принаймні у 2 – 2,5 рази. Це підтверджено результатами, розв'язаної у роботі, задачі розрахунку

електромеханічних перехідних процесів у електромеханотронній системі, що складається з ВБПМ, сполученої з навантаженням, напівпровідникового комутувального пристрою та давача положення ротора. Створена для цього математична модель враховує всі найважливіші чинники, що впливають на перебіг процесів у даній системі, в їх взаємозв'язку, а саме: дійсну форму поперечного перерізу магнітопроводу; двовимірний просторовий розподіл векторного магнітного потенціалу  $i$ , як наслідок, фазні потокозчеплення, ЕРС та електромагнітний момент визначаються з урахуванням усіх просторових гармонік поля; ефект насичення магнітопроводу; нелінійність вольт-амперних характеристик напівпровідникових елементів комутувального пристрою.

7. Розроблено математичну модель для розрахунку напружено-деформованого стану суцільних та складених роторів, викликаного навантаженням відцентровими силами. Задача розрахунку полів зміщень та механічних напружень розглядається у тривимірній постановці, що дає змогу врахувати наявність осьової складової механічного напруження. У порівнянні з підходом, у якому напружено-деформований стан таких роторів вважається пласким, вдалося підняти точність розрахунку запасу міцності більше, ніж на 20%.

8. Розроблено математичну модель для розрахунку критичних частот обертання суцільних та складених роторів на основі модального аналізу матриці жорсткості в обертовій системі координат. Врахування гіроскопічного ефекту та скінченної жорсткості опор ротора дає право стверджувати, що для жорстких суцільних роторів у діапазоні їх діаметрів  $D_j \approx 100 \div 250$  мм та за співвідношень віддалі між опорами до  $D_j$  від 2 до 7, робота за частоти обертання, що перевищуватиме 90000 об/хв неможлива.

9. Розроблена математична модель для розрахунку поля температури у ВБПМ зі способами охолодження: IC0145 (0146, 0147); IC15 (16,17); ICW37 (97) надає можливість, за рахунок урахування об'ємного розподілу втрат потужності й неоднакової теплопровідності обмотки та магнітопроводу статора в ортогональних напрямках, не лише визначати локальні температури з розбіжністю, не вищою 5–10 %, порівняно з експериментальними значеннями, а й виявляти недоліки конструкцій систем охолодження. Запропонована заміна обмотки та осердя статора гомогенними анізотропними, в тепловому відношенні, тілами, що за формою повторюють свої реальні аналоги, дає змогу істотно зменшити розмірність задачі розрахунку температурного поля практично без втрати точності й робить можливим її розв'язання на обчислювальних машинах класу «персональний комп'ютер».

10. Для проведення теплового розрахунку ВБПМ зі способами охолодження IC0145 (0146, 0147), IC15 (16,17), ICW37 (97) пропонуємо, розроблені на підставі аналізу результатів розрахунку тривимірних полів температур та їх градієнтів, теплові заступні схеми. Запропоновані способи обчислення параметрів цих схем, забезпечують можливість оцінки теплового стану таких машин з точністю, не нижчою 11–18 %, по відношенню до експериментально виміряних значень температур.



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ткачук В.І. та ін. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму: монографія / В.І. Ткачук, І.Є. Біляковський, О.В. Макарчук, Л.В.Каша, О.В. Грещук Львів: Видавництво "Львівської політехніки". – 2011. – 320 с.
2. Макарчук О.В. Ефект витіснення струму в провідниках короткозамкнених обмоток машин змінного струму при малих ковзаннях / О.В. Макарчук, І.Є. Біляковський // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 1997. № 334. – С. 3-7.
3. Макарчук О.В. Опис обмоток електричних машин полігармонічними функціями. / О.В. Макарчук // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 1998. № 347. – С. 68-74.
4. Осідач Ю.В. Особливості роботи й основні характеристики вентильного двигуна з зосередженими обмотками якоря / Ю.В. Осідач, В.І. Ткачук, О.В. Макарчук // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 1998. № 347. – С. 124-130.
5. Осідач Ю.В. Дослідження впливу конструкційних факторів на рівень пульсацій ЕРС спеціальних машин постійного струму / Ю.В. Осідач, О.В. Макарчук, А.В. Мирка // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 2000. № 400. – С. 114-121.
6. Макарчук О.В. Метод розрахунку поперечних коливань вала, що обертається / О.В. Макарчук // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 2002. № 449 – С. 120-126.
7. Макарчук О.В. Реактивний момент явнополюсних електричних машин з постійними магнітами / О.В. Макарчук // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 2003. № 485. – С. 120-126.
8. Макарчук О.В. Розрахунок характеристик двигуна постійного струму на підставі обчислення магнітного поля / О.В. Макарчук, В.В. Попічко // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Л.: НУЛП. – 2005. № 544. – С. 96-103.
9. Макарчук О.В. Магнітно-механічна характеристика явнополюсного вентиального двигуна з постійними магнітами / О.В. Макарчук, В.І. Ткачук, Р.К. Василів // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук. – 2006. № 3(38). – С. 29-33.
10. Макарчук О.В. Особливості роботи вентиального двигуна з постійними магнітами без давача положення ротора / О.В. Макарчук // Технічна електродинаміка. – К. – 2006. № 3. – С. 30-35.
11. Макарчук О.В. Математична модель вентиального двигуна з постійними магнітами / О.В.Макарчук // Технічна електродинаміка. – К. – 2007. № 5. – С. 28-35.
12. Макарчук О.В. Вольт-амперні характеристики напівпровідникових елементів електромеханотронних систем / О.В. Макарчук // Вісник Нац. ун-ту

“Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”.–Л.: НУЛП. – 2008. № 615. – С. 72-78.

13. Щур І.З. Стратегії керування безредукторними електроприводами на базі безконтактних вбудованих модулів з постійними магнітами / І.З. Щур, О.В. Макарчук, М.В. Черепаняк // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”.–Л.: НУЛП. – 2008. № 615. – С. 167-175.

14. Макарчук О.В. Модель безконтактної електричної машини зі збудженням від постійних магнітів / О.В. Макарчук // Технічна електродинаміка. – К. – 2011. № 1. – С. 37-45.

15. Макарчук О.В. Ротори електричних машин зі збудженням від постійних магнітів / О.В. Макарчук, І.Г. Шаповалов // “Електромеханічні і енергозберігаючі системи”. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2011. № 1 (13). – С. 21-26.

16. Макарчук О.В. Втрати потужності від вихрових струмів в роторі високошвидкісного генератора зі збудженням від постійних магнітів / О.В. Макарчук // Технічна електродинаміка №1, – 2013. – С. 56–61.

17. Макарчук О.В. Аналітичний розрахунок втрат потужності від вихрових струмів в роторах з постійними магнітами / О.В. Макарчук // Технічна електродинаміка. – К. – 2015. № 6. – С. 41-45.

18. Makarchuk O. V. Additional losses in the stator windings of the high-speed brushless electrical machine with the permanent magnets / O. V. Makarchuk // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2016. № 6. pp. 107-113.

19. Lis M. Model matematyczny układu napędowego z silnikiem PMSM zasilanym ze źródła napięcia sinusoidalnego / M. Lis, O. Makarchuk // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. № 12. pp. 211-214.

20. Shchur I. The Simulation Model of a Synchronous Machine with Permanent Magnets That Takes into Account Magnetic Saturation / I. Shchur, A. Rusek, O. Makarchuk, M. Lis // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. № 4. pp. 102-105.

21. Makarchuk O. The electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for wind turbine / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Shchur // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. № 1. pp. 179-182.

22. Makarchuk O. Optimization of the design of electromagnetic transformer of mechanical energy into heat for VAWT / O. Makarchuk, A. Rusek, I. Shchur, V. Klymko // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. № 12. pp. 151-154.

23. Lis M. Model matematyczny silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o sterowaniu sinusoidalnym zasilanego ze źródła prądowego / M. Lis, O. Makarchuk // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne. – 2012. № 3 (96). pp. 175-178.

24. Shchur I. Modelowanie symulacyjno-komputerowe maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi z uwzględnieniem nasycenia magnetycznego / I. Shchur, A. Rusek, O. Makarchuk // Zastosowania elektromagnetyzmu w nowoczesnych technikach i informatyce. XXII Sympozjum środowiskowe PTZE Sandomierz. – 2012. pp. 192-194.

25. Shchur I. Modelowanie symulacyjno-komputerowe silnika synchronicznego z magnesami trwałymi na podstawie wyników badań polowych / I. Shchur, A. Rusek,

O. Makarchuk // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne. – 2012. № 3 (96). pp. 189-195.

26. Lis M. Model matematyczny elektromechanicznych stanów nieustalonych silnika typu BLDC zasilanego ze źródła napięcia sinusoidalnego / M. Lis, O. Makarchuk // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne.– 2013. № 1 (98). pp. 183-188.

27. Makarchuk O. Analiza stanu cieplnego wysokoobrotowych maszyn elektrycznych o wzbudzeniu od magnesów trwałych z chłodzeniem cieczowym / O. Makarchuk, M. Lis, A. Gastolek, J. Sosnowski // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne. – 2015. № 1 (98). pp. 7-15.

28. Makarchuk O. Metoda wyznaczania parametrów i charakterystyk wysokoobrotowej bezszczotkowej prądnicy z wzbudzeniem magnesami trwałymi dla stanów ustalonych / O. Makarchuk, A. Rusek, M. Patro, A. Gastolek // Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne.– 2016. № 3 (111). pp. 45-52.

