

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Заблодський Микола Миколайович

УДК 621.313.33:621.318.122

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ
ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

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

Харків - 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин і апаратів в Донбаському державному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Шинкаренко Василь Федорович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ,
завідувач кафедри електромеханіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яковлєв Олександр Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є.Жуковського "Харківський авіаційний
інститут", м. Харків, професор кафедри
електродвигунів літальних апаратів;

доктор технічних наук, професор
Ковальов Євген Борисович,
Донецький національний технічний університет,
м. Донецьк, професор кафедри гірничої
електротехніки і автоматики;

доктор технічних наук, професор
Римша Віталій Вікторович,
Одеський національний політехнічний
університет, м. Одеса, професор кафедри
електричних машин.

Захист відбудеться " 10 " 04 2008 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий " 05 " 03 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.С.Марков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема створення енергозберігаючих і екологічно чистих технологій переробки сировини в різних галузях промисловості і сільському господарстві стала особливо гострою у зв'язку з зростанням цін на енергоносії і виникаючої за цієї причини недоцільності експлуатації енергоємних комплексів старого зразка. Розумною альтернативою традиційним комплексам, які містять окремо сформовані одиниці обладнання, стають електротехнічні комплекси на базі поліфункціональних електромеханічних перетворювачів (ПЕМП) технологічного призначення, які передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну і теплову інтеграцію.

Загальний ККД ПЕМП вельми високий, що забезпечує ефективну реалізацію принципів енергоресурсозбереження. Створення ПЕМП і технологій на їх основі базується на ідеї суміщення в одному електромеханічному пристрої одночасно нагрівальних, транспортуючих, змішувальних (турбулентноформуєчих) функцій, інтеграції теплової енергії і спрямування останньої в зону переробки сировини. В ПЕМП використовується конструкція трифазного статора і порожнистого феромагнітного ротора (ПФР), який виконує одночасно функції ротора асинхронного двигуна (АД), нагрівача, виконавчого механізму і захисного корпусу. При цьому ПФР охолоджується сировиною, яка переробляється. У зв'язку з цим важливою науково-технічною проблемою електромеханіки є створення ПЕМП для виконання нових специфічних функцій технологічного призначення.

Оскільки ПЕМП являє собою цілковито перспективний електромеханічний перетворювач, при його створенні виникає комплекс невирішених теоретичних і практичних проблем. Перш за все, повинні бути проведені генетичне моделювання і розробка основних принципів структурної, функціональної і теплової інтеграції ПЕМП технологічного призначення.

Складність опису взаємопов'язаних теплових, електромагнітних і механічних процесів, необхідність координації потоків енергії, а також наявність нетрадиційних для сучасних асинхронних машин багатомодульної структури і режимів роботи, таких як тривала "стоянка під струмом" (РСС), робота при великих ковзаннях, динамічні режими форсування потребують глибоких теоретичних і експериментальних досліджень. Такі дослідження з точним врахуванням ефекту витиснення струмів в ПФР, нелінійної залежності магнітної проникності, а також впливу на параметри і характеристики температури ПФР, яка може досягати 350⁰С, можливі тільки методами теорії електромагнітного (ЕМП) і теплового (ТП) полів на основі узагальненої математичної моделі (ММ), програмних засобів автоматизованого аналізу і синтезу ПЕМП.

ПЕМП слід розглядати і як теплообмінну систему з внутрішніми джерелами теплової енергії, в якій ведеться пошук оптимальної структури, яка забезпечує не тільки припустимі рівні температур електричної ізоляції у відповідності до класу її нагрівостійкості, але ж і досягнення максимальної рекуперації теплової енергії. У зв'язку з цим необхідна розробка нової ідеології оцінки енергетичної ефективності перетворення енергії і моделювання ТП в рамках термодинаміки нерівноважних процесів (ТДНП) з визначанням феноменологічних параметрів і співвідношень для різних типів ПЕМП.

Рішення вказаних задач, присвячених розробці науково-технічних основ створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів для енергоресурсозберігаючих технологій, є актуальним та складає предмет досліджень даної дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у рамках науково-дослідних робіт кафедри електричних машин і апаратів Донбаського державного технічного університету тематика яких безпосередньо пов'язана з:

- госпдоговірною темою "Дослідження і розробка пристроїв для створення мікроклімату в оболонках вибухобезпечних електродвигунів" (Первомайський електромеханічний завод ім. К.Маркса, м. Первомайськ, № ДР 74024799, 1981, здобувач – відповідальний виконавець);

- госпдоговірною темою "Розробка вихідних технічних вимог на вибухобезпечний апарат для ремонту кабелів і рекомендацій по ремонту гнучких та броньованих кабелів в системах підземного електропостачання з напругою 10 кВ" (Інститут гірничої справи ім. О.О.Скочинського, м. Люберці, № ДР № 018900054, 1990, здобувач – відповідальний виконавець);

- госпдоговірною темою "Розробка низькотемпературного індукційного електротермічного обладнання нового технічного рівня, організація його промислового випуску" (Луганське відділення Державного інноваційного фонду України, м. Луганськ, 1995, здобувач – відповідальний виконавець);

- госпдоговірною темою "Розробка конструкції апарата і технології ремонту високовольтних кабелів на напругу 35 кВ" (Вільногірський державний гірничо-металургійний комбінат, м. Вільногірськ, 2000, здобувач – науковий керівник).

Як науковий керівник здобувач очолював виконання держбюджетних робіт МОН України за науковим напрямком "Енергоефективні і ресурсозберігаючі технології в промисловості і агропромисловому комплексі": "Дослідження електротепломеханічних перетворювачів для енергозберігаючих технологій переробки сипучих і легкоплавких речовин" (№ ДР 0104U002172, 2004 р.); "Розробка теорії і методології створення поліфункціональних електротехнічних комплексів технологічного призначення з повним використанням дисипативної складової енергії" (№ ДР 0107U001473, 2007 р.). Був відповідальним виконавцем теми "Розробка способів забезпечення умов вибухобезпечності і рівномірності температурного поля індукційно-резистивного електротермічного обладнання" (№ ДР 0198U002881, 1997 р.).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – розробка теоретичних основ, принципів і методології створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів, розробка математичних і програмних засобів для підвищення ефективності їх проектного синтезу, аналізу і оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз наукових і технічних проблем створення ПЕМП;
- визначення основних принципів створення ПЕМП;
- визначення меж існування та розробка систематики видового різноманіття класу ПЕМП як системної основи для упорядкування знань та реалізації стратегії направленої еволюції класу технологічних систем, що досліджується;

- розробка генетичної моделі структуроутворення домінуючого виду для визначення структурного потенціалу та реалізації функції передбачення нових структурних різновидів ПЕМП з визначеною функцією мети;
- розробка узагальненої коло-польової ММ взаємопов'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів ПЕМП;
- розробка ММ ПЕМП як системи з НДТП для оптимізації процесів перетворення енергії;
- енергетичний аналіз процесів взаємодії ПЕМП і робочого навантажувально-охолоджуючого середовища (РНОС) з різними реологічними властивостями для обґрунтованого вибору механічних і теплових навантажень ПЕМП;
- обґрунтування методології, розробка алгоритмів і математичного забезпечення об'єктно-орієнтованого проектування (ООП) і оптимізації ПЕМП;
- розробка метода експериментального визначення ЕММ і параметрів ПЕМП;
- розробка методів і засобів підвищення стійкості роботи ПЕМП в динамічних режимах;
- теоретичне обґрунтування процесу формування і розробка методів експериментального визначення спектра вищих гармонік (ВГ) ПЕМП з урахуванням температурної несиметрії ПФР.

Об'єктом дослідження є динамічні режими, електромагнітні і теплові поля поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення.

Предметом дослідження є область існування та рангова структура основних систематичних одиниць класу і основні принципи створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів, експериментальне визначення параметрів і характеристик, оптимізація нерівновагих термодинамічних процесів перетворення з використанням дисипативної складової енергії, розробка нових технічних рішень.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження електромагнітних і теплових полів, енергетичних процесів і характеристик ПЕМП базується на фундаментальних положеннях теорії електричних машин і теорії термодинаміки нерівноважних процесів, на структурно-системному підході, генетичному моделюванні та аналізі, методах математичного моделювання, методах теорії нелінійної електротехніки, основаних на використанні концепції динамічних параметрів ПЕМП для врахування нелінійності електромагнітних зв'язків.

