

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Процина Зіновій Павлович



УДК 621.313.33

**АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ
ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ МАЛОЇ
ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини й апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електричних машин Одеського національного політехнічного університету Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Римша Віталій Вікторович,
професор кафедри електричних машин
Одеського національного політехнічного університету

Офіційні опоненти доктор технічних наук, професор
Ткачук Василь Іванович,
завідувач кафедри електричних машин і апаратів
Національного університету “Львівська політехніка”

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Антонов Олександр Євгенович,
заступник директора інституту електродинаміки Національної академії наук України

Захист дисертації відбудеться 16 грудня 2016 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К41.052.05 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, адм. корпус, ауд. 400-а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету (м. Одеса, пр. Шевченка, 1).

Автореферат розіслано « 10 » листопада 2016 р.

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



А.М. Якімець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне електромашинобудування характеризується переходом від застосування окремої електричної машини до комплексних електромеханотронних систем. Однією з таких електромеханотронних систем є вентиляльно-реактивний двигун (ВРД).

ВРД має широку область застосування в електроприводі компресорів, насосів та вентиляторів. Перспективним також є застосування ВРД малої потужності в механізмах побутової техніки. При цьому можливо не тільки створювати механізми з регульованою частотою обертання і високим ККД, але і покращувати характеристики всієї системи. Навіть при простій заміні традиційного електродвигуна регульованим у вже використовуваному механізмі можна знизити витрати на електроенергію. Сучасний рівень розвитку силової електроніки дозволяє створювати надійні ВРД з можливістю регулювання швидкості обертання і моменту на валу електромеханічного перетворювача (ЕМП). Це дозволяє ефективно використовувати ВРД в регульованому електроприводі.

Тому розробка надійних і технологічних ВРД малої потужності, які повинні відповідати не тільки вимогам до статичних і динамічних характеристик, але і до енергетичної ефективності, є важливою і актуальною задачею. У свою чергу, виконання великого обсягу науково-дослідних робіт у цій галузі вимагає створення систем автоматизованого синтезу ВРД. Таким чином, науково-технічна задача автоматизованого синтезу ВРД є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у відповідності до науково-дослідних тем № 560-51 «Розробка математичних моделей і дослідження процесів в електричних машинах і трансформаторах» (номер державної реєстрації 0107U001962) і № 625-51 «Розробка засобів автоматизованого синтезу високоефективних електромагнітних і електромеханотронних пристроїв» (номер державної реєстрації 0106U0113174).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є автоматизований синтез вентиляльно-реактивних двигунів малої потужності на базі об'єднання автоматизованого проектування, удосконалення засобів математичного моделювання та застосування інноваційних технічних рішень.

Для досягнення зазначеної мети потрібно вирішити наступні завдання:

- удосконалити польові математичні моделі (ММ) для аналізу електромагнітних і теплових процесів у ВРД;
- розробити систему автоматизованого синтезу ВРД, яка дозволяє розраховувати динамічні і квазіусталені режими роботи на базі коло-польових ММ високого ступеня деталізації;
- виконати експериментальні дослідження для ідентифікації параметрів та верифікації розроблених ММ;
- розробити рекомендації для підвищення ефективності роботи і поліпшення характеристик ВРД за рахунок оптимізації геометрії ВРД і параметрів комутації.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в ВРД.

Предмет дослідження: геометричні співвідношення активної зони, комутаційні процеси і характеристики ВРД.

Методи досліджень. Рішення поставлених у роботі завдань виконано чисельним моделюванням магнітних та теплових полів методом кінцевих елементів (МКЕ) в двовимірній постановці задачі та вирішенням диференціальних рівнянь ММ ВРД. При проектному синтезі використовувався метод сіток та генетичний алгоритм.

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено математичну модель ВРД на базі коло-польового підходу із високим ступенем деталізації для використання в системі автоматизованого синтезу ВРД, організація якої базується на принципах системного підходу і забезпечує ефективно вирішення проектних і дослідницьких завдань при проектуванні ВРД;
- вперше на базі коло-польових математичних моделей досліджено вплив коефіцієнтів полюсного перекриття статора і ротора ВРД малої потужності на динамічні та квазіусталені режими роботи та розроблено рекомендації по збільшенню ККД ВРД;
- вперше сформовано регресійні моделі середнього моменту і коефіцієнту пульсацій моменту на періоді комутації для дев'яти варіантів полюсної зони чотирифазних ВРД, які дозволили визначити оптимальну форму полюсів статора та ротора ВРД.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено та реалізовано спеціалізоване програмне забезпечення – система автоматизованого синтезу вентильно-реактивних двигунів SRM-CAD, яка дозволяє здійснювати синтез та оптимізацію ВРД на основі польових ММ;
- з використанням коло-польових ММ високого ступеню деталізації виконано порівняльний аналіз трифазних і чотирифазних ВРД для квазіусталених режимів роботи, який дозволив виробити рекомендації щодо їх ефективного застосування;
- розроблено рекомендації щодо вибору геометрії активної частини ЕМП ВРД – форми пазів і величин полюсного перекриття статора і ротора, які дозволяють отримати збільшення середнього електромагнітного моменту при мінімальному коефіцієнті пульсацій моменту в зоні комутації;
- запропоновано та обґрунтовано рекомендації щодо поліпшення енергетичних і динамічних характеристик ВРД за рахунок оптимізації кутів комутації фаз.

Впровадження наукових результатів роботи. Отримані в дисертаційній роботі результати та рекомендації, а також розроблені ММ використані при розробці, конструюванні та практичній реалізації ВРД, які впроваджені в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ) в автоматі для зварювання, наплавлення та різання металів під водою, при розробці і практичній реалізації ВРД SRM-80-215-IE і SRM-80-162-IE, які випускає ТОВ "Електротехніка – Нові технології". За результатами роботи підготовлено методичні вказівки до виконання розрахунково-графічних і практичних робіт з дослідження властивостей ВРД на основі системи автоматизованого синтезу вентильно-реактивних двигунів SRM-CAD, яка впроваджена в навчальний процес на кафедрі електричних машин Одеського національного політехнічного університету.

Особистий внесок здобувача. У наукових працях, які опубліковані у співавторстві, дисертантові належать: в [1] виконано моделювання ЕМП ВРД; в роботі [4] розрахункові дослідження з оптимізації параметрів комутації ВРД; в [5] розрахункові

ві дослідження коефіцієнтів полюсного перекриття трифазного ВРД; в [6] розробка структури системи автоматизованого синтезу ВРД; в [7] розрахунок двовимірного стаціонарного теплового поля ВРД методом кінцевих елементів у програмах ELCUT і FEMM; в [8] моделювання досліджуваних ВРД в динамічних і квазіусталених режимах за допомогою системи SRM-CAD.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на національних і міжнародних конференціях, симпозіумах і семінарах. Міжнародний симпозіум SIEMA "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів" (м. Харків, 2006 – 2010 і 2015р.р.). VIII міжнародна конференція з математичного моделювання (м. Херсон, 2006). XIII міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" (м. Одеса, 2006). VIII міжнародна науково-технічна конференція САІТ "Системний аналіз та інформаційні технології" (м. Київ, 2006). VIII міжнародна науково-практична конференція "Сучасні інформаційні і електронні технології" (м. Одеса, 2007). Міжнародна наукова конференція ISDMIT "Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій" (Україна, Крим, м. Євпаторія 2007). Науково-технічний семінар АН України "Електромагнітні процеси та проектний синтез електричних машин і апаратів", Одеський національний політехнічний університет, 2006 – 2010, 2012, 2015 і 2016р.р. Розроблені ВРД демонструвалися на 4-ій та 5-ій міжнародних спеціалізованих виставках "AISS-Автоматика-2008" (м. Київ) і "AISS-Автоматика-2009" (м. Київ).

Публікації. Основні положення дисертації представлені у восьми статтях, опублікованих у спеціалізованих виданнях, рекомендованих ВАК, двох звітах з науково-дослідницької теми і одній методичній вказівці для студентів електромеханічних спеціальностей.

Без співавторів опубліковано дві наукові праці [2] і [3]. Також отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на програмне забезпечення [9].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота загальним обсягом 245 сторінок складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 119 найменування, 5 додатків, містить 143 сторінок основного тексту, 97 рисунків, 20 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, зазначено основні наукові і практичні положення, які виносяться на захист. Наведено інформацію про апробацію роботи, публікації автора за темою дисертації та приведена її структура.

У першому розділі наведено основні конструктивні виконання ЕМП ВРД. Виконано огляд систем автоматизованого проектування ВРД та їх порівняння. Це дозволило сформулювати мету – виконати автоматизований синтез ВРД малої потужності, який базується на коло-польових ММ високого ступеню деталізації, з можливістю розрахунків динамічних та квазіусталених режимів роботи.

Також виконано огляд літератури, присвяченої проблемі аналізу та синтезу ВРД, сформульовано основні напрями для отримання оптимальної конструкції ВРД. Це

можливо завдяки вибору оптимальної конфігурації зубців статора та ротора, визначенню оптимальних коефіцієнтів полюсного перекриття статора та ротора, та завдяки оптимізації параметрів комутації за допомогою керування кутами вмикання та вимикання обмотки статора.