29. Патент на корисну модель 80216 Україна, МПК F03D 3/02. Безконтактна контрроторна вітроустановка / О.В. Макарчук, І.З. Щур, А.І. Ковальчук. - № u 2012 07720; заявл. 25.06.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. 10. – 4с.

30. Патент 105743 Україна, МПК F03D 9/02. Вітрова теплоелектростанція / І.З. Щур, О.В. Макарчук, В.І. Щур, В.І. Климко. - № а 2013 08843 ; заявл. 15.07.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. 11. – 4с.

## АНОТАЦІЯ

**Макарчук О.В. Методи і засади створення високошвидкісних безконтактних електричних машин з постійними магнітами.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми — розробці теоретично-прикладної бази для створення високошвидкісних безконтактних електричних машин зі збудженням від постійних магнітів (ВБПМ).

Технічні об'єкти, що використовують електричні машини, які обертаються з частотою  $20 \div 200$  тис. об/хв, — когенераційні енергоагрегати, турбодетандери, системи буферизації енергії, металообробні верстати та ін. — є предметом постійної уваги фахівців з цілого світу. Це переконливо підтверджує актуальність даної проблематики.

Робота містить опис методів і алгоритмів, пов'язаних з визначенням розмірів та обмоткових даних, розрахунком електромагнітних навантажень, параметрів, статичних характеристик та оцінкою теплового стану таких машин. Обґрунтовані рекомендації стосовно вибору конструкції ротора і обмотки статора, матеріалів з необхідними фізичними властивостями, типу підшипникових опор та способу їх змащування, системи охолодження.

Для уточнення та перевірки проектних показників створено низку високоадекватних математичних моделей, складених на підставі рівнянь, що описують фізичні поля різної природи, й призначені для розрахунку додаткових втрат в обмотці статора та в полюсах індуктора, динамічних процесів у ВБПМ як

елементі електромеханотронної системи, максимальних механічних напружень у роторі, критичних частот обертання і температурного поля.

Таким чином, створений проектно-конструкторський комплекс дає змогу: проводити оцінку відповідності отриманих показників машини вимогам технічного завдання; виконувати підготовку вхідної інформації для подальшого використання у польових математичних моделях, скорочуючи час багатоваріантних, можливо оптимізаційних, розрахунків; виконувати уточнення проектних показників з урахуванням чинників, які здійснюють визначальний вплив на перебіг процесів у ВБПМ у їх взаємозв'язку; верифікувати результати ще на етапі прийняття проектних рішень.

Розглянута сукупність науково обгрунтованих засобів інформаційно-обчислювальної підтримки процесу створення ВБПМ, за використання технології віртуальних цифрових прототипів, гарантує відповідність проекту вимогам технічного завдання й не потребуватиме виконання дороговартісних етапів виготовлення фізичних макетів та проведення їх експериментальних випробувань.

**Ключові слова:** високошвидкісна безконтактна електрична машина, постійні магніти, додаткові втрати, втрати від вихрових струмів, напружено-деформований стан, критична частота обертання, система охолодження, рівняння Гельмгольца, метод скінченних елементів, функція форми, варіаційний підхід, метод Галеркіна.

## АННОТАЦІЯ

**Макарчук А.В. Методы и принципы создания высокоскоростных бесконтактных электрических машин с постоянными магнитами.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный университет «Львовська политехніка», Львов, 2017.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы — разработке теоретико-прикладной базы для создания высокоскоростных бесконтактных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов (ВБПМ).

Разнообразие технических задач, решение которых требует использования ВБПМ, диктует повышенные требования к их показателям и характеристикам. Попытки удовлетворить эти требования проявляют всю многомерность проблемы и охватывают задачи развития теории проектирования, разработку и внедрение новейших конструктивных решений, технологических процессов и т.п.

Технические объекты, использующие электрические машины которые вращаются с частотой  $20 \div 200$  тыс. об/мин, — когенерационные энергоагрегаты, турбодетандеры, системы буферизации энергии, металлообрабатывающие станки и пр. — постоянно выступают предметом исследования специалистов со всего мира. Это является убедительным подтверждением актуальности данной проблематики и позволяет утверждать, что производство высокоскоростных электрических машин, в частности с возбуждением от постоянных магнитов, может рассматриваться как самостоятельное направление электромашиностроения.

Вся совокупность теоретических методов, практических рекомендаций и программного обеспечения, описанная в работе, объединена в некий проектно-конструкторский комплекс, который состоит из: системы анализа проектных решений, системы анализа конструкторских решений, и системы FEM-анализа (англ. *The Finite Element Method*).

