

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МАСЛЄННІКОВ АНДРІЙ МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.313.17

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ПИТОМОГО ОБЕРТАЛЬНОГО МОМЕНТУ
ДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ,
З ДИСКРЕТНИМ ІМПУЛЬСНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Наній Віталій Вікторович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
доцент кафедри електричних машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Олейніков Олександр Михайлович,
Севастопольський національний технічний університет,
завідувач кафедри суднових та промислових
електромеханічних систем


кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Гребеніков Віктор Володимирович,
Інститут електродинаміки НАН України,
старший науковий співробітник відділу
електромеханічних систем

Захист відбудеться «18» квітня 2013 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий « 05 » березня 2013 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

 О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Заміна тихохідного високомоментного електроприводу, що поєднує швидкохідний електродвигун з механічним редуктором, на тихохідний високомоментний електричний двигун дозволить поліпшити масогабаритні показники електроприводу та позбавить необхідності у коштовному виготовленні багатоступінчастого редуктора.

Для вирішення цієї задачі найбільш перспективними є дві групи тихохідних двигунів, які використовують електромагнітний та електромеханічний спосіб редукції швидкості. У першу групу входять різні типи крокових та індукторних двигунів. Другу групу утворюють двигуни з ротором, що котиться. Отримання високого обертального моменту в двигунах першої групи пов'язане зі збільшенням кількості зубців статора та ротора, що призводить до збільшення габаритів машини і коефіцієнта редукції. Саме коефіцієнт редукції демонструє різницю між частотою обертання ротора і поля статора, а також збільшення обертального моменту на валу двигуна. Раціональне обмеження максимального значення коефіцієнта редукції для першої групи двигунів знаходиться в діапазоні від 50 до 100. Коефіцієнт редукції двигунів з ротором, що котиться, залежить від різниці діаметрів статора та ротора і дозволяє досягати величини коефіцієнта редукції від 100 до 5000 при незмінній кількості пар полюсів чи кількості зубців статора при будь-якому габариті. Крокові та індукторні двигуни не можуть реалізувати такі вихідні параметри, не перевищуючи своєї раціональної межі в геометричних розмірах.

Отже, розробка конструкції та дослідження електромеханічного перетворення енергії в двигуні з ротором, що котиться, для заміни тихохідного високомоментного електроприводу з багатоступінчастим редуктором представляє собою актуальну науково-технічну задачу, яка визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних машин НТУ «ХПІ» у рамках держбюджетних НДР МОН України: «Дослідження високомоментного низькообертного електродвигуна для створення керованого безредукторного електроприводу трубопровідної арматури» (№ ДР 0106U005157), «Розробка експериментального двигуна з ротором, що котиться, для безредукторного електроприводу» (№ ДР 0109U002394), «Розвиток теорії і методів проектування на основі чисельно-польових методів для удосконалення існуючих і створення нових електричних машин» (№ ДР 0111U002269), де здобувач брав участь у якості відповідального виконавця та виконавця окремих розділів роботи, а також у творчій співпраці з підприємствами: СКБ АТ «Укрелектромаш» (м. Харків), ДП «Завод «Електроважмаш» (м. Харків), НВО «Хартрон-Плант» (м. Харків) та проектною організацією ТОВ «Укртехнологісе-

рвіс» (м. Харків), які працюють в галузі електромашинобудування та автоматизації енергосистем.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення питомого обертового моменту двигуна з ротором, що котиться, при дискретному імпульсному живленні.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- проаналізувати конструкції двигуна з ротором, що котиться, та конструкції механізмів передачі обертового моменту;

- визначити вплив розподілу магнітного поля, кількості одночасно ввімкнених коутшок обмотки статора, змінення площі активної поверхні магнітопроводу статора на обертовий момент двигуна;

- визначити умови створення максимального обертового моменту двигуна з ротором, що котиться, з дискретним імпульсним живленням;

- спроектувати двигун з ротором, що котиться, з дискретним імпульсним живленням та провести експериментальні дослідження.

- розробити випробувальну установку, що дозволить знімати необхідні характеристики двигуна при наднизьких частотах обертання вихідного валу двигуна (0,1 – 2 об/хв).

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси при електромеханічному перетворенні енергії в двигуні з ротором, що котиться.

Предмет дослідження – вплив розподілу магнітного поля на силу однобічного магнітного тяжіння та обертовий момент в двигуні з ротором, що котиться.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на моделюванні магнітного поля за допомогою метода скінченних елементів, який використовувався для розрахунку двовимірної і тривимірної картини магнітного поля в двигуні з ротором, що котиться. Для розрахунку сили однобічного магнітного тяжіння використовувались рівняння Максвелла. При дослідженні процесу руху ротора використовувались основні положення теорії коливань з розв'язанням рівняння Лагранжа.

Експериментальні дослідження та випробування проводилися на кафедрі електричних машин НТУ «ХП» та були підтверджені на випробувальній станції СКБ АТ «Укрелектромаш» (м. Харків). Порівняння розрахункових і експериментальних результатів проводилося методами математичної статистики. Достовірність досліджень підтверджена результатами експериментів та ресурсними випробуваннями.

Наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист, полягає у такому:

- вперше отримана та досліджена тривимірною картина розподілу магнітного поля в двигуні з ротором, що котиться, для визначення насичення магнітної системи двигуна та форми розподілу магнітної індукції у повітряному

проміжку;

- вперше розроблено математичний опис руху ротора поблизу точки рівноваги при дискретному імпульсному живленні;

- вперше обґрунтована необхідна кількість котушок, що забезпечує максимальне значення сили однобічного магнітного тяжіння при дискретному імпульсному живленні двигуна з ротором, що котиться.

Практичне значення отриманих результатів роботи для електромашинобудівної галузі:

- розроблений спосіб розрахунку сили однобічного магнітного тяжіння та обертового моменту є точним та зручним для практичного проектування двигунів з ротором, що котиться, при дискретному імпульсному живленні;

- вдосконалено конструкцію механізму передачі обертового моменту (патенти України № 55265, № 57154), яка успішно пройшла ресурсні випробування;

- розроблено і практично реалізовано випробувальну установку для зняття механічної і моментної характеристик, а також характеристик неробочого ходу і короткого замикання для двигунів з частотою обертання 0,1-2 об/хв для рівномірного та дискретного обертання вала з фіксуванням дискретного обертання вала двигуна не більше двох кутових хвилин;

- розроблено, виготовлено та випробувано зразок двигуна з ротором, що котиться, що відповідає основним технічним умовам для однообертних електричних механізмів згідно ГОСТ 7192-87.