Експериментально з використанням мікропроцесорних комплексів досліджені спектри гармонік магнітного поля і динамічні властивості ПЕМП. Вірогідність теоретичних результатів підтверджується багаточисельними експериментальними дослідженнями дослідних зразків ПЕМП різних конструкцій.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблені теоретичні основи і принципи створення перспективного класу електромеханічних перетворювачів з масивним ротором – ПЕМП, де вперше передбачено використання теплової енергії активних частин і механічних вузлів в технологічних процесах, які забезпечуються ПЕМП;
- розроблена природна геносистематика видів класу ПЕМП, що вміщує впорядковану інформацію щодо видового різноманіття як відомих, так і потенційно можливих видів класу. Запропонована генетична модель внутрішньої структури виду

циліндричних повздовж-симетричних ПЕМП з обертовим рухом робочого органу, яка використана при розробці нових технічних рішень;

- розроблена узагальнена коло-польова ММ взаємопов'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів в ПЕМП, яка, на відміну від відомих, дозволяє аналізувати стан і динамічні режими перетворювача з урахуванням всієї сукупності основних факторів: складної конфігурації активної зони, нелінійності фізичних властивостей матеріалів, ефектів витиснення вихрових струмів в ПФР з урахуванням обертового характеру магнітного поля, реального нагріву елементів конструкції і умов теплообміну з робочим навантажувально-охолоджуючим середовищем, особливостей розподілу електромагнітних сил і моментів;

- вперше розроблена ММ ПЕМП як системи з невірноваженими термодинамічними процесами перетворення енергії, яка дозволяє робити оптимізацію трьох процесів перетворення енергії (електричної в механічну, електричної в теплову, механічної в теплову). Встановлено, що термодинамічна ефективність ПЕМП при спрямуванні потужності спотворення до нуля приймає значення, близькі до енергетичного критерію, який являє собою добуток електричного ККД, теплового ККД і коефіцієнта потужності;

- визначені основні закономірності впливу нагріву і ефекту "закручування" силових ліній поля, обумовленого обертовим характером електромагнітного поля, на глибину проникнення, величину і часову фазу вихрових струмів в ПФР, що дозволяє підвищити точність визначення параметрів і результуючого електромагнітного моменту ПЕМП;

- удосконалено метод розрахунку стаціонарних теплових процесів ПЕМП, який за рахунок поєднання метода еквівалентних теплових схем і пінч-принципів дозволяє оцінювати міру інтеграції теплових потоків і ефективність внутрішнього теплообміну;

- вперше увесь спектр гармонік магнітного поля у повітряному проміжку двигунового (ДМ) і гальмівного (ГМ) модулів розглянуто як джерело формування корисної теплової і механічної потужності, а також низьких частот обертання ПЕМП без механічного редуктора. Теоретично обґрунтовані процеси утворення ВГ у повітряному проміжку ПЕМП при періодичній зміні умов охолодження ПФР.

Практичне значення одержаних результатів для електромашинобудівної галузі полягає у наступному:

- розроблена і реалізована методологія створення поліфункціональних ПЕМП технологічного призначення, що забезпечує досягнення показників призначення і оптимізацію ПЕМП по термодинамічній ефективності і максимуму вихідної потужності;

- на основі вивчення фізико-реологічних характеристик і моделей РНОС, яке безпосередньо контактує з ПФР, сформовані рекомендації по технологічним режимам переробки сировини на підприємствах гірничо-металургійного і агропромислового комплексів;

- на основі класового уявлення розроблена методика і її програмна реалізація для інженерного проектування ПЕМП;

- для промислових умов розроблено метод і апаратурну реалізацію експериментального визначення залежностей ЕММ ДМ і ГМ від часу і ковзання, а також отримання результируючих характеристик ПЕМП;

- теоретично обґрунтовані і експериментально реалізовані способи підвищення динамічної стійкості ПЕМП при роботі на низьких частотах обертання (до 150 об/хв.);

- запропонована система заходів щодо формування безпечних властивостей ПЕМП.

Отримані результати впроваджені на ВАТ "Первомайський електромеханічний завод ім. К.Маркса" (м. Первомайськ) при розробці і виготовленні ПЕМП шнекового і заглибного типів (пат. України № 50242, № 39226), дослідної партії комбайнових двигунів ЕКВ-4У з електротепломеханічними пристроями технічного кондиціонування повітря усередині оболонки, на Новомосковському електромеханічному заводі (Тульська обл., Росія) при розробці і організації серійного випуску електротепломеханічних апаратів АВК-1 для виконання кінцевих заділок і ремонту електричних кабелів у відповідності до ліцензійного договору (рег. номер 654/92).

Ефективність розробок підтверджується досвідом промислової експлуатації ПЕМП типу ЕДШ-1 у складі електричних комплексів для сушіння вугільних шламів і концентратів на ЗАТ "ЦЗФ Селідовська" (м. Селідово) і ТОВ "Кондратівська ЦЗФ" (м. Горлівка), електротепломеханічних пристроїв АВК на 35 промислових підприємствах гірничо-металургійного і агропромислового комплексів України, ЗАТ "АвтоВаз" (Росія), на кафедрі електричних машин і апаратів ДонДТУ.

Основні положення роботи використовуються в навчальному процесі в лекційних курсах "Електричні машини", "Проектування електромеханічних пристроїв", "Моделювання електромеханічних пристроїв", "Електромеханічні пристрої з вихровими струмами", в лабораторному практикумі, курсовому і дипломному проектуванні при підготовці спеціалістів за спеціальністю "Електричні машини і апарати".

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота містить теоретичні положення і результати, що отримані здобувачем особисто, а саме: розробка основ теорії, принципів і методології створення ПЕМП, технічних рішень і програмного забезпечення для проектування основних типів ПЕМП. Спільно з співавторами здійснена розробка геносистематики базових видів ПЕМП, проведено обговорення основних концепцій і варіантів, виконані конструкторські, технологічні і патентні роботи, проведені експериментальні дослідження, виготовлені дослідні зразки, проведені промислові випробування і впровадження ПЕМП.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: міжнародних симпозіумах "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (Харків, 2000-2007); VI, VII, VIII, IX міжнародних конференціях "Проблеми сучасної електротехніки" (Київ, 2000, 2002, 2004, 2006); X, XI міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (Крим, Алушта, 2002, 2003); II міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційна техніка і електромеханіка" (Луганськ, 2003); міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані технології і енергозбереження" (Крим, Алушта, 2003); міжнародних науково-технічних конференціях "Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимі-

зації" (Кременчук, 2006, 2007); міжнародній конференції "Экология и безопасность жизнедеятельности" (Феодосія, 2000); симпозіумі "Наука Луганщины в контексте развития региона. Фундаментальные и научно-технические проблемы" (Луганськ, 1999); семінарі "Состояние и перспективы развития энергосбережения в Луганской области" (Луганськ, 2002); III міжнародній конференції "Стратегія якості у промисловості та освіті" (Варна, Болгарія, 2007); першому українсько-китайському форумі "Наука - виробництво" (Харків, 2007); II міжнародній конференції "Моделювання і методи оптимізації електротехнічних систем" (Дунайварош, Угорщина, 2007).

Зразки ПЕМП демонструвались на міжнародних виставках: "Уголь-Майнинг-2004" (м. Донецьк); "Східна Брама" (м. Луганськ, 2004, 2006, 2007); "Винаходи і інновації-2007" (м. Київ).

Публікації. Основні положення дисертації відображені у 55 публікаціях, серед яких 39 статей у наукових фахових виданнях ВАК України, 6 патентів України і 1 А.С. СРСР.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 479 сторінок. Робота містить 53 ілюстрації за текстом, 43 ілюстрації на 36 окремих сторінках; 2 таблиці за текстом, 3 таблиці на 7 окремих сторінках; список використаних джерел із 245 найменувань на 24 сторінках; 10 додатків на 114 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 298 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведена загальна її характеристика.

У першому розділі розглянуто суть і стан проблеми створення ПЕМП для енергозберігаючих технологій переробки сипучих, в'язких і легкоплавких речовин. Визначено, що створення ресурсоенергозберігаючих технологій має два основних напрямки. Перший з них пов'язаний з підвищенням ККД окремих елементів системи перетворення енергії, другий – ґрунтується на інтегруванні функціональних властивостей в одному агрегаті та використанні дисипативної складової енергії. Для технологічних систем, об'єднуючих процеси транспортування, нагріву, сушіння, змішування матеріалів, другий напрямок з використанням ПЕМП слід вважати найбільш перспективним. На базі огляду науково-технічної та патентної літератури, аналізу і узагальнення досліджень, що проводяться у галузі електромеханічних перетворювачів енергії з ПФР, які суміщені з виконавчим механізмом, а дисипативна складова енергії розглядається як корисна, визначені невирішені проблеми та обґрунтовано напрям досліджень.

У другому розділі сформульовані принципи і теоретичні основи створення ПЕМП. Запропоновані найбільш перспективні конструкції шнекових (рис. 1) та бістаторних заглибних ПЕМП (рис. 2).

Розроблені принципи побудови ПЕМП умовно поділені на чотири групи: структурної та функціональної інтеграції; інтеграції теплових процесів; саморегулювання у розділенні на складові корисної потужності; безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертового моменту.

Принцип структурної і функціональної інтеграції ПЕМП полягає у наступному: суміщена технічна система, яка поєднує електромеханічну, механічну і теплові підсистеми для реалізації інтегральної функції по сукупності функціональних ознак електродвигуна, виконавчого механізму та нагрівача, створюється на основі збереження спадкоємності інформації первинного джерела ЕМП, кореляції структурних ознак з генетичними операторами синтезу (схрещування, реплікації, внутрішньовидової мутації, просторової і електромагнітної інверсії).