Система анализа проектных решений предусматривает выбор материалов с необходимыми физическими свойствами, определение размеров и обмоточных данных, расчет электромагнитных нагрузок, параметров, статических характеристик и оценку теплового состояния ВБПМ.

Система анализа конструкторских решений включает рекомендации по выбору конструкции ротора и обмотки статора, типам подшипниковых опор, способам их смазывания и охлаждения.

Система FEM-анализа содержит ряд высокоадекватных математических моделей, составленных на основании уравнений, описывающих физические поля различной природы и предназначенных для расчета дополнительных потерь в обмотке статора и в полюсах индуктора, динамических процессов в ВБПМ как элементе электромеханотронной системы, максимальных механических напряжений в роторе, критических частот вращения и температурного поля машины.

Полевые модели для решения задач электродинамики или магнитостатики учитывают: действительную форму поперечного сечения магнитопровода ВБПМ; двумерное пространственное распределение векторного магнитного потенциала и, как следствие, фазные потокосцепления, ЭДС и электромагнитный момент определяются с учетом всех пространственных гармоник поля; эффект насыщения магнитопровода ВБПМ; нелинейность характеристик полупроводниковых элементов коммутирующего устройства.

Задачи расчетов полей смещений рассматриваются в трехмерной постановке, которая дает возможность учесть наличие осевой составляющей механического напряжения, а модальный анализ матрицы жесткости проводится во вращающейся системе координат с учетом гироскопического эффекта и конечной жесткости опор ротора.

Задачи стационарной теплопередачи учитывают объемное распределение потерь мощности в активных частях ВБПМ и анизотропию теплопроводности обмотки и магнитопровода статора.

Таким образом, созданный проектно-конструкторский комплекс позволяет: проводить оценку соответствия полученных показателей машины требованиям технического задания; выполнять подготовку входной информации для дальнейшего использования полевыми математическими моделями, сокращая время многовариантных, возможно оптимизационных, расчетов; выполнять уточнение проектных показателей с учетом факторов, осуществляющих определяющее влияние на процессы в ВБПМ в их взаимосвязи; верифицировать результаты еще на этапе принятия проектных решений.

Рассмотренная совокупность научно обоснованных средств информационно-вычислительной поддержки процесса создания ВБПМ, при использовании технологии виртуальных цифровых прототипов, гарантирует соответствие проекта требованиям технического задания и позволяет избежать выполнения

дорогостоящих этапов изготовления физических макетов и проведения их экспериментальных испытаний.

**Ключевые слова:** высокоскоростная бесконтактная электрическая машина, постоянные магниты, дополнительные потери, потери от вихревых токов, напряженно-деформированное состояние, критическая частота вращения, система охлаждения, уравнение Гельмгольца, метод конечных элементов, функция формы, вариационный подход, метод Галеркина.

### ABSTRACT

**Makarchuk O.V. Methods and concept the creation of high-speed brushless permanent magnet electrical machines.** – On the rights of manuscript.

Thesis for a Doctor's degree on specialty 05.09.01 – Electrical machines and apparatus. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2017.

The dissertation is dedicated to actual scientific and technical problem solving — the development of the theoretical basis to create a high-speed brushless electrical machines with permanent magnet excitation (HBPM).

Technical objects that use electric machines which rotate at a frequency of 20 ÷ 200 thousands rpm (cogeneration plant, turboexpanders, flywheel storage system, machine tools, etc.) are the subject of research by experts all over the world. This is cogent argumentation of the importance of this problem.

Study includes design decisions which are relating to the definition of size and winding data, a calculation of electromagnetic loads, parameters, static behavior and the thermal condition of this machine. Guidance for the selection of the rotor and stator construction, materials with the necessary physical properties, types of bearings and the method of its lubrication, cooling systems is justified.

Adequacy mathematical models were developed on the basis of the equations, which are describing the physical fields of different nature, to clarify and verify design parameters. They were designed to calculate the additional losses in the stator winding and the inductor poles, dynamic processes in HBPM as an element of mechatronic system, mechanical stress in the rotor, critical speed and the temperature field of the machine.

Thus, the creation of design system allows: to check a project on satisfaction of the requirements of performance specification; to prepare input data for further using by adequacy mathematical models for shortening the time of multiple calculations; to take into account an interconnectivity of the important factors, which effect a determining influence on the processes in HBPM; to verify the results still at the stage of design solutions.

A set of science based tools of data processing support of the process of creating HBPM uses technology of virtual digital prototypes. It allows to avoid an expensive constructions stages of physical prototypes experimental tests on these prototypes.

**Keywords:** high-speed brushless electrical machine, permanent magnets, additional losses, eddy currents losses, mode of deformation, critical speed, cooling system, Helmholtz wave equation, finite element method, FEM-analysis, shape function, variational problem, Galerkin method