Отримано позитивні рекомендації з Рівненської АЕС (м. Кузнецовськ) про проведення дослідної експлуатації двигуна з ротором, що котиться на енергоблоках станції, а також від НВП «Хартрон-Плант» (м. Харків) про можливість організації виробництва двигунів з ротором, що котиться, розробку схвалено на науково-технічній раді Зміївської ТЕС (с.м.т. Комсомольськ, Харківської області). Основні положення та розробки дисертації використовуються у навчальному процесі для курсового і дипломного проектування електричних машин студентами спеціальності 050702 – «Електричні машини і апарати» НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача:

- розрахована необхідна і достатня кількість обмоток статора для створення максимального обертового моменту двигуна;

- досліджено питання впливу дискретного переміщення магнітного поля на дискретність руху ротора при різній кількості котушок статора;

- проведено розрахунок магнітної системи двигуна методом скінченних елементів з адаптацією розрахункової області для нерівномірного повітряного проміжку;

- розроблено і виготовлено блоки живлення для двигуна з ротором, що

- котиться з дискретним магнітним полем;
- доопрацьовано випробувальний стенд з електромагнітним гальмом для вимірювання обертового моменту при частоті обертання 0,1 – 2 об/хв;
- розроблено і реалізовано гідрофрикційний випробувальний стенд для одночасного вимірювання обертового моменту та частоти обертання валу двигуна з ротором, що котиться з дискретним магнітним полем;
- розраховано та виготовлено механізм передачі обертового моменту між валом та ексцентрично розташованим ротором;
- спроектовано і досліджено двигуни з ротором, що котиться, при дискретному імпульсному живленні в режимах неробочого ходу, навантаження і короткого замикання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: міжнародних симпозіумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA)» (2009-2012 р.р., м. Харків), XVII–XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2009-2012 р.р.), семінарах з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» при ІЕД НАН України «Електромагнітні та теплові процеси високо використаних електричних машин» (Харків, 2009-2011 р.р.). Експериментальні зразки демонструвались на Міжнародних та республіканських промисловотехнічних та галузевих виставках «Енергетика та енергозбереження» (Харків, 2009-2011 р.р.), «Барвіста Україна» (Харків, 2009-2011 р.р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 15 робіт, з них – 6 у фахових виданнях України, 3 патенти України, 5 робіт опубліковано у матеріалах конференцій.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел інформації, трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 189 сторінок; з них 64 рисунки по тексту; 6 рисунків на 4 окремих сторінках; 17 таблиць по тексту; 4 таблиці на 7 окремих сторінках; список використаних джерел інформації з 119 найменувань на 15 сторінках; 3 додатки на 35 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

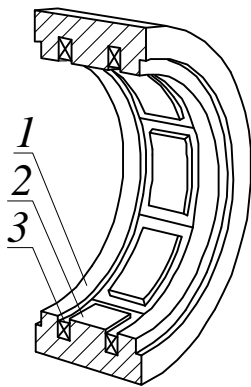
У вступі до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, представлено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

В першому розділі проведено аналіз різноманітних конструкцій двигунів з ротором, що котиться (ДРК). Варіанти конструкцій двигунів аналізувались з точки зору способу живлення статорної обмотки, що дозволило ро-

зділити двигуни на чотири групи: двигуни з уніполярним підмагнічуванням, двигуни з двома обмотками статора, двигуни з пульсуючим магнітним полем і двигуни з дискретним магнітним полем.

При аналізі цих груп ДРК з'ясовано, що перспективним є питання створення та дослідження двигунів з дискретним магнітним полем, як з точки зору засобів і способів управління, так і розрахунку значення обертового моменту. Аналіз конструкцій дозволив визначити найбільш вдалу конструкцію магнітопровода статора. Ця конструкція має Ш-подібний магнітопровід, який є технологічним у виготовленні та має найменші магнітні поля розсіювання (рис.1). Живлення ДРК з дискретним магнітним полем здійснюється уніполярними імпульсами напруги з частотою від 0,5 до 15 Гц, що дозволяє виготовити статор ДРК масивним, а не шихтованим.

Принцип дії ДРК заснований на коченні ротора по поверхні статора при ексцентричному положенні ротора. Таким чином, виникає питання розгляду конструкції механізму передачі неспіввісного обертання між ротором та валом. Проаналізовані механізми мають технологічну складність виготовлення та обслуговування.



1 – каток статора; 2 – зубець статора; 3 – котушка статора.

Рисунок 1 – Осердя статора ДРК обмотане

момент відносно точки K , а друга визначає тиск на опору, тобто ротора на статор. Виходячи з цього, електромагнітний момент розраховується як

Також проаналізовані розрахункові методи магнітного поля для ДРК. Відзначено, що аналітичні методи розрахунку магнітного поля супроводжуються великою кількістю припущень та недостатньо забезпечують точність розрахунку.

У другому розділі досліджено питання створення максимального обертового моменту в ДРК, який залежить від форми розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку, геометричних розмірів двигуна та кількості одночасно ввімкнених статорних котушок.

На рис. 2 показано вектор сили однобічного магнітного тяжіння (СОМТ) P , який розкладається на дві складові P_x і P_y . Перша – створює обертовий

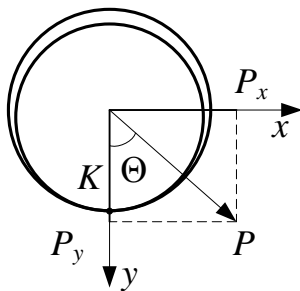


Рисунок 2 – Вектор сили однобічного магнітного тяжіння P та його складові P_x і P_y

$$M_{em} = 0,5 \cdot P_x \cdot d_r, \quad (1)$$

де d_r – діаметр ротора.

Для того, щоб визначити складові СОМТ необхідно знати значення сили P . В окремому випадку, коли дві поверхні паралельні одна до одної

$$P = \frac{B_\delta^2 \cdot S}{\mu_0}, \quad (2)$$

де B_δ – значення магнітної індукції в повітряному проміжку; S – площа поверхні, крізь яку проходить основний магнітний потік; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

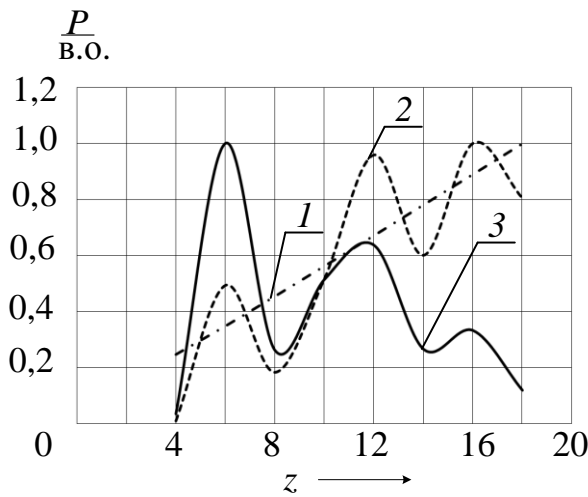
Ексцентричне положення ротора відносно статора обумовлює появу нерівномірного повітряного проміжку, що приводить до нерівномірного розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку. Величина вектора СОМТ змінюється пропорційно зміні значення магнітної індукції.