Здійснена постановка задачі та розроблена природна геносистематика видів класу ПЕМП, що вміщує впорядковану інформацію щодо видового різноманіття як відомих, так і потенційно можливих видів класу систем, що досліджуються.

Інтеграція теплових процесів – це формування можливості добирання тепла від вузлів ПЕМП, координація теплових потоків, сформованих при цільовому перетворенні електричної енергії у теплову та каналізація її до ланок технологічного ланцюга, де саме є потрібним нагрів робочих поверхонь і об'ємів.

Першим принципом інтеграції теплових процесів є *принцип координації термоградієнта*. Основна умова ефективного використання дисипативної складової енергії ПЕМП полягає в тому, що термоградієнти у напрямку лінії зв'язку активних частин з РНОС і додатковим охолоджуючим агентом повинні мати напрямок у бік активних частин. ПФР ПЕМП – основний елемент системи, який регулює напрямок термоградієнту.

Ефективність структури ПЕМП, як теплообмінної системи з внутрішніми джерелами теплової енергії, при виконанні усіх призначених для перетворювача функцій досягається при максимально можливому перекритті на температурно-ентальпійній площині складених кривих "холодних" і "гарячих" потоків та їх економічно доцільному зближенні (*пінч-принцип*).

Принцип забезпечення замкненості теплових ланцюгів у системі "ПЕМП-РНОС" формулюється так: елементи конструкції, активні частини, теплообмінні поверхні та РНОС, як елемент ПЕМП, пов'язані таким чином, що утворюють замкнений тепловий ланцюг, а вся тепла енергія, що виробляється ПЕМП, шляхом прямої теплопередачі або рекуперації витрачається на приріст ентальпії речовини, що переробляється.

Принцип саморегулювання у розподіленні на складові корисної потужності розроблено на основі енергетичного аналізу двох станів, які характерні для ПЕМП заглибного типу (див. рис. 2): А – нерухомий стан ПФР ($s=1$), що відповідає випадку твердого стану речовини (наприклад, мазуту) або штучному режиму РСС у відповідності до вимог технологічного процесу; Б – стан прискорення обертання ПФР ($dn/dt > 0$), який відповідає переходу речовини у рідку фазу та послідовного зниження в'язкості.

Для стану А електромагнітна енергія зовнішнього ДМ та внутрішнього ГМ повністю дисипує у теплову потужність ПФР.

Частковий розподіл електромагнітної потужності на два потоки корисної потужності здійснюється у згоді з поточною величиною ковзання, яка виходячи з співвідношення ЕММ ДМ та ГМ встановлюється на рівні, який забезпечує необхідну для даного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність.

ПЕМП, до складу якого входять як мінімум два (умовно ДМ і ГМ) електромагнітних модулів, які утворені статорами і відповідними зонами ПФР, короткочасно, періодично або постійно працюють у одому з наступних режимів: а) узгоджений напрямок відповідно прямих і зворотних МРС обертових синхронних магнітних полів модулів, які створюють при взаємодії з вихровими струмами ПФР, напрямок обертання якого узгоджений з прямими МРС поля, сумарний, *кратно збільшений по відношенню до номінального, ЕММ (форсований режим)*; б) протилежний напрямок відповідно прямих і зворотних МРС обертових синхронних магнітних полів модулів, які утворюють при взаємодії з вихровими струмами ПФР різних частот, визначених співвідношенням ковзань ДМ та ГМ, ЕММ протилежних напрямків, *що формують при навантаженні ПЕМП частоту обертання з 5...10 кратним зниженням по відношенню до синхронної без застосування механічного редуктора* (рис. 3). Найбільш характерні точки робочого діапазону швидкостей ПФР: $n_{нрф}$ – межа частоти обертання для форсованого режиму; $n_{ном}$ – номінальна частота обертання на рівні 50...100 об/хв.

Сформульовано узагальнену ММ взаємопов'язаних електромагнітних, теплових та механічних процесів ПЕМП. При формуванні ММ прийняті такі припущення: взаємопов'язані електромагнітні і теплові процеси ДМ відбуваються незалежно від аналогічних процесів ГМ; використовуються двомірні польові моделі в межах перетину кожного з модулів. Узагальнена ММ складається з наступних рівнянь:

- диференціальних рівнянь рівноваги обмоток статорів модулів ПЕМП

$$U_k = r_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt}; \quad (1)$$

- диференціального рівняння ЕМП відносно векторного магнітного потенціалу

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 \gamma \dot{A}_z - \gamma \omega_R \left(y \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial x} - x \frac{\partial \dot{A}_z}{\partial y} \right) = -J_{z.стоп}; \quad (2)$$

- диференціального рівняння теплового поля відносно температури

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q; \quad (3)$$

- диференціального рівняння руху МФР ЕТМП з урахуванням силової дії усіх модулів

$$J \frac{d\omega_R}{dt} = M_{EM1}(t) - M_{EM2}(t) - M_C, \quad (4)$$

➤ рівнянь, що визначають відповідно еквіваленту щільність струмів статора, магнітну індукцію, повні магнітні потокозчеплення усіх фаз обмотки статора, питомі теплові виділення і теплову залежність електропровідності матеріалу ротора, розрахунок ЕММ за методом тензора магнітного тяжіння:

$$J_{max} = I \sqrt{2} w_{II} / S_{II}; \quad B_x = \frac{\partial A_z}{\partial x}; \quad B_y = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad \psi_k = \frac{2\ell_a w_{II}}{S_{II}} \int_{S_A} A_z(s) \cdot ds; \quad (5)$$

$$Q = J_z^2 / \gamma(T); \quad \gamma(T) = \gamma_o(1 + \alpha T); \quad M_{EM} = \frac{2 \cdot p \cdot R_\delta}{\mu_o} \int_o^\tau B_n(\ell) \cdot B_\tau(\ell) \cdot d\ell,$$

де $k = 1, 2$ – індекс модуля ($k = 1$ для ДМ; $k = 2$ для ГМ); μ , γ магнітна проникність та електропровідність ділянок середовища в межах розрахункової області; $J_{стор}$ – значення густини струму, обумовленого сторонніми ЕРС; I – діюче значення струму обмотки статора; w_{II} – кількість послідовно з'єднаних елементарних провідників у пазу; S_{II} – площа паза статора; S_A – площа інтегрування, яка складається з сумарної площі перерізу сторін усіх послідовно з'єднаних котушок фази, які мають струми одного напрямку; ℓ_a – активна довжина статора; λ , ϵ , ρ – відповідно теплопровідність, теплоємність та щільність матеріалу розрахункової області; R_δ – радіус повітряного проміжку.

Розроблено ММ ПЕМП як системи з ТДНП перетворення енергії. В рамках ТДНП будь-який перетворювач вільної енергії може бути представлений "чорною скринькою", яка перетворює вільну енергію на вході у вихідну вільну енергію (рис. 5).

Термодинамічна ефективність ПЕМП визначається як співвідношення швидкостей вироблення та споживання вільної енергії. Тому енергетичний процес необхідно розглядати на основі векторного уявлення споживаної повної потужності S і її ортогональних складових P , Q , N . Вихідною є тільки активна потужність P . Очевидно, що термодинамічна ефективність не є еквівалентом ККД, який визначається співвідношенням корисної та споживаної активних потужностей. При намаганні потужності спотворення N досягти нуля, термодинамічна ефективність приймає значення, близьке до енергетичного критерію

$$\lim_{N \rightarrow 0} \eta_{td} = K_E = \eta_E \cdot \eta_{ТП} \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

де η_E , $\eta_{ТП}$ – відповідно електричний та тепловий ККД.

У третьому розділі представлені результати дослідження процесів та характеристик ПЕМП чисельними методами з використанням розробленої узагальненої ММ. Для чисельного розв'язання системи алгебраїчних рівнянь методом скінченних елементів (МСЕ) з урахуванням характерної для МСЕ симетричності та стрічкової структури матриці системи застосовано метод Краута. Оскільки ротор ПЕМП має гладку структуру, конфігурація розрахункової області при обертанні ротора не змінюється і, відповідно, в деформації або перебудові сітки скінченних елементів нема потреби. При цьому вплив відносного переміщення електропровідного ротора і обмотки ротора на електромагнітне поле ПЕМП враховується конвективною складовою $\gamma(\vec{v} \times \text{rot } \vec{A})$. Важливою особливістю застосування МСЕ є необхідність ітераційного рішення системи алгебраїчних рівнянь відносно магнітної проникливості μ . В роботі для розв'язання нелінійних алгебраїчних рівнянь застосовано метод Ньютона-Рафсона. Практична реалізація ММ ПЕМП виконана в рамках програмно-обчислювального комплексу FEMLAB 3.1.

