

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ГРЕЧКО МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.313.3

**ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЕНТИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ІНДУКТОРНОГО ТИПУ З СУМІЩЕНИМИ ОБМО-
ТКАМИ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі гірничої електромеханіки та транспортних систем Стахановського навчально-наукового інституту гірничих та освітніх технологій Української інженерно-педагогічної академії, м. Стаханов

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лущик В'ячеслав Данилович,
Донбаський державний технічний університет,
м. Алчевськ, професор кафедри електричних
машин та апаратів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Васьковський Юрій Миколайович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний університет», м. Київ,
професор кафедри електромеханіки

кандидат технічних наук, доцент
Петренко Микола Якович,
Національний технічний університет України
«Харківський політехнічний університет»,
м. Харків, доцент кафедри електричних машин

Захист відбудеться 06 листопада 2014 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 01 жовтня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку електромашинобудування перспективним є застосування двообмоткових генераторів індукторного типу з комутуючими діодами в якірній обмотці – вентильних генераторів індукторного типу з суміщеними обмотками. Це дозволяє створити безконтактні конструкції генераторів бортових систем електропостачання, що за питомими показниками наближаються до електричних генераторів з контактним вузлом.

Рівень електроозброєності сучасних транспортних засобів приводить до ще більшої залежності надійності і його довговічності від відповідних якостей електроустаткування і, в першу чергу, від основного джерела електричної енергії – генератора. Сучасними тенденціями розвитку транспортних засобів є збільшення установленної потужності споживачів та більш жорсткі вимоги щодо якості електричної енергії і надійності бортової системи електропостачання. Для певного класу транспортних засобів надійність бортової системи електропостачання є найбільш важливою характеристикою, оскільки безпосередньо пов'язана з безпекою експлуатації. В цьому контексті доцільним є використання безконтактних електричних машин, як більш надійних внаслідок відсутності рухомого електричного контакту.

Зважаючи на те, що надійність окремих вузлів транспортних засобів помітно зростає, подальше удосконалення безконтактних електричних машин для їх широкого застосування в системах бортової системи електропостачання є актуальною задачею, яка визначила напрям дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі гірничої електромеханіки та транспортних систем Української інженерно-педагогічної академії. Як виконавець здобувач проводив дослідження у таких НДР: «Створення та дослідження безконтактних генераторів з суміщеними обмотками для транспортних засобів» (держбюджетна тема МОН України, ДонДТУ, № ДР 0108U001537), «Дослідження безконтактних генераторів транспортних засобів» (№ 5/14, план НДР УПА).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є покращення експлуатаційних характеристик вентильного генератора індукторного типу за рахунок суміщеної якірної обмотки з напівпровідниковими елементами, завдяки яким реакція якоря підсилює магнітне поле збудження.

Для досягнення поставленої мети поставлені задачі:

- аналіз конструкцій електричних генераторів, що працюють в системах бортового електропостачання транспортних засобів;
- дослідити роботу генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на основі математичної моделі на базі диференційно-логічної системи рівнянь змінної структури, що враховує напівпровідникові елементи в фазах якірної обмотки, завдяки яким реакція якоря підсилює магнітне поле збудження;
- визначити електромагнітні параметри вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на основі двовимірної польової математичної моделі активної частини з урахуванням реальної геометрії зубцевої зони та насичення магнітопроводу генератора;
- проведення теоретико-експериментальних досліджень електромагніт-

них процесів та експлуатаційних характеристик вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками;

– створення вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками для систем бортового електропостачання з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що відбуваються у вентильному генераторі індукторного типу з суміщеними обмотками.

Предмет дослідження – параметри та експлуатаційні характеристики вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на основних положеннях теорії електричних машин, в ході досліджень використовувалися методи математичного та фізичного моделювання. В якості методів математичного моделювання використовувалися: метод скінчених елементів – для розрахунку магнітних полів та параметрів генератора, для дослідження електромагнітних процесів – численне розв'язання систем часових диференціальних рівнянь, методом дослідження математичних моделей є чисельний експеримент. Достовірність досліджень підтверджено фізичним моделюванням на натурному зразку в лабораторії електричних машин кафедри гірничої електромеханіки та транспортних систем Української інженерно-педагогічної академії.

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше запропонована структура суміщеної якірної обмотки вентильного генератора індукторного типу з комутуючими діодами, яка додатково виконує функцію підсилення магнітного поля збудження дією реакції якоря для покращення експлуатаційних характеристик генератора на 24,2 %;

– вперше визначені електромагнітні параметри вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками у процесі обертання ротора на базі двовимірної польової математичної моделі активної частини генератора;

– вперше досліджено роботу вентильного генератора індукторного типу на основі математичної моделі на базі диференційно-логічної системи рівнянь змінної структури, яка враховує наявність напівпровідникових елементів в якірній обмотці, що дозволяє підсилювати магнітне поле збудження дією реакції якоря.

Практичне значення одержаних результатів для електромашинобудування полягає у розробці універсального програмного комплексу на базі диференційно-логічної системи рівнянь змінної структури, що дозволяє дослідити поведінку вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками в різних режимах роботи для підвищення його експлуатаційних характеристик.

Запропоновано дослідний зразок вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками з поліпшеними техніко-економічними показниками (патент України 78144).

Результати дисертаційної роботи використовуються в спеціалізованому конструкторському бюро ПАТ «Дніпропетровський агрегатний завод» (м. Дніпропетровськ) при проектуванні транспортних генераторів.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації, які виносяться на захист, отримано здобувачем особисто. А саме: досліджено роботу генератор-

ра індукторного типу з суміщеними обмотками на основі математичної моделі, що враховує напівпровідникові елементи в фазах якірної обмотки, завдяки яким реакція якоря підсилює магнітне поле збудження; розроблено методику розрахунку магнітного поля у вентильному генераторі індукторного типу з суміщеними обмотками; спроектовано і досліджено експериментальний зразок генератора з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались на: Міжнародних симпозиумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (SIEMA) (2001, 2002, 2004, 2008 р., м. Харків), семінарах «Електромагнітні і теплові процеси високовикористованих електричних машин» Наукової Ради Національної Академії наук України по комплексній проблемі «Наукові основи електроенергетики» (2002 – 2004 р.р., м. Харків), науково-технічних конференціях з міжнародною участю: «Електромашинобудування та електрообладнання» (2004 р., м. Одеса); «Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів» (2004, 2005 р., м. Миколаїв); «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (2013 р., м. Севастополь).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано у 33 друкованих працях, з них 19 – у фахових періодичних виданнях України, 1 – у закордонному фаховому періодичному виданні, 2 – патенти України, 11 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4–х розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації 151 сторінка, у тому числі: 87 рисунків за текстом, 4 рисунки на 2 сторінках; 18 таблиць за текстом; 1 таблиця на 1 сторінці; список використаних джерел зі 96 найменувань на 12 сторінках; 4 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, зазначено положення, які виносяться здобувачем на захист, теоретичну та практичну цінність отриманих результатів досліджень та їхній зв'язок з науковими програмами, планами, подано інформацію про апробацію роботи, наведено інформацію про публікації та впровадження.

У **першому розділі** виконано порівняльний аналіз безконтактних електричних машин для бортових систем електропостачання. Проаналізовано особливості бортових систем електропостачання транспортних засобів, проведено класифікацію безконтактних електричних машин, обґрунтовано можливість застосування генераторів індукторного типу, розглянуто шляхи поліпшення експлуатаційних характеристик індукторних генераторів.

Аналізуючи науково-технічні джерела, що стосуються теми дисертаційної роботи намічено шляхи покращення індукторних машин за результатами досліджень відомих вчених, як Лущик В.Д., Римша В.В., Алексєєва М.М., Альпер Н.Я., Бичков М.Г., Бут Д.А., Жуловян В.В., Ільїнський Н.Ф., Коломейцев Л.Ф., Красовський А.Б., Кузнецов В.А., Пахомін С.А., Терзян А.А., Ша-

ров В.С., Byrne J.V., Lawrenson P.J., Miller T.J.E., Stephenson J.M. та ін.

Доведено, що перспективним є суміщення магнітопроводів та обмоток електричних машин, що дає можливість суттєво покращити їх експлуатаційні характеристики.

У другому розділі подано конструкцію вентиляного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками та теоретичні основи побудови математичної моделі робочих режимів.

