

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ЗІНЧЕНКО ОЛЕНА ЄВГЕНІВНА



УДК 621.313.13

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЬНИХ  
РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД МЕРЕЖІ ЗМІННОГО  
СТРУМУ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної і загальної електротехніки в Харківській національній академії міського господарства Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Фінкельштейн Володимир Борисович,  
Харківська національна академія міського господарства,  
професор кафедри теоретичної та загальної  
електротехніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Римша Віталій Вікторович,  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри електричних машин

кандидат технічних наук  
Мнускін Юрій Вітальович,  
Донецький національний технічний університет,  
доцент кафедри електромеханіки і теоретичних основ  
електротехніки

Захист відбудеться 18 жовтня 2012 р.  
о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у  
Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».  
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий 10 вересня 2012 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Постійне вдосконалення технології виробництва в різноманітних галузях промисловості та автоматизація виробничих процесів обумовлюють збільшення кількості регульованих електроприводів.

Завдяки появі силових напівпровідникових приладів на великі струми і напругу перспективним є створення вентильних реактивних двигунів (ВРД). Ці двигуни мають механічну характеристику, подібну до механічної характеристики двигунів постійного струму з послідовним збудженням, але значно простіші за конструкцією і надійніші в експлуатації. ВРД можуть працювати від однофазних і трифазних мереж змінного струму, а також від джерел постійного струму. Указані чинники зумовили зростання серійного виробництва ВРД у країнах далекого зарубіжжя і початком виробництва їх окремих типорозмірів у країнах СНД.

При постійному розширенні галузей використання ВРД відчувається необхідність у розробленні питань підвищення енергетичних показників і експлуатаційної надійності, визначення критеріїв розрахунку геометричних розмірів активної частини, оптимальних кутів комутації, способів регулювання швидкості, електромагнітного розрахунку, експериментального виявлення оптимальних параметрів і характеристик, проектування конструктивної частини. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі теоретичної і загальної електротехніки Харківської національної академії міського господарства і є складовою частиною держбюджетної теми МОН України «Створення нових і вдосконалення існуючих електричних машин і апаратів і методик їх розрахунку і проектування» (ДР № 01080004541). Наукова та дослідна роботи «Дослідження можливості створення однофазних і багатофазних ВРД на базі серії АІР і випускаючих насосів» входить у план з нової техніки ВАТ «ХЕЛІЗ «Укрелектромаш» (м. Харків). При виконанні цих робіт здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення енергетичних показників і експлуатаційної надійності вентильних реактивних двигунів, які живляться від мережі змінного струму, на основі уточнення математичної моделі електромагнітних й електромеханічних процесів та удосконалення конструкції.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- уточнення математичної моделі електромагнітних й електромеханічних процесів в ВРД, що живиться від мережі змінного струму через випрямляч;
- розроблення критерію оптимізації геометричних розмірів магнітопроводу ВРД і методики їхнього розрахунку;
- дослідження взаємовпливу магнітних потоків обмоток статора на параметри і характеристики ВРД;

- розроблення переліку функцій і способів їхньої реалізації, які повинен забезпечувати комутатор для одержання найкращих енергетичних показників і розширення можливостей регулювання частоти обертання;

- розроблення програми розрахунку параметрів і характеристик ВРД;

- розроблення конструкції ВРД, інтегрованої з комутатором, що забезпечує інтенсивне охолодження та підвищення експлуатаційної надійності й дозволяє в максимальному ступені використати існуючі в серійному виробництві деталі і вузли та технологію;

- проведення експериментальних досліджень дослідного зразка ВРД.

*Об'єкт досліджень* – електромагнітні й електромеханічні процеси у ВРД.

*Предмет досліджень* – енергетичні параметри і характеристики ВРД.

**Методи досліджень.** Для складання системи нелінійних диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні й електромеханічні процеси у вентильному реактивному двигуні з напівпровідниковим комутатором, методи теорії електромагнітного поля й електричних кіл. Для інтегрування системи нелінійних диференціальних рівнянь використовувався метод Рунге-Кутта. Для розрахунку електромагнітного поля і визначення висоти спинки статора при парній комутації використовувався метод скінчених елементів. Для апроксимації складової потокозчеплення використовувався метод найменших квадратів. Визначення залежності параметрів і характеристик ВРД від кутів комутації проводилося методом числового експерименту. Параметри і характеристики макетного зразка ВРД були досліджені експериментальними методами.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше в математичній моделі електромагнітних й електромеханічних процесів у ВРД, що живиться через випрямляч від мережі змінного струму, врахована зміна напруги на конденсаторі випрямляча при противмиканні, що дозволяє виключити перенапруження та підвищити експлуатаційну надійність;

- здійснена оптимізація геометричних розмірів ВРД за критерієм максимального магнітного потоку при заданій густині струму, що дозволяє підвищити ККД;

- вперше за базову величину, за допомогою якої здійснюється задавання кутів комутації, прийнято час між двома найближчими появами сигналу з датчика кута повороту ротора, що дозволяє без використання енкодера з пульта керування регулювати й установлювати кути комутації на працюючому двигуні (патент України № 40674);

- реалізовано підвищення експлуатаційної надійності електронного блоку за рахунок інтенсифікації системи охолодження комутатора (патент України № 37384).

**Практичне значення отриманих результатів** для електротехнічної галузі полягає у реалізації розробленої методики розрахунку ВРД у вигляді комп'ютерної програми, що здійснює визначення геометричних розмірів магнітопроводу, розрахунок характеристик у сталому і перехідному режимах. Програма дозволяє розрахувати параметри і характеристики двигуна за критерієм максимальної енергії магнітного поля і за критерієм максимального

магнітного потоку, що дозволяє обирати оптимальний критерій для проєктованого двигуна. На програму розрахунку ВРД отримано свідоцтво на реєстрацію авторського права № 32326.

Надані рекомендації за способом вмикання обмоток статора, що дозволяє підвищити ККД двигуна на 4,4 %.

На ВАТ «ХЕЛЗ «Укрелектромаш» виготовлено і випробувано дослідні зразки ВРД покращеної конструкції, при проєктуванні яких використовувалася розроблені методика і програма розрахунку.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: нелінійна математична модель ВРД, що живиться через випрямляч від мережі змінного струму; програма розрахунку величини пульсацій моменту, параметрів, характеристик і показників у номінальному режимі з автоматичним обчисленням геометричних розмірів листів статора і ротора з умови отримання максимального потоку; методика апроксимації кривих намагнічування; удосконалення конструктивних елементів, що підвищують надійність і працездатність двигуна, а також дозволяють визначати оптимальні кути комутації; рекомендації щодо зниження пульсацій моменту.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: Міжнародних симпозиумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA) (2008 р., 2009 р., 2011 р., Харків); 70-й, 71-й Міжнародних науково-технічних конференції кафедр УкрДАЗТ та працівників залізниці (2008 р. і 2009 р. Харків); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (2009 р., Севастополь); 72-й, 73-й, 74-й Міжнародних науково-технічних конференціях кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій (2010 р., 2011 р., 2012р., Харків).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 11 наукових публікаціях, з них: 6 статей у наукових фахових виданнях України, 3 патенти України на корисну модель, 1 свідоцтво на реєстрацію авторського права.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації 220 сторінок, з них: 85 рисунків по тексту, 6 рисунків на 3 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 2 додатки на 72 сторінках, 72 найменувань використаних джерел на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** зазначена актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами, вказана мета та сформульовані основні задачі дослідження, визначено наукову новизну дисертації та її практичне значення, наведені апробація роботи та структура дисертації.