Особливістю функціонування шнекового ПЕМП є його робота при малій частоті обертання ПФР в умовах нестабільності моменту опору. Робочій діапазон ковзання ПФР для ДМ складає $s_{DM} = 0,85 \dots 0,95$, а для ГМ відповідно - $s_{GM} = 1,05 \dots 1,15$. Виконана оцінка розподілу вектора тензора магнітного натягу $\vec{T} = \vec{\tau}T_\tau + \vec{n}T_n$ повздовж активної поверхні ПФР (рис. 8).

Отримані розрахункові залежності ЕММ модулів та результуючого ЕММ від ковзання ПФР. На рис. 10 представлені залежності $M = f(s)$ ДМ (М1), ГМ (М2) та результуючого ЕММ для діапазону зміни ковзання $s = 0,6 \dots 1,4$ при коефіцієнті навантаження $k_n = 6$. Механічний момент навантаження обумовлений опором сипучого матеріалу і має характер, який наближається до лінійної залежності

$$M_C = M_{CO} + k_n \omega_R, \quad (7)$$

де k_n – коефіцієнт навантаження; M_{CO} – постійна складова навантаження, яка незалежна від швидкості (тертя матеріалу в приграничній зоні днища та інш.).

Крива моменту кожного модуля має вигляд, характерний для механічних характеристик АД з масивним ротором, для яких максимум моменту досягається при ковзанні $s > 1$. При такому характері навантаження номінальний режим ПЕМП реалізується при ковзанні ПФР $s = 0,88$. Рівність ЕММ модулів виникає при $s \approx 0,78$ або частоті обертання ротора 165 об/хв. (*ідеальний холостий хід*). Цей розрахунковий результат добре узгоджується з експериментальними даними, у відповідності з якими при відсутності корисного механічного навантаження (відсутність сипучого матеріалу), але наявності власного моменту опору (тертя в підшипниках та інш.) дослідний зразок 8-полюсного ПЕМП обертається з частотою 110 об/хв., тобто при $s = 0,85$. Такий режим є режимом *реального* холостого ходу.

Вплив зміни електропровідності матеріалу ПФР. Нагрівання ПФР вихровими струмами веде до істотного зменшення його електропровідності. При цьому через поверхневий ефект максимумами струмів і температури (рис. 9) виникають на внутрішній поверхні ПФР, а величина електропровідності змінюється по глибині ПФР. В результаті проведеного аналізу (рис. 7) було встановлено, що урахування зміни температури і електропровідності ПФР веде до зниження розрахункової амплітуди струмів на поверхні ПФР на 25...30% і збільшенню глибини проникнення струмів на 35...45%. В результаті за інших рівних умов розрахунковий ЕММ в діапазоні ковзань $s = 0,85 \dots 0,9$ зменшується на 10...15%.

Розроблена польова методика аналізу є універсальною і дозволяє розрахувати ЕММ без введення симетричних складових струмів ПФР прямого і зворотного порядку проходження фаз і виявити основні характеристики цього ефекту, який виявляється перш за все, при пуску ПЕМП. Відомо, що механічна характеристика АД з несиметричним ротором має важливу особливість в районі ковзання $s = 0,5$, що виявляється в істотному (у декілька разів) зниженні ЕММ в порівнянні з випадком симетричного ротора. В діапазоні робочих ковзань ПЕМП $s = 0,85 \dots 1$ вплив несиметрії параметрів ПФР виявляється значно менше (рис. 11).

У четвертому розділі розглянуті енергетичні процеси взаємодії ПЕМП з РНОС. ПЕМП являє собою термодинамічну гетерогенну відкриту систему, яка знаходиться у нерівноважному стані і енергетично взаємодіє з РНОС, яке формує для ПЕМП механічне навантаження за участю сил сухого або в'язкого тертя, пружних, гідродинамічних, кавітаційних і інших дій на рухому частину ПЕМП. Одночасно РНОС є і охолоджуючим агентом, який шляхом кондуктивно-конвективного теплообміну, пароутворення або фазового переходу тверда речовина – рідина здійснює відбір теплової енергії від активних частин ПЕМП.

Розроблені фізичні, динамічні і математичні моделі формування тепломеханічного навантаження. Встановлено, що ПЕМП являє собою двомасову систему, при-

чому момент інерції мас матеріалу є змінна величина, а стартовий рух ПФР з затверділим матеріалом супроводжується ефектами внутрішнього "зриву" і різким зниженням моменту навантаження при нарощуванні швидкості. Загальна математична модель режиму навантаження має вигляд

$$Z(t) = R(t) \cdot S(t), \quad (8)$$

де $R(t)$ – безперервна складова, яка характеризує стохастичний характер фізико-механічних властивостей матеріалу і коливання інтенсивності потоку; $S(t)$ – пульсуюча складова, яка характеризує схему функціонування і надійність ПЕМП.

У п'ятому розділі розглянута методологія проектування ПЕМП з оптимальною термодинамічною структурою. У відповідності з методологією розділу 4, з використанням початкових даних і вимог ТЗ виконуються теплові і гідродинамічні розрахунки, результатами яких повинні стати: кількість теплової енергії необхідна для сушіння, нагріву або плавлення матеріалу; час знаходження матеріалу в шнеку; геометричні розміри зовнішнього (внутрішнього) ПФР, які визначають площу поверхні при кондуктивно-конвективному теплообміні; механічну потужність і механічну навантажувальну характеристику $M_n = f(S)$. На основі принципів структурно-функціональної і теплової інтеграції вузлам ПЕМП делегують основні функції пристроїв технологічної системи і формують схему розподілу основних потоків тепло-масообміну (рис. 14). Практично всі внутрішні вузли ПЕМП є джерелами гарячих утиліт, від яких започатковуються "гарячі" потоки. Потік матеріалу є "холодним" потоком. Основним засобом інтеграції "гарячих" потоків є створення додаткового паралельного "холодного" повітряного потоку з максимально можливою кількістю гілок в зону активних частин ПЕМП. При цьому вихід в цих гілках повинен обов'язково знаходитися в зоні основного "холодного" потоку матеріалу перпендикулярно або протитоком до останнього. Формуванню таких напрямків сприяє правильний підбір перетину отворів S_1 - S_6 .

Запропонована інженерна методика розрахунку ПЕМП, яка відрізняється від діючих методик розрахунку АД процедурою і змістом аналітичних виразів для визначення головних розмірів, обмоткових даних і параметрів активних частин. Частота обертання ротора визначається різницею ЕММ ДМ і ГМ.

Визначаються головні розміри окремих модулів і питома поверхнева потужність ПФР, за величиною якої з урахуванням температури отримують значення магнітної проникності μ_2 і питомого активного опору ρ_2 ПФР. Оскільки проектна корисна потужність P_n ПЕМП формується за результатами теплових і гідродинамічних розрахунків РНОС як сума необхідної теплової $P_{тп}$ і механічної $P_{мех}$ потужностей, то з'являється унікальна можливість визначити МРС ПФР на окремий модуль

$$F_2 = k_\phi \cdot k_\Delta \cdot p \sqrt{\frac{\sqrt{S_n} \cdot \text{Re}(A) \cdot P_{км} \cdot (L_2 + \tau)}{\pi l_\delta \cdot m_1 \cdot \sqrt{\rho_2 \mu_e} \cdot f_1}}, \quad (9)$$

де $A = 1,13 + j1,85$ – коефіцієнт Неймана; $P_{км}$ – корисна потужність модуля; L_2 – довжина активної частини ротора для окремого модуля; k_ϕ , k_Δ – коефіцієнт форми поля і відносного подовження ротора відповідно; l_δ – довжина пакета статора модуля; τ – полюсна поділлка статора.

Результатом електромагнітного розрахунку стають варіативні комплекси параметрів і характеристик окремих модулів ПЕМП.

Запропоновано методику теплового розрахунку, ціллю якої є не тільки узгодження відповідності перевищень температури ізоляційних структур обраному класу нагрівостійкості, але й встановлення градієнтів температур і пінча теплових потоків у структурі ПЕМП при варіаціях його параметрів і характеристик. До складу ЕТС внесено РНОС з власними тепловиділеннями P_{1M} , P_{2M} і відповідними середніми температурами перегріву ΔT_8 , ΔT_9 (рис. 15). Розв'язання системи рівнянь, які відповідають ЕТС, дає змогу встановити середні перевищення температур над температурою T_{BO} охолоджуючого повітря і величини теплових потоків Q між елементами ПЕМП. Для системи теплообміну ПЕМП на температурно-ентальпійній площині здійснюється побудова кривих "холодних" і "гарячих" потоків (рис. 16).