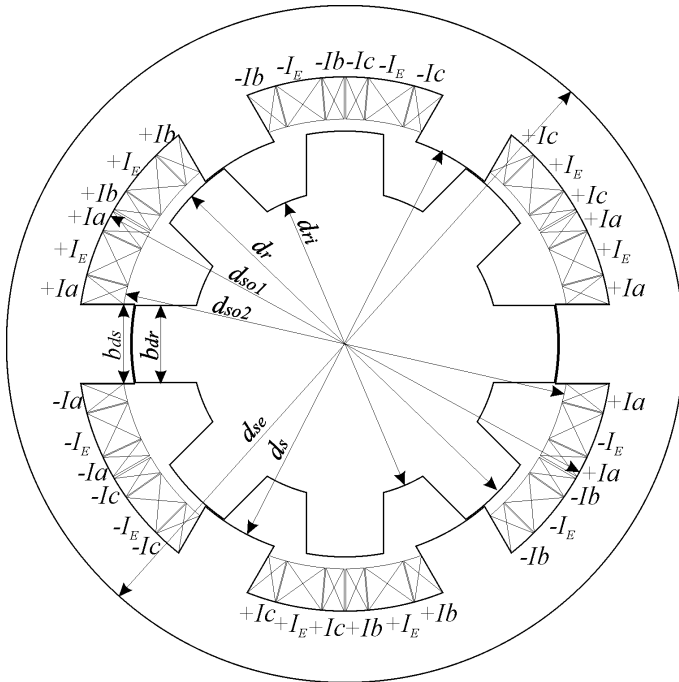


Рисунок 1 – Магнітна система вентиляного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками

у такій машині дорівнює кількості зубців ротора $p = z_r$.

Таким чином, генератор є вентиляним індукторним різноімпульсним генератором з суміщеними обмотками, який одночасно являє собою трифазну машину змінного струму, що працює на випрямне навантаження (рис. 2).

Обмотка статора з'єднана в трикутник для забезпечення замкнутого контуру за напрямком односпрямованого струму, що має місце в контурі трикутника через включення в кожен фазу якірної обмотки діода. Односпрямований струм створює магнітний потік, що збігається за напрямком з потоком обмотки збудження на кожному зу-

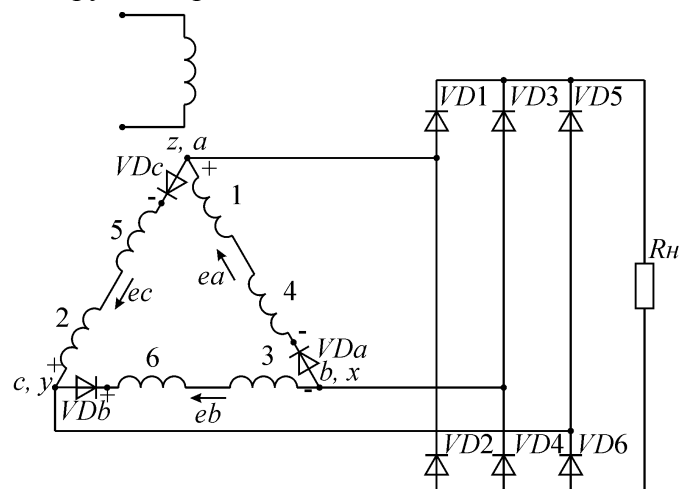


Рисунок 2 – Схема вмикання генератора

Вентильний генератор індукторного типу з суміщеними обмотками являє собою один з різновидів електричних машин індукторного типу (рис. 1). На статорі розташовано шість зубців, на яких розміщена трифазна зосереджена обмотка, кожна фаза якої займає два діаметрально протилежних зубця. Крім того, на кожному зубці знаходиться обмотка збудження, яка створює магнітне поле зі змінною полярністю. На роторі генератора розташовано вісім явно виражених зубців, які при обертанні ротора викликають пульсації магнітної індукції в повітряному проміжку, що призводить до зміни магнітного потокозчеплення із секціями обмотки якоря і, відповідно, до індуктування ЕРС у них. Повний період зміни ЕРС в обмотці якоря індукторного генератора відбувається при повороті ротора на один зубцевий крок ротора, тому кількість пар полюсів

бці. Таким чином, пульсуючий струм кожної фази обмотки статора створює додатковий магнітний потік, викликаючи підмагнічуючий ефект, що, як показує експериментальне дослідження, дозволяє збільшити вихідну напругу генератора, а значить, і його корисну потужність.

Обмотка статора генератора включена на трифазний двонапівперіодний випрямляч, зібраний на некерованих діодах. Навантаженням може бути пасивний об'єкт з активним опором R_n або акумулятор, як джерело проти-ЕРС.

На діаграмі роботи вентилів моста (рис. 3) показано фазні ЕРС генератора та інтервали роботи кожного вентиля випрямного моста.

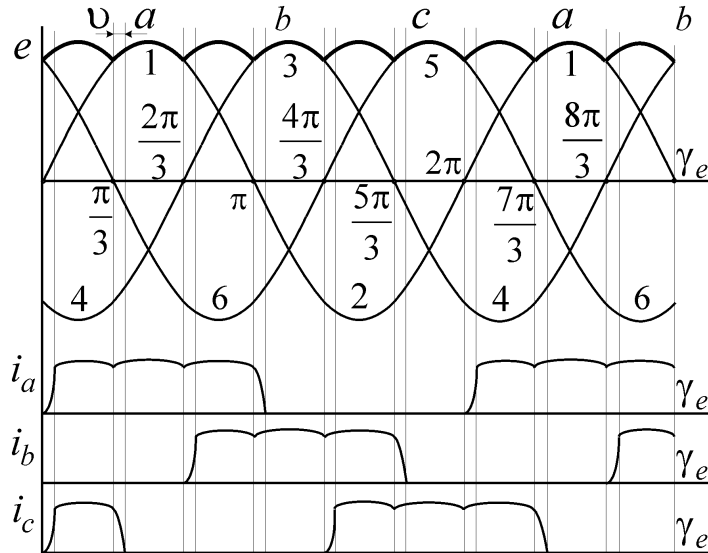


Рисунок 3 – Діаграма роботи вентилів моста генератора

В інтервалі часу $\gamma_e = 0 \div \pi/3$ працює пара вентилів, один із яких має найбільший позитивний потенціал, другий – найменший негативний потенціал. Для цього інтервалу це вентиля $VD5$ фази c і $VD4$ фази b . З урахуванням цього у фазах генератора для даного моменту часу відкриті VDa фази a і VDc фази c , вентиль VDb фази b перебуває під дією негативної ЕРС і він закритий. Для цього інтервалу створюється контур замикання струму $VD5-R_n-VD4$ -фаза a – фаза c , тобто працюють дві фази a та c , які включені послідовно.

У припущенні синусоїдної ЕРС у фазах генератора в момент

$\gamma_e = \pi/3$ відбувається комутація вентилів, вентиль $VD5$ відключається, вентиль $VD1$ включається в роботу. У результаті фаза c відключається і продовжує працювати фаза a . Тривалість комутації визначається кутом ν . При більш детальному розгляданні момент початку комутації вентиля $VD5$ необхідно визначити за рівністю нулю ЕРС фази c .

Наявність вентилів у фазах генератора виключає появу знакозмінного струму, і струм має односпрямований характер, тобто прийнята схема включення обмоток генератора аналогічна схемі однонапівперіодного випрямлення. Жирними лініями (рис 3) показано характер зміни напруги на навантаженні в режимі неробочого ходу.

Включення вентиля у кожну фазу обмотки якоря накладає специфічні особливості на роботу генератора. Струмозподіл по фазах генератора наведено на рис. 4. По фазах протікають струми тільки одного напрямку, які не змінюють свого знаку, причому для одних проміжків часу працює тільки одна фаза, для інших – працює одночасно дві фази.

За законом рівноваги ЕРС процеси у фазних обмотках генератора опису-

ються системою диференціальних рівнянь:

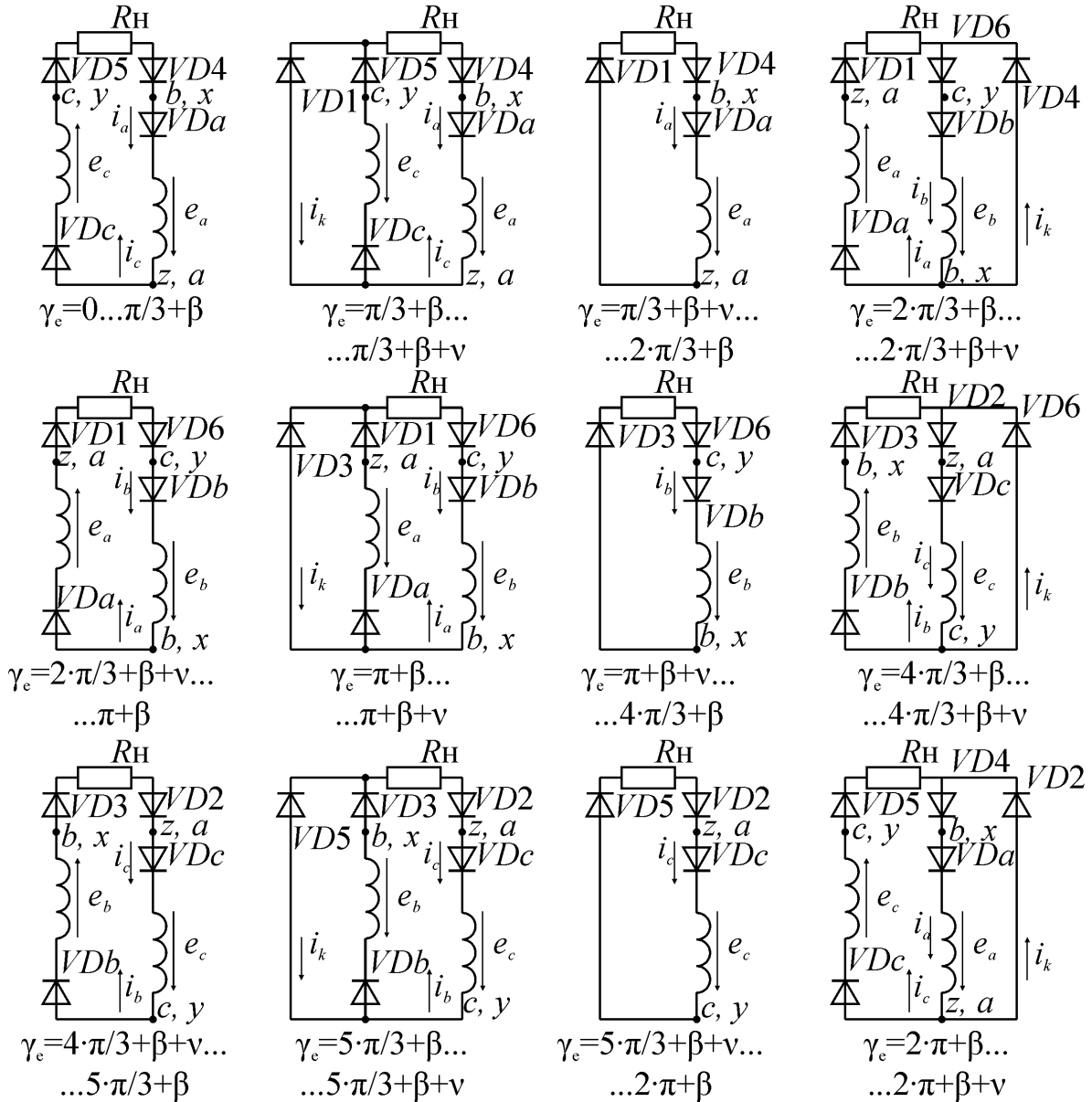


Рисунок 4 – Миттєві схеми роботи генератора

$$-U_a = r \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \quad -U_b = r \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \quad -U_c = r \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \quad (1)$$

де U_a, U_b, U_c - фазні напруги; i_a, i_b, i_c - фазні струми; ψ_a, ψ_b, ψ_c - повні магнітні потокозчеплення фазних обмоток; r - їхні активні опори.

У проміжку часу від $\gamma_e = 0$ до $\gamma_e = \frac{\pi}{3}$ працюють дві фази a та c , включені послідовно, причому напруга на навантаженні дорівнює фазній напрузі генератора.

Рівняння, що описує роботу генератора в цьому випадку має

$$r(i_a + i_c) + R_H \cdot i_0 + \frac{d\psi_a}{dt} + \frac{d\psi_c}{dt} = 0, \quad (2)$$

де $i_b = i_c = i_0$ - струми фаз при їх послідовному з'єднанні з навантаженням.

З урахуванням просторового зсуву фаз a та c $\frac{d\psi_a}{dt} \neq \frac{d\psi_c}{dt}$, незважаючи на рівність струмів фаз. Диференціальне рівняння для цього випадку представлено у такий спосіб

$$(2r + R_n) i_a + \frac{d\phi_a}{dt} + \frac{d\phi_c}{dt} = 0. \quad (3)$$

При включенні джерела з проти-ЕРС диференціальне рівняння має вигляд

$$2r \cdot i_a + E_d + \frac{d\psi_b}{dt} + \frac{d\psi_c}{dt} = 0, \quad (4)$$

де E_d – ЕРС акумуляторної батареї.

Початкові умови для (3), (4): $i_{сн} = 0$; $\gamma_{ен} = 0$; $i_{fn} = const$.

В інтервалі часу від $\gamma_e = \pi/3 + \nu$ до $\gamma_e = 2\pi/3$ включена фаза a і у випадку активно-го навантаження робота генератора представлена диференціальним рівнянням

$$(r + R_n) \cdot i_a + \frac{d\phi_a}{dt} = 0, \quad (5)$$

де $U_a = R_n \cdot i_a$ – напруга на фазі генератора; $i_b = i_0$ – струм навантаження.

Якщо у якості навантаження використовується джерело проти-ЕРС (акумуляторна батарея), то рівняння має вигляд

$$r \cdot i_a + E_d + \frac{d\phi_a}{dt} = 0, \quad (6)$$

де E_d – ЕРС акумуляторної батареї.

Початкові умови для (5), (6): $i_{ан} = i_{a(\pi/3+\beta)}$; $i_{сн} = i_{c(\pi/3+\beta)}$; $i_{fn} = i_{f(\pi/3+\beta)}$.

На інших проміжках часу структура диференціальних рівнянь зберігається такою ж, як і на перших двох проміжках, але зі зміною індексів фаз.

Диференціальні рівняння, записані для фаз обмотки статора генератора, мають бути доповнені рівнянням кола обмотки збудження, котушки якої розташовані на зубцях магнітної системи статора і які живляться від незалежного джерела постійної напруги. Таким джерелом може бути акумуляторна батарея або випрямний міст.

Диференціальне рівняння для контуру обмотки збудження має вигляд

$$U_E = r_E \cdot i_E + \frac{d\psi_E}{dt}, \quad (7)$$

де U_E – напруга джерела живлення; ψ_E – повне потокозчеплення контуру обмотки збудження; r_E – опір обмотки збудження; i_E – струм обмотки збудження.

Наведена система диференціальних рівнянь (2–7) при відповідних початкових умовах дозволяє досліджувати режими роботи вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками та має перемінну структуру.

Магнітні потокозчеплення, що входять у систему диференціальних рівнянь, виражаються через струми та параметри обмоток. При ненасиченій магні-