Кількість і розміщення котушок статора може бути різним. Мінімальна кількість котушок статора дорівнює 3, тоді кожна котушка займає сектор в 120° . Але це не найкращий варіант для ДРК при дискретному імпульсному живленні, тому що повітряний проміжок в такому секторі значно змінюється з максимального до мінімального значення, що буде відображатися на плавності руху ротора та обертальному моменті двигуна. Ці причини визначають мінімальну кількість котушок статора, яка прийнята такою, що дорівнює 4.

Котушки статора живляться імпульсами уніполярної напруги зсунутими в часі. Залежно від цього зсуву змінюється кількість одночасно ввімкнених котушок обмотки статора. Струм кожної котушки створює власний вектор СОМТ, геометрична сума яких створює результуючий вектор СОМТ. Наявність цих даних надає початкові умови розрахунку результуючого вектора СОМТ при змінній кількості одночасно ввімкнених обмоток статора.

На рис. 3 представлено результати розрахунку величини результуючої СОМТ для ідеалізованого випадку та умов врахування зміни активної площі поверхні статора, зміни значення магнітної індукції у повітряному проміжку.

Ідеалізований випадок передбачає прямопропорційне збільшення СОМТ P від зростання кількості одночасно ввімкнених котушок статора z на інтервалі $\pm 90^\circ$ від точки контакту, тобто струм кожної котушки створює свій вектор СОМТ, що дорівнює максимальному, який створює струм котушки з мінімальним повітряним проміжком між ротором і статором (рис. 3, крива 1).



1 – ідеалізований випадок; 2 – при врахуванні нерівномірного повітряного проміжку між статором та ротором; 3 – при врахуванні активної площі поверхні статора.

Рисунок 3 – Графік залежності SOMT від кількості котушок статора

З формули (2) видно, що SOMT залежить також від площі поверхні та магнітної індукції в повітряному проміжку. Площа поверхні зменшується кожен раз, коли збільшується кількість котушок статора. Виконуючи розрахунок SOMT з урахуванням зміни магнітної індукції та активної площі поверхні статора у повітряному проміжку отримано криві 2 і 3, що представлено на рис. 3.

Результати розрахунків, які отримані за умови однаковості МРС в повітряному проміжку, показують, що максимальне значення SOMT досягається при одночасному включенні трьох котушок для шестикотушкового статора. Однак за таких умов не враховується насичення осердя статора при іншій кількості одночасно ввімкнених

котушок.

Подальше дослідження факторів, що впливають на значення величини обертового моменту та SOMT, дозволило отримати розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку для конструкції двигуна з насиченим осердям статора за допомогою програмних комплексів FEMM і Ansys, які стали інструментом розрахунку картин магнітного поля методом скінченних елементів. При створенні моделі ДРК за допомогою програмного комплексу Ansys необхідно було «підняти» ротор в точці контакту на 3 – 5 % від максимального значення повітряного проміжку, що допомогло реалізувати процедуру накладення сітки та отримання необхідних результатів.

Застосування цих двох пакетів програм дозволило наочно розглянути розподіл магнітної індукції як в повітряному проміжку ДРК, так і у всій магнітній системі.

Проведений розрахунок тривимірному магнітного поля за допомогою програми Ansys дозволив з'ясувати доцільність зустрічного направлення струмів у сусідніх котушках, що дозволяє підвищити SOMT та обертовий момент до 20 % при незмінному куті навантаження, а застосування форми імпульсу з крутонаростаючим переднім фронтом збільшує SOMT ще на 5 %. Отримані результати наведено на рис. 4.

Апроксимація форми магнітної індукції у повітряному проміжку має

ВИГЛЯД

$$B(\alpha) = \frac{B_{\max}}{\operatorname{ch}\left(\frac{\alpha_0}{\sigma}\right)}, \quad (3)$$

де B_{\max} – максимальне значення магнітної індукції; σ – коефіцієнт, що залежить від різниці діаметрів статора та ротора Δd (при $\Delta d = 1$ мм $\sigma = 60$); α_0 – кут, що визначає

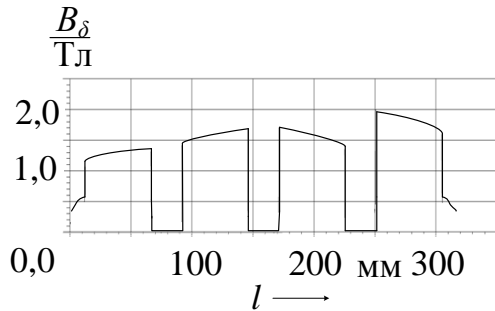


Рисунок 4 – Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку ДРК при формі імпульсу напруги живлення з крутонарастаючим переднім фронтом

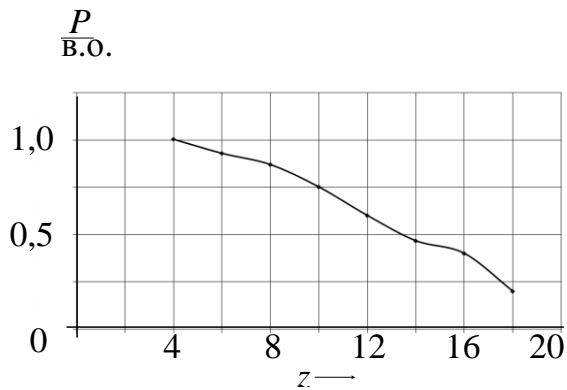


Рисунок 5 – Графік залежності СОМТ від кількості котушок статора з урахуванням рівномірно насиченої магнітної системи двигуна

положення рівноваги ротора при існуючому розподілі магнітного поля.

Залежність (3) дозволяє визначити значення магнітної індукції в повітряному проміжку для будь-якого кута α та розрахувати величину СОМТ при тій самій формі розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку з урахуванням рівномірно насиченого магнітопровода двигуна (рис. 5).