У другому розділі розроблено математичну модель вентиляно-реактивного двигуна на базі коло-польового підходу.

ММ описує процес перетворення електричної енергії в механічну, при якому частина енергії розсіюється у вигляді механічних, електричних і магнітних втрат. Магнітні втрати в сталі статора і ротора ЕМП ВРД виникають внаслідок періодичної зміни в часі магнітного потоку. При розрахунку втрат в окремих елементах магнітопроводу доводиться враховувати несинусоїдальну зміну індукції при пульсаційному перемагнічуванні. Крім несинусоїдальної зміни індукції також потрібно враховувати широкий діапазон зміни частоти перемагнічування. Магнітні втрати значно впливають на енергетичні й експлуатаційні показники ВРД. Тому при моделюванні динамічних і квазіусталених режимів роботи двигуна облік цього виду втрат є дуже важливий. У розділі виконано огляд літератури за тематикою розрахунків втрат у сталі ЕМП ВРД.

ММ, яка описує режими роботи реактивного ЕМП з урахуванням втрат у сталі, являє собою систему диференціальних та лінійних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\phi} = i_{\phi} \cdot R_{\phi} + \frac{d\Psi_{\phi}}{dt} \\ M_{EM} = (M_H + M_{XX}) + (J_{ДВ} + J_M) \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ i_{СТ} = \frac{\Delta P_{СТ}}{U_{\phi}} \\ i_{Д} = i_{СТ} + i_{\phi} \end{array} \right. \quad (1)$$

де: U_{ϕ} – напруга фази ВРД; $i_{Д}$ – струм, який споживає ВРД; i_{ϕ} – струм фази; R_{ϕ} – опір фази; Ψ_{ϕ} – потокозчеплення фази; M_{EM} – результуючий електромагнітний момент від дії всіх фаз; M_H – момент навантаження; M_{XX} – момент холостого ходу; $J_{ДВ}$ – момент інерції ротору; J_M – приведений момент інерції механізму; ω – кутова швидкість ротора; $i_{СТ}$ – еквівалентний струм, який враховує втрати в сталі; $\Delta P_{СТ}$ – втрати в сталі.

Перше рівняння системи (1) – диференціальне рівняння електричної рівноваги, яке записане для однієї з фаз ЕМП при допущенні про те, що фази незалежні в магнітному відношенні, а сама магнітна система – симетрична відносно фаз. Друге рівняння системи (1) – диференціальне рівняння механічної рівноваги рухомих частин ЕМП. Третє рівняння системи описує складову загального струму, відповідну втратам у сталі. Четверте рівняння – визначення струму, що споживається ВРД, з урахуванням втрат у сталі.

Розв'язок системи (1) дозволяє отримати динамічні характеристики ВРД $I_\phi, M_{EM}, \omega = f(t)$, а також побудувати його механічну характеристику $\omega = \varphi(M)$. Для розв'язку системи (1) спочатку потрібно отримати наступні залежності:

$$\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta), \quad (2)$$

$$M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta). \quad (3)$$

Залежності (2) та (3) суттєво нелінійні, що визначається принципом дії та геометричними особливостями ЕМП. Найбільш точно їх можливо отримати шляхом чисельного розрахунку магнітного поля застосовуючи МКЕ на базі польової ММ. Для отримання цих залежностей необхідно розрахувати магнітне поле для ряду положень ротора відносно статора.

На рис. 1 показано кінцево-елементну апроксимацію поперечної геометрії та розподіл магнітного поля 4-х фазного ЕМП класичної конструкції 8/6 (вісім полюсів на статорі і шість на роторі) із зовнішнім діаметром статора 80 мм. Даний ВРД випускається ТОВ “Електротехніка – Нові технології” під позначенням SRM-80-110-LA та відноситься до машин малої потужності. На рис. 1 наведено розподіл магнітного поля в ЕМП при повністю узгодженому положенні.

За результатами розрахунку магнітного поля визначаються залежності (2) (рис. 2,а) і (3) (рис. 2,б).

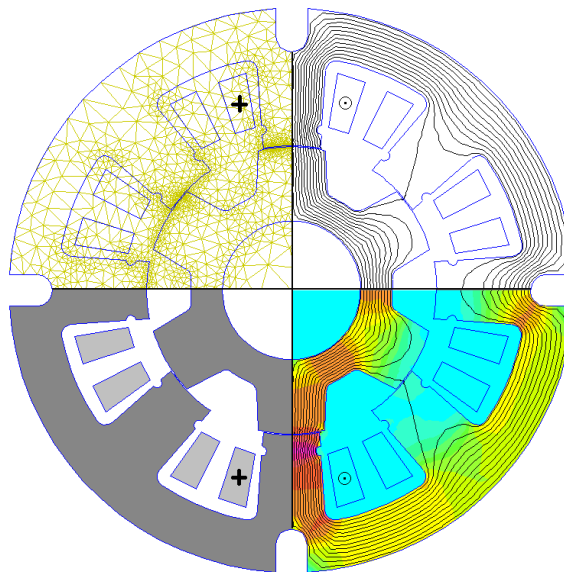


Рисунок 1 – Кінцево-елементна апроксимація поперечної геометрії і розподіл магнітного поля і індукції в ЕМП ВРД

В результаті розв'язання системи рівнянь (1) з використанням залежностей (2) і (3) визначаються наступні величини в залежності від часу: напруга, струми фаз і струм джерела, потокозчеплення фаз, моменти фаз і сумарний момент двигуна, швидкість двигуна, споживана енергія від джерела за час пуску та віддана енергія джерела при гальмуванні. При роботі ВРД в квазіусталеному режимі можна визначити: сталу швидкість, значення споживаної та корисної потужності, електричних і механічних втрат, величину ККД ВРД, середній момент з оцінкою величини пульсацій моменту та робочі характеристики ВРД.

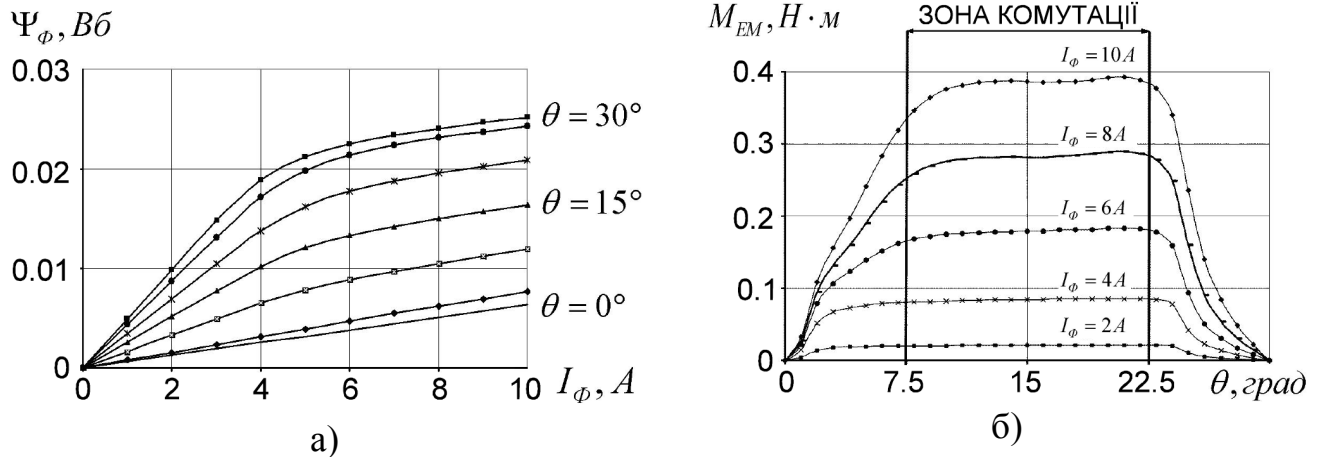


Рисунок 2 – Залежності: а) $\Psi_\phi = f_1(I_\phi, \theta)$, б) $M_{EM} = f_2(I_\phi, \theta)$

Для перевірки адекватності наведеної вище ММ виконано порівняльний аналіз результатів моделювання та експерименту. Як об'єкт дослідження виступає ВРД SRM-80-200 виробництва ТОВ “Електротехніка – Нові технології”. Це чотирифазний ВРД класичної конструкції. Співвідношення чисел полюсів статора до ротора – 8/6, зовнішній діаметр статора ЕМП 82 мм, довжина активної частини 45 мм, номінальний момент навантаження 0.05 Н·м, номінальна частота обертання 6000 об/хв. Порівняльний аналіз результатів математичного моделювання та експерименту виконувався по робочим характеристикам, які отримані при роботі електропривода на “природній” механічній характеристиці. Порівнювалися такі величини, як: швидкість (n), струм джерела живлення (I) і ККД (η). Графічна інтерпретація порівняння результатів моделювання з урахуванням втрат в сталі й експерименту наведено нижче. На рис. 3,а наведено порівняння механічних характеристик, на рис. 3,б порівняння струму, споживаного від джерела живлення, на рис. 3,в – порівняння ККД.

Порівняння результатів експерименту і математичного моделювання, яке враховує вплив магнітних втрат в сталі, показує середню різницю по струму джерела живлення в 6 %, по ККД і по швидкості, на 5 % та 2 %, відповідно. Це свідчить про достатню адекватність запропонованої ММ (1) і можливості її застосування для подальших проектних та оптимізаційних досліджень.

Перетворення енергії в електричних машинах супроводжується електричними і магнітними втратами, що проявляється у вигляді нагріву і може призвести до перегріву як окремих елементів, так і електродвигуна в цілому.

Так як перевищення допустимих значень нагріву обладнання знижує термін використання і якість його функціонування, то визначення та аналіз температури основних елементів електродвигуна в залежності від параметрів і режимів його роботи мають велике значення. Найбільш точно розрахувати теплове поле в електричній машині можливо з використанням чисельних методів розрахунку теплових полів за допомогою МКЕ. Як об'єкт дослідження розглянуто ВРД SRM-57-100 виробництва ТОВ “Електротехніка – Нові технології”. Це чотирифазний ВРД конструкції 8/6, зовнішній діаметр статора якого становить 57 мм, довжина активної частини 28 мм. Обмотка статора містить вісім зосереджених котушок, з'єднаних послідовно по дві в одну фазу, в одній котушці намотано 30 витків. Спосіб охолодження цього ВРД – ІС0040 (закритий двигун з “природним” охолодженням).

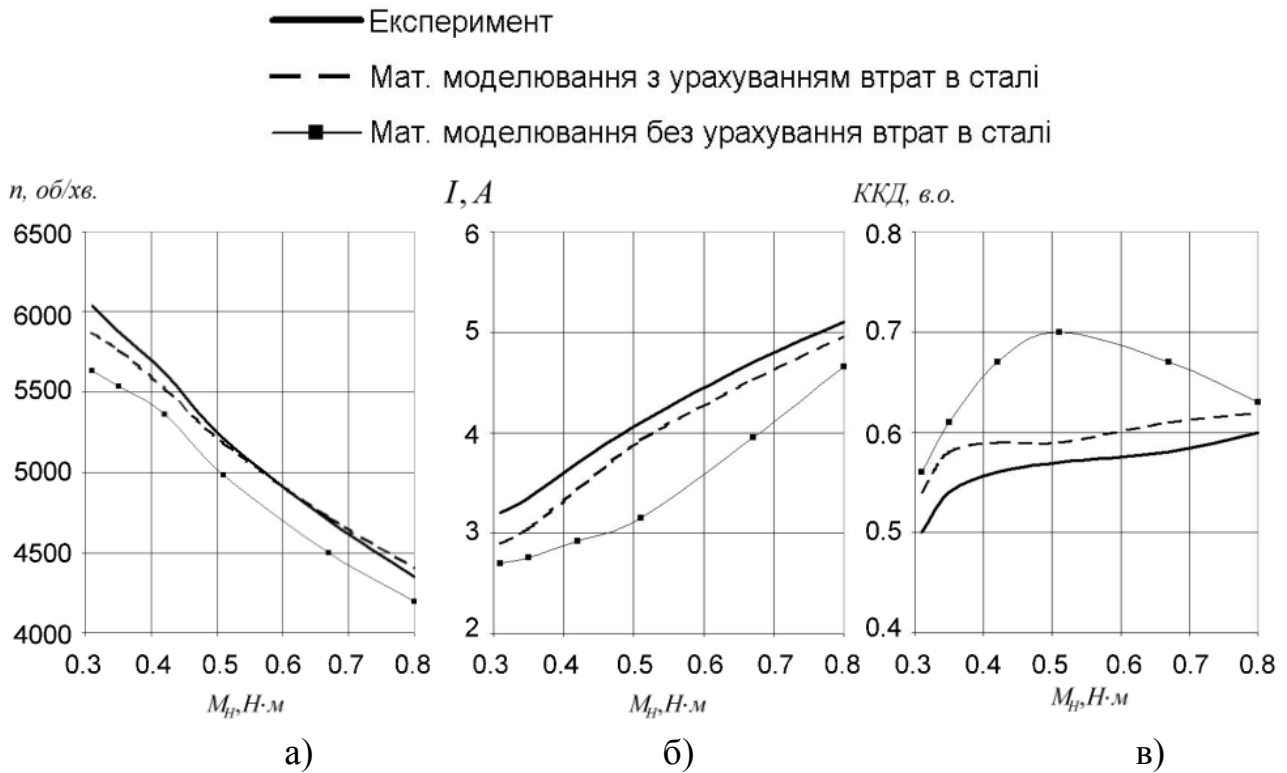


Рисунок 3 – Залежності: а) $n = f(M_H)$, б) $I = f(M_H)$, в) $\eta = f(M_H)$

Для розрахунку стаціонарних температурних полів з використанням МКЕ використана програма ELCUT версії 5.6. Графічна інтерпретація результатів розрахунку стаціонарного теплового поля для ЕМП ВРД наведена на рис. 4. Виконана верифікація ММ електромеханічного перетворювача ВРД на базі рівнянь теплового поля. Результати математичного моделювання стаціонарного теплового поля та фізичного експеримента достатньо близькі. Відміна між ними не перевищує 5 %, що свідчить про достатню ефективність розробленої моделі.

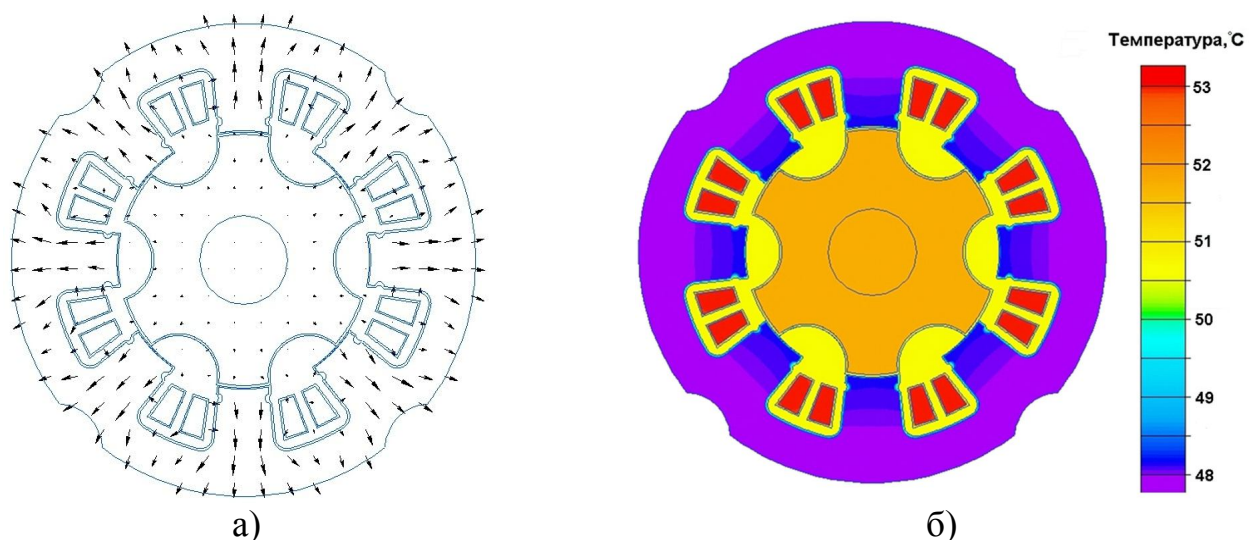


Рисунок 4 – Розподіл теплового потоку в ЕМП ВРД (а), розподіл температури в ЕМП ВРД (б)

Матеріал третього розділу присвячено створенню системи автоматизованого синтезу вентильно-реактивних двигунів SRM-CAD, яка призначена для вирішення задач структурного і параметричного синтезу, а також виконання оптимізаційних і проектних досліджень. Функціональну схему системи SRM-CAD представлена на рис. 5.

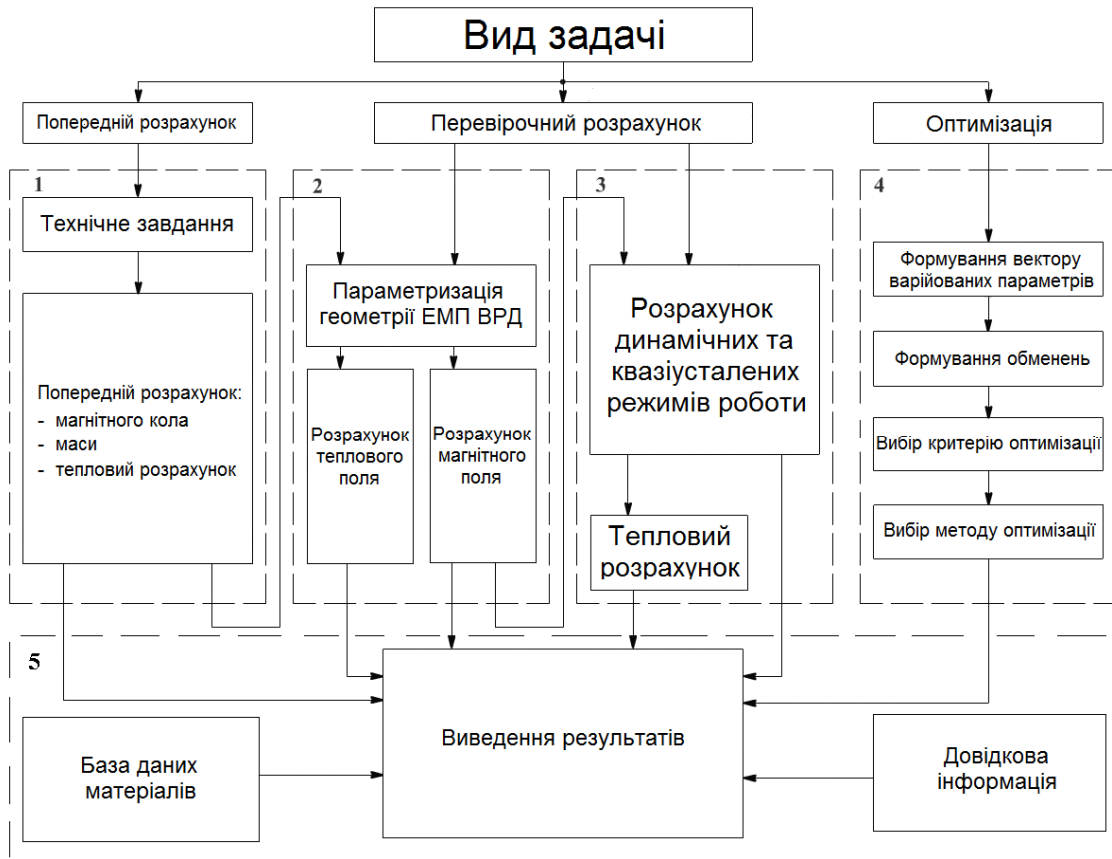


Рисунок 5 – Функціональна схема системи SRM-CAD

Цифрами позначено наступні підсистеми: 1 – попереднього розрахунку, 2 – параметризації геометрії ЕМП ВРД та розрахунку магнітних і теплових полів чисельними методами, 3 – розрахунку динамічних і квазіусталених режимів роботи, 4 – оптимізації та 5 – інформаційна. При цьому кожна підсистема реалізує самостійну групу задач автоматизованого проектування. При проектуванні системи було реалізовано наступне: повний цикл проектування – від технічного завдання до розрахунку динамічних і квазіусталених режимів роботи, також є можливість виконання оптимізаційних процедур. Система об'єднує різні розрахункові модулі; забезпечує передачу даних між підсистемами, надає доступ до різних підсистем через єдиний інтерфейс. Виконується параметризація геометрії ЕМП ВРД та її передача в програми розрахунку магнітних і теплових полів. Підсистема оптимізації геометричних розмірів ЕМП та параметрів системи керування використовує метод сіток та генетичний алгоритм, як пошукові методи. Інформаційна підсистема надає інформаційну підтримку користувачу та довідкові матеріали.

Розвинені засоби взаємодії між підсистемами дозволяють значно спростити процес проектування електричної машини. Наприклад, створену геометрію ЕМП мож-

ливо передати у зовнішню програму чисельних розрахунків магнітних та теплових полів методом кінцевих елементів. Дані, які отримано при розрахунку магнітного поля, передаються в систему SRM-CAD, в підсистему розрахунку динамічних та квазіусталених режимів роботи.

В результаті вирішення теплової задачі визначаються температури у різних частинах ЕМП ВРД. Форма вводу вихідних даних і результат параметризації ЕМП ВРД конструкції 8/6 показані на рис 6.

Підсистема розрахунку динамічних та квазіусталених режимів роботи надає користувачу наступні можливості:

- отримання результатів розрахунку залежностей $\Psi_{\phi} = f_1(I_{\phi}, \theta)$ і $M_{EM} = f_2(I_{\phi}, \theta)$ в табличній формі з їх подальшою візуалізацією;
- аналіз динамічних режимів роботи ВРД з поданням результатів у вигляді діаграм зміни миттєвих значень: напруги і струмів фаз, моментів фаз і сумарного моменту двигуна (рис. 7,а); потокозчеплення фаз; швидкості обертання валу і зміни кута повороту ротора (рис. 7,б); потужності втрат; спожитої енергії від джерела за час пуску та енергії, відданої джерелу при гальмуванні;
- для квазіусталеного режиму роботи розраховується середня величина вищевказаних параметрів.

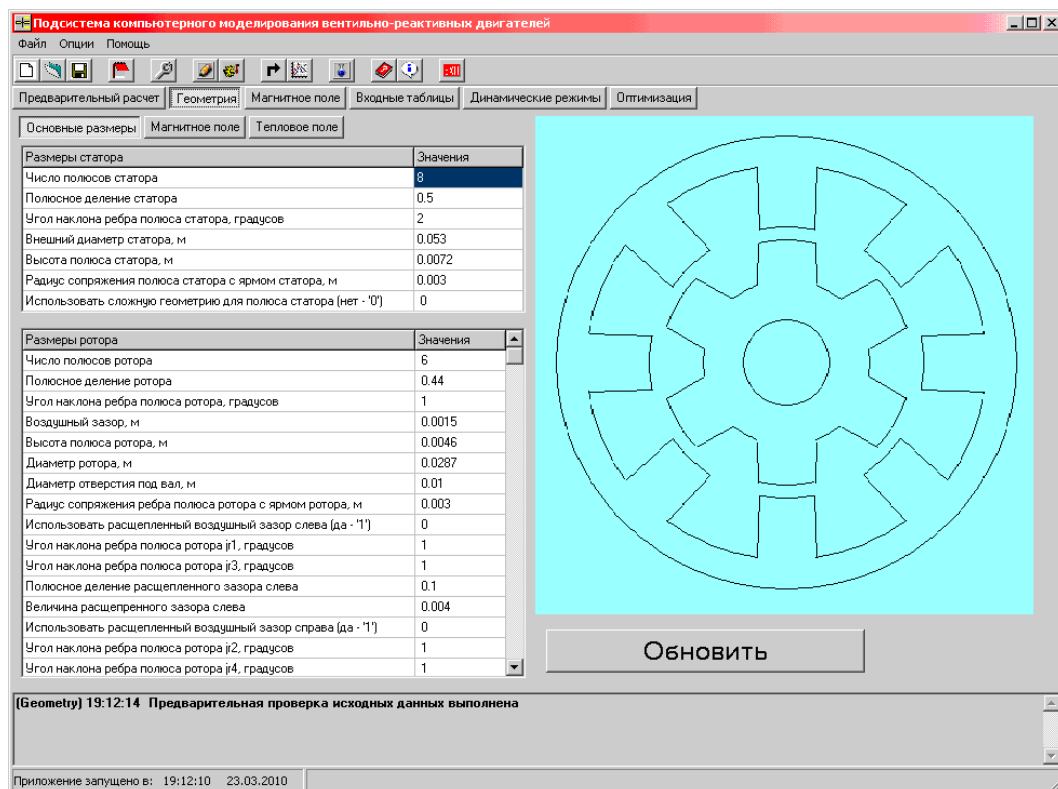
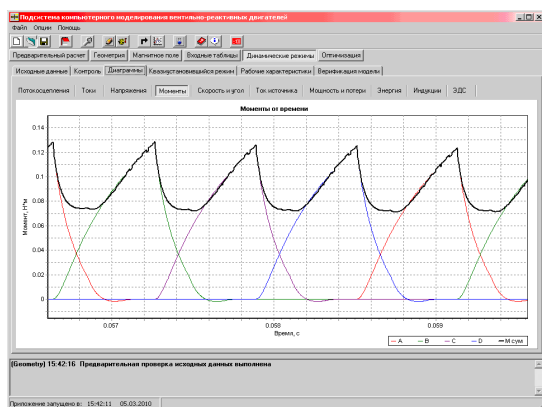


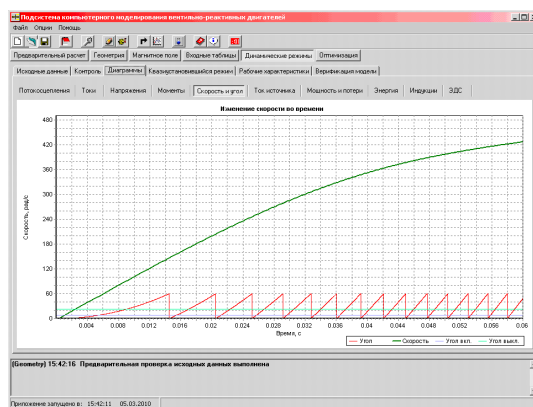
Рисунок 6 – Підсистема генерації геометрії системи SRM-CAD

У розділі сформульовано загальну постановку задачі оптимізації ВРД та показано, що вона включає в себе як структурну, так і параметричну оптимізацію.

Слід відзначити, що програмний комплекс SRM-CAD, написаний на компільованій мові високого рівня, дозволяє суттєво прискорити час розрахунку перехідних процесів, особливо у порівнянні з підсистемами, реалізованими в середовищах MathCad, MatLab Simulink, LabView, тощо.



а)



б)

Рисунок 7 – Діаграми: моментів фаз та сумарного моменту (а), зміни швидкості та кута комутації (б)

Матеріал четвертого розділу присвячено поліпшенню технічних характеристик ВРД.

Розглядається аналіз та вибір конфігурації зубцевої зони ЕМП ВРД, так як цей фактор має суттєвий вплив на його властивості. В конструктивних виконаннях ВРД набули застосування різні конфігурації зубців статора і ротора.

Відомі варіанти конфігурації полюсів статора ЕМП ВРД можливо звести до трьох базових: полюс, який розширюється від краю до основи, прямий та який звужується від краю до основи.

Використовуючи три базових варіанта конфігурацій полюсів для статора і три аналогічних варіантів для ротора можна отримати комбінацію сполучень із дев'яти варіантів ЕМП (табл. 1).

Окрім форми полюсів вплив на характеристики ВРД надає така величина, як коефіцієнт полюсного перекриття. Тому для кожного із дев'яти варіантів визначені оптимальні коефіцієнти полюсного перекриття статора (α_s) і ротора (α_r). Вже по результатам оптимізації кожної конструкції визначено кращий варіант.

Для оцінки ефективності застосування того чи іншого варіанту конфігурації полюсів застосуємо як критерій середнє значення статичного електромагнітного моменту M_{CP} , яке отримується інтегруванням залежності $M_{EM} = f(\theta)$ на періоді комутації (4):

$$M_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^N M_{EM_i}}{i}, \quad i \in [1, N]; \quad (4)$$

де M_i – значення миттєвого електромагнітного моменту в i -й точці зони комутації; N – число розрахункових точок за період комутації.

При цьому будемо шукати максимальне значення критерію. Таким чином, постановка задачі оптимізації наступна: варійованими змінними для кожної із конфігурацій є коефіцієнти полюсного перекриття статора і ротора, критеріями оптимізації виступають значення середнього моменту на періоді комутації (4). У зв'язку з малою розмірністю оптимізаційної задачі доцільно застосовувати метод сіток (повного перебору).

Таблиця 1 – Варіанти конфігурацій полюсів статора та ротора

Конструкція								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Форма полюсів статора								
								
Форма полюсів ротора								
								

За результатами досліджень дев'яти конструкцій ЕМП ВРД отримано значення середнього електромагнітного моменту в залежності від коефіцієнтів полюсного перекриття статора і ротора для кожного із варіантів конструкції. При цьому для кожної конструкції синтезовано регресійне рівняння, яке описує середній електромагнітний момент у функції від коефіцієнтів полюсного перекриття статора і ротора.

Регресійне рівняння шостого порядку, яке описує розподіл середнього електромагнітного моменту на періоді комутації для першого варіанту конструкції, наведено нижче.

$$\begin{aligned}
 M_{CP}(\alpha_S, \alpha_R) = & 3845.521 \cdot \alpha_S \alpha_R^5 + 1354.877 \cdot \alpha_R^6 + 4981.182 \cdot \alpha_R^6 + 6132.108 \cdot \alpha_R^4 - \\
 & - 5391.658 \cdot \alpha_S \alpha_R^4 - 2525.05 \cdot \alpha_S \alpha_R^5 - 3381.381 \cdot \alpha_R^3 + 1303.031 \cdot \alpha_S \alpha_R^3 + 6427.173 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R^3 - \\
 & - 1664.786 \cdot \alpha_S \alpha_R^5 + 850.542 \cdot \alpha_R^2 + 1145.691 \cdot \alpha_S \alpha_R^2 - 5535.5 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R^2 + 2571.315 \cdot \alpha_S^3 \alpha_R^2 - \\
 & - 334.443 \cdot \alpha_S^4 \alpha_R^2 - 97.503 \cdot \alpha_R - 395.237 \cdot \alpha_S \alpha_R + 917.677 \cdot \alpha_S^2 \alpha_R + 953.571 \cdot \alpha_S^3 \alpha_R - \\
 & - 2016.779 \cdot \alpha_S^4 \alpha_R + 945.807 \cdot \alpha_S^5 \alpha_R + 21,118 - 180.924 \cdot \alpha_S + 1065.104 \cdot \alpha_S^2 - 3094.911 \cdot \alpha_S^3 + \\
 & + 4424.126 \cdot \alpha_S^4 - 3130.778 \cdot \alpha_S^5 + 867.775 \cdot \alpha_S^5
 \end{aligned}$$

Максимальна відносна похибка для регресійної моделі, яка описує середній електромагнітний момент, складає 0.7 %. На рис. 8 показана графічна інтерпретація регресійної моделі, для порівняння наведено вихідні точки, розраховані з використанням польової моделі.

При застосуванні регресійних моделей для кожної із конструкцій отримано оптимальні значення коефіцієнтів полюсного перекриття статора і ротора, які забезпечують максимальний середній електромагнітний момент на періоді комутації.

В табл. 2 представлений розрахунок для кращих варіантів конфігурацій полюсів статора і ротора.

З точки зору технології виготовлення ЕМП, полюс статора, показаний у першому варіанті, дозволяє утримувати котушку за рахунок своєї форми. Для варіантів 2 та 3 необхідно застосовувати спеціальні конструктивні рішення для утримання котушок на полюсах, або виконувати в полюсі виріз під пазовий клин.

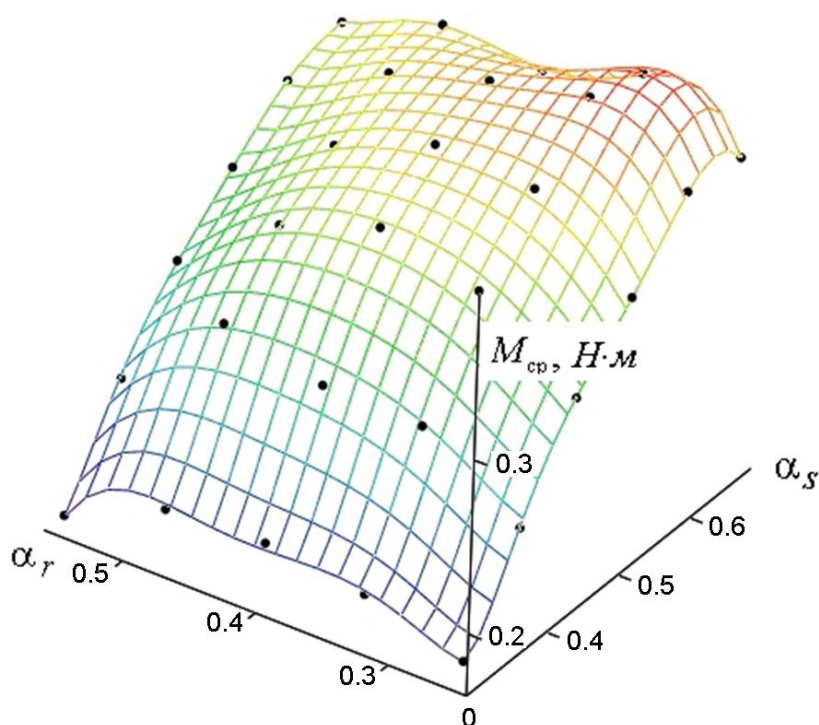


Рисунок 8 – Залежність $M_{CP} = f(\alpha_S, \alpha_R)$ для конструкції з полюсом статора, який звужується від краю до основи та прямим полюсом ротору

Таблиця 2 – Результати розрахунків варіантів 1 – 3

Конструкція	1	2	3
Форма зубця статора			
Форма зубця ротора	Полюс з прямими стінками		
Значення оптимальних α_S та α_R , в.о.	$\alpha_S = 0.64$ $\alpha_R = 0.33$	$\alpha_S = 0.63$ $\alpha_R = 0.35$	$\alpha_S = 0.45$ $\alpha_R = 0.5$
M_{CP} , Н·м	$M_{CP} = 0.38$	$M_{CP} = 0.4$	$M_{CP} = 0.4$

Аналіз даних таблиці 2 дозволяє зробити висновок, що при формі зубця ротору з паралельними стінками найбільший середній момент розвивають конструкції ЕМП з полюсами статора показаними в варіантах 2 та 3. При цьому варіант 2 є кращим, так як саме в цьому варіанті під котушки відводиться більша площа.

Також виконано аналіз та вибір коефіцієнтів полюсного перекриття ротора і статора трифазного ЕМП ВРД.

Для отримання рекомендацій по вибору коефіцієнтів полюсного перекриття α_S і α_R , а також оцінки їх впливу на робочі властивості двигуна були проведені розрахункові дослідження трифазного ВРД із співвідношенням чисел полюсів статора до ротора 6/4. При цьому зовнішній діаметр статора/ротора становить 82/41.7 мм, довжина пакету статора 45 мм, висота полюсу статора/ротора 13/6.2 мм відповідно, величина повітряного зазору 0.15 мм.

За номінальний прийнято електромагнітний момент, який розвиває ЕМП ВРД при магніторушійній силі (МРС) фази двигуна 480 А. Зміна електромагнітного моменту M_{EM} розглядається в залежності від кута повороту ротора $\theta = (0 \div 45)$ град. Кут $\theta = 0$ град. відповідає повністю розузгодженому положенню полюсу ротора відносно статора, коли вісь зубця статора збігається з віссю пазу ротора, а $\theta = 45$ град. відповідає узгодженому положенню.

Включення фази виконується при куті вмикання 7.5 град., відключення – при 37.5 град., тобто період комутації становить 30 град. Робочі властивості ВРД можна оцінити по критерію – максимуму середнього електромагнітного моменту (4). При проведенні досліджень допустима область зміни коефіцієнтів α_r і α_s прийнята наступною: $\alpha_r \in [0.25; 0.6]$, $\alpha_s \in [0.3; 0.8]$. Це дозволило охопити практично всю область можливої зміни цих коефіцієнтів. Крок зміни коефіцієнтів 0.01 в.о.

За результатами досліджень побудовані лінії рівня в площині (α_s, α_r) від функцій величини середнього моменту M_{CP} і коефіцієнта пульсацій моменту K_{II} , отриманих шляхом апроксимації двовимірними сплайнами результатів розрахунку магнітного поля. Для номінальної МРС 480 А показано лінії рівня функцій $M_{CP} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ (рис. 9,а) і $K_{II} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ (рис. 9,б).

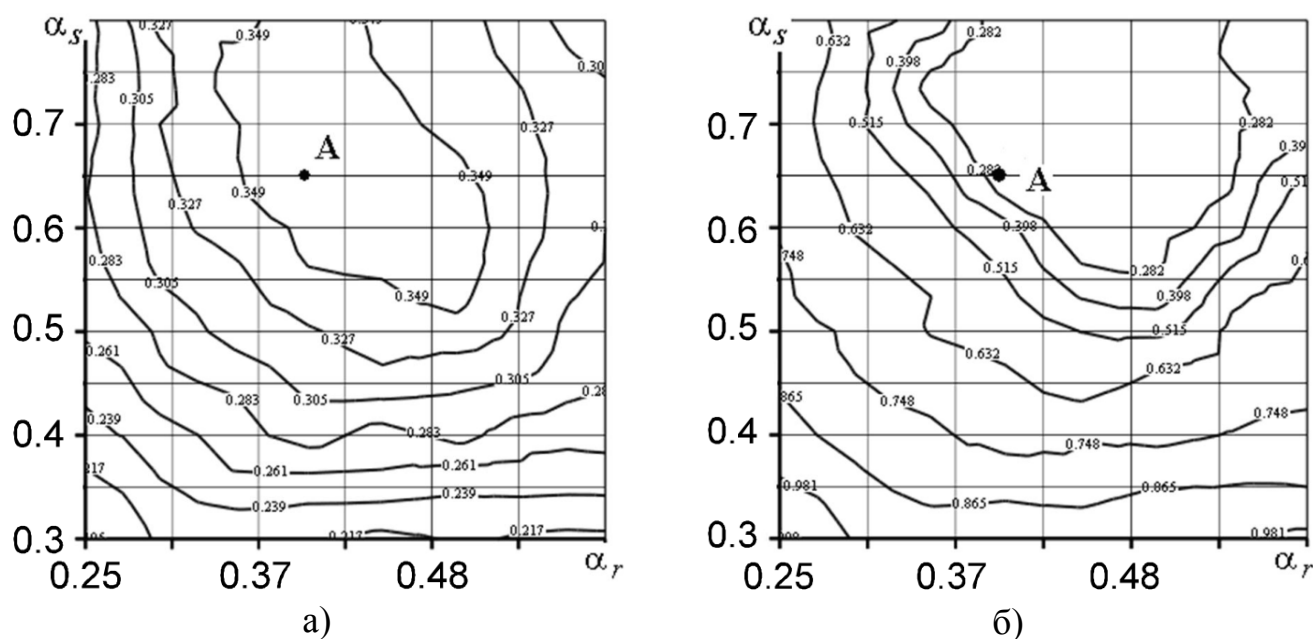


Рисунок 9 – Лінії рівня:

- а) $M_{CP} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ – середнього електромагнітного моменту,
 б) $K_{II} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ – коефіцієнта пульсацій моменту ВРД.

Наведений графічний матеріал свідчить, що області екстремумів функцій $M_{CP} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ і $K_{II} = f(\alpha_s, \alpha_r)$ практично співпадають. Максимальний середній момент забезпечується при коефіцієнтах полюсного перекриття $\alpha_s = 0.65$ в.о. і $\alpha_r = 0.4$ в.о. Використання цих величин при номінальній МРС дозволяє отримати $K_{II} = 0.32$ в.о. та $M_{CP} = 0.35 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що відповідає точці “А” на рис. 9.

В роботі розглянуто аналіз впливу параметрів комутації на характеристики ВРД. Вибір параметрів комутації фаз ВРД має суттєвий вплив на його робочі властивості і енергетичні показники. Наведений аналіз можливих технічних рішень при формуванні кутів комутації фаз та отримані рекомендації поліпшують характеристики і енергетичні властивості ВРД.

Для покращення характеристик ВРД за допомогою зміни параметрів комутації можливі наступні способи:

1. Симетричне розширення зони комутації фаз. В цьому випадку необхідно використання давача, який має замість двох каналів чотири – по числу фаз ВРД.

2. Розширення зони комутації з випередженням включення фаз, що вимагає, для реверсивних ВРД, збільшення числа сигналів з давача положення ротору до восьми. При цьому кут вмикання фази зміщується в сторону повністю розузгодженого положення полюсів статора і ротора.

В проведеному аналізі як об'єкт дослідження виступає чотирифазний низькошвидкісний ВРД SRM-130. Він має наступні дані: співвідношення полюсів статора до ротора – 16/12, зовнішній діаметр статора/ротора – 130 мм/80.5 мм, активна довжина – 80 мм, величина повітряного проміжку – 0.25 мм, число витків в фазі – 132.

Досліджувався вплив симетричного розширення зони комутації (спосіб 1), у межах від 7.5 до 15 градусів на зміну ККД (η) і коефіцієнта пульсацій моменту (K_{Π}) при роботі ВРД на “природній” механічній характеристиці. На рис. 10 представлено зазначені залежності для ряду значень моменту навантаження (M_H).

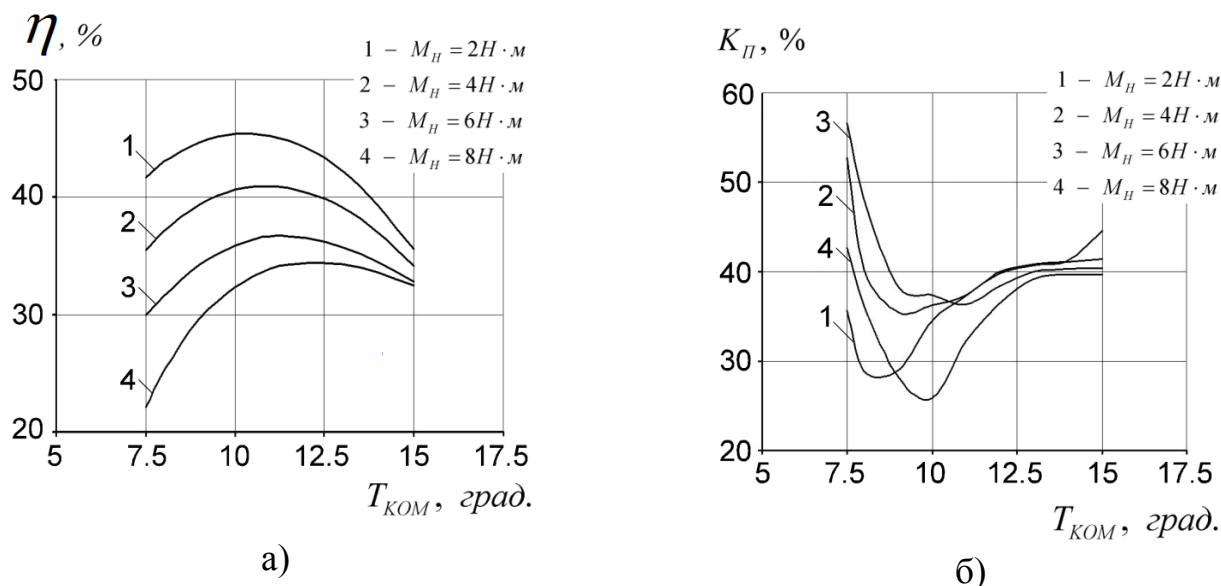


Рисунок 10 – Залежності для ряду значень моменту M_H :

а) $\eta = f(T_{КОМ})$, б) $K_{\Pi} = f(T_{КОМ})$

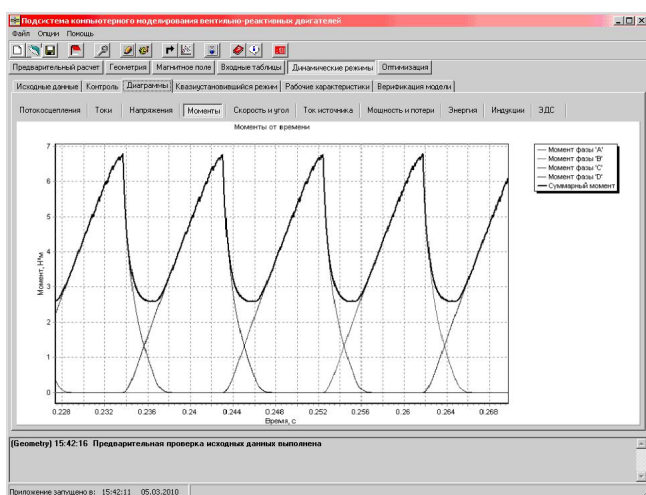
Як впливає з рис. 10, для підвищення ККД при одночасному зниженні рівня пульсацій моменту ВРД, може бути рекомендована зона комутації розміром в 11 град. Наприклад, для значення моменту $M_H = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ маємо: при $T_{КОМ} = 7.5$ град. $\eta = 35.9 \%$, при $T_{КОМ} = 11$ град. η виріс до 41.3 %, а K_{Π} знизився з 49.6 % до 36.9 %. Таким чином, незначне подорожчання давача положення ротора, за рахунок викори-

стання чотирьох каналів замість двох, дозволяє поліпшити показники ВРД.

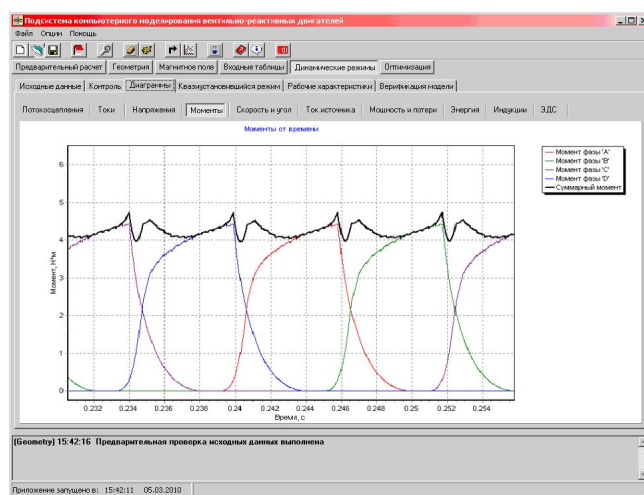
Для реалізації другого способу досліджено вплив розширення зони комутації і зсуву кута вмикання фази в сторону розузгодженого положення полюсів статора і ротора, при цьому кут затримки вмикання режиму P1 (θ_r) варіювався. Під режимом P1 мається на увазі режим, при якому струм проводить тільки один з двох напівпровідникових ключів у фазі.

За результатами розрахунку рекомендуються наступні параметри комутації: кут вмикання 0.5 град., період комутації 8.5 град. При цих параметрах спостерігається подальше зростання ККД – до 47.7 %, а також суттєве зниження коефіцієнта пульсацій моменту – до 9.4 % при моменті навантаження $M_H = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$, що добре ілюструється діаграмами моментів, моделювання яких виконано в системі автоматизованого синтезу ВРД SRM-CAD (рис. 11).

Застосування першого способу комутації дозволяє, порівняно з вихідним варіантом, збільшити ККД ВРД в середньому на 6 %, а коефіцієнт пульсацій K_D знизити в середньому на 10 %. Перехід до другого способу сприяє додатковому збільшенню ККД в середньому ще на 6 % при зниженні коефіцієнта пульсацій моменту в середньому до 13 %.



а)



б)

Рисунок 11 – Діаграми зміни моментів ВРД від часу при різних параметрах комутації, отримані в системі SRM-CAD:

- а) – кут вмикання 3.75 град., період комутації 7.5 град. (стандартні значення кутів комутації);
- б) – кут вмикання 0.5 град., період комутації 8.5 град. (при застосуванні другого способу)

ВИСНОВКИ

1. Моделювання динамічних та квазіусталених режимів роботи ВРД здійснюється на основі розроблених польових ММ високого ступеню деталізації з урахуванням магнітних втрат в магнітопроводі. ММ є основою для розробки програмного забезпечення автоматизованого синтезу ВРД. Адекватність розробленої ММ підтверджується експериментальними дослідженнями на макетних взірцях ВРД.

2. Розроблено ММ стаціонарного теплового поля ВРД на основі МКЕ. Результати порівняння фізичного експерименту та математичного моделювання стаціонарного теплового поля ВРД співпадають з точністю до п'яти відсотків.

3. Сформовані системні принципи, на базі яких розроблена система автоматизованого синтезу ВРД SRM-CAD. Модульна структура системи дозволяє виконувати її розширення та модернізацію по мірі необхідності. Розроблена система інваріантна до ряду конструктивних виконань ВРД, що дозволяє в процесі проектування виконувати їх структурну оптимізацію. Для оперативної зміни структури використовується параметризація геометрії ЕМП ВРД. Використання системи SRM-CAD вирішує основні проектні задачі: від технічного завдання до розрахунку динамічних і квазіусталених режимів роботи, а також перевірку теплового стану ЕМП ВРД з використанням польових ММ. Систему реалізовано на компільованій мові високого рівня, що суттєво прискорює час розрахунків, в порівнянні з реалізаціями, які базуються на системах MatLab Simulink, LabView, MathCad, тощо.

4. Розроблені програмні засоби симуляції електромеханічних процесів дозволяють оперативно проводити дослідження впливу різних факторів на процеси у ВРД. Ці засоби є основою для проведення оптимізації ВРД на базі коло-польової ММ високого ступеню деталізації з можливістю розрахунку динамічних та квазіусталених режимів роботи. При оптимізації використовується генетичний алгоритм, якому придатна потенційна властивість знаходити глобальний оптимум.

5. Виконано аналіз із застосуванням МКЕ розрахунку магнітного поля дев'яти базових конфігурацій зубцевої зони чотирифазного ЕМП ВРД класичної конструкції з співвідношенням чисел полюсів статора до ротора 8/6. Рекомендовано застосовувати активну зону з паралельними стінками полюсів на статорі і роторі.

6. Виконана оптимізація конфігурації активної зони чотирифазної конструкції 8/6 ЕМП ВРД. Отримано оптимальні коефіцієнти полюсного перекриття для статора $\alpha_S = 0.63$ в.о. і для ротора $\alpha_R = 0.35$ в.о. При цих значеннях забезпечується максимальний середній момент на періоді комутації.

7. Також визначено оптимальні коефіцієнти полюсного перекриття статора $\alpha_S = 0.63$ в.о. і ротора $\alpha_R = 0.42$ в.о. для трифазного ЕМП конфігурації 6/4, при яких забезпечується максимальний середній електромагнітний момент.

8. Суттєве покращення робочих властивостей та енергетичних характеристик ВРД може бути забезпечено шляхом розширення та зсуву зони комутації в бік випередження кута вмикання. Це призводить до підвищення ККД (в середньому на 12 %) з одночасним зниженням рівня пульсацій моменту (в середньому на 23 %).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гулый М.В. Влияние смещения зоны коммутации на характеристики вентиляно-реактивного электропривода / М.В. Гулый, З.П. Процина, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // Сборник научных трудов Днепропетровского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2007. – С. 94-96.

2. Процына З.П. Оптимизация углов включения и выключения фаз вентиляльно-реактивного двигателя / З.П. Процына // Вестник Национального технического университета “ХПИ” – 2009. – № 7 С. 118-125.

3. Процына З.П. Параметризация геометрии вентиляльно-реактивного двигателя / З.П. Процына // Электротехнические и компьютерные системы – 2016. – № 22 (98) С. 239-243.

4. Радимов И.Н. Влияние параметров коммутации на характеристики вентиляльно-реактивного электропривода / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2006. – № 67. – С. 82-87.

5. Радимов И.Н. Коэффициенты полюсного перекрытия трехфазного вентиляльно-реактивного двигателя / И.Н. Радимов, В.В. Рымша, З.П. Процына // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2009. – № 73. – С. 63-67.

6. Рымша В.В. Подсистема компьютерного моделирования вентиляльно-реактивных электродвигателей / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, З.П. Процына // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. – № 2 (25). – С. 437-442.

7. Рымша В.В. Расчет двухмерного стационарного теплового поля вентиляльно-реактивного двигателя методом конечных элементов / В.В. Рымша, З.П. Процына, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 26-28.

8. Рымша В.В. Сопоставительный анализ энергетических свойств вентиляльно-реактивных двигателей с различным числом фаз / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, З.П. Процына, П.А. Кравченко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 6. – С. 39-41.

9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30929. Комп'ютерна програма “Система автоматизованого аналізу та синтезу вентиляльно-реактивних двигунів SRM-CAD” / М.В. Гулий, О.Є. Мальований, З.П. Процына, І.М. Радімов, В.В. Рымша. Україна, м. Київ: Міністерство освіти і науки України, Державний департамент інтелектуальної власності, 10.11.2009 р.

Процына З.П. Автоматизований синтез вентиляльно-реактивних двигунів малої потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.09.01 – Електричні машини та апарати. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

Дисертація присвячена синтезу вентиляльно-реактивних двигунів малої потужності з використанням розробленого спеціалізованого програмного забезпечення SRM-CAD. У дисертації розроблена коло-польова ММ, яка враховує втрати у сталі, для розрахунку динамічних і квазіусталених режимів роботи ВРД. Застосування математичних моделей на базі чисельних методів аналізу магнітного поля дозволяє врахувати реальну геометрію та рівень насичення феромагнітних матеріалів, який властивий ЕМП ВРД. Запропоновані моделі є основою для розробки програмного забезпечення автоматизованого синтезу ВРД SRM-CAD. Розроблена система інваріантна до ряду конструктивних виконань ЕМП ВРД, що дозволяє в процесі проектування варіювати структуру ЕМП та здійснювати її оптимальний вибір. Для оперативної зміни структури використовується параметризація геометрії ЕМП ВРД. Використання

системи SRM-CAD дозволяє виконувати розв'язок основних проектних задач: від технічного завдання до розрахунку динамічних та квазіусталених режимів роботи, а також здійснювати перевірку теплового стану ЕМП ВРД, застосовуючи польові ММ. Система реалізована на компільованій мові високого рівня, що суттєво прискорює час розрахунків перехідних процесів у порівнянні з реалізаціями, які базуються на системах MatLab Simulink, LabView, MathCad, тощо. Експерименти на макетних взірцях підтвердили адекватність розробленої ММ.

Запропонована методика розрахунку стаціонарного теплового поля ВРД з застосуванням ММЕ. Порівняння результатів фізичного експерименту та математичного моделювання стаціонарного теплового поля збігаються з точністю до п'яти процентів. Це свідчить про достатню точність розробленої ММ теплових полів.

Визначена конфігурація активної зони чотирифазного ЕМП ВРД класичної конструкції з співвідношенням чисел полюсів статора до ротора 8/6. Рекомендується застосовувати активну зону з паралельними стінками полюсів на статорі і роторі. Виконана оптимізація конфігурації активної зони чотирифазного ЕМП ВРД конструкції 8/6. При цьому коефіцієнти полюсного перекриття складають для статора $\alpha_S = 0.63$ в.о., для ротора $\alpha_R = 0.35$ в.о. Саме при цих значеннях забезпечується максимальний середній момент на періоді комутації. Також визначено оптимальні коефіцієнти полюсного перекриття статора і ротора, для трифазного ВРД конфігурації 6/4, при яких забезпечується максимальний середній електромагнітний момент на періоді комутації. Рекомендовані коефіцієнти полюсного перекриття для статора $\alpha_S = 0.63$ в.о., для ротора $\alpha_R = 0.42$ в.о. Показана можливість покращення робочих властивостей та енергетичних характеристик ВРД шляхом розширення та зсуву зони комутації в бік випередження кута вмикання. При цьому забезпечується значний вигреш у вигляді збільшення ККД, в середньому на 12 % та одночасному зниженні пульсацій моменту, в середньому на 23 %.

Ключові слова: вентиляно-реактивний двигун, електромеханічний перетворювач, математична модель, магнітне поле, динамічні та квазіусталені режими роботи, система автоматизованого проектування.

Процьна З.П. Автоматизированный синтез вентиляно-реактивных двигателей малой мощности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

Диссертация посвящена синтезу вентиляно-реактивных двигателей малой мощности с применением созданного специализированного программного обеспечения SRM-CAD. В диссертации разработана цепно-полевая математическая модель, учитывающая потери в стали, для расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы ВРД. Применение математических моделей на базе численных методов анализа магнитного поля позволяет учесть реальную геометрию и уровень насыщения ферромагнитных материалов, который свойственен электромеханическому преобразователю (ЭМП) ВРД. Предложенные модели являются основой для разработки

программного обеспечения автоматизированного анализа, синтеза и оптимизации ВРД SRM-CAD. Разработанная система инвариантна к ряду конструктивных исполнений ЭМП ВРД, что позволяет в процессе проектирования варьировать структуру ЭМП и осуществлять ее оптимальный выбор. Для оперативного изменения структуры используется параметризация геометрии ЭМП ВРД. Использование системы SRM-CAD позволяет реализовать решение основных проектных задач: от технического задания до расчета динамических и квазиустановившихся режимов работы, а также проверку теплового состояния ЭМП ВРД, с помощью полевых математических моделей. Система реализована на компилируемом языке высокого уровня, что существенно ускоряет время расчета переходных процессов, в сравнении с реализациями, основанными на системах MatLab Simulink, LabView и MathCad. Экспериментальные исследования опытных образцов подтвердили адекватность разработанной математической модели.

Предложена методика расчета стационарного теплового поля ВРД с использованием метода конечных элементов, который позволяет учесть особенности реальной геометрии. Результаты сопоставления физического эксперимента и математического моделирования стационарного теплового поля совпадают с точностью до пяти процентов. Это свидетельствует о высокой точности разработанных математических моделей.

Определена конфигурация зубцовой зоны четырехфазного ЭМП ВРД классической конструкции с соотношением чисел полюсов статора к ротору 8/6. Рекомендуется применять активную зону с параллельными стенками полюсов на статоре и роторе. Выполнена оптимизация конфигурации активной зоны четырехфазного ЭМП ВРД конструкции 8/6. При этом коэффициенты полюсного перекрытия составляют для статора $\alpha_s = 0.63$ о.е., для ротора $\alpha_r = 0.35$ о.е. Именно при этих значениях обеспечивается максимальный средний момент. Также определены оптимальные коэффициенты полюсного перекрытия статора и ротора, для трехфазного ЭМП конфигурации 6/4, при которых обеспечивается максимальный средний электромагнитный момент на периоде коммутации. Рекомендуемые коэффициенты полюсного перекрытия для статора $\alpha_s = 0.63$ о.е., для ротора $\alpha_r = 0.42$ о.е. Показана возможность улучшения рабочих свойств и энергетических характеристик ВРД при расширении и смещении зоны коммутации в сторону угла опережения. При этом получаем значительный выигрыш в виде увеличения КПД (в среднем на 12 %) и одновременном снижении уровня пульсаций момента (в среднем на 23 %).

Ключевые слова: вентильно-реактивный двигатель, электромеханический преобразователь, математическая модель, магнитное поле, динамические и квазиустановившиеся режимы работы, система автоматизированного проектирования.

Protsyna Z.P. Automated synthesis of low power switched reluctance motors. – *Manuscript copyright.*

The thesis for PhD degree in Technical Sciences on the speciality 05.09.01 – Electric Machines and Apparatus. – Odessa National Polytechnic University, City of Odessa, 2016

The dissertation provides insight into the synthesis of low power switched reluctance motors with the use of purposely designed SRM-CAD specific software. The circuit-field mathematical model considering losses in steel is developed in this dissertation. The proposed models form the basis for SRM-CAD software of automated analysis, synthesis and optimization development. The developed system is invariant to a number of designs of SRM electromechanical converter (EMC) that makes it possible to change EMC structure and put into practice its optimal choice in the process of designing. The parameterization of SRM EMC geometry is used for the efficient change of the structure. The use of SRM-CAD system makes it possible to implement the solving of the main design tasks: from the technical requirement to calculation of dynamic and quasistable operational modes as well as verification of the thermal state of SRM EMC with the aid of circuit-field mathematical models. The system is implemented in a compiled high-level language significantly speeding up the time of the calculation of transients in comparison with the implementations based on MatLab Simulink, LabView and MathCad systems. The pilot study prototypes instantiated the compliance of the developed mathematical model.

The method of calculation of SRM stationary thermal field with the aid of the finite element method which makes it possible to consider the real geometry features is proposed. The results of the comparison of physical experiment and mathematical modeling of the stationary thermal field agree within five percent. This indicates the high precision of the developed mathematical models.

The configuration of the pole area of the four-phase SRM EMC with 8/6 stator poles numbers to rotor poles numbers ratio is determined. It is recommended to use an area with parallel walls on stator and rotor. The optimization of the four-phase SRM EMC of 8/6 design poles configuration is implemented. By so doing, the pole arcs make up $\alpha_s = 0.63$ o.e. for stator and $\alpha_r = 0.35$ o.e. for rotor. The maximum average moment is provided exactly at these values. The optimal stator and rotor pole arcs for three-phase EMC of 6/4 configuration providing the maximum average moment at the period of switching are determined. The recommended pole arcs are $\alpha_s = 0.63$ o.e. for stator and $\alpha_r = 0.42$ o.e. for rotor. The possibility of improving of SRM working properties and energy characteristics due to the expansion and displacement of the switching area is shown. By so doing, a significant gain in the form of increase of efficiency factor (on average by 12%) and simultaneous reduction of torque ripples (on average by 23%) is obtained.

Keywords: switched reluctance motor, SRM, electromechanical converter, mathematical model, magnetic field, dynamic and quasistability operational modes, computer-aided design

Підписано до друку 01.11.16. Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,25.
Обл.-вид. арк. 0,87. Наклад 100. Зам. № 2012.

Віддруковано з готового оригінал-макету в АО БАХВА

(свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 145 від 11.08.2000)
65044, Україна, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, корп. 5
тел./факс (048) 777-43-50, e-mail: mail@bahva.com
www.bahva.com, www.vuzkniga.ua