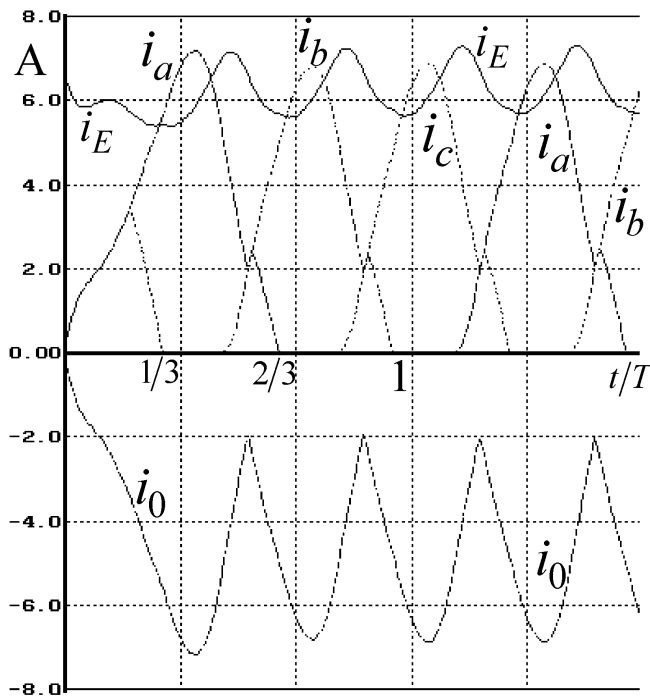


Рисунок 5 – Струми при $R_H = 6 \text{ Ом}$ та $n = 2000 \text{ об/хв}$

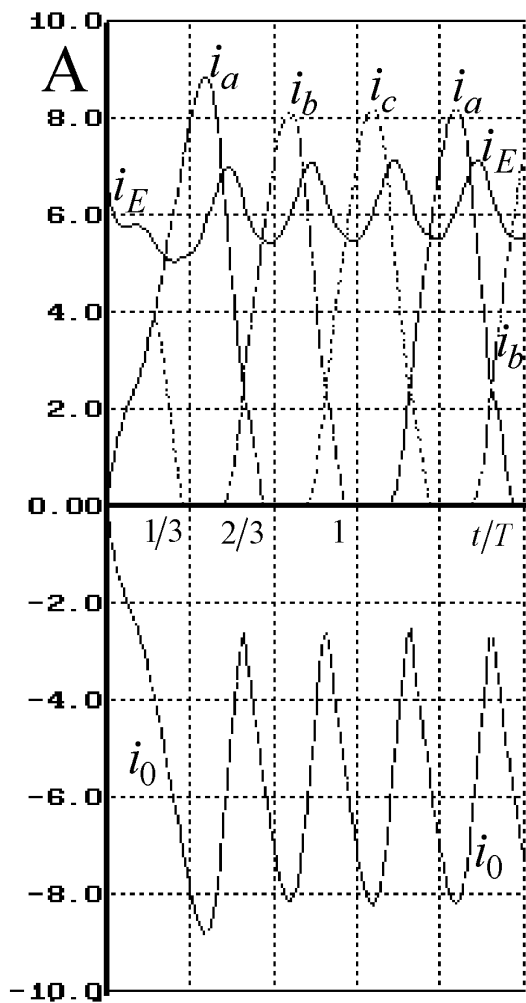


Рисунок 6 – Струми при $R_H = 10 \text{ Ом}$ та $n = 4000 \text{ об/хв}$

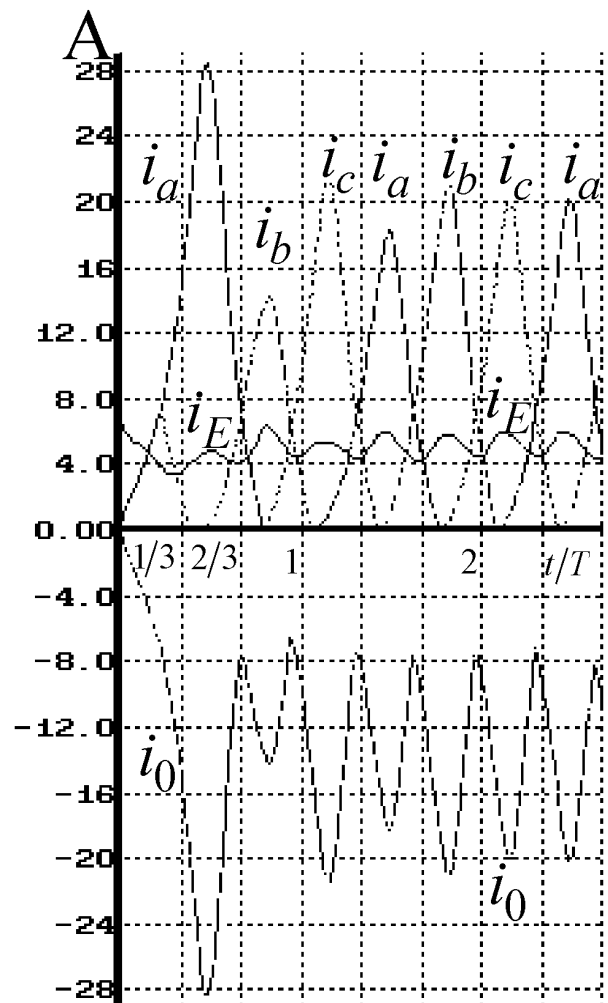


Рисунок 7 – Струми при $R_H = 2 \text{ Ом}$ та $n = 6000 \text{ об/хв}$

тній системі індукторного генератора потокозчеплення являють собою лінійні функції струмів, при цьому коефіцієнтами пропорційності між потокозчепленнями та струмами обмотки є індуктивності даної обмотки та її взаємодуктивності з іншими обмотками.

Індуктивності обмоток та їх взаємодуктивності з іншими обмотками є періодичними функціями кутового положення ротора. Тому система диференціальних рівнянь, в якій описано режими роботи генератора, є системою з періодичними коефіцієнтами, для розв'язання якої ефективним є використання чисельних

методів інтегрування. Повний цикл роботи розбивається на шість проміжних станів схеми генератора, після чого цикл повторюється.

Розрахунки проводилися для основи взаємопов'язаного розв'язання дванадцяти систем диференційних рівнянь. Інтегрування проводилося чисельно методом Рунге-Кутта четвертого порядку по спеціально розробленій програмі для ПЕОМ. На рис. 5-7 наведено результати розрахунку значень струмів збудження (i_E), фазних струмів (i_a, i_b, i_c) та струму навантаження (i_0) вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками при номінальному збудженні та різних значеннях потужності і кутових швидкостей обертання ротора. Вісь часу представлена у відносних одиницях з періодом повторюваності T , якому відповідає кут повороту ротора $\gamma_e = 2\pi$.

В третьому розділі визначено електромагнітні параметри вентильного генератора індукторного типу на основі чисельних розрахунків.

Розрахункова модель електромагнітної системи вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками представлена на рис. 1 поперечним перерізом.

Для визначення ролі системи збудження вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками чисельний розрахунок магнітного поля в першу чергу проведено в режимі неробочого ходу, тобто від дії обмотки збудження. Картина магнітного поля збудження при слабкому насиченні магнітопроводу при струмі $I_E = 2 \text{ A}$ представлена на рис. 8 – лінії рівного векторного магнітного потенціалу (ВМП). Положення ротора, що наведено на рис.8, відповідає вихідній позиції, яка характеризується кутовим положенням $\alpha = 0$. розрахунки проведено в програмі FEMM.

На рис. 9 наведено розподіл нормальної складової магнітної індукції в проміжку. Магнітна індукція під полюсними наконечниками ротора $B_\delta = 0,4 \text{ Тл}$.

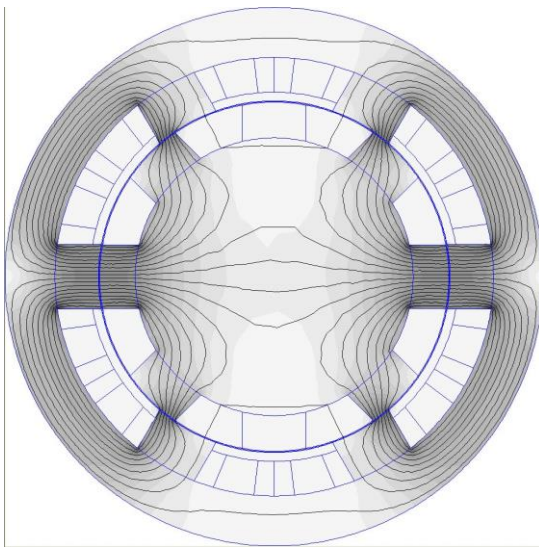


Рисунок 8 – Картина магнітного поля обмотки збудження при $\alpha = 0$ і $I_E = 2 \text{ A}$ ($A_{max}=0,003 \text{ Вб/м}$)

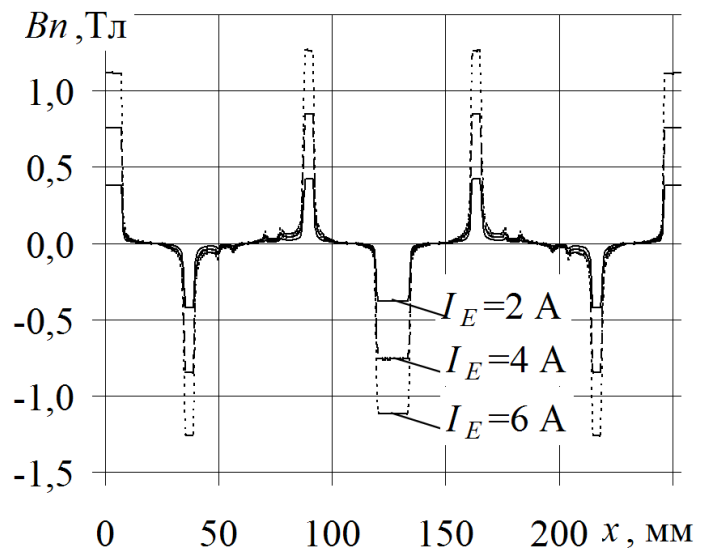


Рисунок 9 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції по розгортці проміжку при різних струмах збудження

Розрахунки магнітного поля при тому ж положенні ротора наведено і при більших значеннях струму обмотки збудження до $I_E = 6$ А. Картина поля залишилась практично без змін, що і на рис. 8, так як навіть при такому струмі магнітопровід залишається слабонасиченим. Магнітна індукція в проміжку сягає $B_\delta = 1,2$ Тл.

З аналізу індуктивності обмотки збудження випливає, що її величина змінюється по куту з періодом повороту ротора на 15° .

Одним з важливих результатів польових розрахунків є визначення індуктивних параметрів обмоток. Результати розрахунку магнітного поля дозволяють безпосередньо через розподіл ВМП визначити магнітне потокозчеплення обмотки на основі виразу

$$\Psi_e = w_e l_a \left(\frac{1}{S_{e+}} \int_{S_{e+}} A_{z,e} dS - \frac{1}{S_{e-}} \int_{S_{e-}} A_{z,e} dS \right), \quad (8)$$

де $A_{z,e}$ - ВМП поля, збудженого струмом I_e обмотки; S_{e+} , S_{e-} - площі поперечного перерізу сторін котушок обмотки з різним напрямком струму по всіх полюсах; w_e - кількість витків на полюс.