У шостому розділі наведені результати експериментальних досліджень і промислових випробувань ПЕМП різних конструкцій. Розроблено метод експериментального визначення залежностей $M = f(s)$ і $M = f(t)$ безпосередньо в промислових умовах. Мала частота обертання і гладка внутрішня поверхня ПФР дозволяє використовувати для вимірювання напруженості електричного поля (НЕП) спеціально розроблену конструкцію потенціальних зондів, що встановлені в відкритих пазах статора, де укладено початки фаз обмотки. Вимірювання частоти обертання ПФР і результуючого вектора магнітного поля виконується за допомогою давачів Холла, які розміщені у повітряному проміжку. При цьому швидкість обертання вектора поля визначається по тривалості появи максимумів сигналу на перетворювачах Холла, які розташовані на нормовану дистанцію в повітряному проміжку. Основний елемент для реєстрації миттєвих значень НЕП, струмів і напруг в ланцюгах живлення – USB-осцилограф на базі мікроконтролера С8051F321 (розрядність АЦП - 10 бит, частота дискретизації – 0,01 Гц...200 кГц). Запропоновано такий алгоритм обробки даних в перехідних режимах ПЕМП, який складається з двох модулів і живленням від одного джерела:

а) визначається амплітуда НЕП контурів вихрових струмів на поверхні ПФР для кожного моменту часу у трьох еквівалентних фазах ПФР;

б) визначаються еквівалентні хвильові опори і фаза комплексного струму за допомогою модифікованих універсальних кривих залежностей відносин хвильових параметрів ПФР $R_o(x_o) = f(E_{mi} / \sqrt{\omega_1 \cdot s}; T)$

$$Z_2 = R_B(R_o + jX_o); \varphi_2 = \arctg \frac{X_o}{R_o}, \quad (10)$$

де $R_B = X_B = \sqrt{\omega \mu_m / 2 \cdot \gamma_{2o}}$ - базові хвильові опори при умовах ненасиченості сталі і температури 20°C;

в) визначаються діюче значення і далі послідовно комплексна амплітуда і миттєве значення струму ПФР;

г) визначається миттєве значення результуючого ЕММ ПЕМП

$$M_{ip} = M_{Di} + M_{Gi} = \left[(i'_{pD})^2 \frac{R'_{2D}}{s_D} - (i'_{pT})^2 \frac{R'_{2T}}{(2-s_D)} \right] \frac{m_i \cdot p}{\omega_i}. \quad (11)$$

На основі методології створення ПЕМП, яка викладена в розділі 5, на ВАТ "Первомайський електромеханічний завод ім. К.Маркса" були розроблені і виготовлені дослідні партії шнекових ПЕМП, що увійшли до складу електричних комплексів для сушіння вугільних шламів і концентратів і успішно пройшли промислові випробування на ЗАТ "Селідовська ЦЗФ" і ТОВ "ЦЗФ Кондратівська". Порівняльний аналіз величин, отриманих при експериментальних дослідженнях, свідчить про те, що розбіжність з розрахунковими даними, які отримані за методикою інженерного розрахунку (розділ 5), а також результатами чисельного моделювання (розділ 3), не перевищують 7,5%.

Досліджена стійкість шнекового ПЕМП у динамічному режимі при періодичній зміні M_c . Встановлено, що ознаками динамічно стійкого режиму ПЕМП є: повторення за кожний період навантаження коливань миттєвих значень ЕММ і ковзань; позитивна похідна середнього моменту $\partial M / \partial S$; аналогія у характері кривих ЕММ і ковзання. Усталений режим коливань настає після трьох обертів ПФР ($\gamma = 6\pi$).

Розглянуті економічні аспекти використання ПЕМП технологічного призначення. Порівняння масогабаритних характеристик комплексу обладнання діючих технологій сушіння і технологій на базі ПЕМП дозволяє зробити наступні висновки: поєднання виконавчого механізму, нагрівача і електропривода в ПЕМП забезпечує зниження маси і габаритів комплексу майже вдвічі; використання режиму протиключення модулів ПЕМП виключає необхідність використання механічного редуктора.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розробці основ теорії, принципів побудови та методології проектування поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення. Сукупність наукових положень і технічних розробок, представлених в дисертації, складає обґрунтоване вирішення важливої науково-практичної проблеми створення перспективного класу високоефективних електромеханічних перетворювачів з повним використанням дисипативної складової енергії і поліфункціональними властивостями.

1. На даний час при створенні енергоресурсозберігаючих технологій існує тенденція суміщення електромеханічних перетворювачів з виконавчим механізмом і використання дисипативної складової енергії. У зв'язку з цим актуальним є розробка нових підходів і нової методології проектування при створенні поліфункціональних електромеханічних перетворювачів, в основу якої покладена структурна, функціональна і теплова інтеграція, нетрадиційний спосіб оцінки енергетичної ефективності, модульне формування результуючих механічних характеристик у широкому діапазоні зміни ковзання з урахуванням усього спектру вищих гармонік.

2. Розроблено принцип структурної і функціональної інтеграції ПЕМП, згідно якого суміщена технічна система, що поєднує електромеханічну, механічну і теплові підсистеми для реалізації інтегральної функції по сукупності функціональних ознак привідного двигуна, виконавчого механізму та нагрівача, створюється на основі збереження спадкоємності інформації первинного джерела електромагнітного поля, кореляції структурних ознак з генетичними операторами синтезу. Здійснена постановка задачі та розроблена геносистематика видів класу ПЕМП. Вперше запропонована

генетична модель внутрішньої структури виду циліндричних повздовж-симетричних ПЕМП з обертовим рухом робочого органу, які використані при розробці нових технічних рішень.

3. Розроблені принципи теплової інтеграції ПЕМП, що формують схему добирання тепла від джерел дисипативної енергії, координацію теплових потоків та каналізацію теплової енергії до ланок технологічного ланцюга, де саме є потрібним нагрів робочих поверхонь і об'ємів. Встановлено, що оптимальність ПЕМП, як теплообмінної системи з внутрішніми джерелами теплової енергії, досягається при максимально можливому перекритті на температурно-ентальпійній площині складених кривих "холодних" і "гарячих" потоків та їх економічно доцільному зближенні (пінч-принцип), а всі елементи в системі "ПЕМП – навантажувально-охолоджуюче середовище" пов'язані таким чином, що утворюють замкнений ланцюг.

4. Розроблено принцип саморегулювання у перетворенні електромагнітної енергії ПЕМП, згідно до якого частковий розподіл на корисні потоки теплової і механічної енергії здійснюється у згоді з поточною величиною ковзання, яка виходячи з співвідношення електромагнітних моментів двигунового і гальмівного модулів ПЕМП встановлюється на рівні, що забезпечує приблизно однакові теплові потоки для різних технологічних режимів за рахунок зміни швидкості передачі теплової енергії.

5. Розроблено принципи безредукторного забезпечення частоти обертання з 5...10 кратним зниженням по відношенню до синхронної і кратного посилення обертового моменту ПЕМП, які базуються на використанні взаємодії прямих і зворотних полів двигунового і гальмівного модулів, зміни напрямку обертання поля статора гальмівного модуля і тривалості його дії.

6. Розроблено узагальнену коло-польову ММ взаємопов'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів в ПЕМП, що дозволяє аналізувати сталі і динамічні режими роботи перетворювача з урахуванням всієї сукупності основних чинників: складної конфігурації активної зони, нелінійності фізичних властивостей матеріалів, ефектів витиснення вихрових струмів в масивному роторі з урахуванням обертового характеру магнітного поля, реального нагріву елементів конструкції і умов теплообміну з навантажувально-охолоджуючим середовищем, особливостей розподілу електромагнітних сил і моментів. Встановлено вплив нагрівання ротора на глибину проникнення в нього вихрових струмів і ефект "закручування" вихрових ліній поля ротора, що обумовлений обертовим характером електромагнітного поля. Встановлено, що урахування зміни електропровідності ротора, викликаного його нагріванням вихровими струмами, веде до зниження розрахункової амплітуди струмів на поверхні ротора на 25...30% і збільшенню глибини проникнення струмів на 35...45%. В результаті за інших рівних умов розрахунковий електромагнітний момент в діапазоні робочих ковзань $s = 0,85...0,9$ зменшується на 10...15%.

7. Розроблено польову методикку аналізу впливу на механічні характеристики ПЕМП несиметрії параметрів ротора без введення симетричних складових струмів прямого і зворотного порядку проходження фаз. Встановлено, що несиметрія ротора не веде до погіршення умов пуску ПЕМП, але жорсткість реальної механічної характеристики збільшується на 5...7% у порівнянні з розрахунковими характеристиками без врахування несиметрії.

8. Теоретично і експериментально обґрунтовано умови оптимального пуску ПЕМП при різному характері навантаження. Встановлено, що найбільш ефективною є двоступенева схема пуску, яка в залежності від характеру пускового навантаження реалізується або шляхом одночасного, узгодженому за електромагнітними моментами запуску двигунового і гальмівного модулів з наступним реверсом останнього, або шляхом затримки включення гальмівного модуля на певний час, достатній для досягнення ротором рівня номінального ковзання.

9. Вперше розроблено ММ ПЕМП як системи з нерівновагими термодинамічними процесами перетворення енергії, що дозволяє проводити оптимізацію внутрішньої структури ПЕМП за максимумом термодинамічної ефективності і вихідної потужності. Встановлено, що термодинамічна ефективність при намаганні потужності спотворення досягати нуля приймає значення, близьке до енергетичного критерію, який являє собою добуток електричного ККД, теплового ККД і коефіцієнта потужності. Розроблені фізичні, динамічні і математичні моделі енергетичних процесів взаємодії ПЕМП з робочим навантажувально-охолоджуючим середовищем.