**У першому розділі** надано загальну характеристику ВРД, проведено аналіз ряду переваг ВРД з комутаторами в порівнянні з вентильними двигунами

з комутаторами й асинхронних двигунів (АД) з частотними перетворювачами, проаналізовані недоліки ВРД і заходи щодо їх усунення. Систематизовані особливості роботи різних схем живлення при парній комутації ВРД.

Обґрунтована необхідність розроблення уточненої математичної моделі електромагнітних й електромеханічних процесів, що враховує зміну напруги на конденсаторі при живленні ВРД від мережі змінного струму через випрямляч.

Для виявлення резервів підвищення енергетичних показників ВРД вказано на необхідність розроблення методики розрахунку геометричних розмірів осердь статора і ротора. Підвищення експлуатаційної надійності пов'язане зі створенням інтегрованої конструкції, що забезпечує підвищення інтенсивності охолодження комутатора і відповідність струму елементів комутатора робочому струму. Для регулювання кутів комутації необхідно передбачити їх зміну програмними засобами без використання додаткових елементів. Також потрібно визначення оптимальних кутів комутації, що забезпечують якнайкращі енергетичні характеристики двигуна. Для апробації теоретичних розрахунків вказано на необхідність проведення експериментальних досліджень дослідного зразка ВРД.

**Другий розділ** присвячений дослідженню електромагнітних й електромеханічних процесів, що протікають у ВРД, які живляться через випрямляч від мережі змінного струму.

Особливість ВРД полягає в тому, що система керування є невід'ємною частиною процесу перетворення енергії. Порівняльний аналіз роботи схеми Міллера і схеми асиметричного моста показав, що якнайкращі енергетичні показники при парній комутації досягаються при використанні схеми асиметричного моста (рис. 1). В цьому випадку корисна потужність ВРД вище на 20 %.

При противмиканні будь-якої фази обмотки ВРД знак напруги на обмотці фази статора змінюється на протилежний, а величина напруги при цьому залишається незмінною. Така математична модель адекватна в тому випадку, якщо ВРД живиться від генератора постійного струму або акумулятора. При живленні ВРД від випрямляча (рис. 1) в режимі противмиканні фази енергія, запасена в обмотці статора, переходить у конденсатор на виході випрямляча, а випрямляч замикається збільшеною напругою на конденсаторі.

Рівняння рівноваги напруг в колі фази статора ВРД має вигляд

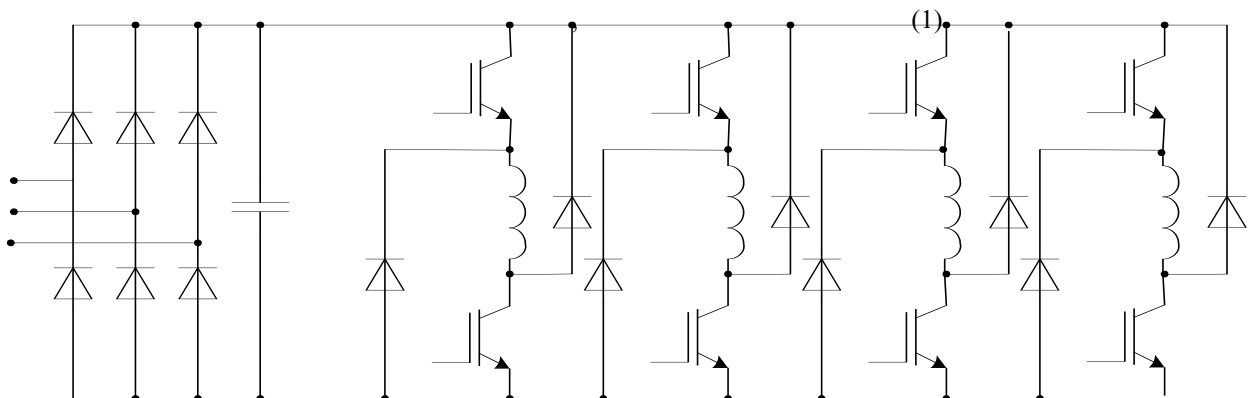


Рисунок 1 – Схема силової частини комутатора





(6)

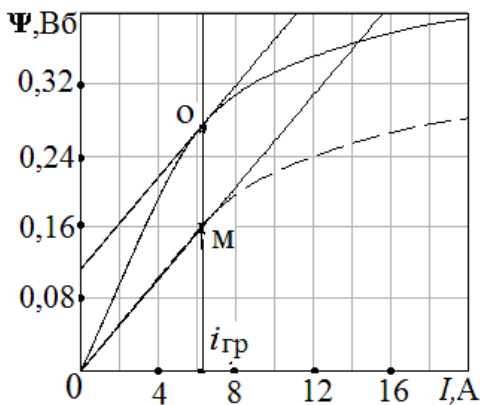
Початкові умови системи (6):  $i_m(0) = 0, u_c(0) = 0, \dot{\alpha}(0) = 0, \alpha(0) = \alpha_0$  ( $\alpha_0$  – кутова швидкість обертання при  $t=0$ ). Отримана система диференціальних рівнянь (6) є нелінійною та її інтегрування здійснено методом Рунге-Кутта.

До рівнянь (6) і (3) входять похідні від потокозчеплення по струму фази

$\Psi_{f1}$  і по куту повороту ротора  $\alpha$ . Для аналітичного подання цих похідних проведена апроксимація функції  $\Psi_{f1}$  і  $\alpha$ . Апроксимація виконується таким чином.

Задавшись масивом значень магнітної індукції в повітряному проміжку  $B$ , можна визначити масиви потокозчеплень  $\Psi_{f1}$  і МРС для визначення масиву струмів  $I_i$  при узгодженому положенні ротора:

(7) 
$$I_i = f(B, \alpha, \dots)$$



(8)

де  $\alpha$  – полюсна дуга статора;  $l$  – довжина магнітопроводу;  $w$  – кількість витків;  $\Psi_{f1}$  – масиви МРС, що припадають на магнітопровід і повітряний проміжок відповідно.

За розрахованими значеннями  $\Psi_{f1}$  і  $\alpha$  побудована крива намагнічування в узгодженому положенні (рис.2, верхня крива) і за допомогою вбудованих функцій сплайн-інтерполяції та сплайн-апроксимації середовища MathCAD отримана крива намагнічування в межах граничного струму до  $I_{gr}$ . Аналіз сімейств кривих намагнічування при фіксованих значеннях кута повороту ротора, отриманих розрахунком електромагнітного узгодженому положенні ротора на криву при розузгодженому положенні ротора

поля та експериментально різними авторами, дозволяє зробити висновок, що нелінійні ділянки залежностей при всіх значеннях кута повороту ротора паралельні.

Величина паралельного зсуву на рис. 2 (відрізок OM) нелінійної частини кривої намагнічування в узгодженому (після зсуву пунктирна крива) положенні визначається залежністю

$$, \quad (9)$$

де  $\dots$  – залежність індуктивності від кута повороту ротора;  $\dots$  – значення граничних струмів лінійних ділянок кривих намагнічування, подане як функція від кута повороту ротора.

Залежність потокозчеплення від струму і кута повороту ротора з урахуванням (9) отримана у вигляді

$$(10)$$

Порівняння розрахованих за (10) експериментальних кривих та отриманих розрахунком поля за допомогою програми FEMM показав їх достатній для практичних цілей збіг.

На основі (10) отримано вираз для

$$(11)$$

Підставивши (11) в (3) і виконавши інтегрування, знайдена залежність для електромагнітного моменту

$$(12)$$

Внаслідок інтегрування при однакових параметрах двигуна системи (6) і системи, що описує процеси у двигуні при його живленні від акумулятора без конденсатора, отримані такі відмінності: при одиночній комутації напруга на конденсаторі в перехідному процесі підвищується на 53 % (рис. 3, 4); швидкість обертання ротора при розгоні на 6–7 % вище; відмінності струмів, моментів і поточозчеплень не перевищують 3 %; при парній комутації максимальне підвищення напруги на ємності знижується до 10 %.

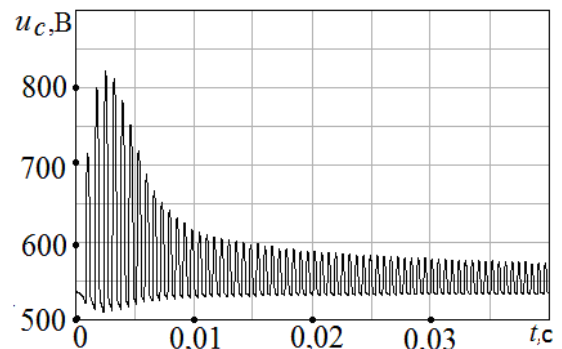
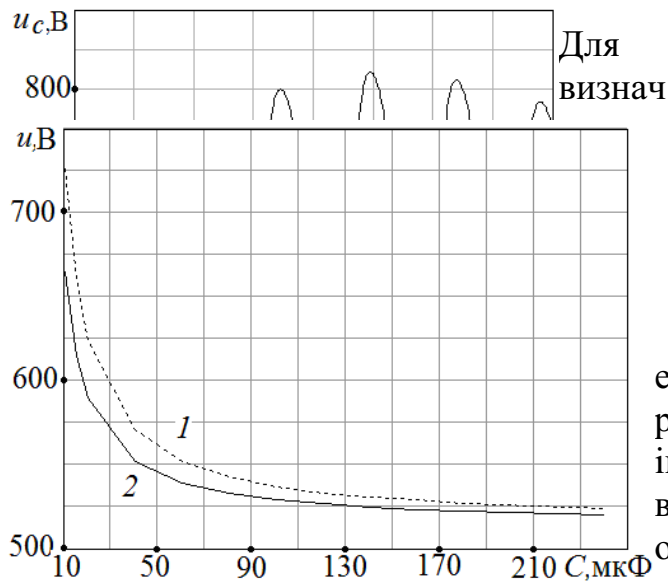
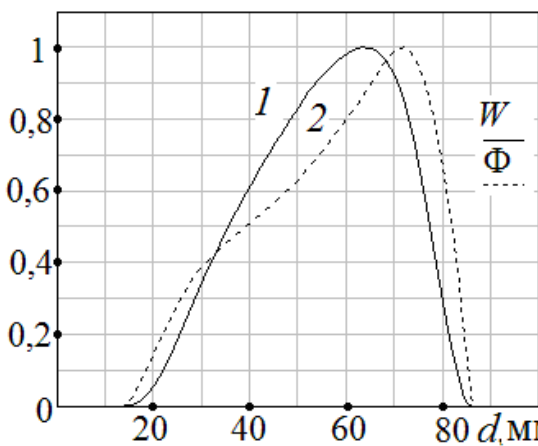


Рис. 5 – Залежність напруги конденсатора від ємності при різних величинах ємності конденсатора отримати криві (рис. 5). За отриманими кривими обирається ємність

конденсатора. За кожним максимумом  $U_{c0}$  при парній комутації і  $U_{c0}$  при переходній комутації від величини ємності конденсатора надруковані номограми ВРД випрямленої напруги при одиночній комутації (наведені в розділі визначення) коефіцієнта розсіяння і дано оцінку похибки визначення потужності ВРД при нехтуванні вищими гармоніками випрямленої напруги.

У третьому розділі розглянуто питання розрахунку характеристик і



регулювання частоти обертання ВРД. Наведено порівняння розрахунку геометричних розмірів магнітопроводу з умови отримання максимальної енергії магнітного поля у повітряному проміжку і з умови отримання максимального магнітного потоку.

При обраному співвідношенні кількості зубців статора і ротора визначення геометричних розмірів базується на отриманні максимальної

енергії магнітного поля в повітряному проміжку або максимального потоку. Як видно з рис. 6, внутрішній діаметр статора для експериментального двигуна, відповідний максимальній енергії магнітного поля у повітряному проміжку (63 мм) менше діаметра, відповідного прийнятій максимальній енергії та максимальному магнітному потоку (72 мм). магнітного потоку (2) (за базову одиницю прийнятий максимальний магнітний потік) від внутрішнього діаметра статора

Коли визначені геометричні розміри та магнітна індукція у повітряному проміжку, розраховується МРС  $F$ , після чого знаходиться кількість витків обмотки за формулою:

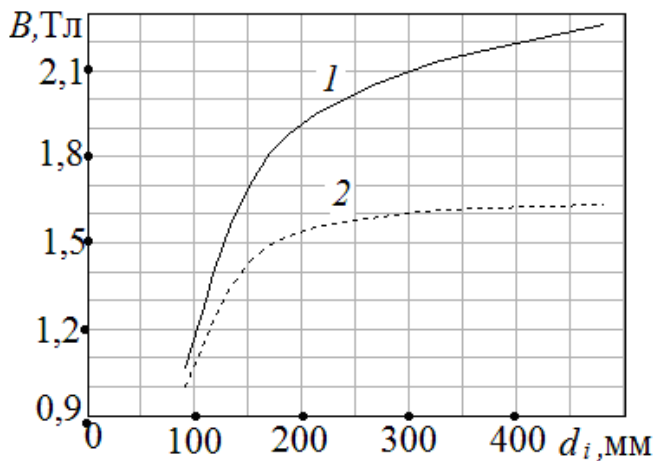
$$F = \frac{I_n}{K_n} \quad (13)$$

де  $I_n$  – номінальний струм двигуна;

$K_n$  – коефіцієнт відношення величини струму в момент противмикання до номінального струму, попереднє його значення дорівнює 2.

Остаточний вибір критерію визначення геометричних розмірів визначається результатами електромагнітного розрахунку. При внутрішніх діаметрах статора, відповідних вищенаведеним критеріям, порашовані двигуни на 6000 об/хв потужністю 1,5 і 132 кВт зі співвідношенням кількості пазів статора і ротора 8/6.

Порівняння розрахункових даних показало, що при геометричних розмірах за критерієм максимального магнітного потоку виходить вищий на 1,5 – 2,8 % ККД, менша вага міді на 23 – 30 % при незмінній вазі сталі, менший струм на 4,9 – 14,2 %, питомий момент менше на 19,8 – 40 %. Причина вказаних відмінностей обумовлена тим, що коефіцієнт насичення при геометричних розмірах за критерієм максимального магнітного потоку знаходиться в інтервалі 1,10 ÷ 1,286, а при геометричних розмірах за критерієм максимальної енергії магнітного поля в повітряному проміжку доходить до 3,5. Це приводить до того, що для створення відповідного магнітного потоку, для отримання максимальної енергії магнітного поля в повітряному проміжку, потрібна дуже велика МРС і великий струм. Причому значна частина МРС йде на намагнічування осердя. При цьому магнітна індукція в осерді (рис. 7) доходить до 2,25 Тл, що приводить до повного насичення сталі.