Перехід від магнітного потокозчеплення до індуктивності обмотки здійснюється за класичною формулою

$$L_e = \frac{\Psi_e}{I_e}. \quad (9)$$

Якщо інтегрування проводити по площах перерізу фазної ярірної обмотки S_{a+} , S_{a-} , то за результатами розрахунку поля від струму обмотки збудження I_E взаємне магнітне потокозчеплення обмотки збудження і фазної обмотки буде визначатися

$$\Psi_{Ea} = w_a l_a \left(\frac{1}{S_{a+}} \int_{S_{a+}} A_{z,E} dS - \frac{1}{S_{a-}} \int_{S_{a-}} A_{z,E} dS \right), \quad (10)$$

де w_a - кількість витків фазної обмотки на полюс.

Взаємна індуктивність обмотки збудження і фазної обмотки

$$M_{Ea} = \frac{\Psi_{Ea}}{I_E}. \quad (11)$$

Аналогічно отримано взаємні потокозчеплення Ψ_{Eb} , Ψ_{Ec} та взаємні індуктивності M_{Eb} , M_{Ec} обмотки збудження із іншими фазними обмотками.

У двох крайніх положеннях ротора індуктивні параметри практично не залежать від величини струму обмотки збудження. Магнітна система вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками слабо насичена і його магнітні характеристики є лінійними. Це полегшує аналіз перехідних процесів у ярірній обмотці при розрахунку процесу його роботи.

Результати розрахунків індуктивних параметрів обмоток на основі (8-11) при зміні кутового положення ротора наведено на рис. 10. Їхній період становить 45° , а фазовий зсув - 15° , з урахуванням симетрії і періодичності безносе-

редньо розрахунки проводились при зміні кута α у межах $0-22,5^\circ$. Для власної індуктивності обмотки збудження L_E період виявляється в три рази менше і складає 15° , а розрахунки можна проводити для діапазону кута α від 0 до $7,5^\circ$. Графіки взаємних індуктивностей обмотки збудження та фазних обмоток (M_{Ea}, M_{Eb}, M_{Ec}) представлені на рис. 11.

На рис. 12 надані результати чисельних розрахунків – картина магнітного поля однієї фазної обмотки при вихідному кутовому положенні ($\alpha = 0$). У цьому випадку власне магнітне потокозчеплення і, відповідно, власна індуктивність L_a максимальні.

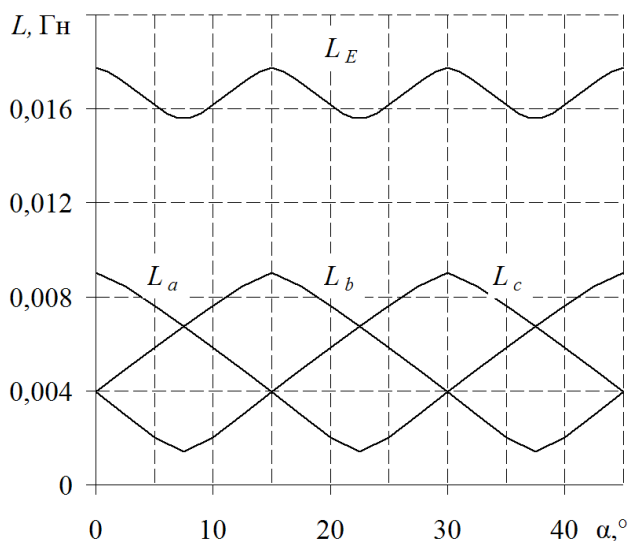


Рисунок 10 – Графіки індуктивностей обмоток збудження (L_E) та фазних (L_a, L_b, L_c)

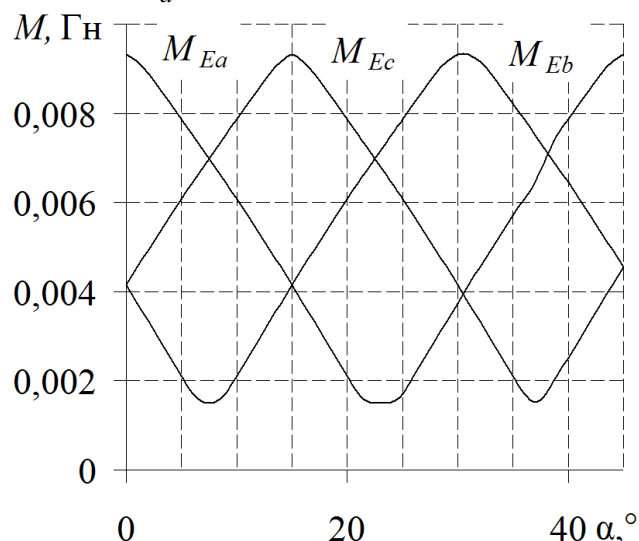


Рисунок 11 – Графіки взаємних індуктивностей обмоток збудження та фазних (M_{Ea}, M_{Eb}, M_{Ec})

На рис. 13 надано розподіл нормальної складової магнітної індукції по розгортці проміжку, що відповідає рис. 12.

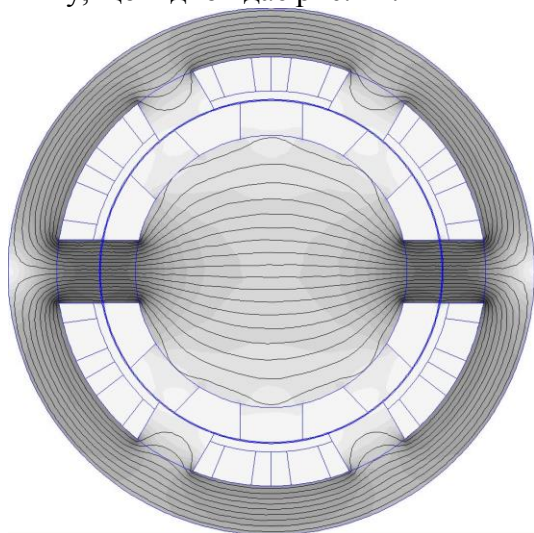


Рисунок 12 – Картина магнітного поля фазної обмотки a при $\alpha = 0$ і $I_a = 4$ А ($A_{max}=0,005813$ Вб/м)

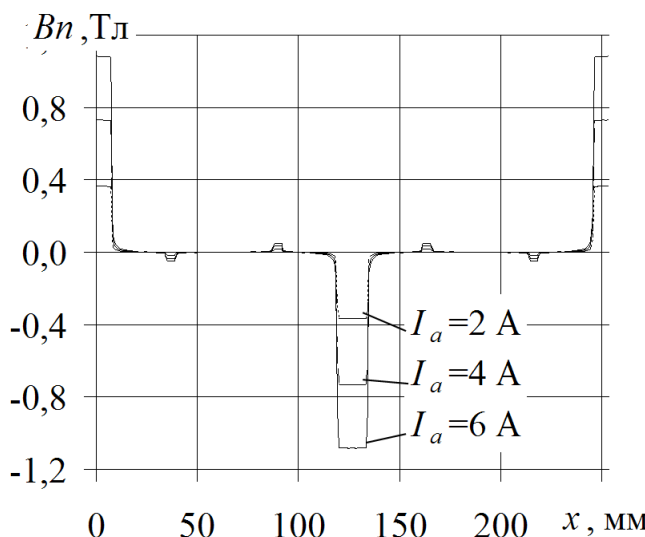


Рисунок 13 – Розподіл нормальної складової магнітної індукції по розгортці проміжку при $\alpha = 0$

Відзначимо, що характер залежностей взаємних індуктивностей фазних обмоток M_{ab} та M_{ac} значно складніший, ніж попередніх, які виявилися близькими до гармонійних. Ці складні залежності істотно ускладнили наступні розрахунки, однак значення M_{ab} та M_{ac} майже на два порядки менше, ніж попередні. Тому в наступних розрахунках перехідних процесів, що супроводжують робочий режим генератора, взаємодією фазних обмоток якоря можна знехтувати.

Отримані дані індуктивних параметрів обмоток вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками свідчать, що їхні кутові функції є періодичними. Причому для власних індуктивностей обмотки збудження L_e , фазної обмотки якоря L_a та їх взаємоіндуктивностей M_{ea} характер цих функцій близький до гармонійного з наявністю значної постійної складової.

В четвертому розділі досліджено вплив геометричних розмірів вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на його індуктивні параметри, а також виконане експериментальне дослідження створеного зразка такого генератора.