10. Удосконалено методику теплових розрахунків при проектуванні ПЕМП, що дозволяє вести не тільки оцінку відповідності перевищень температури ізоляційної структури обраному класу нагрівостійкості, але й визначити градієнти температур, ефективність теплообміну і пінч теплових потоків у структурі ПЕМП при варіаціях його параметрів і характеристик.

11. Розроблено і реалізовано методологію проектування ПЕМП, яка містить наступні нові методики: термодинамічні розрахунки навантажувально-охолоджуючого середовища; структурно-функціональна і тепла інтеграція вузлів; об'єктно-орієнтоване проектування модулів; теплові розрахунки за методом еквівалентних теплових схем, модифікованих на основі пінч-принципів; оптимізація за термодинамічною ефективністю на основі феноменологічних співвідношень. Використання цієї методології дозволяє підвищити загальний ККД комплексів технологічного обладнання на 18...25%, у тому числі електричний ККД ПЕМП – на 5...10%. Розроблена програмна реалізація об'єктно-орієнтованого проектування на мові програмування C++, середовище розробки – програма "Microsoft Visual Studio.Net".

12. Розроблено і реалізовано метод експериментального визначення електромагнітного моменту і механічних характеристик ПЕМП та інших електричних машин з масивним ротором, які не мають вихідного кінця валу, безпосередньо в промислових умовах.

13. Теоретично обґрунтовані процеси утворення вищих гармонік у повітряному проміжку ПЕМП при періодичній зміні умов охолодження масивного ротора. Запропоновано спосіб експериментального визначення вищих гармонік магнітного поля ПЕМП, які спричинені наявністю пазів на статорі, насиченням магнітного кола, статичним і динамічним ексцентриситетом, а також температурними коливаннями питомого активного опору і відносної магнітної проникності ділянок масивного ротора. На відміну від методик проектування традиційних АД увесь спектр субгармонік і вищих гармонік використовується в ПЕМП для формування оптимальної корисної теплової і механічної потужностей.

14. Основні результати дисертації впроваджені на ВАТ "Первомайський електромеханічний завод ім. К.Маркса", Новомосковському електромеханічному заводі

Тулської області, ЗАТ "ЦЗФ Селідовська" і ТОВ "Кондратівська ЦЗФ". Основні положення роботи використовуються у навчальному процесі за фахом 092206 "Електричні машини і апарати" в Донбаському державному технічному університеті, м. Алчевськ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Заблодський М.М. Теплові розрахунки електротехнічних устаткувань: Навч. посібник. – Алчевськ: ДГМІ, ВПЦ "Ладо", 2003. – 289 с.

2. Заблодский Н.Н., Шадрин С.В., Плюгин В.Е. Основные принципы создания электротепломеханических нагревательных устройств // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ: СУДУ, 1998. - № 4. – С. 113-116.

Здобувач сформулював ідею і основні принципи створення двостаторного електромеханічного нагрівача з суміщенням функцій.

3. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Электромагнитные и тепловые процессы вращающихся электромеханических нагревателей // Вестник Харьковского государственного политехнического университета, тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика". – Харьков, 2000. – Вып. № 84. – С. 93-96.

Здобувач розробив математичні моделі електромеханічного нагрівача.

4. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Чан Дай Шон. Энергетическая эффективность вращающихся электромеханических нагревателей // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – К., 2000. - Ч. 6. – С. 74-77.

Здобувач виконав узагальнення експериментальних даних та запропонував аналітичні співвідношення для оцінки енергетичної ефективності.

5. Заблодский Н.Н., Дорофеев В.Н., Плюгин В.Е. Высокоэффективные погружные электротепломеханические нагреватели для легкоплавких и сыпучих материалов // Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического ин-та. – Алчевск: ДГМІ, 2000. - Вып. 11. – С. 158-167.

Здобувач запропонував принципи створення електромеханічних нагрівачів і математичну модель тепломасообміну.

6. Заблодский Н.Н., Захарченко П.И., Плюгин В.Е. Математическое моделирование процессов тепломассообмена и гидродинамики вращающегося электромеханического нагревателя // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", тем. вип. "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика". – Харків, 2001. – № 16. – С. 77-80.

Здобувач отримав основні вирази і співвідношення процесів формування характеристики механічного навантаження заглибного ЕТМП.

7. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Чан Дай Шон. Математическая модель вращающегося электромеханического нагревателя в основных режимах работы // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Київ, 2002. – Ч. 5. – С. 71-76.

Здобувач запропонував математичну модель заглибного електромеханічного нагрівача та методику розрахунку приведенного опору.

8. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Учет фазового перехода при моделировании теплового поля электромеханического нагревателя в среде легко-

плавкого материала // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ, 2002. - № 4 (50). – С. 175-179.

Здобувач отримав основні співвідношення для розрахунку часу фазового переходу при моделюванні теплового поля електромеханічного нагрівача.

9. Заблодский Н.Н. Формирование спектра высших гармоник в воздушном зазоре электротепломеханического преобразователя // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", тем. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – Харьков, 2002. – № 14. – С. 22-27.

10. Заблодский Н.Н., Зеленев А.Б., Плюгин В.Е. Электромеханические преобразователи с внешним массивным ротором // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка. – 2002. – Вип. 58. – С. 69-71.

Здобувач запропонував математичну модель динамічних режимів і схему заміщення електромеханічного перетворювача з суміщеними обмотками.

11. Заблодский Н.Н. Формирование динамических и энергетических характеристик электротепломеханических преобразователей // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", серия "Электротехника, электроника и электропривод", вып. 12, том 2 "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2002. – С. 432-433.

12. Заблодский Н.Н., Зеленев А.Б., Плюгин В.Е. и др. Вопросы создания и применения электротепломеханических преобразователей // Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического ин-та. – Алчевск: ДГМИ, ИПЦ "Ладо", 2002. – Вып. 15. – С. 178-182.

Здобувач запропонував технічну ідею формування механічної характеристики двостаторного електротепломеханічного перетворювача.

13. Заблодский Н.Н. Интеграция тепловых процессов в энергоемких технологических процессах с применением электротепломеханических преобразователей энергии // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: Вид. НТУ "ХПІ", 2003. - № 4. – С. 41-45.

14. Заблодский Н.Н., Чан Дай Шон, Заблодский С.Н. Энергетическая и функциональная эффективность применения режима противовключения электромеханических модулей // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: Вид. НТУ "ХПІ", 2003. - № 4. – С. 105-109.

Здобувач теоретично обґрунтував технічну ідею використання режиму противключення для формування механічних характеристик.

15. Заблодский Н.Н. Регуляция процессов преобразования энергии в многомодульной электротепломеханической системе // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт", тем. вып. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2003. – Вып. 10. – Т. 2. - С. 374-375.

16. Заблодский Н.Н. Формирование выходных характеристик многомодульной электротепломеханической системы // Електротехніка і електромеханіка. - Харків, 2003. - № 4. – С. 32-35.

17. Заблодский Н.Н. Моделирование динамических режимов и теплообменных процессов электротепломеханических преобразователей // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – К., 2004. – Ч. 6. – С. 34-37.

18. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Захарченко П.И. Механические характеристики шнекового электротепломеханического преобразователя // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. - № 4. – С. 23-26.

Здобувач розробив програму та узагальнив результати експериментальних випробувань шнекового електротепломеханічного перетворювача.

19. Шинкаренко В.Ф., Заблодский Н.Н. Генетическое моделирование и структура генома электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – Харьков: Технологический центр, 2004. - № 2 (8). – С. 44-51.

Здобувач обґрунтував технічну ідею використання генетичного моделювання для створення електротепломеханічних перетворювачів.

20. Заблодский Н.Н. Нелинейность тепломеханических нагрузок шнекового электротепломеханического преобразователя // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - № 1. – С. 41-43.

21. Заблодский Н.Н. Динамическая модель и характеристика режима нагружения шнековой электротепломеханической системы // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Тем. вып. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2005. – Вып. № 45. – С. 315-318.

22. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Объектно-ориентированный подход к расчету и проектированию электротепломеханических преобразователей // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – Вып. 19. – С. 383-393.

Здобувач запропонував концепцію об'єктно-орієнтованого підходу до проектування електротепломеханічних перетворювачів.

23. Заблодский Н.Н. Определение термодинамических параметров неравновесных процессов преобразования энергии в электротепломеханических преобразователях // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – Вып. 19. – С. 373-382.

24. Заблодский Н.Н., Лущик В.Д., Кулешов В.В. Обеспечение устойчивого режима работы шнековой электротепломеханической системы в области низких частот вращения // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2005. – Вып. 20. – С. 379-392.

Здобувач обґрунтував математичну модель режиму навантаження і запропонував параметричний спосіб підвищення динамічної стійкості системи.

25. Заблодский Н.Н. Механические характеристики шнекового электротепломеханического преобразователя при асимметрии массивного ротора // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт": Проблемы усовершенствования электрических машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – № 48. – С. 52-57.