Для визначення при проектуванні внутрішнього діаметра статора, що забезпечує максимальний магнітний потік, пропонується аналітична залежність

$$d_i = \dots \quad (14)$$

де  $d_i$  – внутрішній діаметр осердя статора, м;  $d_n$  – зовнішній діаметр осердя статора, м.

Отримані геометричні розміри осердь статора і ротора й

Рисунок 7 – Залежність індукції в повітряному проміжку від зовнішнього діаметра осердя статора з програми, що здійснює апроксимацію кривих намагнічування і розв'язання геометричних розмірами за критерієм: системи диференціальних рівнянь (6). Проведене в цьому розділі порівняння даних при узгодженому і зустрічному, відносно зубця увімкненні обмоток фаз показане в табл. 1 і на магнітного потоку (2)

рис. 8, 9.

На підставі розрахунку магнітного поля методом скінченних елементів отримані залежності розподілу магнітної індукції в зубцях і в спинці статора при зустрічному та узгодженому щодо зубців увімкненні обмоток фаз. При зустрічному увімкненні обмоток спостерігається в порівнянні з узгодженим увімкненням менше значення магнітного потоку в зубцях і більше значення магнітного потоку в спинці.

Таблиця 1

Характер з'єднання	Струм, А	Споживана потужність, Вт	Корисна потужність, Вт	ККД, %	Швидкість обертання, об/хв	Перевищення температури обмотки, °С
Зустрічне	5,25	2377	1705	71,7	4500	107
			1747			

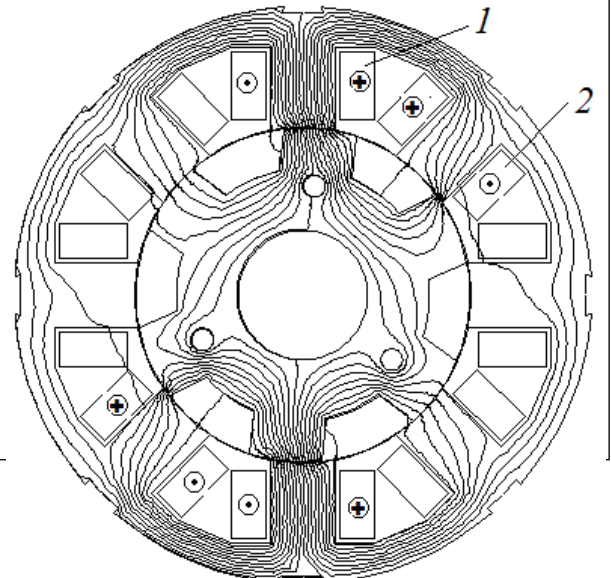
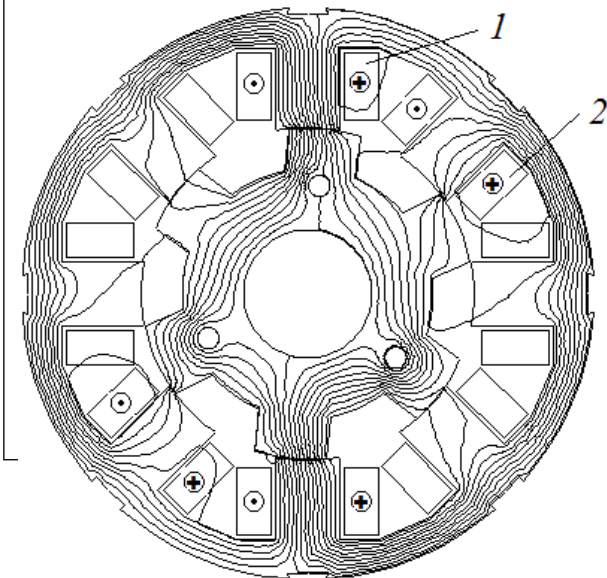


Рисунок 8 – Розрахункова картина магнітного поля при зустрічному увімкненні обмоток з віссю по вертикалі, при узгодженому увімкненні обмоток з віссю по горизонталі, збільшення магнітної індукції в спинці статора не більше 8 %, а на ділянках спинки, прилеглих до зубців з віссю по горизонталі, зменшення магнітної індукції в спинці статора складає 40 %. Це приводить до зменшення втрат у сталі, зменшення МРС і збільшення ККД двигуна.

Система (6) забезпечує розрахунок характеристик у перехідних і сталих режимах. При випробуванні дослідного зразка ВРД, виготовленого на ВАТ «ХЕЛЗ «Укрелектромаш», отримані експериментальні дані. Різниця між розрахунковими та експериментальними даними за основними параметрами не перевищує 1%, засвідчує досить високу ступень їх збігу.

При розрахунку перехідного режиму враховано забезпечуване комутатором обмеження по струму, реалізоване закорочуванням обмотки при перевищенні величини струму граничного значення (рис. 10).

На підставі отриманого характеру зміни струму залежно від кута повороту ротора на початку пуску показано, що у зв'язку з насиченням магнітної системи і відповідним зменшенням індуктивності й постійної часу перехідного процесу струм у фазі після її противмикання спадає до нуля практично миттєво.

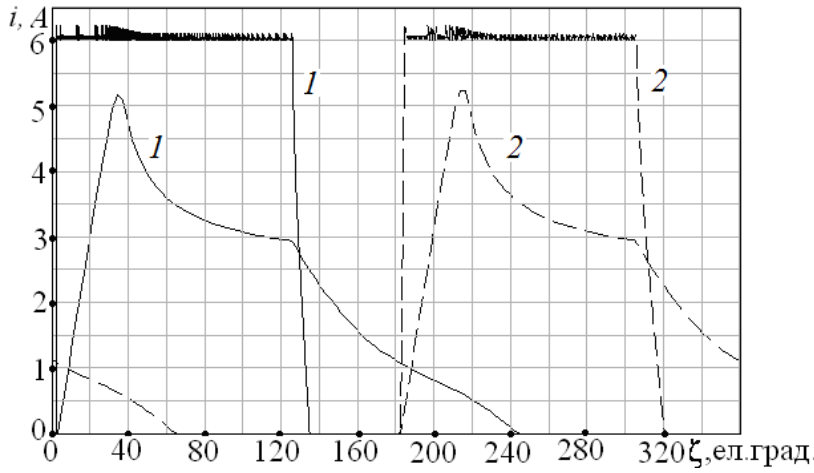


Рисунок 10 – Графік зміни струму залежно від кута повороту ротора з віссю зубця статора  $\zeta$ , ел. град. у першій фазі (1); у третій фазі (2), на початку пуску (з амплітудою 6А) і наприкінці пуску (з амплітудою 5А) початку пуску кут противмикання  $\gamma_{off}$  обмотки (рис. 11, 12).

Потокозчеплення при противмиканні в 1,65 раз більше, ніж у номінальному режимі. Це обумовлено тим, що при противмиканні струм на початку пуску може бути до чотирьох разів більше, ніж у сталому режимі. Також при малій частоті обертання ротора час його повороту до суміщення осі

За даними рис. 11, 12 відзначається, що до швидкості близько 3500 – 4000 об/хв наростання швидкості йде швидше при величині кута противмикання 180 ел. град. Також до вказаного інтервалу швидкостей спостерігається більша величина потужності на валу двигуна. Аналогічна ситуація стосується й електромагнітного моменту двигуна.

Досліджено вплив кутів комутації на корисну потужність і величину пульсацій моменту. Показано, що зміною (регулюванням) кутів комутації можливо регулювати частоту обертання ВРД.

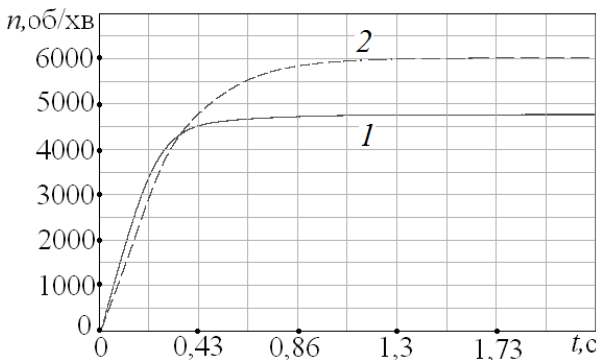


Рисунок 11 – Криві зміни швидкості обертання двигуна при величині кута противмикання: 180 ел. град. (1); 125 ел. град. (2)

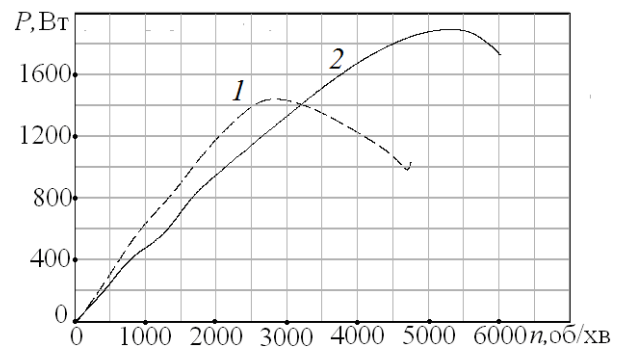


Рисунок 12 – Залежність поточної потужності на валу при пуску від швидкості обертання при кутах противмикання: 180 ел. град. (1); 125 ел. град. (2)

ртання від кута вмикання, від кута закорочування і кута вимкнення обмотки. Регулювання частоти обертання ще можливе шляхом зміни величини обмеження по струму (рис. 14).

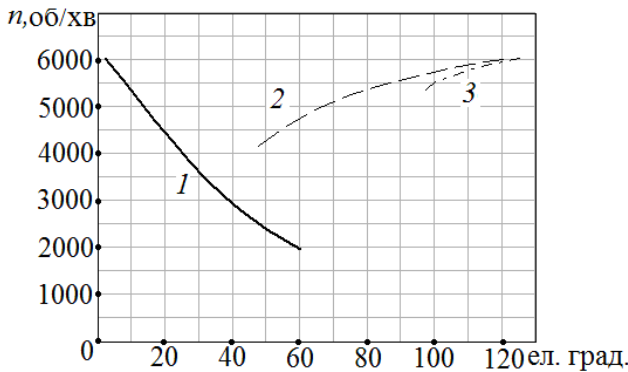


Рисунок 13 – Залежність швидкості обертання від кута вмикання обмотки (1), від кута закорочування (2), від кута вимкнення (3)

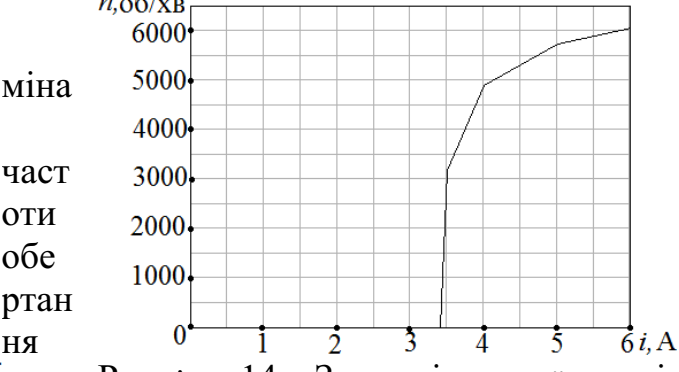


Рисунок 14 – Залежність швидкості обертання від величини обмеження по струму при номінальній напрузі

напруги дозволяє змінювати швидкість практично в будь-яких межах. Величина, форма, діюче і максимальне значення струму при номінальній напрузі практично незмінними. Залежність частоти обертання від величини живильної напруги лінійна, що важливо при адаптації двигуна під конкретний технологічний процес. Але для реалізації цього способу необхідний регульований випрямляч, що істотно здорожує комутатор. Найбільш прийнятним є відоме регулювання частоти обертання широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ). Цей спосіб регулювання не вимагає застосування регульованого випрямляча і він також забезпечує лінійну залежність частоти обертання від коефіцієнта заповнення (рис. 15).

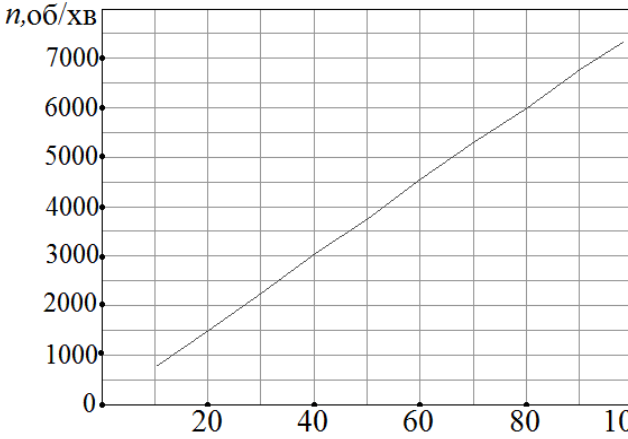


Рисунок 15 – Залежність швидкості обертання від коефіцієнта заповнення при ШИМ

Пропонується регулювання жорсткості механічної характеристики здійснювати зміною кута вмикання обмотки і регулювати відповідно до вимог технологічного процесу.

На рис. 16 представлена механічна характеристика досліджуваного двигуна (1) і потрібна за умовами технологічного процесу штучна механічна характеристика (2).

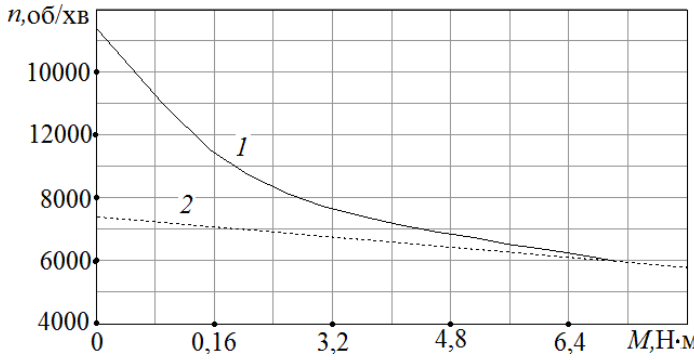


Рисунок 16 – Механічна характеристика ВРД: 1 – природна; 2 – штучна

Таким чином, отримуємо залежність кута вмикання від частоти обертання, яка апроксимована функцією

## ВИГЛЯДУ

. (15)

Для ВРД, що працює з механізмом, для якого необхідна наведена жорстка механічна характеристика, залежність (15) можна ввести в програму мікропроцесора і тоді автоматично здійснюватиметься за частотою обертання зміна кута вмикання і механічна характеристика буде такою, якою вона зображена на рис. 16 (2).

Регулювання кутів комутації без енкодера на працюючому двигуні здійснюється таким чином (пат. 40674). Мікропроцесор комутатора фіксує час між двома найближчими появами сигналу датчика кута повороту ротора. Цей час рівний періоду комутації  $T$ . З пульта управління та індикації комутатора ВРД обирається тип кута комутації (кут вмикання, вимкнення або закорочування) і встановлюється числове значення відповідного кута в ел. град. З пульта числові значення кутів передаються в мікропроцесор комутатора. Мікропроцесор обчислює відповідні часи, базуючись на певному періоді  $T$  і заданих з пульта кутах комутації:

$$\begin{aligned} & \alpha_{\text{вмк}} = \alpha_{\text{вмк}} + \alpha_{\text{вмк}} \cdot \cos(\alpha_{\text{вмк}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{вмк}}) \\ & \alpha_{\text{вмк}} = \alpha_{\text{вмк}} + \alpha_{\text{вмк}} \cdot \cos(\alpha_{\text{вмк}}) \cdot \cos(\alpha_{\text{вмк}}) \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\alpha_{\text{вмк}}$ ,  $\alpha_{\text{вмк}}$ ,  $\alpha_{\text{вмк}}$  – кути вмикання, вимкнення та закорочування відповідно;  $\alpha_{\text{вмк}}$ ,  $\alpha_{\text{вмк}}$  і  $\alpha_{\text{вмк}}$  – відповідні миті часу.

У відповідні моменти часу мікропроцесор подає команди на вмикання, вимкнення або закорочування обмотки.

З табл. 2, отриманою експериментально при регулюванні кута вимкнення

, очевидна можливість підвищення корисної потужності  $P_2$  і ККД на працюючому ВРД підстроюванням вказаного кута.

Таблиця 2

$\gamma_{\text{off}}$ , ел.град.	$n_{\text{факт}}$ , об/хв	$I_{\text{обм}}$ , А	$M$ , Нм	$P_2$ , Вт	$I_1$ , А	$P_1$ , Вт	$\eta$ , %	$U_1$ , В
137	3470	8,5	4,13	1505	5,1	2100	72	380
130	3460	8,5	4,15	1512	4,7	2000	76	380
137	5200	8,5	2,65	1447	4,7	2280	63	440
130	5200	8,5	2,70	1474	4,5	2180	68	440

*Примітка:  $I_{\text{обм}}$  – величина обмеження по струму;  $I_1$  – значення діючого струму фази;  $P_1$  – споживана потужність;  $U_1$  – напруга живлення.*

У цьому ж розділі наведені результати експериментально-аналітичного визначення перевищення температури обмотки й описано експериментальне визначення енергетичних показників ВРД.

**У четвертому розділі** представлено дослідну конструкцію ВРД, яка розроблена і виготовлена на ВАТ «ХЕЛЗ «Укрелектромаш». Підвищення енергетичних показників і експлуатаційної надійності ВРД неможливе без внесення змін до конструкції цих машин.

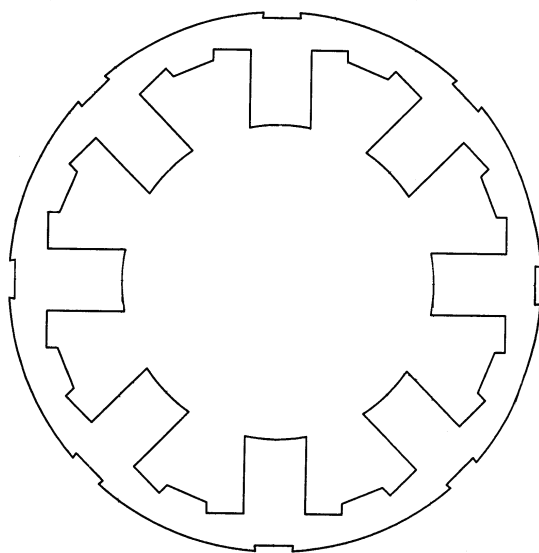
До конструкції ВРД увійшли деталі АД серії АИР: станина, вал ротора, вентилятор, задній підшипниковий щит, підшипники, пружина осьового підтискання, кожух вентилятора. Разом з вказаними уніфікованими деталями



для ВРД розроблені оригінальні деталі: диск з виступами (шторками), які служать для отримання сигналу з датчиків Холла; коробка комутатора; каркаси котушок. Запропоновані конструктивні рішення, що дозволяють повертати на певний кут датчики для регулювання кута вмикання обмоток при незмінному інтервалі комутації.

Підвищення ККД можливе також за рахунок потовщення спинки статора в міжкотушковому проміжку. Міжкотушкові проміжки в статорі ВРД звичайної конструкції нічим не заповнені. Це дає можливість у вільній зоні виконати спинку статора потовщеною (рис. 17). У потовщених проміжках спинки відповідно знижується магнітна індукція, що призводить до зниження втрат у сталі на цих ділянках і до зменшення МРС, яка припадає на них. Як показують розрахунки, зниження втрат у сталі спинки статора становить близько 10 %, що призводить до збільшення ККД на  $1 \div 1,5$  %. Струм двигуна при цьому практично не змінюється. Зміна струму не перевищує 0,5 %.

Для забезпечення ефективного охолодження комутатора основу 1 з силуміну (рис. 18) було закріплено над ребрами на станині. Інтенсивний повітряний потік, що створюється в міжреберних каналах 2 вентилятором двигуна, здійснює охолодження осн



і тр  
під  
спо  
зуб  
здій  
ста  
обм  
юте  
пер  
ста  
обм  
виг  
їхн:

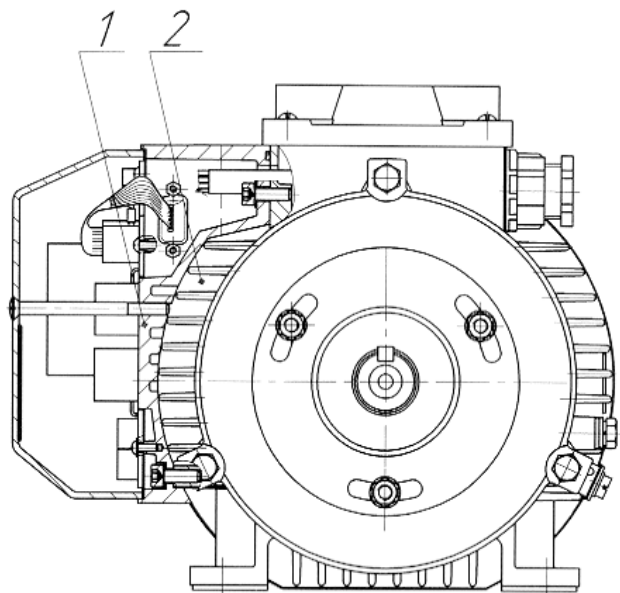


Рисунок 17. Диск статора з потовщеною спинкою в міжкотушковій зоні

Рисунок 18. Розташування на двигуні комутатора, що забезпечує інтенсивне його охолодження

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення енергетичних показників та експлуатаційної надійності ВРД при живленні від мережі змінного струму, на основі уточнення математичної моделі електромагнітних й електромеханічних процесів та удосконалення конструкції. За результатами досліджень отримані такі висновки:

1. При живленні ВРД від мережі змінного струму через випрямляч на конденсаторі останнього при противмиканні обмотки двигуна збільшується напруга. Величина цієї напруги залежить від ємності конденсатора.

Математична модель електромагнітних та електромеханічних процесів в ВРД, наведена в роботі, дозволяє визначити таку мінімальну величину ємності конденсатора, при якій напруга на ньому не перевищує допустимого значення, що усуває вихід з ладу комутатора і підвищує експлуатаційну надійність, а також розраховувати параметри, характеристики і показники двигуна в сталих і перехідних режимах.

2. Двигуни, геометричні розміри осердь статора і ротора яких визначені за запропонованим в роботі критерієм – максимальним магнітним потоку мають вищий ККД у порівнянні з двигунами, геометричні розміри яких визначені за раніше відомим критерієм – максимальною енергією магнітного поля в повітряному проміжку. На розрахованих двигунах збільшення ККД склало 1,5 – 2,8 %.

3. При випробуванні дослідних зразків встановлено, що узгоджене, щодо зубців статора, увімкнення фазних обмоток за рахунок зменшення насичення магнітопроводу дозволяє підвищити ККД у порівнянні з ККД двигуна при зусстрічному увімкненні фазних обмоток. На досліджуваному двигуні ККД збільшився на 4,4 %.

4. Запропонований спосіб регулювання кутів комутації, що базується на визначенні часу між появою і зникненням сигналу датчика Холла, дозволяє на працюючому двигуні при зміні частоти обертання здійснювати відповідну зміну кутів комутації без використання енкодера, а також змінювати частоту обертання за рахунок зміни останніх.

5. Запропоноване кріплення комутатора на двигуні дозволило зменшити температуру на силових транзисторах і діодах на 30 – 35 °С у порівнянні з їх температурою при кріпленні комутатора на коробці виводів двигуна, що підвищує його експлуатаційну надійність і довговічність. При цьому трудомісткість виготовлення основи в серійному виробництві при кріпленні її на коробці виводів така ж, як і трудомісткість виготовлення основи, закріпленої над ребрами, змінюється тільки конфігурація ливарної прес-форми.

6. Конструктивні зміни, які введені спосіб кріплення котушок на зубцях статора забезпечує максимальну площу перерізу обмотки і відповідне зниження втрат в обмотці в порівнянні з традиційним кріпленням котушок. Потовщення спинки статора в зоні міжкотушекових проміжків дозволяє досягти підвищення ККД на 1 – 1,5 %.

7. Програма розрахунку ВРД забезпечує автоматичний вибір геометричних розмірів магнітного кола, обмотувальних даних і розрахунок параметрів, характеристик і показників у сталому і перехідному режимах при будь-якій залежності моменту приводного механізму від частоти обертання і кута повороту ротора.

8. Результати досліджень впроваджено на ВАТ «ХЕЛЗ «Укрелектромаш», де розроблені, виготовлені і випробувані дослідні зразки ВРД покращеної конструкції.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Зинченко Е.Е. Раскрой листов магнитопровода вентиляльных индукторно-реактивных двигателей / Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2008. – № 5. – С. 16 – 19.

*Здобувачем запропонована методика розрахунку геометричних розмірів листів магнітопроводу статора і ротора ВРД.*

2. Зинченко Е.Е. Экспериментальное исследование параметров вентиляльных индукторно-реактивных двигателей / Е.Е. Зинченко // *Вісник Національного технічного університету „ХПІ”.* – Харків: НТУ „ХПІ” – 2008. – № 40. – С. 30 – 38.

3. Зинченко Е.Е. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентиляльных индукторно-реактивных двигателей / Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2009. – №1. – С. 13–16.

*Здобувачем запропоновано методику апроксимації кривих намагнічування ВРД і одержання залежностей потокозчеплення від струму і кута повороту ротора.*

4. Зинченко Е.Е. Математическая модель вентиляльного индукторно-реактивного двигателя, питающегося от выпрямителя / Е.Е. Зинченко // *Технічна електродинаміка.* – 2009.– №4. – С. 23 – 28.

5. Зинченко Е.Е. Методика расчета вентиляльных индукторно-реактивных двигателей / Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2009. – № 4. – С. 24 – 29.

*Здобувачем запропонована методика розрахунку ВРД, що враховує зміну напруги на конденсаторі випрямляча, коливання моменту, насичення магнітопроводу, збільшення магнітного потоку в спинках статора і ротора при парній комутації.*

6. Зинченко Е.Е. Сравнение характеристик вентиляльного реактивного двигателя при его питании от коммутаторов по схемам Миллера и асимметричного моста/ Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2012. – № 1. – С. 33 – 35.

*Здобувачем здійснено порівняльний аналіз характеристик вентиляльного реактивного двигуна при живленні його від комутатора по схемі Міллера і по схемі асиметричного моста.*

7. Пат. № 37384 Україна, МПК H02K 29/00. Вентильный реактивный электропривод / Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б.; заявник і патентовласник Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б. – № u200808006; заявл. 12.08.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.

*Здобувачем запропоновано конструктивне рішення, яке підвищує інтенсивність охолодження комутатора.*

8. Пат. 39187 Україна, МПК H02K 3/00. Обмотаний статор вентиляльного индукторно-реактивного двигуна/ Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б.; заявник і патентовласник Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б. – № u200811244; заявл. 17.09.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 3.

*Здобувачем запропоновано засіб кріплення катушок обмоток статора.*

9. Пат. 40674 Україна, МПК H02K 29/00. Экспериментальный вентильный индукторно-реактивный привод/ Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б.; заявник і патентовласник Зінченко О.Є., Фінкельштейн В.Б. – № u200812062; заявл. 13.10.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

*Здобувачем запропоновано конструктивне рішення, яке дає можливість регулювати кут вмикання обмоток статора.*

10. Зинченко Е.Е. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильного индукторно-реактивного двигателя / Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн / Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: материалы науч.-техн. конф. (Севастополь, 21-25 сент. 2009 г.). – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009.

С. 51 – 52

*Здобувачем представлено методику апроксимації кривих намагнічування ВРД.*

11. Комп'ютерна програма «Программа расчета многофазного вентильного индукторно-реактивного двигателя»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №32326/ В.Б. Фінкельштейн, О.Є. Зінченко / Дата реєстрації 04.03.2010

*Здобувачем запропоновано програму розрахунку ВРД.*

## АНОТАЦІЇ

**Зінченко О.Є. Підвищення енергетичних показників вентильних реактивних двигунів, які живляться від мережі змінного струму. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини та апарати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертація присвячена питанням підвищення енергетичних показників ВРД, визначення оптимального критерію розрахунку, дослідження впливу кутів комутації і взаємовпливу магнітних потоків обмоток статора та підвищення експлуатаційної надійності на основі уточненої математичної моделі й удосконалення конструкції.

Підвищення енергетичних показників ВРД здійснене такими способами: визначенням оптимальних геометричних розмірів магнітопроводу з умови отримання максимального магнітного потоку; установленням оптимальних кутів комутації за допомогою запропонованого способу і їх регулюванням на працюючому двигуні без використання енкадера; зниженням насичення магнітопроводу за рахунок узгодженого ввімкнення, відносно зубців, фазних обмоток і потовщення спинки статора в зоні міжкотушкових проміжків.

Запропонована математична модель електромагнітних й електромеханічних процесів у ВРД, яка враховує замикання випрямляючого моста і зміну напруги на ємності при противмиканні при живленні двигуна від мережі змінного струму. Розроблені методика і програма розрахунку ВРД.

Запропоновані конструктивні елементи, які підвищують надійність і працездатність двигуна. Визначення мінімальної ємності конденсатора, що усуває вихід з ладу комутатора, а також запропонований спосіб охолодження комутатора підвищують експлуатаційну надійність ВРД.

*Ключові слова:* електрична машина, енергетичні параметри, вентиляльний реактивний двигун, геометричні розміри магнітопроводу, кути комутації.

**Зинченко Е. Е. Повышение энергетических показателей вентиляльных реактивных двигателей, питающихся от сети переменного тока. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2012.

Диссертация посвящена вопросам повышения энергетических показателей ВРД, определения оптимального критерия расчета, исследования влияния углов коммутации, взаимовлияния магнитных потоков обмоток статора; и повышение эксплуатационной надежности на основе уточненной математической модели и усовершенствования конструкции.

При быстром росте производства ВРД, которое наблюдается в настоящее время, и постоянном расширении областей их использования ощущается настоятельная необходимость в разработке вопросов определения критериев расчета геометрических размеров активной части, оптимальных углов коммутации, способов регулирования скорости, электромагнитного расчета, экспериментального выявления оптимальных параметров и характеристик, проектирования конструктивной части.

Повышение энергетических показателей ВРД осуществлено следующими способами. Определение оптимальных геометрических размеров магнітопровода, обеспечивающим более высокие энергетические показатели, получено из условия получения максимального магнитного потока при заданной плотности тока. Предложен способ регулирования углов коммутации, базирующийся на определении времени между двумя ближайшими появлениями сигнала датчика Холла, который позволяет на работающем двигателе при изменении частоты вращения, без энкодера устанавливать оптимальные углы коммутации, соответствующие наилучшим энергетическим показателям. Повышение КПД ВРД достигается при согласном относительно зубцов подключения обмоток соседних фаз, за счет увеличения магнитного потока в зубцах и его уменьшения на участках спинки статора. Снижение потерь в стали в спинке статора, и соответственно увеличение КПД, получено путем утолщения спинки в зоне межкатушечного пространства.

При подключении какой-либо фазы обмотки ВРД знак напряжения на обмотке изменяется на противоположный, а величина напряжения при этом остается неизменной. Такая математическая модель адекватна в том случае, если ВРД питается от генератора постоянного тока или аккумулятора. При питании ВРД через выпрямитель при противовключении энергия, запасенная в индук

тивности обмотки, переходит в емкость на выходе выпрямителя, а выпрямитель замыкается возросшим напряжением на емкости. При этом система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе, видоизменяется. Новизна предложенной математической модели в том, что она учитывает эти особенности.

Проведенное уточнение математической модели, дает возможность определения минимальной емкости конденсатора, что исключает выход из строя коммутатора и повышает эксплуатационную надежность ВРД.

Разработана методика и программа расчета ВРД, учитывающая изменение напряжения на конденсаторе выпрямителя, колебание момента, насыщение магнитопровода, увеличение магнитного потока в зубцах при парной коммутации, с элементами оптимизации магнитопровода с использованием изготавливаемых деталей и узлов АД. Предложенные методика и программа позволяют рассчитать электромагнитные и электромеханические процессы в установившемся и переходном режимах. Программа расчета базируется на предложенной аппроксимации кривых намагничивания и обеспечивает быстрое получение готового расчета, что делает ее приемлемой для использования совместно с оптимизационными блоками.

Проведенные экспериментальные исследования зависимости коэффициента рассеяния от угла поворота ротора показали, что коэффициент рассеяния не зависит от степени насыщения магнитопровода. Это обусловлено тем, что основная часть магнитного сопротивления путей рассеяния приходится на воздушные промежутки, которые не насыщаются

Даны рекомендации по регулированию ВРД. Подбором углов коммутации можно существенно снизить пульсации момента. Представлены зависимости изменения скорости вращения от углов коммутации, от величины питающего напряжения и от коэффициента заполнения при использовании широтно-импульсной модуляции. Регулирование жесткости механической характеристики предложено реализовывать путем изменения угла включения. Представлена аналитическая зависимость угла включения от скорости вращения. Введение этой зависимости в программу микропроцессора позволяет автоматически регулировать жесткость механической характеристики в соответствии с требованием технологического процесса.

Предложены конструктивные дополнения, позволяющие повысить интенсивность охлаждения коммутатора. Для экспериментального определения углов коммутации в конструкции ВРД предусмотрена возможность углового смещения датчиков. Разработан способ крепления катушек на зубцах статора, обеспечивающий максимальную площадь сечения обмотки.

Предложенный способ охлаждения коммутатора позволяет уменьшить его нагрев и повысить эксплуатационную надежность и долговечность ВРД.

Результаты диссертационной работы используются при проектировании ВРД в ОАО «ХЭЛЗ «Укрэлектромаш». Испытания опытных образцов подтвердили адекватность расчетов.

*Ключевые слова:* электрическая машина, энергетические параметры, вентильный реактивный двигатель, геометрические размеры магнитопровода, углы коммутации.

**Zinchenko E. E. Increase of Power Indexes of Switched Reluctance Motors Feedings from the Network of Alternating Current. - Manuscript.**

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.09.01 – Electric Machines and Apparatus – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2012.

Dissertation is devoted the questions of increase of power indexes of switched reluctance motors (SRM) on the basis of the specified mathematical model, determination of optimum criterion of calculation, research of influence of angles of commutation and interference of magnetic streams of coil winding of stator. The increase of power indexes of engine is carried out the followings methods: by determination of optimum geometrical sizes of magnetic conductor on the criterion of receipt of maximal magnetic stream; due to adjusting of angles of commutation on SRM ; by the decline of satiation of magnetic conductor due to the consonantal including of phase coil winding. A method and program of calculation of SRM, taking into account the change of tension on the condenser of rectifier is developed, with the elements of optimization of magnetic conductor with the use of the made details and knots of asynchronous motors. The offered method and program allow to expect electromagnetic processes in the steady and transient states. Offered, protected the patents of Ukraine, structural elements, increase reliability and capacity of SRM, and also allowing to determine optimum angles commutations.

*Key words:* electrical machine, characteristic of energy, switched reluctance motors, geometrical dimension of magnetic core, angles commutations.



Зінченко Олена Євгенівна

УДК 621.313.13

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЬНИХ  
РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ, ЯКІ ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД МЕРЕЖІ ЗМІННОГО  
СТРУМУ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано за згодою з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



к.т.н., доц. Форкун Я.Б.

---

Підписано до друку 21.05.2012 р.  
Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.  
Умовн.-друк.арк. 0,9. Тираж 100. Замовлення № 190

---

Виготовлювач ТОВ «Енергозберігаючі технології»  
61050, Харків, Харківська набережна, 8.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1360 від 19.05.2003 р.