Дослідження впливу геометрії на індуктивні параметри проводилися при таких значеннях параметрів (позначення див. на рис. 1), у мм: $d_s=124$, $d_{sz}=81$, $d_{so1}=101$, $d_{so2}=85$, $z_s=6$, $z_r=8$, $d_{rz}=80,4$, $d_r=64$, причому генератор мав $z_s=6$ та $z_r=8$. А ширина зубців статора (b_{zs}) та ротора (b_{zr}) змінювалася в діапазоні 13..15 мм. Результати розрахунків електромагнітних параметрів та позначення різних варіантів генератора наведено в табл. 1 і на рис. 14 та 15.

Таблиця 1 – Результати розрахунку індуктивних параметрів обмоток для різних варіантів генератора

Варіант	b_{ds}	b_{dr}	L_o	L_m	M_o	M_m	L_{fop}	L_{fmp}	M_{of}	M_{mf}
А	13	15	4,535	3,341	0,111	0,076	14,561	0,693	4,689	3,439
Б	14	15	4,834	3,506	0,122	0,082	15,507	0,907	5,015	3,619
В	15	15	5,122	3,607	0,134	0,086	16,407	1,053	5,328	3,732
Г	15	14	4,896	3,560	0,123	0,082	15,577	0,946	5,076	3,673
Д	15	13	4,642	3,427	0,112	0,077	14,702	0,760	4,796	3,527

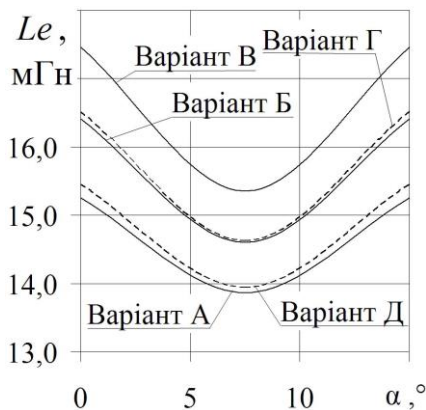


Рисунок 14 – Графіки $L_e = L_e(\alpha)$ для різних варіантів генератора

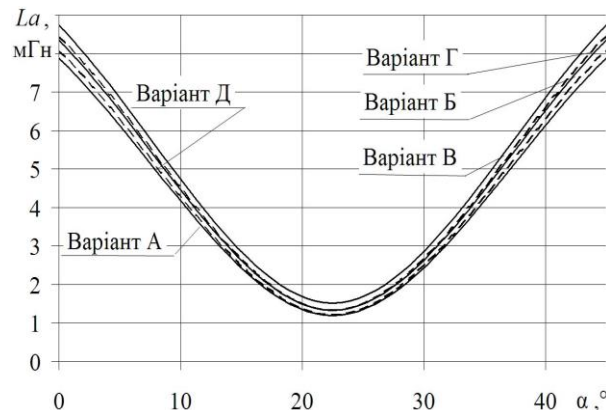


Рисунок 15 – Графіки $L_a = L_a(\alpha)$ для різних варіантів генератора

Результати чисельних розрахунків експлуатаційних характеристик на основі математичної моделі роботи генератора $U_n = U_n(I_n)$, $P_n = P_n(I_n)$ для варіантів А–Д наведено на рис. 16 та 17. Максимальні потужності на частотах 2000 и 4000 об/хв у варіанті Г генератора (182,5 та 431,1 Вт), а на частоті 6000 об/хв – Д (681,5 Вт).

Експлуатаційні характеристики отримані при номінальному збудженні $I_E = 5$ А, частотах обертання 2000, 4000 та 6000 об/хв. та зміні опору навантаження R_n в діапазоні від 10 до 2 Ом

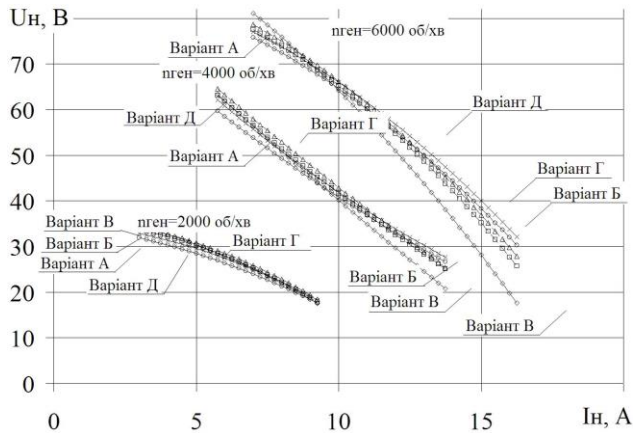


Рисунок 16 – Графіки $U_n = U_n(I_n)$ для варіантів

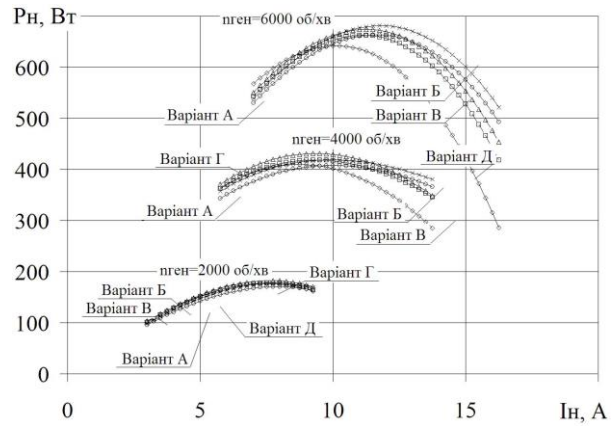


Рисунок 17 – Графіки $P_n = P_n(I_n)$ для варіантів

Виходячи з результатів розрахунків, розроблено, створено та досліджено зразок генератора (рис. 18), для якого прийняте $b_{zs}=15$ мм, $b_{zr}=14,5$ мм (табл. 1) з іншими вище зазначеними параметрами. Обмотки якоря та збудження виконано проводом 0,8 мм, по 52 витків в котушці, активний опір обмотки збудження склав 2,1 Ом, фази яркової обмотки – 0,7 Ом.

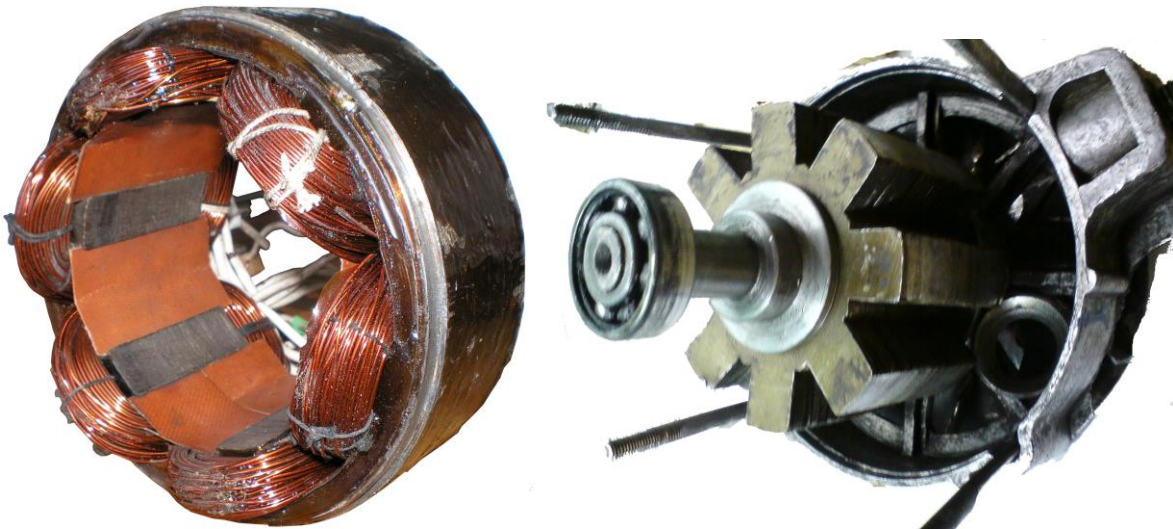


Рисунок 18 – Досліджуваний зразок генератора (окремо статор та ротор з підшипниковим щитом)

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії електричних

машин Стахановського навчально-наукового інституту гірничих та освітніх технологій Української інженерно-педагогічної академії.

На рис. 19 та 20 наведено результати експериментальних випробувань експлуатаційних характеристик створеного зразка генератора. На рис. 21 подана осцилограма струму фази при номінальному збудженні при $R_H = 6 \text{ Ом}$ та $n = 2000 \text{ об/хв}$

Порівняння експериментальних даних з розрахунковими залежностями і характеристиками, показало якісну і кількісну відповідність.