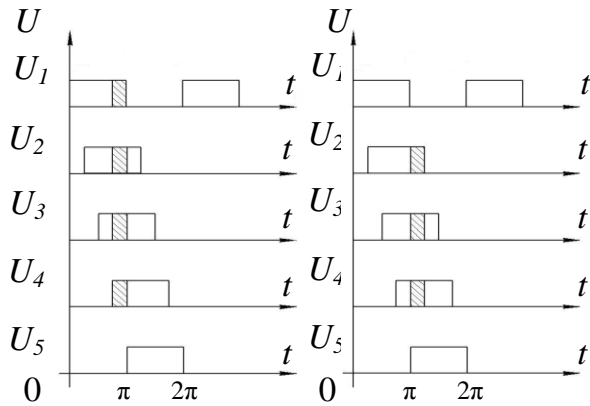
Для створення максимального обертального моменту, найбільш прийнятними є варіанти двигунів з чотирьох-, шести- і восьмикушковими статорами.

Рух ротора при різній кількості котушок статора залежить від руху магнітного поля, що в свою чергу, залежить від параметрів імпульсу напруги живлення. Саме форма і амплітуда імпульсу живлячої напруги впливають на перехідний процес у кожній котушці, тривалість якого впливає на швидкість наростання і зменшення СОМТ.

Наведений на рис.6 часовий зсув імпульсів напруги живлення використовується для восьми катушкового статора ДРК при одночасному ввімкненні чотирьох котушок статора. Аналізуючи комутацію котушок статора, слід зауважити, що існують такі моменти часу, коли працюють не всі котушки статора, а на одну менше (рис.6 б), одночасно ввімкнені котушки виділені

штрихуванням. Це відбувається внаслідок того, що на першій котушці після припинення подачі напруги живлення струм зменшується до нуля поступо-

во, а у котушці, що вмикається збільшується до номінального значення також поступово.



a

б

a – момент часу, коли ввімкнено чотири котушки статора; *б* – момент часу, коли відбувається комутація першої та п'ятої котушок.

Рисунок 6 – Імпульси напруги живлення

Через це відбувається зміщення та зменшення результуючого вектора СОМТ, що призводить до зміни обертового моменту на валу двигуна.

Розрахунок величини СОМТ призводить до того, що максимальне значення СОМТ є у шести- та восьмикотушкових статорів. Але у всіх варіантах розрахунку СОМТ бралось значення магнітної індукції на середині зубця. При цьому, якщо точка контакту припадає на середину зубця, тоді в розрахунок потрапляє максимальне значення магнітної індукції ($B_{\max} = 1,6$ Тл), а у всіх інших випадках – середнє. Враховуючи це, середнє значення магнітної індукції для конструкцій ДРК, що мають точку контакту на середині зубця розраховане за формулою Сімпсона

$$B_{av} = \frac{B_1 + 4B_k + B_2}{6}, \quad (4)$$

де B_1 , B_2 – значення магнітної індукції в крайніх точках зубця від точки контакту; B_k – значення магнітної індукції в точці контакту.

Результати розрахунку наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Середнє значення магнітної індукції для ДРК з точкою контакту на середині зубця

z	6	10	14	18
B_{av} , Тл	1,45	1,55	1,57	1,58

Підставивши ці значення магнітної індукції у формулу розрахунку результуючої СОМТ, отримані остаточні результати розрахунку величини СОМТ (рис. 7).

При дискретному імпульсному живленні постає питання рівномірності обертання ротора, що впливає на значення обертового моменту ДРК. Це

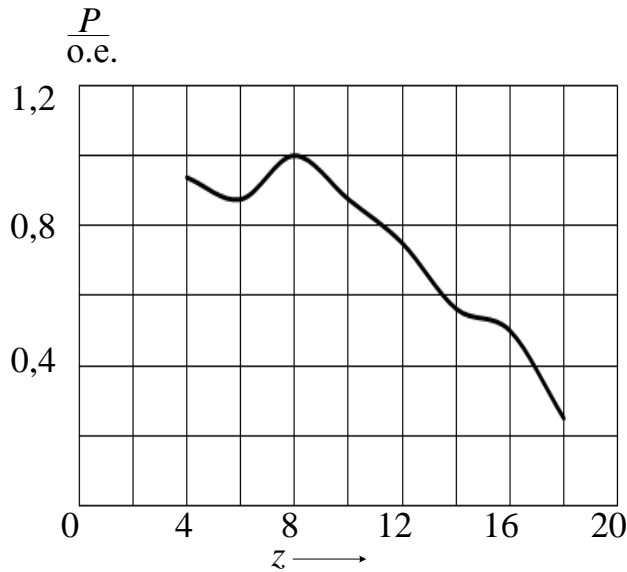


Рисунок 7 – Графік залежності СОМТ від кількості котушок статора з урахуванням середнього значення магнітної індукції в точці контакту

но осі симетрії ротора.

Кінетична енергія ротора має вигляд

$$T = \frac{m}{2} \dot{\beta}^2 (r_s - r_r)^2 \cdot \left(2 - \frac{r_{ri}^2}{r_r^2} \right), \quad (5)$$

де m – маса ротора; $\dot{\beta}$ – похідна кута за часом; r_s – внутрішній радіус статора; r_r – зовнішній радіус ротора; r_{ri} – внутрішній радіус ротора.

Для аналізу руху ротора необхідно визначити графік залежності потенційної енергії ротора в зоні впливу магнітного поля статорних котушок. Аналіз графіка дозволить визначити точку мінімуму потенційної енергії, а значить точку рівноваги та кількість енергії, яка надається ротору для руху в наступну точку рівноваги.

Рух ротора з однієї точки мінімуму потенційної енергії в наступну призводить до нерівномірного переміщення ротора зі змінним прискоренням і здійсненням коливань поблизу точки рівноваги. Визначивши цю частоту коливань, можливо розрахувати частоту комутації котушок статора, яка дозволить зробити рух ротора найменш дискретним. В результаті коливань ротор відхиляється від точки рівноваги і виникає сила, що спрямована в протилежний відхиленню бік, що повертає ротор до області сталої рівноваги. Фо-

пояснюється тим, що ротор, переміщуючись під дією дискретного магнітного поля статора, синхронно з ним переходить з однієї точки рівноваги в іншу. Збільшення дискретності переміщення магнітного поля призведе до збільшення швидкості переміщення ротора. Якщо ж ротор не встигає переміщуватись, тоді він випадає з синхронізму.

Рух ротора відбувається під дією дискретного магнітного поля статора. Відомо, що вся енергія, яка передається ротору для переміщення, розподіляється на кінетичну T і потенційну W .

Якщо сума цих двох складових знаходиться в достатній кількості, тоді ротор переміщується з певною кутовою швидкістю, в результаті чого на його кінетичну енергію впливає момент інерції, що визначається віднос-

рму потенційної кривої задає розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку двигуна, яка має максимум в точці контакту статора та ротора, в цій точці знаходиться точка локального мінімуму потенційної енергії ротора. Тому процес коливання ротора досліджено з боку зміни магнітної енергії в повітряному проміжку ДРК. Елементарний внесок в енергію магнітного поля для нескінченно малого кута

$$dW_m = w \cdot dV = \frac{B_i^2}{2\mu_0\mu_i} dV, \quad (6)$$

де w – густина енергії магнітного поля, де μ_i – магнітна проникність середовища; B_i – значення магнітної індукції у інтегрованому об'ємі; dV – елемент об'єму.

Інтегруючи по елементу об'єму і розкриваючи всі змінні, отримано розподіл потенційної енергії, завдяки якій ротор переміщується між точками рівноваги

$$W = w \cdot l \cdot R_s \cdot (r_s - r_r) \cdot \left(\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{ch\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)} - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{ch\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)} d\alpha \right), \quad (7)$$

де l – осьова довжина статора.

Для визначення частоти коливань ротора необхідно скласти диференціальні рівняння руху механічної системи, які можна вивести з рівняння Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial L}{\partial \beta} = 0, \quad (8)$$

де L – функція Лагранжа, що дорівнює різниці між кінетичною T і потенційною W енергіями системи,

$$L = T - W. \quad (9)$$

На даному етапі отримано кінетичну і потенційну енергії системи. Тепер можна показати не тільки зміну амплітуд потенційної енергії ротора при різній кількості котушок статора, а також, розв'язавши рівняння Лагранжа, отримати власну частоту коливання ротора в зоні локального мінімуму потенційної ями

$$\omega_r = \sqrt{\frac{2w \cdot l \cdot r_s}{m \cdot (r_s - r_r) \cdot \left(2 - \frac{r_s^2}{r_r^2}\right)}}. \quad (10)$$

Виведене рівняння (10) показує залежність власної частоти коливань ротора від маси ротора та геометричних розмірів статора та ротора, форми розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку. Через частоту власних коливань ротора визначено період коливань. Значення періоду цих коливань визначає значення максимуму амплітуди нада-

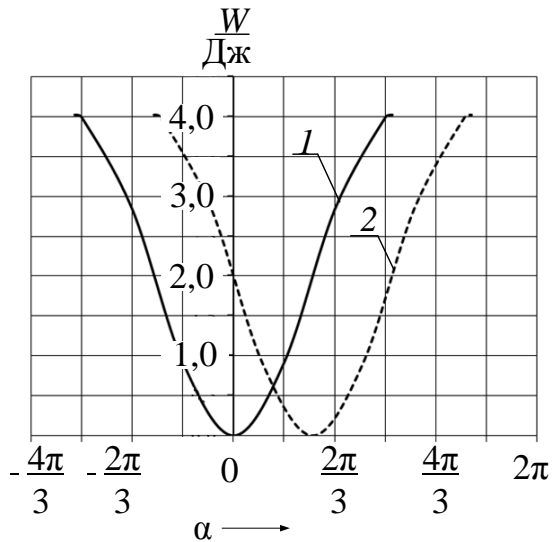
ної ротору енергії. Перший максимум, наданої ротору енергії, виникає при 0,25 від періоду цих коливань. Таким чином, якщо зробити комутацію котушок у першу максимальну амплітуду гармонічних коливань, то ротор почне переміщуватись в нову точку рівноваги з мінімальним значенням зміни наданої йому енергії. Реалізація такого способу переміщення ротора призведе до відсутності дискретності руху ротора.

У третьому розділі визначаються умови, які необхідні для створення максимального обертального моменту. Ці умови залежать від факторів: форми розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку, геометричних розмірів двигуна та кількості одночасно ввімкнених статорних котушок. Проведений аналіз факторів, що впливають на створення СОМТ, демонструє можливість створення максимального значення СОМТ і обертального моменту для конструкції двигуна з восьмикотушковим статором. Подальше збільшення кількості котушок статора не буде збільшувати обертальний момент. Обґрунтовано, що максимальне значення обертального моменту має восьмикотушковий статор.

На основі залежності (7) отримано графік розподілу потенційної енергії системи (рис. 8) та проаналізовано вплив дискретного руху магнітного поля на рух ротора. Магнітне поле переміщується дискретно з однієї точки в іншу. При цьому енергія, яка надається ротору двигуна, надається імпульсно. Відбувається «стрибок» енергії ротора ΔW з точки рівноваги $(0;0)$ в наступну точку локального мінімуму $(2\pi/z;0)$ та, чим більше цей «стрибок» енергії, тим більш дискретним є рух ротора, що зменшує обертальний момент двигуна (табл. 2).

Таблиця 2 – Кількість енергії, яка надається ротору при різній кількості котушок статора

z	4	6	8	10	12	14	16	18
ΔW , Дж	2,00	1,00	0,60	0,40	0,30	0,25	0,20	0,15
ΔW , в.о.	13,33	6,67	4,00	2,67	2,00	1,67	1,33	1,00



1 – початкове положення; 2 – дискретне переміщення.

Рисунок 8 – Просторове розподілення потенційної енергії системи для чотирьохкотушкового статора

вим статором із запропонованим механізмом передачі неспіввісного обертання між ротором і валом. Наведено блок-схему системи управління дискретного імпульсного живлення ДРК. Розроблена схема випробувального стенду та проведено ресурсні випробування двигуна в обсязі 72000 пусків з номінальним навантаженням на валу. Обидва двигуни успішно витримали програму випробувань.

За результатами теоретичних досліджень розраховано, сконструйовано та виготовлено ДРК з восьмикотушковим масивним статором зі збільшеним питомим моментом на 47 % та поліпшеними на 20 % масогабаритними показниками в порівнянні з шестикотушковим статором ДРК (рис. 9).

Живлення обмотки статора для обох двигунів здійснювалося за допомогою уніполярних імпульсів прямокутної форми. Для реалізації дискретного імпульсного живлення обмотки статора розроблено і виготовлено два блока живлення. Основою елементів системи керування для першого лабораторного блока живлення двигуна використовувалися тригери, а для другого – мікроконтроллер, що дозволило значно розширити кількість алгоритмів роботи ДРК.

В ході проведення експериментального дослідження зразків ДРК визначені характеристики неробочого ходу і короткого замикання, експериментальні дані яких не мають відхилення між собою.

Проведене дослідження форми імпульсу напруги живлення, демонструє необхідну форму, яка дозволяє скоротити час перехідного процесу у котушках статорної обмотки. Аналіз форм трьох видів імпульсів продемонстрував, що найбільш ефективним є імпульс з крутим переднім фронтом та з протилежною полярністю напруги живлення заднього фронту.

Розглянуто питання виготовлення масивної магнітної системи ДРК з легированої (сталь 40Х), високовуглецевої (сталь Ст45) та низьковуглецевої сталей (Ст3). Одержано криві намагнічування матеріалів до і після термічної обробки. Найкращі результати мають сталь Ст45 та сталь 40Х, що дозволяє збільшити обертальний момент двигуна до 10 %.

У четвертому розділі наведено експериментальні результати випробування ДРК з шести- та восьмикотушко-

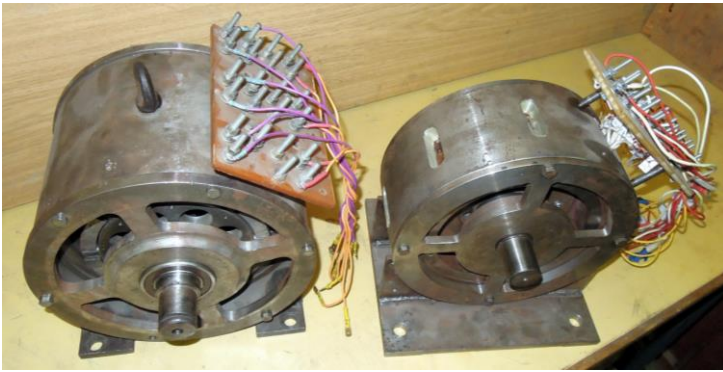
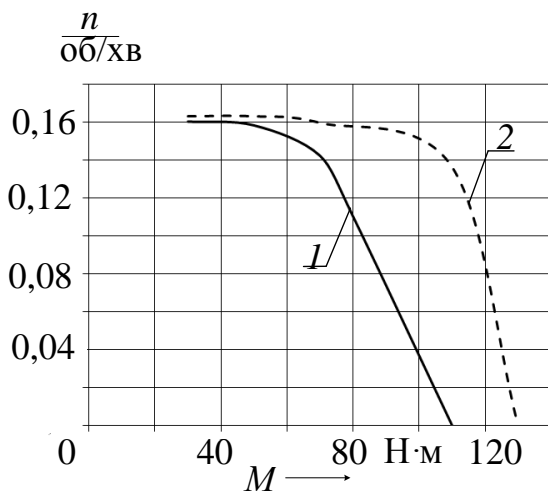


Рисунок 9 – ДРК з шестикотушковим статором (ліворуч) та ДРК з восьмикотушковим статором (праворуч).

%. Наведені експериментальні результати наочно демонструють перевагу восьмикотушкового двигуна над шестикотушковим (рис. 10). Жорсткість механічної характеристики для двигуна з восьмикотушковим статором вище, ніж у шестикотушкового статора. Це приводить до того, що двигун з восьмикотушковим статором може зберігати стабільність частоти обертання і обертового моменту, що необхідно для роботи електропривода.

Реалізований у тому ж габариті шестикотушковий статор двигуна демонструє менш жорстку характеристику, що призводить до більш інтенсивної зміни частоти обертання вала. Ці механічні характеристики дозволяють оцінити вплив дискретності переміщення магнітного поля на обертовий момент ДРК з шести- і восьмикотушковим статором. Аналіз руху ротора при дискретному переміщенні магнітного поля статора та отримані механічні характеристики демонструють можливість створення ДРК з жорсткою механічною характеристикою для багатокотушкових ДРК.



1 – шестикотушковий статор;
2 – восьмикотушковий статор.

Рисунок 10 – Механічна характеристика ДРК з шести- та восьмикотушковим статорами при частоті напруги живлення 1 Гц

Отриманий результат говорить про те, що ДРК при дискретному імпульсному живленні обмотки статора здатний працювати в режимі короткого замикання без збільшення струму обмотки статора. Експериментальні механічні характеристики ДРК з шести- і восьмикотушковим статором (рис. 10) показали різницю між максимальними обертовими моментами у 20 Н·м, що становить 16 %, а розрахункове значення цієї різниці становить 13,5

%. Наведені експериментальні результати наочно демонструють перевагу восьмикотушкового двигуна над шестикотушковим (рис. 10). Жорсткість механічної характеристики для двигуна з восьмикотушковим статором вище, ніж у шестикотушкового статора. Це приводить до того, що двигун з восьмикотушковим статором може зберігати стабільність частоти обертання і обертового моменту, що необхідно для роботи електропривода.

Реалізований у тому ж габариті шестикотушковий статор двигуна демонструє менш жорстку характеристику, що призводить до більш інтенсивної зміни частоти обертання вала. Ці механічні характеристики дозволяють оцінити вплив дискретності переміщення магнітного поля на обертовий момент ДРК з шести- і восьмикотушковим статором. Аналіз руху ротора при дискретному переміщенні магнітного поля статора та отримані механічні характеристики демонструють можливість створення ДРК з жорсткою механічною характеристикою для багатокотушкових ДРК.

Дослідження ДРК проводилось при різній частоті напруги живлення, результатом цих експериментів стало спостереження зниження обертового моменту при збільшенні частоти напруги живлення. Спроектвані ДРК експериментально підтвердили правиль-

ність теоретичних розрахунків. Середньоарифметична похибка між експериментально отриманими даними моментної характеристики і теоретичними склала 6,7 %. Результати,

отримані при визначенні механічної характеристики, підтверджені на випробувальній станції СКБ АТ «Укрелектромаш» (м. Харків).

Результати експериментів свідчать про правильність теоретичних положень та можливість їх використання для розрахунку максимального обертового моменту в ДРК з дискретним живленням.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення питомого обертового моменту ДРК з дискретним імпульсним живленням та поліпшення його масогабаритних показників на 20 % відносно шестикотушкової конструкції ДРК. На основі теоретичних висновків створений зразок ДРК відповідає вимогам, що вказані в ГОСТ 7192-89 для однообертних електричних механізмів.

В результаті виконання роботи сформульовано основні висновки.

1. В ході аналізу існуючих конструкцій ДРК запропонована масивна Ш-подібна конструкція магнітопроводу для ДРК з дискретним імпульсним живленням, яка дозволяє об'єднати активну частину двигуна з поверхнею кочення, має найменший магнітний потік розсіювання, а також має високу технологічність виготовлення.

2. Проведене дослідження магнітного поля ДРК за допомогою чисельних методів дозволило поліпшити масогабаритні показники двигуна на 20%, визначити, що кількість одночасно ввімкнених котушок статора повинно створювати магнітне поле в повітряному проміжку двигуна у діапазоні $\pm\pi/2$ від точки контакту статора та ротора, а також, що чим більша площа активної поверхні статора, тим більшим є обертовий момент ДРК з дискретним імпульсним живленням.

3. Визначено три необхідні умови для збільшення обертового моменту в ДРК з дискретним імпульсним живленням:

- рух ротора повинен мати найменшу можливу дискретність;
- живлення котушок повинне створюватись імпульсами напруги живлення з крутонаростаючим переднім фронтом;
- застосування масивного магнітопроводу ДРК з магнітом'якої сталі, що дозволяє об'єднати активну частину магнітної системи з поверхністю кочення ротора.

4. Експериментальні дослідження ДРК з дискретним імпульсним живленням, підтвердили теоретичні дослідження і показали, що розроблений ДРК має питомий момент, рівний 4,8 Н·м/кг, що в 2 – 3 рази перевищує ана-

логічний показник обертального моменту двигунів з електромагнітною редукцією частоти обертання.

5. Для проведення експериментальних досліджень ДРК розроблена випробувальна установка, що дозволяє знімати усі види характеристик двигуна при наднизьких частотах обертання вихідного валу (0,1 – 2 об/хв). Вперше для цього типу двигуна проведені ресурсні випробування в об'ємі 72000 циклів роботи в режимі номінального навантаження.

6. Отримано позитивні відгуки і рекомендації на дослідну експлуатацію ДРК на енергоблоках Рівненської АЕС (м. Кузнецовськ), готовність до виробництва НПП «Хар-трон-Плант» (м. Харків) та рекомендації щодо комплексного завершення робіт від ТОВ «Укртехнологіясервіс» (м. Харків), розробку схвалено на науково-технічній раді Зміївської ТЕС (с.м.т. Комсомольськ, Харківської обл.). Основні положення і розробки дисертації використовуються в учбовому процесі для курсового і дипломного проектування електричних машин студентами спеціальності 050702 – електричні машини й апарати НТУ «ХПІ», пройшли апробацію на міжнародних конференціях.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Масленников А.М. Устройство для создания дискретно вращающегося магнитного поля / А.М. Масленников // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2009. – №41.– С. 99 – 103. *Здобувач розробив алгоритм роботи пристрою для створення дискретного обертового магнітного поля і отримав експериментальні дані досліджуваного двигуна.*
2. Масленников А.М. Выбор материала магнитопровода для электрических машин с катящимся ротором / А.А. Авраменко, А.А. Тищенко, А.М. Масленников // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2010. – №36. – С. 3 – 8. *Здобувачем поставлено низку експериментів та визначено вплив термічної обробки магнітопроводу на обертальний момент ДРК.*
3. Масленников А.М. Аспекты проектирования и испытания двигателей с катящимся ротором / В.В. Наний, А.Г. Мирошниченко, В.Д. Юхимчук, А.А. Дунев, А.М. Масленников, А.В. Егоров, Д.В. Потоцкий // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2010. – №55. – С. 84 – 88. *Здобувач розробив рекомендації до проектування.*
4. Масленников А.М. Численно-аналитическое исследование магнитной индукции в двигателе с катящимся ротором при разных способах питания / В.В. Наний, В.Д. Юхимчук, А.А. Дунев, А.М. Масленников // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДУ. 2010. – Вип. 4/2010 (63). – С. 76 – 78. *Здобувач створив модель ДРК і розрахував форму розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку з*

допомогою чисельних методів розрахунку магнітного поля.

5. Масленников А.М. Оценка теплового состояния двигателя с катящимся ротором при различной продолжительности включения / В.В. Наний, А.Г. Мирошниченко, В.Д. Юхимчук, А.А. Дунев, А.М. Масленников, А.В. Егоров, Д.В. Потоцкий // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2011. – №4. – С. 49 – 53. *Здобувач провів експериментальне дослідження та обробку результатів.*

6. Масленников А.М. Зависимость максимального вращающего момента ДКР от количества статорных катушек при дискретном импульсном питании / В.В. Наний, А.М. Масленников // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 28. – С. 74 – 78. *Здобувач запропонував методику розрахунку максимального обертального моменту для різної кількості статорних катушок.*

7. Пат. 55265 Україна, МПК F16C3/03. Пристрій для передачі обертального моменту між ексцентрично розташованим ротором та валом / А.М. Масленников; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – № u201006499; заявл. 28.05.2010; опубл.10.12.2010. Бюл. №23. *Здобувач розробив конструкцію механізму передачі обертального моменту за допомогою шестикутника між ексцентрично розташованим ротором та валом.*

8. Пат. 57152 Україна, МПК G01L3/06 Пристрій для вимірювання обертального моменту електродвигуна / В.Д. Юхимчук, В.В. Наний, А.Г. Мирошниченко, А.М. Масленников, О.О. Дунев, А.В. Егоров; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – № u201009539; заявл. 30.07.2010; опубл.10.02.2011. Бюл. №3. *Здобувач запропонував розташовувати фрикційний матеріал на полюсах та диску електромагнітного гальма з метою їх подальшого механічного контакту.*

9. Пат. 57154 Україна, МПК F16C3/03. Пристрій для передачі обертального моменту між ексцентрично розташованим ротором та валом / В.Д. Юхимчук, В.В. Наний, А.М. Масленников; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – № u201009548; заявл. 30.07.2010; опубл.10.02.2011. Бюл. №3. *розробив конструкцію механізму передачі обертального моменту за допомогою багатокутника, що розташовано в середині ротора.*

10. Масленников А.М. Возможные области совершенствования и развития двигателей с катящимся ротором / А.А. Дунев, А.М. Масленников, В.В. Наний // Вісник кафедри «Електротехніка» присвячується п'ятдесятиріччю електротехнічного факультету «ДонНТУ». – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – С. 35 – 36. *Здобувач проаналізував сильні та слабкі сторони ДРК.*

11. Масленников А.М. Исследование двигателя с катящимся ротором / А.А. Дунев, В.В. Наний, А.М. Масленников // III Університетська Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів НТУ «ХПІ», 14 – 16 квітня 2009 р. –

Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – С. 176 – 178. *Здобувач виконав розрахунок електромеханічної та електромагнітної постійної часу.*

12. Масленников А. М. Преобразование энергии в двигателе с катящимся ротором / В.В. Наний, В.П. Шайда, А. Г. Мирошниченко, В. Д. Юхимчук, А.М. Масленников, А.А. Дунев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2009 : тр. XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 травня 2009 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2009. – С. 65 – 67. *Здобувач розглянув питання втрат потужності.*

13. Масленников А.М. Определение магнитной индукции в двигателе с катящимся ротором численно-аналитическим методом / А.Г. Мирошниченко, В.В. Наний, А.М. Масленников, А.А. Дунев // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2010 : тр. XVII Міжнар. наук.-практ. конф., 12 – 14 травня 2010 р. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2010. – С. 181. *Здобувач створив модель ДРК та розрахував форму розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку з допомогою чисельних методів розрахунку магнітного поля.*

14. Масленников А.М. Дискретное магнитное поле в двигателе с катящимся ротором / А.М. Масленников, В.В. Наний // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2011 : тр. XIX Міжнар. наук.-практ. конф., 1 – 3 червня 2011 р. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2011. – С. 170. *Здобувач розглянув рух ротора поблизу точки рівноваги при дискретному магнітному полі статора.*

15. Масленников А.М. Условия создания максимального вращающего момента ДКР при дискретном импульсном питании/ В.В. Наний, А.М. Масленников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2012 : тр. XIX Міжнар. наук.-практ. конф., 15 – 17 травня 2012 р – Харків, НТУ «ХПІ». – 2012. – С. 179. *Здобувачем розглянуто фактори, що впливають на створення максимального крутного моменту.*

АНОТАЦІЇ

Масленников А.М. Способи підвищення питомого обертового моменту двигуна з ротором, що котиться, з дискретним імпульсним живленням. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертація присвячена збільшенню питомого обертового моменту в ДРК. Визначена найбільш вдала конструкція магнітопровода, для ДРК – Ш-подібне масивне осердя. Визначено необхідну кількість одночасно ввімкнених статорних котушок, що дозволяють створювати максимальний оберта-

льний момент. Наведено розрахунки сили однобічного магнітного тяжіння, що демонструють наявність коливання обертового моменту при дискретному імпульсному живленні котушок статорної обмотки. Розрахована власна частота коливань ротора щодо точки рівноваги. Розроблено та впроваджено гідро- та електромагнітно-фрикційні установки для вимірювання обертового моменту двигуна при наднизьких частотах обертання (0,1 – 1 об/хв). Отримані результати на підставі розрахунків відрізняються від експериментальних на 6,7 %.

Ключові слова: електромагнітні процеси, електромеханічне перетворення енергії, двигун з ротором, що котиться, максимальний обертовий момент, магнітне поле, сила одностороннього магнітного тяжіння, дискретне імпульсне живлення.

Масленников А.М. Способы повышения удельного вращающего момента двигателя с катящимся ротором с дискретным импульсным питанием. На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена увеличению удельного вращающего момента в двигателе с катящимся ротором и определению необходимого количества одновременно работающих катушек статора при использовании дискретного импульсного питания обмотки статора. Определена наиболее удачная конструкция магнитопровода, для двигателя с катящимся ротором при дискретном импульсном питании – Ш-образный массивный сердечник. Предложен механизм передачи несоосного вращения, который обладает достаточной технологической простотой в изготовлении и обслуживании. Проанализированы факторы, влияющие на величину вращающего момента двигателя с катящимся ротором. К этим факторам относится: распределение магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя, количество одновременно включенных катушек статора, активная площадь поверхности статора, коммутация катушек и направление движения токов в них, качество движения ротора, частота вращения. Определено необходимое и достаточное количество одновременно включенных статорных катушек, позволяющих развивать максимальный вращающий момент на валу двигателя с катящимся ротором. Представлены расчеты силы одностороннего магнитного притяжения для идеализированного случая, с учетом неравномерного изменения воздушного зазора между статором и ротором, а также с учетом изменения активной площади статора. Построена и проанализирована трехмерная и двумерная картина магнитного поля в двигателе с катящимся ротором. В результате анализа получен гра-

фик распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя, для которого применена аппроксимация гиперболическим косинусом и получено аналитическое описание. Исследовано изменение потенциальной энергии ротора при дискретном перемещении магнитного поля статора, что позволило продемонстрировать разницу между энергией ротора и вновь сообщаемой ему потенциальной энергией от магнитного поля статора для совершения движения в новую точку равновесия. Рассчитана собственная частота колебаний ротора относительно точки равновесия. Предложены способы повышения вращающего момента: термообработка массивного магнитопровода статора и ротора, использование сложной формы импульса, движение ротора должно иметь наименьшую дискретность. Разработаны и применены гидро- и электромагнитно-фрикционные установки для измерения вращающего момента на сверхнизких частотах вращения (0,1 – 1 об/мин). Полученные результаты на основании расчетов отличаются от экспериментальных на 6,7 %.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, электромеханическое преобразование энергии, двигатель с катящимся ротором, максимальный вращающий момент, магнитное поле, сила одностороннего магнитного притяжения, дискретное импульсное питание.

A.M. Maslennikov. Methods of specific torque amplification for the rolling rotor engine with a discrete switched mode power supply.

Manuscript copyright.

Ph.D. thesis in Engineering Science with a specialization 05.09.01 in electrical machinery and devices. National technical university "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2013.

The dissertation is devoted to specific torque amplification for the rolling rotor engine. The E-shaped massive core is determined as the most effective design of a magnetic circuit for the rolling rotor engine. The necessary quantity of simultaneously energized stator coils which allow the maximum torque to develop is determined. Calculations of lateral magnetic attraction force which demonstrate availability of the torque fluctuation at a discrete switched mode power supply of stator coils are presented. The natural oscillation frequency of a rotor with respect to an equilibrium point is calculated. Hydraulic and electromagnetic/frictional settings for engine torque measuring at an ultralow rotational speed (0,1 – 1 rpm) are developed and implemented. The results obtained on the basis of calculations differ from the experimental results by 6,7 %.

Keywords: electromagnetic processes, electromechanical energy conversion, rolling rotor engine, maximum torque, magnetic field, lateral magnetic attraction force, discrete switched mode power supply.



Підп. до друку 25.02.13 р. Формат 60×90 1/16. Папір офісний. Riso-друк. Гарнітура
Таймс. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.
Зам. № 4. Ціна договірна.

Копі-центр «МОДЕЛІСТ»
ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953, від 31.03.94 р.,
61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3, літер Б-1
Копі-центр «МОДЕЛІСТ» 61002, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3, літ. Б-1