

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"Л Ъ В І В С Ь К А П О Л І Т Е Х Н І К А"

На правах рукопису

М А К А Р Ч У К
Олександр Володимирович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У ЯВНОПОЛЮСНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 1996

ДВ 35, 197

Дисертація ЛННБ України ім. В. Стефаника

Робота виконана в Державному університеті



00754023 (L)

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК

доктор технічних наук, професор Роман Володимирович Фільд

ОФІЦІЙНІ ОПОНЕНТИ:

- 1. Доктор технічних наук, професор Лесник Володимир Акимович
- 2. Кандидат технічних наук Кекот Олег Володимирович

ПРОВІДНА ОРГАНІЗАЦІЯ:

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

Захист дисертації відбудеться "24" червня 1996 року на засіданні спеціалізованої Ради К04.06.17 при Державному університеті "Львівська політехніка" (головний навчальний корпус, аудиторія 114), о 14.00 год за адресою: 290646, м. Львів-13, вул. С.Бандери, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Державного університету "Львівська політехніка" (вул. Професорська, 1).

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

Автореферат розіслано "22" травня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марущак Я. Ю.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЇ

1.1. **Актуальність теми.** Сучасна практика проєктування електричних машин загальнопромислового призначення й, особливо, спеціальних передбачає виконання перевірових розрахунків їх режимів, характеристик і процесів при прийнятих на певних етапах оптимізаційної процедури значеннях вхідних даних – геометрії магнітопроводу, параметрах обмоток, характеристиках матеріалів тощо. Ці розрахунки виконуються в межах САПР електричних машин з використанням відповідних математичних моделей, доведених до рівня комп'ютерних програм, і досяжний рівень оптимальності машин однозначно визначається рівнем адекватності цих моделей. Відомі в літературі математичні моделі, призначені для розрахунків електромеханічних процесів явнопольосних електричних машин, як правило, призначені для машин окремих типів і характеризуються недостатньо високими для потреб практики САПР рівнями адекватності, оскільки такі важливі чинники, як вищі просторові гармоніки магніторушійних сил обмоток, насичення магнітопроводу й витіснення струму в стрижнях короткозамкнених обмоток у них не враховуються зовсім або ж враховуються поодинокі і при досить грубих допущеннях. Тому створення математичної моделі, яка забезпечувала б урахування усіх згаданих чинників одночасно й у їх взаємозв'язку й придатної для певного досить широкого класу електричних машин з явнопольосною конструкцією магнітопроводу, є актуальним завданням.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з темою "МУЗА" (реєстраційний номер 5.51.06/283-93) "Створення математичної моделі узагальненої явнопольосної електричної машини" Державного комітету України з питань науки і технологій.

1.2. Метою дисертаційної роботи є:

- розвиток на підставі методів чисельного аналізу нелінійної теорії електромеханічних процесів в електричних машинах з явнопольосною конструкцією індуктора в напрямках узагальнення, комплексного врахування найважливіших чинників, що впливають на поведінку й техніко-економічні показники машин, і розширення сфери її застосування;

- створення математичної моделі для розрахунку електромеханічних процесів узагальненої явнопольосної електричної машини як математичного забезпечення, що дозволяє безпосередньо й на рівні адекватності, придатному для широкого кола інженерних задач розраховувати ці процеси в явнопольосних машинах конкретних типів;

- дослідження впливу насичення магнітопроводу, вищих просторових гармонік магніторушійних сил, витіснення струму в стрижнях короткозамкненої обмотки ротора на перехідні процеси явнопольосних електричних машин.

1.3.Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є узагальнена явнопольосна електрична машина з шихтованим магнітопроводом, у якій на неявнопольосному статорі укладена довільна кількість фаз з довільним розподілом провідників по пазах і на явнопольосному роторі - короткозамкнена обмотка, що містить довільну кількість довільним способом розподілених вздовж полюсного кроку стрижнів з довільною конфігурацією поперечного перерізу, й обмотка збудження, що охоплює полюси.

1.4.Предметом дослідження є електромеханічні перехідні процеси в електричних машинах з явнопольосною конструкцією індуктора.

1.5.Методика дослідження. В основу математичного моделювання прийняті чисельні методи аналізу.

Кількісний вплив окремих чинників та їх груп на перехідні процеси досліджувався за результатами математичного експерименту.

Рівень адекватності математичної моделі перевірявся на підставі порівняння результатів розрахунків з результатами фізичного експерименту.

1.6.Наукова цінність. Показано, що для чисельного розв'язування нелінійної одновимірної за просторовою координатою задачі розрахунку електромагнітних перехідних процесів у стрижні короткозамкненої обмотки електричної машини найбільш ефективним є алгоритм, який ґрунтується на інтегро-диференціальних рівняннях електродинаміки й методі колокації.

Створено математичну модель для розрахунку електромеханічних перехідних процесів в абстрактному об'єкті - узагальненій явнопольосній електричній машині, який охоплює широкий клас електричних машин, що об'єднуються спільністю конструкції магнітопроводу й відрізняються кількістю електричних контурів статора та розподілом їх провідників по пазах, кількістю стрижнів короткозамкненої обмотки на полюсній поділці, їх розташуванням та конфігурацією поперечного перерізу, розмірами магнітопроводу, параметрами та характеристиками матеріалів тощо, з урахуванням вищих просторових гармонік магніторушійних сил обмоток, насичення магнітопроводу й витіснення струму в стрижнях у взаємозв'язку цих чинників.

Встановлені деякі загальні закономірності впливу згаданих чинників на перехідні процеси явнопольосних електричних машин.

1.7. Практична цінність. Розроблена математична модель доведена до рівня комп'ютерної програми, яка дозволяє для конкретної явнопольосної машини за відомою інформацією у вигляді відповідних масивів чисел, виписаних безпосередньо з заводського розрахункового формуляру машини і з довідникових джерел, розраховувати електромеханічні перехідні процеси машини на рівні адекватності, придатному для широкого кола інженерних задач, тобто вона є інженерною методикою в сучасному розумінні цього терміну й може використовуватись як складова частина САПР явнопольосних електричних машин загальнопромислового й спеціального призначення (наприклад, вентильних двигунів чи генераторів), а також при дослідженні поведінки цих машин в електромеханічних системах.

1.8. Автор захищає:

математичну модель для розрахунку електромагнітних процесів у стрижні з поперечним перерізом довільної конфігурації короткозамкненої обмотки електричної машини з урахуванням витіснення струму й насичення шляхів потоків розсіяння у їх взаємозв'язку;

математичну модель для розрахунку електромеханічних процесів узагальненої явнопольосної електричної машини як машини з шихтованим магнітопроводом, короткозамкненою обмоткою зі стрижнями довільного профілю на явнопольосному роторі та довільною кількістю електричних контурів з довільним розподілом їх провідників вздовж полюсного кроку на неявнопольосному статорі, з урахуванням насичення основного магнітного кола та шляхів потоків розсіяння, вищих гармонік магніторушійних сил обмоток і витіснення струму в короткозамкненій обмотці ротора у взаємозв'язку цих чинників;

результати аналізу математичного експерименту, спрямованого на з'ясування впливу насичення магнітопроводу, витіснення струму та вищих гармонік магніторушійних сил обмоток на перехідні процеси явнопольосних машин.

1.9. Апробація. Основні наукові результати роботи доповідались та обговорювались на I-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці" та на наукових семінарах кафедри "Електричні машини" Державного університету "Львівська політехніка". Робота в цілому доповідалась на кафедрі "Електричні машини" Львівської політехніки.

1.10. Публікація результатів дослідження. Основний зміст дисертації викладено в трьох друкованих працях.

2. ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація викладена на 203 сторінках і складається з вступу,

6 розділів з 51 рисунком, висновків і списку літератури. Основний машинописний текст викладений на 147 сторінках.

У вступі підкреслюється важливість дослідження електромеханічних перехідних процесів (ЕМПП) в електричних машинах, що є елементами сучасних автоматизованих електроприводів та електроенергетичних систем, з погляду їх експлуатації та проектування.

У першому розділі "Загальна характеристика проблеми й обґрунтування прийнятого напрямку досліджень" на підставі аналізу літератури охарактеризований сучасний стан теорії математичного моделювання режимів і процесів у явнopolюсних електричних машинах (ЯЕМ), виявлені актуальні завдання теорії, сформульовані мета дисертаційної роботи та вихідні допущення й обґрунтовані прийняті шляхи досягнення поставленої мети.

В результаті аналізу описаних у літературі методів дослідження режимів, характеристик і процесів у ЯЕМ встановлено що:

розділ теорії ЯЕМ, який ґрунтується на допущеннях про відсутність насичення магнітопроводу й про синусний розподіл вздовж розточки статора провідників фаз є практично завершеним, однак у переважній більшості інженерних задач не задовільняє потреб практики внаслідок недостатньої точності;

насичення основного магнітного кола й шляхів потоків розсіяння, вищі просторові гармоніки магніторушійних сил (МРС) обмоток і витіснення струму в стрижнях короткозамкнутої обмотки ротора (КЗОР) є чинниками, які істотно впливають на процеси в ЯЕМ і, відповідно, на техніко-економічні показники машин у цих процесах;

існуючі математичні моделі (ММ) є вузькоспеціалізованими - вони орієнтовані на моделювання окремих видів процесів (електромагнітних чи електромеханічних; коротких замикань, пусків, синхронізації, скиду чи накиду навантаження тощо), на ЯЕМ конкретних типів (з одно-, дво-, три- чи шестифазною симетричною чи несиметричною обмоткою статора; з круглим, пляшкоподібним чи прямокутним профілем стрижнів КЗОР; з різними кількостями стрижнів на полюсній поділці тощо) і враховують тільки деякі зі згаданих чинників чи комбінації деяких з них і не об'єднуються спільністю теоретичного підходу.

При сучасному рівні розвитку теорії математичного моделювання в електромеханіці орієнтацію на вузькоспеціалізовані ММ вже не можна вважати раціональною як внаслідок великих затрат висококваліфікованої праці на їх створення, так і з погляду зручності їх застосування в інженерній практиці. Значно економічніше, а також зруч-

ніше для користувача ставити й розв'язувати задачі комплексно (моделювання будь-яких ЕМПП) і стосовно до деяких абстрактних об'єктів, які є узагальненнями якомога більшої множини реальних об'єктів споріднених типів. За такий абстрактний об'єкт у дисертації прийнято узагальнену явнополюсну електричну машину (УЯЕМ) (див. підрозділ 1.3).

Сучасна обчислювальна техніка спроможна забезпечувати для розрахунків ЕМПП в електричних машинах створення ММ на рівнях адекватності, достатніх для широкого кола інженерних задач, за умови використання для опису цих процесів звичайних диференціальних рівнянь і диференціальних рівнянь у частинних похідних, якщо останні містять похідну тільки за однією просторовою координатою, оскільки тільки тоді створювані ММ можуть бути достатньо швидкодіяними. Іншими словами, для забезпечення високої швидкодії ММ опис електромагнітного поля в машині не може виходити за межі одновимірних за просторовими координатами постановок крайових задач, що й визначає майже однозначно вихідні допущення, закладені в основу ММ УЯЕМ.

У дисертації прийняті наступні вихідні допущення:

магнітне поле машини умовно розділене на дві взаємнонезалежні частини – робоче поле й поля розсіяння; робоче поле є плоскопаралельним; зубчасті структури статора й ротора еквівалентовані гладкими розподіленими вздовж розточки нелінійними магнітними опорами; укладені в пазах обмотки еквівалентовані нескінченно тонкими розподіленими вздовж розточки обмотками; індуктор, ярмо статора й шляхи потоків розсіяння пазів через коронки зубців еквівалентовані зосередженими нелінійними магнітними опорами; електромагнітне поле в поперечному перерізі стрижня КЗОР є одновимірним; електричні контури й геометрія магнітопроводу є такими, що магнітні індукції в точках, віддалених одна від одної на полюсний крок, відрізняються тільки знаком; гістерезис і вихрові струми в магнітопроводі не впливають на ЕМПП машини.

Кожна конкретна ЯЕМ виділяється з множини машин цього типу специфічним набором числових даних, які конкретизують кількість фаз статора й розподіл їх провідників по пазах, кількість стрижнів КЗОР, їх профіль та розташування на полюсній поділці, геометрію магнітопроводу й характеристики намагнічування його елементів, питомі опори провідникових матеріалів тощо. Для користувача важливо, щоб ці дані можна було вводити до комп'ютера на підставі розрахункового формуляру машини та довідникових матеріалів безпосередньо, тобто без будь-якої попередньої їх математичної обробки. Всю необ-

хідну інформацію про конкретну ЯЕМ, задану в такому найпримітивнішому її вигляді, названо первинною вхідною інформацією (ПВІ) про конкретну ЯЕМ.

Розрахунок будь-якого ЕМПП конкретної ЯЕМ зводиться до чисельного інтегрування системи алгебричних і диференціальних рівнянь (САДР), яка описує ці процеси. До неї входять, зокрема, аналітичні вирази, що описують розподіл провідників електричних контурів вздовж полюсної поділки, інтерполяційні формули характеристик намагнічування нелінійних елементів магнітопроводу, опори електричних контурів тощо. Вони при прийнятих допущеннях однозначно визначаються на підставі ПВІ. Для досягнення мінімуму затрат машинного часу розрахунку ЕМПП необхідно, щоб на кожному ітераційному циклі кожного кроку інтегрування виконувались тільки ті операції, результати яких залежать від номера ітерації, а всі інші (тобто ті, результати яких для всіх ітераційних циклів кожного кроку інтегрування є однаковими) повинні бути виконані тільки один раз - перед початком чисельного інтегрування САДР. Інформацію, яка використовується під час інтегрування САДР і не залежить від номера кроку й номера ітераційного циклу, названа вторинною вхідною інформацією (ВВІ) про конкретну ЯЕМ.

Моделювання ЕМПП конкретної ЯЕМ доцільно виконувати в два етапи: спочатку визначити ВВІ досліджуваної ЯЕМ, а після цього розраховувати усі необхідні її ЕМПП.

Для цих етапів доцільно створити окремі моделі як відповідні системи рівнянь, алгоритми їх розв'язування й комп'ютерні реалізації цих алгоритмів, а саме:

математичну модель визначення ВВІ, придатну для будь-якої конкретної ЯЕМ, що є окремим випадком УЯЕМ;

математичну модель розрахунку ЕМПП на підставі отриманої ВВІ, орієнтовану на УЯЕМ.

На підставі порівняння ефективності відомих методів прикладної математики встановлено, що при математичному моделюванні ЕМПП ЯЕМ найбільш доцільно використовувати:

для розв'язування задачі Коші - неявного методу з застосуванням формул диференціювання назад G -го порядку;

для розв'язування нелінійних систем алгебричних рівнянь (САР) - методу Ньютона;

для обчислення інтерпольованих значень нелінійних таблично заданих функцій та їх похідних - теорії інваріантного наближення функцій.

У другому розділі "Обробка вхідних даних, що характеризують явнопольосну електричну машину" описані методи розрахунку амплітуд функцій густини розподілу та функцій розподілу провідників електричних контурів машини, характеристик намагнічування, магнітних провідностей та опорів елементів магнітопроводу.

Сукупності фаз статора однозначно відповідає матриця V_{Σ} розподілу провідників по пазах, яка формується за правилом: елемент цієї матриці, що належить k -му рядкові і j -му стовпцеві, дорівнює кількості V_{kj} провідників k -ї фази, розташованих у j -му пазі, зі знаком "+", якщо при обході k -ї фази в додатному напрямі рух у j -му пазі збігається з напрямом, прийнятим за додатний напрям пазів, зі знаком "-", якщо вони протилежні, і нулеві, якщо провідники k -ї фази в j -му пазі відсутні. Аналогічним способом формується матриця V_{Γ} розподілу провідників по пазах для контурів КЗОР.

Кутова густина розподілу провідників k -ї фази вздовж розточки статора визначається многочленом

$$V_{\Sigma k}[\alpha] = \sum_{\nu=1,3,\dots,\nu_m} u_{k\nu} \cos \nu \alpha + u_{k\nu} \sin \nu \alpha, \quad (1)$$

де α - кутова координата довільної точки A на розточці відносно точки відліку як точки перетину вибраного променя з колом розточки; ν - номер найвищої враховуваної гармоніки.

Кількість провідників k -ї фази, розташованих на ділянці довжиною π , яка починається в точці з координатою α , визначається многочленом

$$W_{\Sigma k}[\alpha] = \sum_{\nu=1,3,\dots,\nu_m} w_{k\nu} \cos \nu \alpha + w_{k\nu} \sin \nu \alpha. \quad (2)$$

Кількість провідників n -го контура КЗОР, розташованого на ділянці довжиною π , яка починається в точці з координатою η , враховуваною від точки перетину поздовжньої магнітної осі машини з розточкою, визначається многочленом

$$W_{\Gamma n}[\eta] = \sum_{\nu=1,3,\dots,\nu_m} w_{n\nu} \cos \nu \eta + w_{n\nu} \sin \nu \eta. \quad (3)$$

Для обчислення за відомими матрицями V_{Σ} і V_{Γ} коефіцієнтів многочленів виду (1)-(3) виведені формули за умови, що провідники кожного контура розподілені в пазі рівномірно в межах центрального кута, що охоплює паз.

Викладені алгоритми розрахунку характеристик намагнічування у вигляді таблично заданих функцій для зубцевих зон статора й ротора, полюсів разом з ярмом ротора, ярма статора й коронок зубців статора й ротора й на підставі їх наближення многочленами Тейлора

третього степеня - алгоритми інтерполяції та диференціювання цих характеристик та алгоритми обчислення магнітних опорів та провідностей лінійних ділянок магнітопроводу.

Описані алгоритми реалізовані у вигляді комп'ютерної програми визначення ВВІ.

У третьому розділі "Математичне моделювання електромагнітних перехідних процесів у стрижні короткозамкненої обмотки" викладені чотири математичні моделі, що дозволяють розраховувати процеси у стрижні з довільною конфігурацією поперечного перерізу з урахуванням насичення коронок прилягаючих до стрижня зубців і витіснення струму в ньому на підставі рівнянь електродинаміки в одновимірній постановці, та наведена порівняльна характеристика цих моделей.

Задача розв'язується при таких допущеннях: електричне поле в стрижні має тільки складову, спрямовану вздовж стрижня, а магнітне - тільки складову, спрямовану перпендикулярно до висоти стрижня; магнітна проникність зубців за межами їх коронок є нескінченно великою, а залежність магнітного потоку Φ , що охоплює стрижень (тобто проходить через коронки) від струму i в стрижні задана характеристикою намагнічування $\Phi = \Phi[i]$ коронок.

Математичне формулювання крайової задачі розрахунку перехідного електромагнітного процесу в стрижні здійснене в двох варіантах: на підставі диференційних та інтегро-диференційних рівнянь електродинаміки. У першому варіанті воно складається з диференційних рівнянь

$$\frac{\partial H}{\partial y} + \frac{H}{b} \cdot \frac{db}{dy} + j = 0 ; \quad (4) \quad \rho_c v_0 \frac{\partial j}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 , \quad (5)$$

формул

$$i = \int_0^h j b dy ; \quad (6) \quad \Phi = \Phi[i] \quad (7)$$

та граничних умов

$$H_0 = 0 ; \quad (8) \quad -\rho_c j_n + E_{cr} - \frac{d\Phi}{dt} = 0 , \quad (9)$$

а в другому - з інтегральних рівнянь

$$b_2 H_2 - b_1 H_1 + \int_{y_1}^{y_2} j b dy = 0 ; \quad (10) \quad \rho_c v_0 (I_2 - I_1) + \int_{y_1}^{y_2} \frac{dH}{dt} dy = 0 \quad (11)$$

і співвідношень (6)-(9). Початковою умовою є розподіл густини струму по висоті стрижня в момент часу $t = t_0$. В (4)-(11) позначено: H , j , b - відповідно, напруженність магнітного поля, густина струму й ширина стрижня на висоті y від його основи; H_1, H_2, b_1, b_2 -

відповідно, значення H і b при $y = y_1$ та $y = y_2$; ρ_c - питомий опір матеріалу стрижня; ν_0 - питомий магнітний опір пустоти; H_0 - значення H при $y = 0$; j_h - значення j при $y = h$, де h - висота стрижня; $E_{ст}$ - напруженість стороннього електричного поля. Гранічна умова (9) є неklasичною, тому (4)-(9) чи (6)-(11) є неklasичними задачами електродинаміки.

Для розв'язування цих задач використані два методи - сітковий і колокації. В обидвох методах розв'язком є сукупність функцій $H_q = H_q[t]$ і $j_q = j_q[t]$, у вузлах сітки, розташованих по висоті стрижня (в загальному - нерівномірно). В сітковому методі g -го порядку частинна похідна в q -му вузлі при фіксованому значенні часу t замінюється алгебричною комбінацією миттєвих значень залежної змінної H чи j на комплекті найближчих $g+1$ вузлів на підставі апроксимації функції $H = H[y]$ чи $j = j[y]$ многочленами g -го степеня. Аналогічний підхід використаний і для обчислення інтегралів.

Так, на підставі методу колокації для крайової задачі (6)-(11) отримана система алгебричних і диференціальних рівнянь (САДР)

$$\begin{aligned} b_q H_q - b_{q-1} H_{q-1} + (S_{q0} i_0 b_0 + \dots + S_{qQ} i_Q b_Q) &= 0; \\ \rho_c \nu_0 (j_q - j_{q-1}) + (S_{q0} dH_0/dt + \dots + S_{qQ} dH_Q/dt) &= 0; \\ H_0 = 0; \quad \rho_c j_Q - E_{ст} + d\Phi/dt &= 0; \quad (q=1, Q) \quad (12) \\ \Phi = \Phi[i]; \quad I = \frac{S_0}{\mu_0} b_0 i_0 + \dots + S_Q b_Q i_Q, \end{aligned}$$

де S_{qj} , S_j ($q=1, Q$; $j=0, Q$) - коефіцієнти, які визначаються геометрією сітки;

Для алгебризації похідної d/dt використані формули диференціювання назад G -го порядку. Отримана в результаті нелінійна САР має порядок $2Q+4$. Для її розв'язування застосовано метод Ньютона. В результаті перетворень лінійної САР з невідомими поправками змінних j_q , H_q ($q=0, Q$), i , Φ на l -ій ітерації, породженої нелінійною САР на кроці інтегрування, отримано алгоритм інтегрування САДР (12), у якому чисельному розв'язанню підлягає лінійна САР тільки $(Q+1)$ -го порядку, що забезпечує високу швидкість математичної моделі.

Алгоритми розрахунку електромагнітних процесів у стрижні, складені стосовно до задачі (6)-(11), на підставі сіткового методу, й стосовно до задачі (4)-(9), на підставі методу колокації та сіткового методу, мають аналогічну структуру.

Згідно з описаними алгоритмами реалізовані комп'ютерні програми й з їх використанням виконано математичний експеримент у ши-

рокому діапазоні зміни вхідних даних - геометрії стрижня, кількості вузлів сітки та насичення коронок зубців. На підставі аналізу його результатів встановлено, що алгоритм, який впливає з постановки задачі, сформульованої в термінах інтегро-диференціальних рівнянь, характеризується більш широкою зоною стійкості, а метод колокації дозволяє досягнути задану точність при меншій кількості вузлів, ніж сітковий метод. Тому для моделювання ЕМП в УЯЕМ вирішено застосовувати саме викладений вище алгоритм.

У четвертому розділі "Математичне формулювання задачі розрахунку електромеханічних перехідних процесів УЯЕМ" на підставі законів електротехніки й механіки складена САДР, що описує ЕМП в УЯЕМ.

Ця САДР складається з рівнянь електричного стану

$$\begin{aligned} d\psi_{zk}/dt + r_{zk}i_{zk} - u_{zk} &= 0; & d\psi_r/dt + r_r i_r - u_r &= 0; \\ d\psi_{rn}/dt + r_{rn}i_{rn} + i_r(\rho_{cn}j_n + \rho_{cn+1}j_{n+1}) &= 0; & & (13) \\ i_{rn} &= \frac{1}{2} \left[\sum_{m=1}^n i_{crm} - \sum_{m=n+1}^N i_{crm} \right], & (\kappa=1, K; n=1, N) \end{aligned}$$

магнітного стану

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K W_{zk}[\eta_p + \gamma] \frac{i_{zk}}{a_{zk}} + W_r \frac{i_r}{a_r} + \sum_{n=1}^N W_{rn}[\eta_p] \frac{i_{rn}}{a_{rn}} - F_a - F_r - F_{zp} - \rho_{\delta p} B_p &= 0; \\ \Phi_a - c_{\phi}(B_1 + \dots + B_p) &= 0; & \Phi_r - \Phi_a - \lambda_{\sigma r}(W_r i_r/a_r - F_r) &= 0; \\ F_a = F_a[\Phi_a]; & & F_r = F_r[\Phi_r]; & & F_{zp} = F_{zp}[B_p]; & (14) \\ \Phi_{\sigma zj} = \Phi_{\sigma zj}[i_{pzj}]; & & \Phi_{\sigma rn} = \Phi_{\sigma rn}[i_{crn}]; & \\ i_{pzj} = \sum_{k=1}^K V_{kj} i_{zk}/a_{zk}; & & i_{crn} = 2\rho_0 \left[\sum_{q=0}^{Q-1} S_q i_{nq} b_q + S_Q i_n b_Q \right] & \\ & & (j=1, J; \kappa=1, K; n=1, N; \rho=1, P), \end{aligned}$$

рівнянь електромагнітних процесів у КЗОР

$$\begin{aligned} H_{n0} &= 0; \\ b_1 H_{n1} - b_0 H_{n0} + \sum_{q=0}^{Q-1} S_{1q} i_{nq} b_q + S_{1Q} i_n b_Q &= 0; \\ \vdots & \\ b_Q H_{nQ} - b_{Q-1} H_{n, Q-1} + \sum_{q=0}^{Q-1} S_{Qq} i_{nq} b_q + S_{QQ} i_n b_Q &= 0; & (n=1, N)(15) \\ \rho_{cn} v_0 (i_{n1} - i_{n0}) + (S_{10} dH_{n0}/dt + \dots + S_{1Q} dH_{nQ}/dt) &= 0; \\ \vdots & \\ \rho_{cn} v_0 (i_n - i_{n, Q-1}) + (S_{Q0} dH_{n0}/dt + \dots + S_{QQ} dH_{nQ}/dt) &= 0, \end{aligned}$$

рівнянь механічного стану

$$-J_r d\omega_r/dt + M_e + M_n = 0; \quad \omega_r = dy_r/dt \quad (16)$$

і виразів для потокозчеплень контурів та електромагнітного моменту

$$\psi_{sk} = \sum_{k=1}^K L_{\sigma skk} i_{sk} + \frac{2\rho_0}{a_{sk}} \sum_{j=1}^J V_{kj} \Phi_{\sigma sj} + \frac{\rho_0 c_\phi}{a_{sk}} \sum_{p=1}^P W_{sk} [\eta_p + \gamma] B_p;$$

$$\psi_r = \sum_{n=1}^N L_{\sigma rn} i_{rn} + \frac{\rho_0 W_f \Phi_f}{a_f}; \quad (17)$$

$$\psi_{rn} = \sum_{n=1}^N L_{\sigma rnn} i_{rn} + L_{\sigma rnn'} i_{r'} + \Phi_{\sigma rn} - \Phi_{\sigma rn+1} + \frac{\rho_0 c_\phi}{a_{rn}} \sum_{p=1}^P W_{rn} [\eta_p] B_p;$$

$$M_e = -2\rho_0^2 c_\phi \sum_{k=1}^K \frac{i_{sk}}{a_{sk}} \sum_{p=1}^P V_{sk} [\eta_p + \gamma] B_p \quad (k=1, K; n=1, N),$$

де позначено: K, N, J, P, Q відповідно, кількість фаз статора, контурів КЗОР, пазів статора на полюсній подільці, вузлів сітки на полюсній подільці й вузлів сітки по висоті стрижня; $i_{sk}, i_r, i_{rn}, \psi_{sk}, \psi_r, \psi_{rn}, i_{sk}', i_r', i_{rn}', a_{sk}, a_r, a_{rn}$ - струми, потокозчеплення, опори й кількості паралельних гілок фаз, обмотки збудження й контурів КЗОР; Φ_n, Φ_f - магнітні потоки ярма якоря й полюса; F_n, F_f - магнітні напруги в ярмі якоря й в індукторі; W_f - кількість витків обмотки збудження; ρ_0 - кількість пар полюсів; l_f - довжина полюса; η_p - координата p -го вузла сітки на полюсній подільці; $B_p, F_{zp}, \rho_{\delta p}$ - магнітна індукція, магнітна напруга й локальний магнітний опір у повітряному проміжку для p -го вузла сітки; $\lambda_{\sigma r}$ - магнітна провідність розсіяння індуктора; j_{nq}, H_{nq} - густина струму й напруженість магнітного поля в q -му вузлі сітки n -го стрижня; $i_{nsj}, \Phi_{\sigma sj}, i_{cnn}, \Phi_{\sigma rn}$ - струми та магнітні потоки коронок j -го паза статора й n -го паза ротора; J_r - момент інерції обертових частин машини; c_ϕ - площа поверхні розточки між сусідніми вузлами сітки; $\gamma_r = \gamma/\rho_0$ - кут повороту ротора; ω_r - кутова швидкість обертання ротора.

САДР (13)-(17) складається з $\Pi = 2K + 6N + 2P + 2J + 2NQ + 9$ рівнянь і містить стільки ж змінних - i_{sk}, ψ_{sk} ($k=1, K$), $i_r, \psi_r, i_{rn}, \psi_{rn}, i_{cnn}, \Phi_{\sigma rn}$ ($n=1, N$), $i_{nsj}, \Phi_{\sigma sj}$ ($j=1, J$), B_p, F_{zp} ($p=1, P$), i_n, i_{nq} ($n=1, N; q=0, Q-1$), H_{nq} ($q=0, Q$) $\Phi_n, \Phi_f, F_n, F_f, M_e, \gamma, \omega_r$ як невідомих функцій часу.

Початковою умовою для конкретного ЕМПП є сукупність значень

$$i_{sk} = i_{sk}^{(0)}; i_r = i_r^{(0)}; i_{nq} = i_{nq}^{(0)}; i_n = i_n^{(0)};$$

$$l = l^{(0)}; \omega_r = \omega_r^{(0)}; \gamma_r = \gamma_r^{(0)} \quad (k=1, K; n=1, N; q=0, Q-1) \quad (18)$$

Розрахунок ЕМПП зводиться до розв'язування задачі Коші, тобто до інтегрування САДР (13)–(17) за початкових умов (18).

У п'ятому розділі "Розроблення алгоритму розв'язування задачі розрахунку електромеханічних перехідних процесів УЯЕМ" наведені перетворення системи рівнянь, що описує ЕМПП в машині, до вигляду, який безпосередньо використовується в алгоритмі розрахунку цих процесів, і описаний алгоритм розрахунку ЕМПП.

Задача Коші (13)–(18) є істотно нелінійною внаслідок наявності трансцендентних функцій виду (1)–(3), кусково-поліноміальних апроксимацій характеристик намагнічування елементів магнітопроводу й добутоків невідомих. Крім цього, вона має високий порядок. Так при $K=3$, $N=6$, $J=9$, $P=30$, $Q=6$ маємо $L=201$. Таким чином, її належить віднести до порівняно складних задач цього типу.

З умов необхідності утримання похибки дискретизації на кроці інтегрування в допустимих межах довжина кроку інтегрування цієї САДР навіть без урахування насичення магнітопроводу й вищих гармонік МРС обмоток повинна не перевищувати $1/30$ від періоду напруги живлення, а при врахуванні цих чинників її необхідно зменшити ще в 10–50 разів. Оскільки тривалість ЕМПП може досягати десятків секунд, то безпосереднє застосування для інтегрування цієї САДР навіть найбільш досконалих стандартних процедур є неможливим внаслідок недопустимо великої затрати комп'ютерного часу. Тому успіху можна досягнути тільки на шляху створення спеціального й оптимізованого алгоритму, в якому на кожному з його етапів поєднуються переваги аналітичного й чисельного підходів.

Алгебризацію похідних у САДР (13)–(17) виконано за загальною формулою диференціювання назад G -го порядку, а для розв'язування отриманої на кроці інтегрування нелінійної САР застосовано метод Ньютона. При цьому, як відомо, домінуючою за затратами комп'ютерного часу операцією є розв'язування лінійної САР з невідомими поправками залежних змінних на l -му ітераційному циклі, породжуваної нелінійною САР на кроці. Тому стратегія оптимізації алгоритму повинна полягати в тому, щоб ця операція виконувалась для лінійної САР якомога нижчого порядку.

В результаті виконаних під цим кутом зору алгебричних перетворень лінійної САР на l -ій ітерації отримано систему рівнянь і формул, згідно з якою невідомі обчислюються в такій послідовності:

шляхом чисельного розв'язання лінійної САР $(K+N+4)$ -го порядку визначаються поправки невідомих $i_{\text{вк}}^{(k)}$ ($k=1, K$), i_n ($n=1, N$), i_r , Φ_n .

Φ_r, γ_r і, далі, l -е наближення цих невідомих;

за виведеними формулами - поправки невідомих i_{nq} ($n=1, N$; $q=0, Q-1$), B ($p=1, P$) і, далі, l -е наближення цих невідомих;

l -е наближення невідомих $i_{n\alpha j}$ ($j=1, J$), i_{rn} , i_{cgn} ($n=1, N$), H_{nq} ($n=1, N$; $q=0, Q$), $\psi_{\alpha k}$ ($k=1, K$), ψ_r , i_{rn} , ψ_{rn} ($n=1, N$), $\Phi_{\sigma \alpha j}$ ($j=1, J$), $\Phi_{\sigma rn}$ ($n=1, N$), F_{zp} ($p=1, P$), F_{α} , F_r , M_{α} , ω_r - безпосередньо за виведеними формулами.

За нульове наближення для виконання першої ітерації наступного кроку інтегрування приймаються значення невідомих, отримані в результаті виконання попереднього кроку. Нульовим наближенням на першій ітерації першого кроку є початкова умова.

У складеному алгоритмі порядок лінійної САР, що підлягає розв'язуванню на l -ій ітерації, є в 10-20 разів нижчим від порядку САДР (13)-(17).

Варто зауважити, що при розрахунку ЕМПП ЯЕМ без урахування насичення й витіснення струму в КЗОР доводиться розв'язувати на l -ій ітерації кроку інтегрування лінійну САР $(K+N+2)$ -го порядку і, отже, в запропонованому алгоритмі порядок лінійної САР, що підлягає чисельному розв'язанню на l -ій ітерації, є тільки на 2 одиниці більшим від останнього, і ця обставина досить наочно характеризує рівень оптимальності складеного алгоритму.

Алгоритм розрахунку ЕМПП УЯЕМ реалізований у вигляді комп'ютерної програми.

У шостому розділі "Результати математичного та фізичного експериментів та їх аналіз" наведені й проаналізовані найважливіші з отриманих з використанням створеної моделі результати математичного експерименту, спрямованого на вивчення впливу насичення основного магнітного кола, насичення шляхів потоків розсіяння, вищих гармонік МРС обмоток і витіснення струму зокрема й у взаємозв'язку цих чинників, і дані, що підтверджують високий рівень адекватності моделі.

У дисертації аналізуються результати розрахунків ЕМПП на прикладі серійної синхронної машини - двигуна СДЗБ 13-52-8 (номінальні дані: потужність - 630 кВт, лінійна напруга - 6 кВ, струм фази - 71,4 А, коефіцієнт потужності - 0,9, частота обертання - 750 об/хв, частота напруги живлення - 50 Гц; основні дані заводського розрахункового формуляру: кількість фаз - 3, кількість стрижнів на полюсному кроці - 6, діаметр розточки - 728 мм, довжина осердя

статора - 520 мм). З метою більш повного вивчення впливу враховуваних чинників на ЕМПП виконувались розрахунки процесів для цієї ж машини з деякими відхиленнями від даних розрахункового формуляру.

Зокрема, за результатами розрахунку прямого асинхронного пуску двигуна від мережі з номінальною напругою встановлено, що:

гармоніки МРС обмоток впливають на електромагнітний момент в межах десятків відсотків;

насичення основного магнітного кола спостерігається на початковій і кінцевій стадіях пуску, й істотно впливає на перехідний процес, оскільки воно є причиною виникнення високочастотних осциляцій у струмах обмоток, особливо, у струмах стрижнів КЗОР;

насичення коронок зубців ротора спостерігається тільки на початковій стадії пуску і є істотним при порівняно вузьких шліцах пазів ротора і, особливо, при закритих пазах;

розподіл густини струму по висоті стрижня КЗОР при наявності насичення як основного магнітного кола, так і коронок зубців є значно більш нерівномірним, ніж при відсутності насичення (в 2 і більше разів) за рахунок більш інтенсивного витіснення високочастотних складових струму;

в машинах з напівзакритими чи закритими пазами на роторі при відсутності насичення коронок струм витісняється як у напрямі розточки, так і в напрямі дна паза; насичення коронок докорінно змінює розподіл густини струму по висоті стрижня - наближає його до такого, як і при відкритому пазі (явище "відкривання" паза за рахунок насичення коронок).

Останні два висновки ілюструють твердження про те, що врахування чинників, які впливають на процеси в ЯЕМ, у їх взаємозв'язку приводить до результатів, які докорінно відрізняються від отриманих на підставі врахування цих чинників поодиночі.

Наведені результати показують, що нехтування вказаними чинниками може приводити до значної похибки, що є переконливим підтвердженням доцільності застосування створеної ММ в інженерній практиці.

3. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літератури в галузі теорії й практики використання електричних машин з явнополюсними роторами встановлено, що насичення основного магнітного кола й шляхів потоків розсіювання, вищі просторові гармоніки МРС обмоток і витіснення струму в стрижнях короткозамкнених обмоток ротора є чинниками, які істотно впливають на поведінку й техніко-економічні показники машин як в

усталених режимах, так і в перехідних процесах, однак в існуючих математичних моделях машин ці чинники зовсім не враховуються або ж враховуються поодиноці чи в комбінаціях яких-небудь двох з них і їх вплив, зокрема, у їх взаємозв'язку на ЕМПП машин залишається вивченим недостатньо глибоко.

2. В результаті оцінки можливостей відомих у теорії електричних машин методів аналізу з'ясовано, що математична модель для розрахунку ЕМПП ЯЕМ, яка враховувала б ці чинники на досить високому для широкого кола інженерних задач рівні адекватності і, водночас, забезпечувала б прийнятну швидкодію на сучасних персональних комп'ютерах, може бути створена тільки у фазних кординатах (тобто без перетворення координат) і за умови опису робочого магнітного поля й електромагнітного поля в стрижнях короткозамкненої обмотки в одновимірній за просторовими координатами постановці.

3. Обґрунтування доцільності моделювання ЕМПП в ЯЕМ різних типів на підставі моделі УЯЕМ як машини з шихтованим магнітопроводом, у якій на неявнополюсному статорі укладена довільна кількість фаз з довільним розподілом провідників по пазах і на явнополюсному роторі – короткозамкнена обмотка з довільним розподілом вздовж полюсного кроку стрижнів довільного профілю й обмотка збудження, що охоплює полюси.

4. На підставі порівняння відомих методів прикладної математики з'ясовано, що при моделюванні ЕМПП найбільш ефективними є для розв'язування задачі Коші – неявний метод з застосуванням формул диференціювання назад G -го порядку, для розв'язування нелінійних САР – метод Ньютона і для інтерполяції та диференціювання нелінійних залежностей – теорія інваріантного наближення функцій.

5. Для розрахунку нестационарного електромагнітного поля в стрижні довільного профілю короткозамкненої обмотки електричної машини з урахуванням насичення коронок прилеглих до стрижня зубців складені математичні моделі на підставі диференційних та інтегральних рівнянь електродинаміки в одновимірній за просторовою координатою постановці і з застосуванням сіткового методу й методу колокації. За результатами виконаного на цих моделях математичного експерименту встановлено, що за затратами комп'ютерного часу й границями зон стійкості найефективнішою є модель, що ґрунтується на інтегро-диференційних рівняннях електродинаміки й методі колокації.

6. Складена математична модель ЕМПП УЯЕМ, яка охоплює математичне формулювання задачі, алгоритм її розв'язання й комп'ютерну

реалізацію цього алгоритму, з урахуванням вищих просторових гармонік МРС обмоток, насичення основного магнітного кола й шляхів потоків розсіяння й витіснення струму в стрижнях короткозамкненої обмотки.

Модель передбачає введення вхідної інформації про конкретну ЯЕМ з її заводського розрахункового формуляру й довідникової літератури без попередньої ручної математичної обробки і характеризується високою швидкодією, що дозволяє використовувати створену модель як інженерну методику в сучасному розумінні цього терміну.

7. Високий рівень адекватності створеної моделі обґрунтований теоретично й підтверджений порівнянням результатів розрахунків з експериментальними даними.

8. З застосуванням розробленої моделі виконано в широкому діапазоні вхідних даних математичні експерименти, спрямовані на з'ясування впливу вищих просторових гармонік МРС обмоток, насичення основного магнітного кола й шляхів потоків розсіяння та витіснення струму в стрижнях короткозамкненої обмотки на ЕМПП як поодиночі, так і у взаємозв'язку цих чинників.

Отримані результати проаналізовані під кутом зору фізичного пояснення впливу враховуваних чинників і показано, що цей вплив у переважній більшості випадків є істотним, а їх врахування у взаємозв'язку, як правило, – необхідним.

4. ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Макарчук О.В. Математична модель електромеханічних перехідних процесів в явнопольсних електричних машинах. – Тези доповідей 1-ої Міжнародної конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці". – Львів, 1995, с.92.

2. Макарчук О.В. Порівняння моделей перехідних електромагнітних процесів у стрижні короткозамкненої обмотки електричної машини. – Тези доповідей 1-ої Міжнародної конференції "Математичне моделювання в електротехніці й електроенергетиці". – Львів, 1995, с.93.

3. Фільц Р.В., Макарчук О.В. Математичне моделювання електромагнітних процесів у стрижні короткозамкненої обмотки // Технічна електродинаміка. 1995. №1, с.3–8.

Особистий внесок автора. У публікації, написаній у співавторстві, авторові належить розробка алгоритмів математичних моделей, комп'ютерних програм і виконання математичних експериментів.

Ключові слова: явнопольсна машина, електромеханічний процес, насичення магнітопроводу, витіснення струму, математична модель.

Аннотация

Макарчук А.В. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов в явнополюсных электрических машинах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины, Государственный университет “Львовская политехника”, Львов, 1996.

Защищается рукопись, сущность которой отражена в трех научных работах и охватывающая математическую модель электромеханических переходных процессов обобщенной явнополюсной электрической машины как машины с шихтованным магнитопроводом, содержащий на неявнополюсном статоре произвольное количество фаз с произвольным распределением проводников по пазам и на роторе – обмотку возбуждения традиционного типа и короткозамкнутую обмотку, образованную произвольно распределенными вдоль полюсного деления стержнями произвольного профиля, результаты выполненных с применением этой модели математических экспериментов и их анализ. Модель учитывает на основе уравнений электродинамики в одномерной постановке и теории цепей высшие пространственные гармонические магнитодвижущих сил обмоток, насыщение магнитопровода и вытеснение тока в стержнях во взаимосвязи этих факторов.

Abstract

Makarchuk A.V. Mathematical modeling of electromechanical transients in salient pole electrical machines.

The thesis for the candidate of science degree. Speciality 05.09.01 – Electrical machines, Lviv State Politechnical University, Lviv, 1996.

The manuscript is defended, the essence of which is described in three scientific works and comprises mathematical model of electromechanical transients of a generalized salient pole electrical machine as a machine with a laminated magnetic core containing on a nonsalient pole stator an arbitrary number of phases with arbitrary distribution of conductors in slots and on rotor, a traditional field winding and a short-circuited winding formed by arbitrary profile bars arbitrary distributed along pole pitch, the results of mathematical experiments performed using this model, and their analysis. The model takes into account, on the basis of one-dimensional electrodynamic equations and circuit theory, spatial harmonics of magnetomotive forces, magnetic core saturation and deep-bar effect in interconnection of these factors.

В. Макарчук

436 517

AB 35.191

Підписано до друку 01.05. 1996р.
Формат 60X84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 10.
Ум. фарб.-відб. 10.Зам 809.
Тираж 100.

Навчально-виробничі майстерні
Львівського поліграфічного технікуму
290004, м.Львів, вул.Винниченка,12