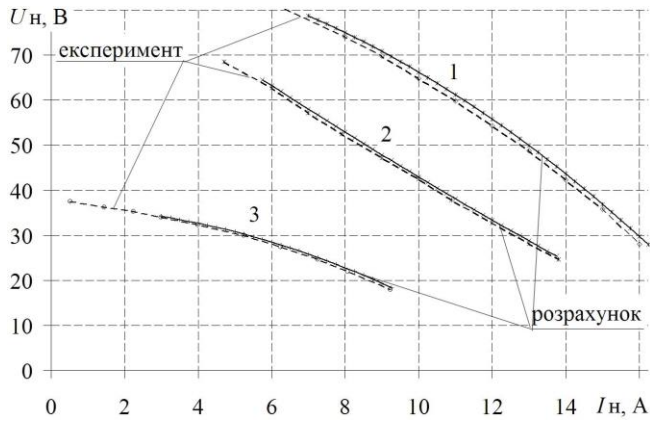


Рисунок 19 – Результати випробувань: зовнішня характеристика $U_n = U_n(I_n)$

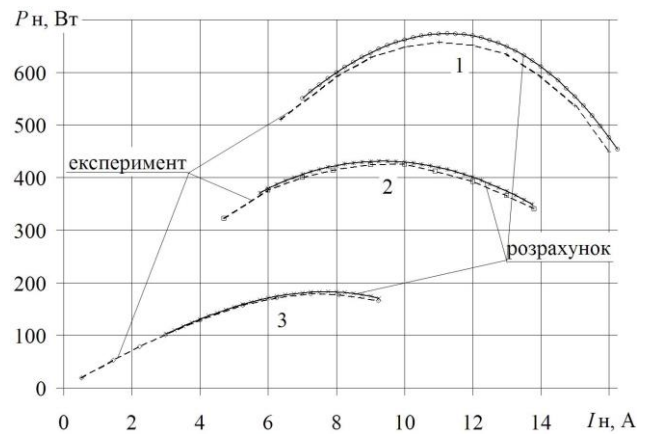


Рисунок 20 – Результати випробувань: характеристика корисної потужності $P_n = P_n(I_n)$

Так досліджуваний генератор показав максимальні потужності на відповідних частотах 174, 419 і 672 Вт.

Осцилограма на рис. 21 відповідає за формою та значеннями розрахованій функції фазного струму при $I_E = 5 \text{ А}$, $R_H = 6 \text{ Ом}$ та $n = 2000 \text{ об/хв}$ (рис. 5).

Експериментальні дослідження довели покращення експлуатаційних характеристики генератора на 24,2 % у порівнянні з генератором без комутуючих діодів в якірній обмотці.

Незначна кількісна розбіжність значень чисельного і фізичного експерименту (до 7,8 %) обумовлена ідеалізацією геометричних параметрів та фізичних процесів при математичному моделюванні.

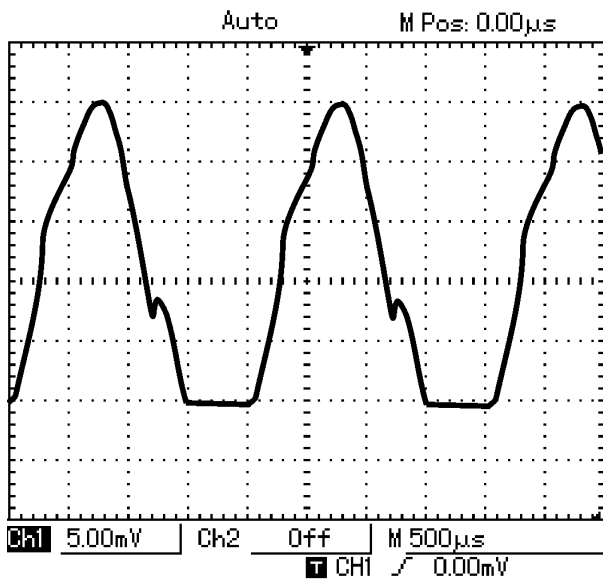


Рисунок 21 – Осцилограма струму фази

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено теоретичне обґрунтування і вирішення науково-практичної задачі, що полягає в покращенні експлуатаційних

характеристик вентильного генератора індукторного типу завдяки суміщенню дії якірної обмотки та спрямоване на створення високоефективних генераторів для систем бортового електропостачання.

Дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Проведено аналіз конструкцій електричних генераторів, що працюють в системах бортового електропостачання транспортних засобів та обґрунтовано перспективність застосування індукторних генераторів.

2. Досліджено роботу вентильного генератора індукторного типу з комутуючими діодами в фазах якірної обмотки з суміщенням її дії, що дозволяє враховувати підсилення магнітного поля збудження дією реакції якоря на основі математичної моделі.

3. Визначено електромагнітні параметри вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на базі польової математичної моделі активної частини з урахуванням реальної геометрії зубцевої зони та насичення магнітопроводу генератора.

4. Доведено ефективність застосування комутуючих діодів в якірній обмотці вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками через підсилення магнітного поля збудження дією реакції якоря проведеними теоретико-експериментальними дослідженнями електромагнітних процесів та експлуатаційних характеристик зазначеного генератора.

5. Створено дослідний зразок вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками з покращеними експлуатаційними характеристиками на 24,2 % у порівнянні з генератором без комутуючих діодів в якірній обмотці.

6. Отримані теоретичні та експериментальні результати підтверджують можливість використання вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками в системах бортового електропостачання транспортних засобів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень використано при конструюванні та практичній реалізації вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками, які впроваджено в ПАТ «Дніпропетровський агрегатний завод», при виготовленні експериментальних зразків під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт, а також у навчальному процесі кафедри електричних машин та апаратів Донбаського державного технічного університету при викладанні дисципліни «Сучасні напрямки розвитку електромеханічних пристроїв»; при виконанні дипломних проектів і випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 8.05070201 – «Електричні машини і апарати»; у навчальному процесі кафедри гірничої електромеханіки та транспортних систем Української інженерно-педагогічної академії при викладанні дисциплін «Електричні машини» та «Спеціальні типи електричних машин»; при виконанні дипломних проектів і випускних кваліфікаційних робіт магістрів за спеціальністю 8.01010401.21 Професійна освіта. Гірництво. Спеціалізація «Електромеханічне обладнання, автоматизація процесів добування корисних копалин та руд».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гречко М.В. Аналіз автомобільних генераторів та шляхи їхнього подальшого вдосконалення. / М.В. Гречко // Електротехніка та електроенергетика. – 2000. – №1. – С. 15–17.

2. Гречко М.В. Практичне дослідження якісних показників системи стабілізації вихідної напруги магнітоелектричних генераторів. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Вісник НТУ „ХПІ”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. – №16. – С. 59–61.

Здобувачем розроблено стенд та методичку досліджень якісних показників системи стабілізації вихідної напруги магнітоелектричного генератора.

3. Гречко М.В. Дослідження індукторного генератора з несиметричною суміщеною обмоткою. / В.Д. Лущик, М.В. Гречко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2002. – №14. – С. 49–52.

Здобувачем поставлено експеримент, отримано експериментальні дані, проведено їх обробку.

4. Гречко Н.В. О возможности использования магнитоэлектрического генератора в системе электроснабжения автотранспортных средств. / Н.В. Гречко // Вісник СНУ. – Луганськ: СНУ. – 2002. – №4. – С. 167–171.

5. Гречко М.В. Аналіз електромагнітних процесів у системі „магнітоелектричний генератор – стабілізатор напруги - навантаження”. / М.В. Гречко, А.Г. Глебін, В.В. Дяченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – №1. – С. 71–75.

Здобувачем розроблено математичну модель системи, отримано дані, проведено їх обробку.

6. Гречко М.В. Принцип створення індукторного генератора з суміщеними обмотками. / В.Д. Лущик, М.В. Гречко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – №11. – С. 89–93.

Здобувачем проаналізована робота індукторного генератора з суміщеними обмотками та сформульовано рекомендації до співвідношень геометрії.

7. Гречко М.В. Перспективи використання вентильних електричних машин у автотранспортних засобах. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Вісник СНУ. – Луганськ: СНУ. – 2004. – №12. – С. 66–69.

Здобувачем проаналізовано та класифіковано вентильні електричні машини відносно їх застосування у автотранспортних засобах.

8. Гречко М.В. Визначення параметрів для побудови векторної діаграми вентильного індукторного генератора з суміщеними обмотками. / В.Д. Лущик, М.В. Гречко // Відомчий науково-технічний збірник. – Київ.: Техніка. – 2004. – Випуск 62. С.113–116.

Здобувачем отримані параметри для побудови вентильного індукторного генератора з суміщеними обмотками.

9. Гречко М.В. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик вентильного генератора індукторного типу з суміщеною обмоткою. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – №42. – С.32–36.

Здобувачем поставлено експеримент, отримано експериментальні дані,

проведено їх обробку.

10. Гречко М.В. Використання вентильного індукторного генератора з суміщеними обмотками у системах електропостачання автотранспортних засобів. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2005. – №1. – С.151–156.

Здобувачем розроблено функціональну та електричну принципову схеми перетворювача «постійний струм-частота-випрямляч».