26. Заблодский Н.Н. Модель электротепломеханического преобразователя как системы с неравновесными термодинамическими процессами преобразования энер-

гии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук, 2006. – Вип. 3/2006 (38). Ч. 2. – С. 117-121.

27. Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Овчаров А.А. Оценка влияния термомеханических изменений в конструкции на параметры и характеристики электротепломеханических преобразователей энергии // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – Вып. 21. – С. 222-229.

Здобувач запропонував методику оцінки впливу термомеханічних змін в конструкції на параметри і характеристики електротепломеханічного перетворювача.

28. Заблодский Н.Н. Исследование распределения электромагнитных и тепловых полей в электротепломеханическом преобразователе энергии // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. - Вып. 21 – С. 231-248.

29. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Моделирование переходных процессов в погружных электротепломеханических преобразователях энергии при неподвижном роторе // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2006. – Вып. 22. – С. 221-230.

Здобувач розробив математичну модель та виконав аналіз перехідних процесів пуску заглубного електротепломеханічного перетворювача.

30. Заблодский Н.Н., Овчаров А.А., Филатов М.А. Пусковые режимы шнекового электротепломеханического преобразователя // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ, 2006. – Вип. 4/2006. – Ч. 1. – С. 29-31.

Здобувач виконав моделювання пускових режимів та узагальнив результати експериментальних досліджень двохмодульного шнекового електротепломеханічного перетворювача.

31. Васьковский Ю.Н., Заблодский Н.Н. Моделирование полей и характеристик электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2006. – Ч. 7. – С. 41-44.

Здобувач запропонував узагальнену математичну модель електромагнітних, теплових і механічних процесів електротепломеханічного перетворювача.

32. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. Проектирование электротепломеханических преобразователей для переработки сыпучих материалов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2006. – Ч. 1 – С. 106-111.

Здобувач обґрунтував методику визначення електромагнітних параметрів масивного ротора та узагальнив результати моделювання теплових процесів.

33. Заблодский Н.Н. Модифицированный метод эквивалентных тепловых схем для анализа процессов в электротепломеханических преобразователях // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського: Наукові праці КДПУ. - Кременчук, 2007. – Вип. 3/2007 (44). Ч. 1. – С. 121-124.

34. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Филатов М.А. Метод экспериментального определения электромагнитного момента электротепломеханического преобразова-

теля // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського: Наукові праці КПДУ. - Кременчук, 2007. – Вип. 3. – Ч. 2. – С. 126-129.

Здобувач теоретично обґрунтував метод експериментального визначення електромагнітного моменту електротепломеханічного перетворювача.

35. Заблодский Н.Н. Взаимодействие шнекового электротепломеханического преобразователя и нагрузочно-охлаждающей среды // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. - № 3. – С. 25-28.

36. Заблодский Н.Н., Овчаров А.А., Филатов М.А. Экспериментальная оценка энергетических процессов в массивном роторе шнекового электротепломеханического преобразователя энергии // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. - № 4. – С. 22-24.

Здобувач запропонував методику і узагальнив результати експериментальних досліджень енергетичних процесів у масивному роторі ЕТМП.

37. Заблодский Н.Н., Коцемир И.А., Стройников В.Г. Система импульсного управления реверсирования и форсировки электротепломеханических преобразователей технологического назначения // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – Вып. 23. – С. 324-328.

Здобувач сформулював технічну ідею форсованих режимів роботи електротепломеханічних перетворювачів.

38. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Лупанов А.А. и др. Математическое моделирование распределения теплового поля в системе "легкоплавкая среда" – электротепломеханический преобразователь // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. - № 23. – С. 329-337.

Здобувач розробив математичну модель та алгоритм програми моделювання теплового поля.

39. Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Смагина И.А. и др. Динамика и гармонический состав токов полифункциональных электротепломеханических преобразователей энергии // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического ун-та. – Алчевск: ДонГТУ, 2007. – Вып. 24. – С. 370-383.

Здобувач розробив методику експериментального визначення гармонічного складу струмів електротепломеханічного перетворювача.

40. Устройство для удаления влаги из оболочки электрической машины: А.с. 1431632 А1. СССР. МКИ 4 Н02К9/26 / Н.М.Шакула, П.И.Захарченко Н.Н.Заблодский и др. - № 4224009/24-07; Заявл. 27.02.87; Зарег. 15.06.88 (для служ. пользов). – 5 с.

Здобувач виконав теоретичне обґрунтування електромагнітних і тепломасообмінних процесів при роботі пристрою.

41. Пат. 945 України, МКИ 5 Н02G1/16. Вулканізатор для ремонту кабелів / М.М.Шакула, В.І.Серов, М.М.Заблодський та інші. - № 4422919/SU; Заявл. 04.04.88; Опубл. 30.04.93, Бюл. № 2. – 9 с.

Здобувач сформулював технічну ідею вузлів індукційного нагріву і механічного тиску.

42. Пат. 39226 України, МКІ 7 Н05В6/10. Заглибний електронагрівач / М.М.Заблодський, В.І.Веремеєнко, В.М.Бондарев - № 98031637; Заявл. 31.03.1998; Опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5. – 6 с.

Здобувач сформулював основну технічну ідею двостаторного заглибного обертювального електронагрівача.

43. Пат. 49409 України, МКІ 7 Е21В37/00. Пристрій для видалення парафіну зі стінок нафтогазових свердловин / М.М.Заблодський, В.М.Дорофєєв, В.Ф.Шинкаренко та інш. - № 2001128246; Заявл. 03.12.2001; Опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10. – 4 с.

Здобувач сформулював основну технічну ідею електротепломеханічного перетворювача для очищення нафтогазових свердловин.

44. Декларац. пат. на корисну модель № 5517 України, МКІ 7 Н02G1/14, Н02G1/16. Електротепломеханічний пристрій для ремонту кабелів / М.М.Заблодський - № 20040605123; Заявл. 29.06.2004; Опубл. 15.03.2005, Бюл. № 3. – 5 с.

45. Пат. 5042 України, МКІ 7 F26B17/18. Шнековий сушильний апарат / М.М.Заблодський, В.М.Дорофєєв, В.Ф.Шинкаренко та інш. - № 2001128244; Заявл. 03.12.2001; Опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1. – 4 с.

Здобувач сформулював основну технічну ідею шнекового електротепломеханічного перетворювача.

46. Пат. 75771 України, МПК (2006) Н 05В6/10. Заглибний електронагрівач / М.М.Заблодський, В.М.Дорофєєв, В.Ф.Шинкаренко та інш. - № 20040605162; Заявл. 29.06.2004; Опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. – 5 с.

Здобувач теоретично обґрунтував ідею розміщення короткозамкненої обмотки у лопатях масивного ротора заглибного електронагрівача.

47. Заблодский Н.Н., Шадрин С.В., Заблодский С.Н. Аналого-цифровая диагностическая система контроля изоляции электромеханических устройств // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інформатизації: Науковий журнал. – Луганськ, 1998. – № 1. – С. 50-59.

Здобувач теоретично обґрунтував концепцію діагностичної системи контролю ізоляції статорних обмоток асинхронних двигунів і кабелю живлення.

48. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Обеспечение безопасных свойств погружных электромеханических нагревателей // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Санкт-Петербург, 1999. - № 10 (22). – С. 76-77.

Здобувач сформулював основні принципи забезпечення безпечних властивостей заглибних електромеханічних нагрівачів.

49. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Анализ безопасных способов борьбы с парафино-асфальтовыми отложениями в нефтяных скважинах // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Санкт-Петербург, 2000. - № 2 (26). – С. 111-113.

Здобувач обґрунтував концепцію безпечного використання заглибного електромеханічного нагрівача у нафтовій свердловині.

50. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Моделирование распределения теплового поля замкнутой системы "легкоплавкая среда" – нагреватель //

Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Санкт-Петербург, 2001. - № 1 (37). – С. 90-93.

Здобувач розробив математичну модель системи та узагальнив результати досліджень.

51. Заблодский Н.Н., Новиков В.А. К вопросу выбора проектных критериев и норм безопасности взрывозащищенного нагревательного оборудования // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Санкт-Петербург, 2002. - № 3 (51). – Т. 7. – С. 72-74.

Здобувач запропонував концепцію вибору проектних критеріїв вибухобезпечного індукційного електротермічного обладнання.

52. Заблодский Н.Н., Новиков В.А. Концепция обеспечения безопасного температурного режима индукционных нагревательных устройств // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – Санкт-Петербург, 2002. - № 7. – Т. 7. – С. 80-83.

Здобувач запропонував концепцію забезпечення безпечного температурного режиму шнекового електротепломеханічного перетворювача.

53. Заблодский Н.Н., Бойчук В.М. Об одном методе расширения зоны уверенной работы магнитоуправляемых датчиков // Технічні засоби автоматизації та управління: IV Українська конференція з автоматичного управління "Автоматика 97". Черкаси, 23-28 червня 1997 р. – Черкаси: ЧІТІ, 1997. – Т. 4. – С. 22.

Здобувач сформулював технічну ідею підвищення ефективності роботи магнітокермованих датчиків.

54. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Заблодская Т.П. Эффективность и безопасность нагревательных устройств в процессах переработки и транспортировки нефтепродуктов и сыпучих веществ // Безопасность жизнедеятельности на пороге XXI века: Материалы международной конференции. Алушта, 20-24 сентября 1999 г. – Алчевск: ДГМИ, 1999. – С. 151-152.

Здобувач обґрунтував вимоги, що забезпечують ефективну та безпечну експлуатацію електротепломеханічних пристроїв технологічного призначення.

55. Zablodsky N.N. Methodology and basis principles of creation of multifunctional electro-thermo-mechanical converters of energy for technological setting // Strategy of Quality in Industry and Education. III International Conference. Varna, Bulgaria, June, 1-8 2007. – Varna: Techn. University. – 2007. – Proceedings, vol. 1. – P. 226-228.

АНОТАЦІЇ

Заблодський М.М. Науково-технічні основи створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення. – Рукопис.

Дисертація на здобування наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, 2008.

Дисертація присвячена проблемі створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення. Розроблені теоретичні основи і принципи побудови нового класу електромеханічних перетворювачів з масивним ротором, де передбачено використання дисипативної складової енергії активних ча-

стин в технологічних процесах. Запропонована генетична модель внутрішньої структури виду циліндричних повздовж-симетричних електромеханічних перетворювачів і математична модель перетворювача як системи з нерівновагими термодинамічними процесами перетворення енергії. На основі пінч-принципів запропоновано модифікований метод еквівалентних теплових схем. Теоретично обґрунтовані процеси утворення вищих гармонік у повітряному проміжку електромеханічного перетворювача при періодичній зміні умов охолодження порожнистого феромагнітного ротора. Отримані експериментальні дані, які підтверджують вірогідність прийнятих математичних моделей і технічних рішень. Основні результати досліджень використані при виконанні 7 держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт, у науково-виробничих фірмах та в навчальному процесі.

Ключові слова: поліфункціональний електромеханічний перетворювач, систематика, порожнистий феромагнітний ротор, моделювання електромагнітних процесів, теплова характеристика, енергетичні параметри, електромагнітний момент.

Заблодский Н.Н. Научно-технические основы создания полифункциональных электромеханических преобразователей технологического назначения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, 2008.

Диссертация посвящена проблеме создания полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) технологического назначения. Разработаны принципы структурной и функциональной интеграции электромеханического преобразователя, в соответствии с которым совмещенная техническая система, объединяющая электромеханическую, механическую и тепловую подсистемы для реализации интегральной функции по совокупности функциональных признаков приводного двигателя, исполнительного механизма и нагревателя, создается на основе сохранения унаследования информации первичного источника электромагнитного поля, корреляции структурных признаков с генетическими операторами синтеза. Разработаны принципы тепловой интеграции ПЭМП, с помощью которых формируется схема сбора тепла от узлов ПЭМП, выполняется координация тепловых потоков и канализация тепловой энергии к участкам технологической цепи, где требуется нагрев рабочих поверхностей и объемов. Установлено, что оптимальность ПЭМП как теплообменной системы с внутренними источниками тепловой энергии, достигается при максимально возможном перекрытии на температурно-энтальпийной плоскости составных кривых "холодных" и "горячих" потоков и их экономически целесообразном сближении (пінч-принцип). Разработаны принципы безредукторного обеспечения частоты вращения с 5...10 кратным снижением по отношению к синхронной и кратного усиления вращающего момента ПЭМП, которые основаны на использовании взаимодействия прямых и обратных полей двигательного и тормозного модулей, изменения направления вращения поля статора тормозного модуля и длительности его действия.

Теоретически обоснованы процессы образования высших гармоник в воздушном зазоре ПЭМП при периодическом изменении условий охлаждения массивного ротора. В отличие от методик проектирования традиционных асинхронных двигате-

лей весь спектр субгармоник и высших гармоник используется в ПЭМП для формирования оптимальной полезной тепловой и механической мощностей. Разработана обобщенная цепе-полевая математическая модель (ММ) взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и механических процессов в ПЭМП, позволяющая анализировать установившиеся и динамические режимы работы преобразователя с учетом всей совокупности основных факторов. Установлено влияние нагрева ротора на глубину проникновения в него вихревых токов и эффект "закручивания" вихревых линий поля ротора, обусловленный вращающимся характером электромагнитного поля. Установлено, что учет изменения электропроводности ротора при нагреве его вихревыми токами ведет к снижению расчетной амплитуды токов на поверхности ротора на 25...30% и увеличению глубины проникновения на 35...45%. В результате при прочих равных условиях расчетный электромагнитный момент в диапазоне рабочих скольжений (0,85...0,9) уменьшается на 10...15%. Разработана полевая методика анализа влияния на механические характеристики ПЭМП несимметрии, параметров ротора без введения симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательности. Установлено, что несимметрия ротора не ведет к ухудшению условий пуска ПЭМП, но увеличивает жесткость реальной механической характеристики на 5...7% в сравнении с расчетными характеристиками без учета несимметрии.

Разработана ММ ПЭМП как системы с неравновесными термодинамическими процессами преобразования энергии, позволяющая проводить оптимизацию внутренней структуры ПЭМП по максимуму термодинамической эффективности и выходной мощности. Установлено, что термодинамическая эффективность при устремлении мощности искажения к нулю принимает значение, близкое к энергетическому критерию, представляющему собой произведение электрического КПД, теплового КПД и коэффициента мощности.

Усовершенствован метод эквивалентных тепловых схем, позволяющий вести не только оценку соответствия превышений температуры изоляционной структуры выбранному классу нагревостойкости, но и определять градиенты температур, эффективность теплообмена и пинч тепловых потоков ПЭМП при вариациях его параметров и характеристик.

Разработана и реализована методология проектирования ПЭМП, содержащая новые методики: термодинамические расчеты нагрузочно-охлаждающей среды; структурно-функциональной и тепловой интеграции узлов; объектно-ориентированное проектирование модулей; оптимизация по термодинамической эффективности на основе феноменологических соотношений. Использование этой методологии позволяет повысить общий КПД комплекса технологического оборудования на 18...25%, в том числе электрической КПД ПЭМП – на 5...10%. Разработана программная реализация объектно-ориентированного проектирования на языке программирования C++.

На натурных образцах ПЭМП получены экспериментальные данные, которые подтверждают достоверность математических моделей и технических решений. Основные результаты исследований использованы при выполнении 7 госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских работ, в научно-производственных фирмах и в учебном процессе.

Ключевые слова: полифункциональный электромеханический преобразователь, систематика, полый ферромагнитный ротор, моделирование электромагнитных процессов, тепловая характеристика, энергетические параметры, электромагнитный момент.

Zablodsky N.N. Scientific and technical bases of creation of multifunctional electro-mechanical converters of the technological setting. - Manuscript.

Thesis is for Technical Sciences Doctor's degree, specialty 05.09.01 – Electrical Machines and Apparatus. – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2008.

The thesis is devoted to the problem of multifunctional electro-mechanical converters creation of the technological setting. Theoretical bases and principles of construction of new class of electro-mechanics converters with a massive rotor, where the use of dissipative energy of active parts in technological processes foreseen, are developed. The genetic model of underlying structure of type of cylinder longitudinal-symmetric electro-mechanical converters and a mathematical model of converter, as a system with the unstable thermodynamics conversation of energy is offered. On the basis of pinch-principles the modified method of equivalent thermal charts is offered. Processes of formation of higher accordions in the air interval of electro-thermo-mechanical converter at the periodic change of terms of cooling of hollow ferromagnetic rotor are theory grounded. Experimental information which confirm authenticity of the accepted mathematical models and technical decisions is got. Basic results of researches in the 7 state-budgets projects and economic-contractual researches works, in scientific-research firms and in an educational process are implemented.

Keywords: polyfunctional electro-mechanical converter, systematization, hollow ferromagnetic rotor, modeling electromagnetic processes, thermo-characteristic, energy parameters, electromagnetic torque.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЕМП	- поліфункціональний електромеханічний перетворювач;
ЕМП	- електромагнітне поле;
ЕММ	- електромагнітний момент;
КЗ	- коротке замкнення;
ПФР	- порожнистий ферромагнітний ротор;
РНОС	- робоче навантажувально-охолоджуюче середовище;
ОП	- охолоджуюче повітря;
АД	- асинхронний двигун;
РСС	- режим стоянки під струмом;
ТП	- температурне поле;
ДМ	- двигуновий модуль;
ГМ	- гальмівний модуль;
ВГ	- вищі гармоніки;
ООП	- об'єктно-орієнтоване проектування;
ТДНП	- термодинаміка нерівноважних процесів;
КЗО	- короткозамкнені обмотки;
ПП	- перехідний процес;
ЕТС	- еквівалентна теплова схема.