11. Гречко М.В. До питання оптимізації конструктивних параметрів автотранспортних індукторних генераторів. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Електротехніка та електромеханіка. – 2006. №5. С.30–32.

Здобувачем проаналізовано вплив параметрів на питомі показники індукторного генератора, отримано результати.

12. Гречко М.В. Експериментальне дослідження втрат в індукторних машинах від тертя роторів об повітря. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – №1. С. 53–56.

Здобувачем поставлено експеримент, отримано експериментальні дані, проведено їх обробку.

13. Гречко М.В. Шляхи поліпшення питомих показників вентильних індукторних генераторів. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Електротехніка та електромеханіка. – 2007. №5. С.30–32.

Здобувачем проаналізовано вплив параметрів на питомі показники індукторного генератора, зроблено аналіз схемних рішень.

14. Гречко М.В. Математическая модель вентильно-индукторного генератора для автотранспортных средств. / В.И. Милых, В.Н. Иваненко, Н.В. Гречко // Вісник НТУ «ХП». Харків: НТУ «ХП». – 2008. – №25. С.91–96.

Здобувачем розроблено математичну модель генератора з напівпровідниковим елементом в якірній обмотці.

15. Гречко М.В. Математическое моделирование режимов работы вентильно-индукторного генератора. / В.И. Милых, В.Н. Иваненко, Н.В. Гречко // Електротехніка та електромеханіка. 2009. №1 С.20–24.

Здобувачем отримано електромагнітні параметри генератора та результати математичного моделювання.

16. Гречко М.В. Індукторні генератори радіального збудження з суміщеною обмоткою. / В.Д. Лущик, В.В. Дяченко, М.В. Гречко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». –Донецьк: ДНТУ. – 2009. – №9. – С.156–159.

Здобувачем отримано електромагнітні параметри генераторів.

17. Гречко М.В. Методика визначення індуктивних параметрів вентильних генераторів індукторного типу. / М.В. Гречко // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика» –Донецьк: ДНТУ. – 2009. – №9. – С.66–71.

18. Гречко М.В. Комутаційні процеси в вентильному генераторі індукторного типу з суміщеними обмотками. / М.В. Гречко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета.– Алчевск: ДонГТУ, 2011. – Вып.34. – С.314–322.

19. Гречко М.В. Вплив геометрії на індуктивні параметри вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками. / М.В. Гречко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. 39. – С.269–277.

20. Гречко Н.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны якоря на параметры вентильного генератора индукторного типа с совмещенными обмотками. / Н.В. Гречко // Электрика. – Москва. – 2013. – № 8. – С. 12–16

21. Пат. 49178 А Україна, МКІ 6Н02К21/00. Спосіб захисту магнітоелектричного генератора від розмагнічування дією реакції якоря. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко; заявник і патентовласник М.В. Гречко, В.В. Дяченко. – № 2001042731; заявл. 23.04.01; опубл. 16.09.02, Бюл. №9.

Здобувач розробив концепцію захисту магнітоелектричного генератора від розмагнічування дією реакції якоря.

22. Пат. 78144. Україна, МПК Н02К 19/20. Суміщений трифазний різнополюсний вентильний індукторний генератор. / В.В. Дяченко, М.В. Гречко; заявник і патентовласник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u 2012 10379; заявл. 03.09.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. №5.

Здобувач розробив схему включення обмоток генератора.

23. Гречко М.В. Аналіз конструктивних та схемних рішень генераторів індукторного типу. / М.В. Гречко, В.В. Дяченко // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю: В 2 ч. – Миколаїв: НУК, 2005. – Ч. 2. – С.135-142.

Здобувачем сформульовані критерії оцінки та аналіз різних рішень індукторних генераторів.

24. Гречко М.В. Експериментальне дослідження вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками. / М.В. Гречко // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали XII наук.-техн. конф., м. Севастополь, 23-27 вересня 2013 / М-во освіти і науки України, Севастоп. нац. тех. ун-т; наук. ред. А.М. Дегтярьов. – Севастополь: Сев. НТУ, 2013. – 33-35.

АНОТАЦІЇ

Гречко М.В. Покращення експлуатаційних характеристик вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини й апарати. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2014.

У дисертаційній роботі представлено рішення науково-практичної задачі, що полягає в удосконаленні конструкції двообмоткового генератора індукторного типу з комутуючими діодами в якірній обмотці – вентильного генератора індукторного типу за рахунок суміщення обмоток та магнітопроводу для сис-

тем бортового електропостачання транспортних засобів.

Досліджено роботу вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на основі математичної моделі, яка враховує наявність напівпровідникових елементів в якірній обмотці; визначені електромагнітні параметри вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на базі двовимірної польової скінченно-елементної моделі активної частини з урахуванням реальної геометрії зубцевої зони та насичення магнітопроводу генератора; створено універсальний програмний комплекс для дослідження вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками в різних режимах роботи; одержано покращені на 24,2 % експлуатаційні характеристики вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками завдяки використанню комутуючих діодів з підмагнічуючою дією реакції якоря при різних значеннях конструктивних елементів з урахуванням його реальної геометрії на базі математичної моделі для різних кутових швидкостей.

Ключові слова: індукторний генератор, комутуючі діоди, суміщені обмотки, трифазний випрямляч, електромагнітні процеси, експлуатаційні характеристики.

Гречко Н.В. Повышение эксплуатационных характеристик вентильного генератора индукторного типа с совмещенными обмотками. – 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», Харьков, 2014.

В диссертационной работе представлено теоретическое обоснование и решение научно-практической задачи, заключающейся в улучшении характеристик вентильного генератора индукторного типа за счет совмещения действия полей якорной обмотки с целью создания высокоэффективных генераторов для систем бортового электроснабжения транспортных средств.

Предложена структура совмещенной якорной обмотки вентильного генератора индукторного типа с коммутирующими диодами для использования подмагничивающего действия реакции якоря. По фазам протекают токи только одного направления, при этом они не изменяют свой знак и в одних промежутках работает только одна фаза, а в других – одновременно две. Генератор является вентильным индукторным разноименнополюсным генератором с совмещенными обмотками, который, в тоже время, представляет собой трехфазную машину переменного тока, работающую на выпрямительную нагрузку.

Исследована работа вентильного генератора индукторного типа с совмещенными обмотками на основании математической модели с переменной структурой, учитывающей наличие полупроводниковых элементов в фазах якорной обмотки, усиливающих магнитное поле возбуждения за счет использования реакция якоря. Полный цикл работы разделен на шесть промежуточных состояний схемы генератора.

Определены электромагнитные параметры вентильного генератора ин-

дукторного типа с совмещенными обмотками на базе двумерной полевой модели, учитывающей реальную геометрию зубцовой зоны и насыщение магнитопровода; исследованы электромагнитные процессы, протекающие в генераторе.

Разработан универсальный программный комплекс для исследования вентильного генератора индукторного типа с совмещенными обмотками в разных режимах работы для разных значений конструктивных элементов с учетом его реальной геометрии на базе математической модели его работы для разных угловых скоростей.

Исходя из результатов расчета, разработан и исследован образец генератора, который показал улучшенные на 24,2 % эксплуатационные характеристики по сравнению с подобным вентильным индукторным генератором без совмещения якорной обмотки.

Ключевые слова: индукторный генератор, коммутирующие диоды, совмещенные обмотки, трехфазный выпрямитель, электромагнитные процессы, эксплуатационные характеристики.

Grechko N.V. Heightening of Operating Performances of the Gate Inductor a Type as with the Mated Winding. – As the manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by specialty 05.09.01 – electrical machines and apparatus. – National technical university «Kharkov polytechnic institute», Kharkov, 2014.

In dissertation work the solution of a scientific and practical task which consists in improvement of a design of the two- winding generator of inductor type with the switching diodes in an anchor – the valve generator of inductor type due to combination of windings and a magnetic conductor for systems of onboard power supply of vehicles is submitted.

It is investigated operation of the valve generator of inductor type with the combined windings on the basis of mathematical model which considers existence of semiconductor elements in an anchor winding; electromagnetic parameters of the valve generator of inductor type with the combined windings on the basis of two-dimensional field final and element model of active part taking into account real geometry of a tooth zone and saturation of a magnetic conductor of the generator are determined; the universal program complex for research of the valve generator of inductor type with the combined windings in different operating modes is created; the operational characteristics of the valve generator of inductor type improved for 24,2 % with the combined windings thanks to the switching diodes with a bias from the effect of armature reaction at different values of constructive elements taking into account its real geometry on the basis of mathematical model for different angular speeds are received.

Key words: Inductor generator commuting diodes combined windings, three-phase rectifier, electromagnetic processes, operating performances.



Підписано до друку 01.10.2014 р.
Формат 60ч84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,16.
Наклад 100 прим. Зам. № 21600

Віддруковано в ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Ольмінського, 11
Тел.: (057) 756-53-25
www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua