

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

ДУНЄВ ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.313.17

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ СТІЙКОЇ РОБОТИ  
ДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ,  
НА ОСНОВІ ОБ'ЄМНОГО ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис

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

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

**Петрушин Віктор Сергійович,**

Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри електричних машин

кандидат технічних наук, доцент

**Прус В'ячеслав В'ячеславович,**

Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського,  
доцент кафедри електричних машин та апаратів

Захист відбудеться «05» березня 2015 р. о 12 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при 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».

Автореферат розісланий «12» січня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Двигуни з ротором, що котиться, які застосовуються у складі електроприводів засувки, вентилів, вимикачів та інших поворотних механізмів на електростанціях, різних трубопроводах і багатьох інших пристроях автоматики, являють собою комбінацію властивостей швидкохідного електродвигуна та механічного редуктора.

За своїми технічними даними двигун з ротором, що котиться, має низькі оберти (від 0,5 до 20 об/хв) і відносно великий обертальний момент (від 1 до 1000 Н·м). Такий двигун здатний в певних технічних межах замінити існуючі поворотні електроприводи. При цьому використання двигуна з ротором, що котиться, в якості приводу засувки і поворотних механізмів дозволить зменшити їх вагові та габаритні показники, експлуатаційні витрати, собівартість і підвищити надійність їх роботи. Але для цих двигунів є певні питання визначення зони стійкої роботи у межах діючого кута навантаження для їх вірного проектування, особливо при низьких частотах обертання.

Тому визначення зони стійкої роботи, як важливого показника надійності цього типу електричних машин є актуальним завданням для створення двигунів з ротором, що котиться, які відповідають сучасним вимогам експлуатації.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Здобувач як виконавець брав участь у держбюджетних НДР МОН України: «Дослідження високомоментного низькооборотного електродвигуна для створення керованого безредукторного електроприводу трубопровідної арматури» (№ ДР 0106U005157); «Розробка експериментального двигуна з ротором, що котиться для безредукторного електроприводу» (№ ДР 0109U002394). Здобувач як виконавець брав участь у роботі по договору про науково-технічне співробітництво з Магдебурзьким університетом ім. Отто фон Геріке (Німеччина, Магдебург): «Розробка високомоментних тихохідних електродвигунів і генераторів середньої потужності (10–30 кВт) з високим питомим моментом для використання в електромобілях, машинобудуванні і малих електростанціях» та госпдоговірної НДР: «Розробка конструкцій двигунів з ротором, що котиться, з обертаючими моментами 1–250 Н·м» (ТОВ «Укртехнологіясервіс», м. Харків).

**Мета і задачі дослідження.** *Мета дослідження* – визначення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, вдосконалення його конструкції на основі чисельного моделювання електромагнітних процесів для визначення експлуатаційних властивостей чисельними методами, а також аналіз роботи такого двигуна від мережі змінного струму з подальшим експериментальним підтвердженням.

Для досягнення зазначеної мети поставлені задачі:

- проаналізувати існуючі конструкції двигуна з ротором, що котиться, та існуючі методи розрахунку магнітного поля;

- удосконалити конструкцію двигуна з ротором, що котиться, на основі чисельного моделювання електромагнітних перехідних процесів;
- визначити зону стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, і встановити вплив тертя на обертальний момент машини;
- визначити умову стабільного кочення ротора при відсутності проковзування;
- проаналізувати роботу двигуна з ротором, що котиться, при живленні від мережі змінного струму;
- провести ресурсні випробування обкатуваних поверхонь у двигуні з ротором, що котиться, експериментальні дослідження моменту при зменшеному коефіцієнті тертя, у тому числі при живленні його обмотки статора від мережі змінного струму.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітні і механічні процеси у двигуні з ротором, що котиться.

*Предмет дослідження* – зона стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, при живленні від джерел постійного та змінного струму.

**Методи дослідження.** Дослідження базувалися на положеннях теорії електромагнітного поля, теорії електричних машин із застосуванням методів чисельного моделювання (метод кінцевих елементів), який використано для розрахунку параметрів магнітного поля з метою виявлення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, на базі двовимірної і тривимірної картини магнітного поля машини. Використовувалися класичні положення векторної алгебри для розрахунку сумарного вектора сили однобічного магнітного тяжіння, для виявлення величини коефіцієнта тертя ротора використовувалися основні положення фізики із теорії механіки фрикційної взаємодії.

Експериментальні дослідження проводилися в науково-дослідній лабораторії кафедри електричних машин НТУ «ХП». Достовірність результатів досліджень підтверджено збігом результатів теоретичних розрахунків і експериментальних даних.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- на підставі дослідження розподілу магнітного поля двигуна з ротором, що котиться, чисельними методами отримано результати реального розподілу сили однобічного магнітного тяжіння, які є вірогідними за низькою експериментальних досліджень;
- на підставі дослідження зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, уточнена залежність обертального моменту від кута навантаження машини;
- отримано подальший розвиток теоретичних та експериментальних досліджень впливу коефіцієнту тертя на обертальний момент машини;
- вперше проаналізовано умову стабільного кочення ротора двигуна з ротором, що котиться, без проковзування;
- розрахована критична маса ротора, що характеризує його здатність втягування в синхронізм при роботі від мережі змінного струму.

**Практична цінність отриманих результатів роботи для електромашинобудівної галузі:**

- встановлено, що спосіб розрахунку напрямку сил однобічного магнітного тяжіння і обертального моменту двигуна з ротором, що котиться, є найбільш точним у порівнянні з попередніми методами розрахунку і зручний для практичного застосування;

- удосконалено конструкцію двигуна з ротором, що котиться, і поліпшені його масогабаритні показники без зміни величини живлячої напруги, а також найбільш точно визначена результуюча сила однобічного магнітного тяжіння;

- розроблено та практично реалізовано гідравлічний вузол гальмівної системи випробувальної установки для зняття механічної та моментної характеристик для дослідження впливу тертя на момент двигуна;

- розроблено, виготовлено та випробувано дослідний зразок двигуна з ротором, що котиться, здатний працювати при різних схемах включення від мережі змінного струму частотою 50 Гц і вживаний у якості подрібнювача.

Отримано позитивні рекомендації з Рівненської АЕС про проведення дослідної експлуатації двигуна з ротором, що котиться, на енергоблоках станції, а також від НВП «Хартрон-Плант» (м. Харків) про можливість організації виробництва двигуна з ротором, що котиться, рекомендації щодо комплексного завершення проектних робіт від ТОВ «Укртехнологіясервіс» (м. Харків), розробка яких схвалена на НТС Зміївської ТЕС, також отримано позитивне рішення на розробку на НТР Харківського представництва ТОВ «Механіка-Інжинірінг» (м. Харків, 2013 р.).

На основі наукових та практичних результатів дисертаційної роботи двигун з ротором, що котиться, впроваджено в схему електропривода регулюючої арматури блоку насосно-силового НП 15.04 виробництва ВАТ Механічний завод «Калязінський» (РФ, м. Калязін, 2014 р.), про що свідчить отриманий акт. Теоретичні та експериментальні результати роботи використано у дослідженнях по договору про науково-технічне співробітництво з Магдебурзьким університетом ім. Отто фон Геріке та впроваджено у навчальний процес кафедри електричних машин НТУ «ХП» у дисциплінах спеціальності «Електричні машини та апарати», дипломному проектуванні та науково-дослідних роботах.

**Особистий внесок здобувача.** Положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: виявлено, що передбачуваний кут навантаження відрізняється від реального кута внаслідок впливу нерівномірності розбіжного повітряного проміжку; проведено моделювання тривимірної картини магнітного поля магнітопроводу двигуна з ротором, що котиться, чисельними методами з метою виявлення найкращих результатів для створення сили однобічного магнітного тяжіння; проаналізовано вплив коефіцієнта тертя зчеплення ротора на реальний кут навантаження і обертальний момент машини; розроблено і виготовлено гідравлічний вузол гідро-фрикційного випробувального стенду для одночасного вимірювання обертального моменту і частоти обертання валу

двигуна з ротором, що котиться, із дискретним магнітним полем; спроектовано, розраховано і виготовлено діючий зразок двигуна з ротором, що котиться, із живленням від мережі змінного струму частотою 50 Гц; дано рекомендації з удосконалення конструкції магнітної системи на підставі математичного й експериментального аналізу двигуна з урахуванням різних способів живлення.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародних симпозиумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA)» (Харків, 2010–2013 р.р.), XVIII–XXI Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2010 р., 2013 р.), семінарах з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України «Електромагнітні та теплові процеси високо використовуваних електричних машин» (Харків, 2010–2013 р.р.), «Проблеми автоматизованого електроприводу» (Крим, Алушта, 2013 р.), в Магдебурзькому університеті ім. Отто фон Геріке (Німеччина 2012–2013 р.р.), конференції UNITECH–2012 в Технічному Університеті Габрово (Болгарія). Дисертація заслухана на НТС Зміївської ТЕС Центренерго (пгт. Комсомольський, Харківська обл. 2012 р.), НТС харківського представництва ТОВ «Механіка Інжиніринг» (м. Харків). Експериментальні зразки демонструвалися на промислових і галузевих виставках: «Енергетика та енергозбереження» (м. Харків, 2010–2012 р.р.), «Барвіста Україна» (м. Київ, 2010–2011 р.р.), «Промисловість, Інвестиції, Технології» (м. Кривий Ріг, 2013 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 17 наукових публікаціях, з них: 11 статей у наукових фахових виданнях України (1 – у міжнародній наукометричній базі даних), 1 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 3 патенти України, 2 – у матеріалах конференцій.

**Структура і склад дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел інформації, двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 201 сторінка, з них: 103 рисунки по тексту; 24 рисунки на 14 окремих сторінках, 12 таблиць по тексту, список використаних джерел інформації з 106 найменувань на 13 сторінках, 2 додатки на 22 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 і розглянуто існуючі конструкції двигуна з ротором, що котиться (ДРК), для визначення їх недоліків і переваг.

При аналізі різноманітних конструкцій ДРК було з'ясовано, що менш за все розглянуто питання для двигунів з дискретним магнітним полем, як з точки зору розрахунку значення обертового моменту, так і з точки зору

визначення зони їх стійкої роботи, яка в основному характеризується таким параметром машини, як кут навантаження.

В ході детального аналізу існуючих конструкцій двигунів з ротором, що котиться, виявлено неефективність замикання магнітного поля по шляху

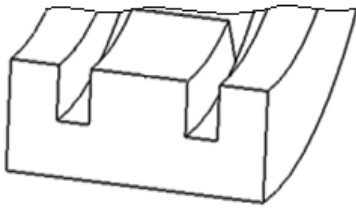


Рисунок 1 – Осердя статора ДРК

«статор-ротор-статор», в результаті чого магнітопровід використовувався не в повній мірі для створення у межах зони стійкої роботи максимально можливого обертального моменту. В результаті запропоновано більш вдаль конструкцію магнітопровода статора (рис.1). Ця конструкція має Ш-подібне осердя, яке є технологічним у виготовленні та має найменші магнітні поля розсіювання. Живлення ДРК з дискретним магнітним полем здійснюється уніполярними імпульсами напруги через керуючий пристрій із частотою від 0,5 до 15 Гц, що дозволяє виготовити статор ДРК масивним, а не шихтованим.

Принцип дії ДРК ґрунтується на обкотуванні ротора по поверхні статора при ексцентричному положенні ротора. Цей процес характеризується нерівномірним повітряним проміжком, що надалі впливає на розподіл магнітного поля у магнітопроводі ДРК. До певного часу методики розрахунку магнітного поля ДРК базувалися лише на аналітичних методах, що супроводжуються великою кількістю припущень, які негативно впливають на точність розрахунку, а вплив нерівномірності розподілу магнітного поля у повітряному проміжку на величину обертального моменту було ураховано недостатньо.

Виявлено, що найбільш перспективними є 2 конструктивних виконання з восьми- та шести-пазовим статором ДРК, які відрізняються між собою конструкцією та габаритними розмірами (рис.2, рис.3).

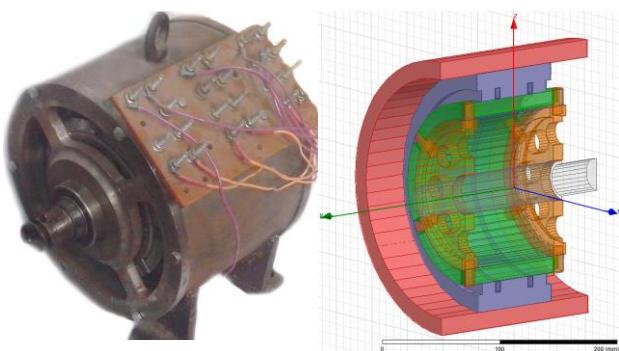


Рисунок 2 – Конструкція 6-пазового ДРК з габаритними розмірами 250x250x170 мм

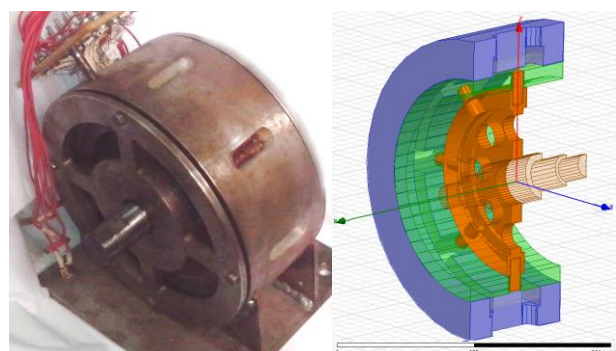


Рисунок 3 – Конструкція 8-пазового ДРК з габаритними розмірами 250x250x100 мм

У **другому розділі** здійснено чисельне моделювання магнітного поля ДРК у тривимірній постановці та проведено процес вдосконалення конструкції магнітопровода статора на основі чисельних методів розрахунку.

В цілому магнітне поле, яке надається за допомогою законів електромагнетизму, об'єднаних в єдину систему Максвеллом, описується системою диференціальних рівнянь у часткових похідних:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} \vec{E} = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

де  $\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля;  $\vec{B}$  – вектор магнітної індукції;  $\vec{J}$  – вектор густини струмів провідності;  $\rho$  – щільність зарядів в області;  $\epsilon_0$  – електрична постійна;  $\mu_0$  – магнітна постійна вакууму.

Для розрахунку параметрів магнітного поля ДПК у програмному комплексі ANSYS Maxwell граничні умови були прийняті за замовчуванням (векторний магнітний потенціал на границях заданої розрахункової області дорівнює нулю). Тобто для нормальних складових магнітної індукції

$$B_{2n} - B_{1n} = 0, \quad (5)$$

де  $B_{1n}, B_{2n}$  – магнітна індукція, як нормаль до поверхні області розрахунку.

Проведено моделювання електромагнітних процесів в ДПК методом кінцевих елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS Maxwell, в якому задавалась величина магніторушійної сили та напрям протікання струму в активних котушках. В ході аналізу розрахованого розподілу магнітного поля 8-пазової конструкції двигуна з ротором, що котиться, запропоновано конструкцію із магнітними концентраторами задля більш ефективного розподілу магнітного поля, поліпшення його масогабаритних показників та для зменшення магнітного насичення неактивної зони магнітопроводу, яке характеризується наявністю гальмівних моментів у ДПК (рис. 4, рис. 5).

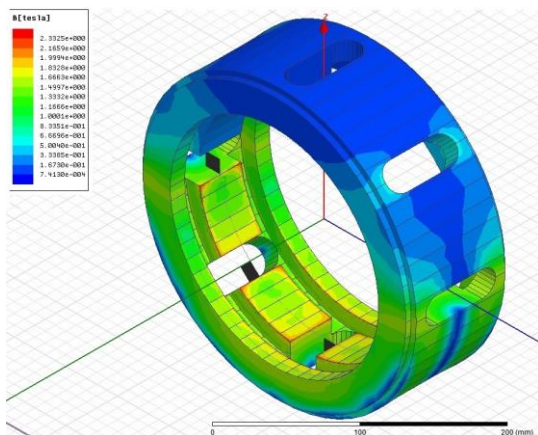


Рисунок 4 – Конструкція ДПК з овальними проточками в області лобових частин машини (концентратори магнітного поля)

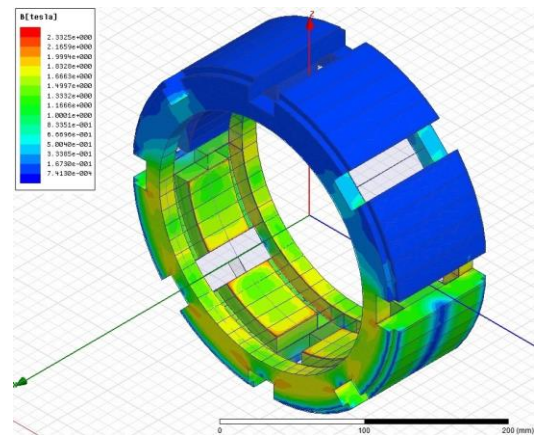


Рисунок 5 – Вінцеподібна конструкція ДПК із поздовжньо-фрезерною обробкою осердя статора у області лобових частин машини (концентратори магнітного поля)



Для подальшого застосування у якості магнітопроводу нової вдосконаленої конструкції ДРК обрана конструкція із поздовжньо-фрезерною обробкою осердя статора у області лобових частин, тому що в ній, за результатами розрахунків, відсутні явновиражені насичення неактивних зубців машини (для ефективного створення максимального моменту у двигуні у кожний проміжок часу заживлено одразу чотири котушки, тобто магнітне поле повинно охоплювати рівно половину довжини внутрішньої поверхні статора). При замиканні магнітного поля на неактивну область магнітопроводу на ротор діють гальмівні моменти, що зменшують результуючий момент двигуна та явно присутні в гладких зразках магнітопроводу (рис. 6).

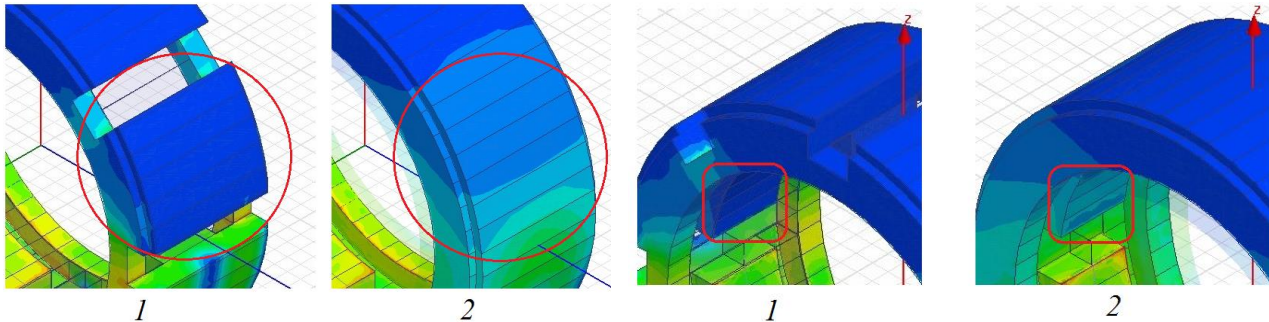


Рисунок 6 – Порівняння насичення неактивної області зубців та спинки магнітопроводу статора двох конструкцій ДРК із гладким (2) і явновираженим (1) полюсом (вінцеподібна конструкція)

У **третьому розділі** запропоновано спосіб чисельного розрахунку реального кута навантаження в ДРК, описані та враховані фактори, які впливають на вихідний момент двигуна та показано характер реального кута навантаження.

На рис. 7 зображено розподіл магнітної індукції при розгортці двох зубців за результатами, отриманими із програми ANSYS Maxwell.

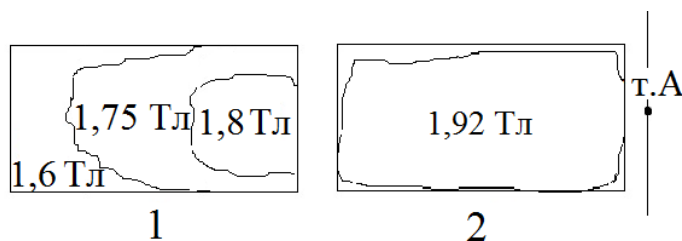


Рисунок 7 – Розподіл магнітної індукції на поверхнях 1 та 2 робочих зубців розглянутого ДРК (аналогічна картина відносно точки контакту т. А на 3 та 4 зубці, тільки в дзеркальному відображенні)

Як видно із рис. 7, внаслідок нерівномірності повітряного проміжку між статором та ротором розподіл магнітної індукції був неоднаковим, тому що її величина оберненопропорційна величині повітряного проміжку

$$B \sim \frac{1}{\delta}. \quad (6)$$

За результатами моделювання було розраховано величину сили однобічного магнітного тяжіння (ОМТ) для окремо взятої області кожної із чоти-

рьюх котушок за формулою

$$P = \frac{B^2 \cdot S_z}{2\mu_0}, \quad (7)$$

де  $B$  – значення магнітної індукції, що проходить через активну поверхню зубця статора, Тл;  $S_z$  – площа поверхні, через яку проходить основний магнітний потік, що припадає на одну зубцову поділку (площа зовнішньої поверхні зубця на діаметрі розточення статора  $S_z = 1500 \text{ мм}^2$ ).

Після усереднення величини магнітної індукції на 1 та 4 зубцях статора визначено силу ОМТ для кожної із чотирьох котушок:  $P_2 = P_3 = 2200 \text{ Н}$ ,  $P_1 = P_4 = 1800 \text{ Н}$ . Але необхідно уточнити напрямок дії цих сил щодо кожного, окремо взятого зубця машини, – для цього скористаємося методом рівності площ або зазорів у розглянутому двовимірному розрізі поперек вісі вала ДРК (рис. 8, рис. 9).

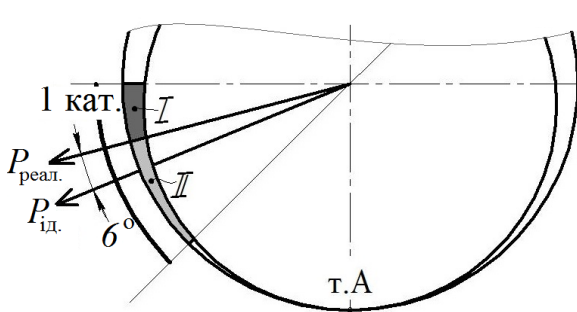


Рисунок 8 – Напрямок сили ОМТ з урахуванням рівності площ  $S_I$  і  $S_{II}$  (площі показані різними кольорами)

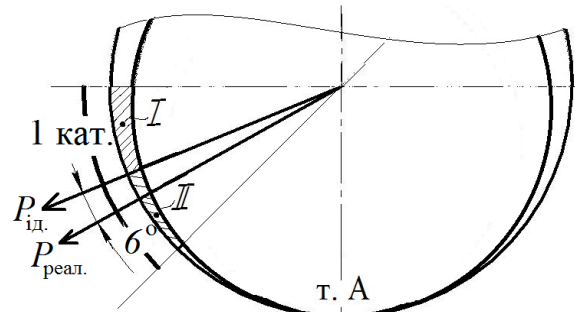


Рисунок 9 – Реальний напрям вектора сили  $P$  відносно області дії першої котушки

Але, враховуючи (6), уточнюється, що сила ОМТ обернено пропорційна величині повітряного проміжку, тому реальний її напрям повинен бути віддзеркалений відносно осі котушки ( $P_{ид.}$ ) у бік із меншим повітряним проміжком (рис. 9). Аналогічно, дослідивши вплив цієї нерівномірності повітряного проміжку на дійсний (реальний) напрям сил ОМТ у зоні дії інших, ввімкнених у певний час котушок, зроблено висновок, що кут між точкою контакту (т. А) та сумарним напрямом дії сили ОМТ (кут навантаження) буде відрізнятися від ймовірного (ідеалізованого) її напрямку у центр зубця машини. Ця різниця для розглянутих зразків ДРК відображена на графіку залежності реального від ідеалізованого кутів навантаження (рис. 10, рис. 11).

На основі проведених розрахунків величин сили ОМТ доведено, що її величина зменшується з ростом кута навантаження ( $\Theta$ ), тобто неробочий хід для ДРК – це небажаний режим роботи, так як при роботі без навантаження ( $\Theta = 1^\circ - 5^\circ$ ) сила притиснення ротора до статора буде максимальною, що при тривалому коченні може вплинути на ущільнення внутрішньої поверхні статора і збільшення величини повітряного проміжку, внаслідок розкошування сталі магнітопроводу.

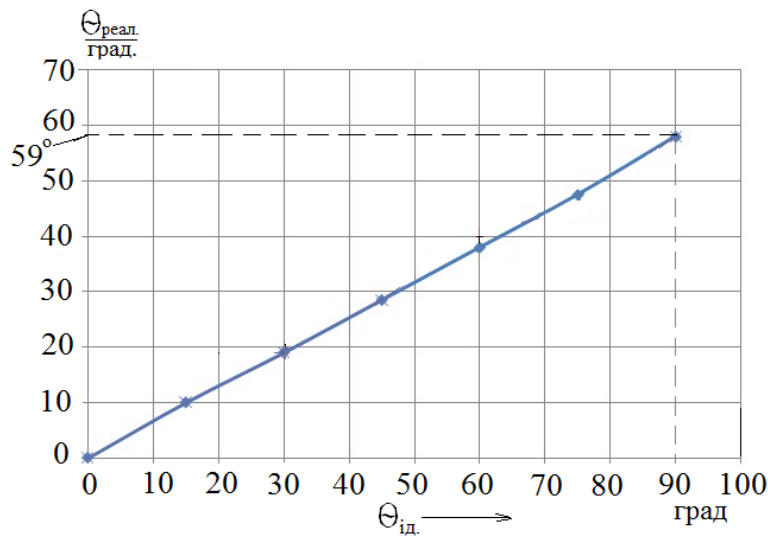


Рисунок 10 – Залежність реального кута навантаження від ідеалізованого для 8-пазового ДРК (ексцентриситет 0,35 мм, струм 2А)

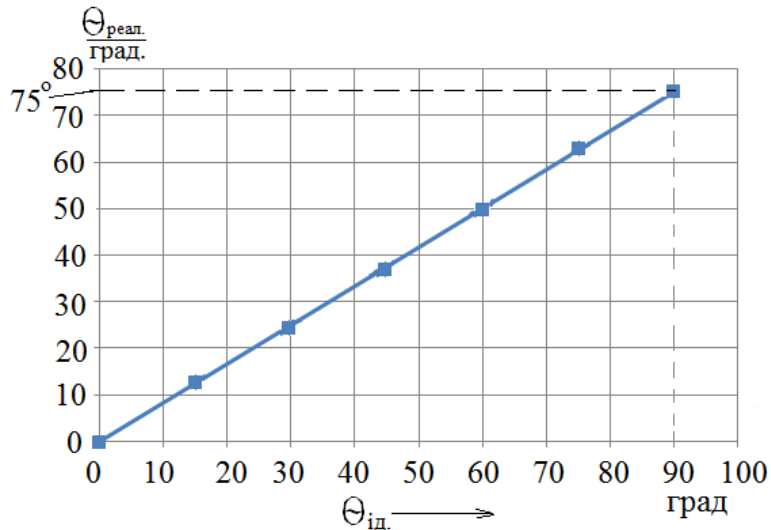


Рисунок 11 – Залежність реального кута навантаження від ідеалізованого для 6-пазового ДРК (ексцентриситет 0,08 мм, струм 2А)

Встановлено, що від сили притиснення і властивостей дотичних поверхонь (коефіцієнт тертя) залежать максимальні значення моменту (рис. 12), що були розраховані для значень вище описаних реальних кутів навантаження (рис. 13)

$$M = P_{рез} \cdot \frac{D_r}{2} \cdot \sin\theta, \quad (8)$$

де  $D_r$  – діаметр ротора розглянутого ДРК;  $\theta$  – реальний кут навантаження двигуна;  $P_{рез}$  – результуюче сумарне значенні сили ОМТ від дії чотирьох активних котушок статора.

Внаслідок урахування дійсного кута навантаження у двигуні та впливу його величини на значення обертового моменту ДРК у роботі даються рекомендації, які констатують той факт, що без урахування зсуву кута навантаження унаслідок нерівномірного повітряного проміжку максимальний обертовий момент ДРК буде розраховано не достатньо точно, а саме 368 Н·м замість вірних 275 Н·м.

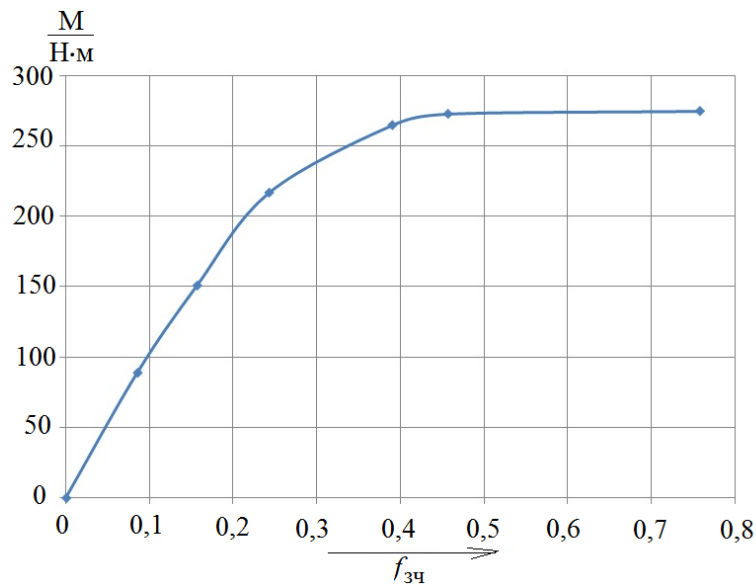


Рисунок 12 – Залежність обертового моменту ДПК від коефіцієнту тертя зчеплення

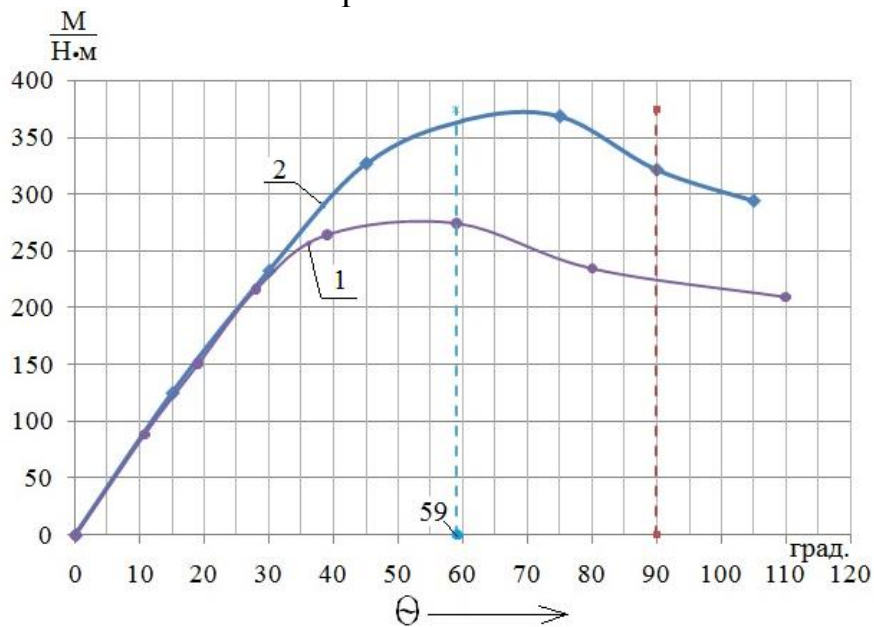


Рисунок 13 – Графіки залежності моменту ДПК від кута навантаження:

1 – залежність  $M_{реал}(\Theta_{реал.})$ ,

2 – залежність  $M_{ид}(\Theta_{ид.})$

Проведено аналіз умов не проковзування ротора по внутрішній поверхні статора, що дозволило зробити висновок про його динамічні властивості та характер якісного кочення із створенням максимально можливого обертового моменту ДПК (рис.14):

$$f_{зч} \geq \frac{(P \cdot \sin \alpha) \cdot (R_1^2 + R_2^2)}{(3 \cdot R_1^2 + R_2^2) \cdot (P \cdot \cos \alpha)}, \quad (9)$$

$$f_{зч} \geq 0,459 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (10)$$

де  $f_{зч}$  – коефіцієнт зчеплення ротора, або коефіцієнт тертя покою (із довідника 0,8);  $\alpha$  – реальний кут навантаження розглянутого 8-пазового ДПК, максимальне значення якого не перевищує  $59^\circ$  (див. рис. 10).

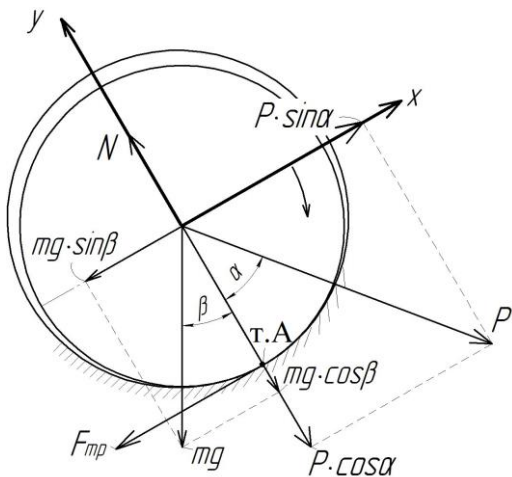


Рисунок 14 – Узагальнена картина розподілу сил діючих на ротор із урахуванням кута навантаження  $\alpha$  та кута дії сили тяжіння  $\beta$

Як свідчать чисельні розрахунки жоден із отриманих результатів коефіцієнту тертя зчеплення  $f_{зч}$  для певних значень реальних кутів навантаження не перевищує допустимий:  $0,8 \geq 0,766$ , тобто умова непроковзування ротора навіть при критичних  $59^\circ$  реальних градусів виконується і ротор створює максимально можливий обертальний момент на рівні 275 Н·м.

Встановлено, що величина розбіжного повітряного проміжку обернено пропорційна величині максимального реального кута навантаження

машини (коротке замикання, режим роботи «на упор») і, відповідно, величини обертального моменту ДРК.

Проаналізовано зниження моменту двигуна та проведено порівняння розрахункових та експериментальних значень моменту досліджуваного 8-пазового ДРК. Основні моменти опору, що присутні у ДРК – це момент опору від тертя у механізмі передачі неспіввісного обертання  $M_\phi$ , момент опору від тертя у точці контакту «ротор-статор»  $M_k$  та момент опору від потоків розсіювання на неактивну область осердя статора  $M_\sigma$  (рис. 15, рис. 16).

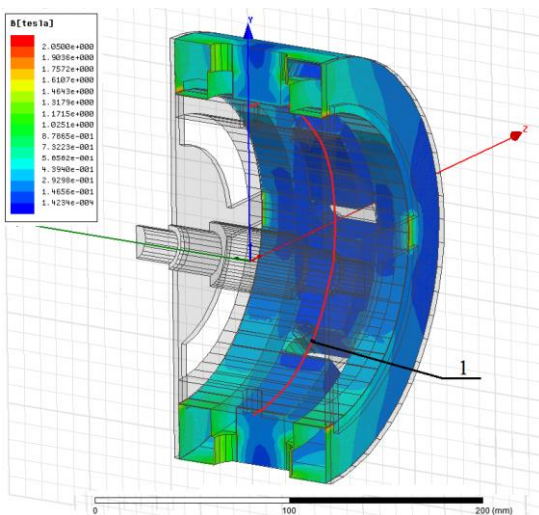


Рисунок 15 – Розподіл магнітної індукції в області неввімкнених котушок 8-пазового ДРК (неактивна зона магнітопроводу)

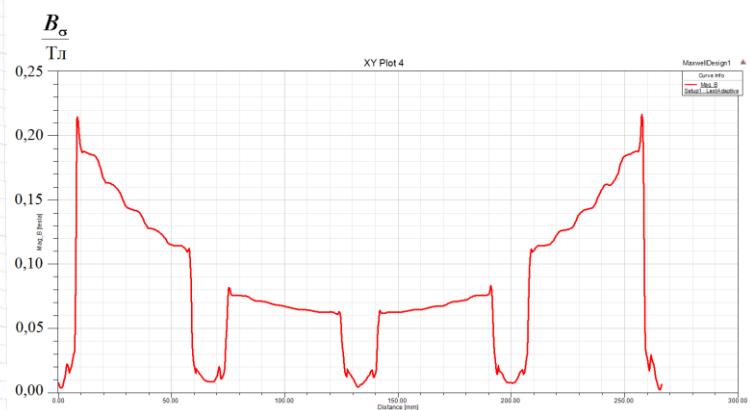


Рисунок 16 – Розподіл магнітної індукції по лінії 1 (рис. 15) у повітряному проміжку від потоків розсіювання неактивної частини магнітопроводу статора

Розраховане значення обертального моменту на основі об'ємного моделювання процесів у ДРК складає 275 Н·м (рис. 13), а експериментальне значення з урахуванням усіх моментів опору

$$M = M_{\text{нв}} + M_{\phi} + M_{\kappa} + M_{\sigma} = 200 + 50 + 15 + 5 = 270 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де  $M_{\text{нв}}$  – навантажувальний момент ДРК на вихідному кінці вала, знятий експериментально (згідно з протоколом випробувань АО «СКБ Укрелектромаш»). Розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами склала 1,81 %.

У **четвертому розділі** теоретично проаналізовано роботу ДРК при живленні обмотки змінним струмом частотою 50 Гц та досліджено причини зменшення обертального моменту у порівнянні із дискретним живленням ДРК через керуючий пристрій. Встановлено, що робота ДРК на підвищених частотах обертання (близько 100 об/хв) характеризується підвищеною вібрацією та шумом, що підтверджено в реальних умовах експлуатації. Розраховано критичну масу ротора, необхідну для втягування в синхронізм при живленні від мережі змінного струму, яка склала 0,38 кг

$$m_r < m_{\text{max}} = \frac{\lambda \cdot P}{2 \cdot e \cdot \omega_Q^2}, \quad (11)$$

де  $P$  – сила ОМТ;  $\lambda$  – коефіцієнт, що характеризує перевантажувальну здатність ДРК;  $e$  – ексцентриситет машини;  $\omega_Q$  – кутова швидкість обертання точки контакту, рад/с,

$$m_r < m_{\text{max}} = \frac{0,25 \cdot 24}{2 \cdot 0,08 \cdot 10^{-3} \cdot 314^2} = 0,38 \text{ кг}.$$

Запропоновано застосування немоментних властивостей досліджуваного швидкохідного ДРК в якості подрібнювача часток (рис. 17) і проведено гармонійний аналіз його магнітного поля. Встановлено, що значний негативний вплив на криву струму чинить сума 7, 11 і 13 гармонік. В результаті спотворена форма струму автоматично передається на обкатувані поверхні, що призводить до появи додаткових вібрацій, підвищеного шуму і зниження основного обертального моменту.



Рисунок 17 – Подрібнювач на базі ДРК, що працює при частоті живлячої мережі 50 Гц (фрагмент руху)

Для зменшення впливу вищих гармонік магнітного поля в повітряному проміжку ДРК доцільно скористатися класичним прийомом – застосування розподіленої обмотки замість зосередженої, тому запропонована схема включення його обмоток із внутрішніми котушками (рис. 18, рис. 19).

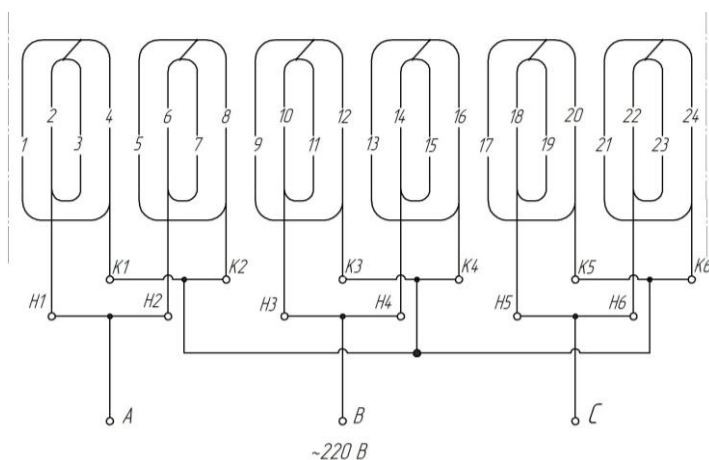
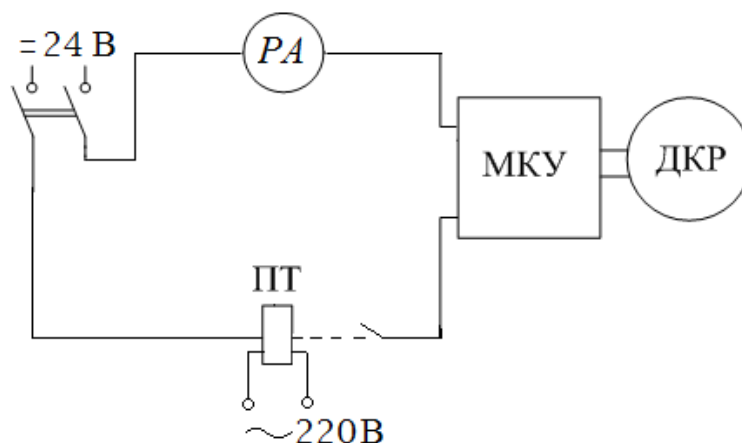


Рисунок 18 – Схема з'єднання розподіленої обмотки статора ДРК із внутрішніми котушками при трифазному живленні



Рисунок 19 – Магнітна система ДРК з розподіленою обмоткою статора із внутрішніми котушками

У п'ятому розділі проведено експериментальні та ресурсні випробування 8-пазового ДРК з масивним ротором при живленні його обмотки постійним струмом через керуючий пристрій та виявлено значні збільшення міцністних властивостей його конструкції (наклепа сталі), що дозволяє зробити висновок про надійність роботи ДРК при тривалих режимах роботи без зміни форми його магнітопроводу (розкотуванні). Схема стенда проведених випробувань представлена на рис. 20.

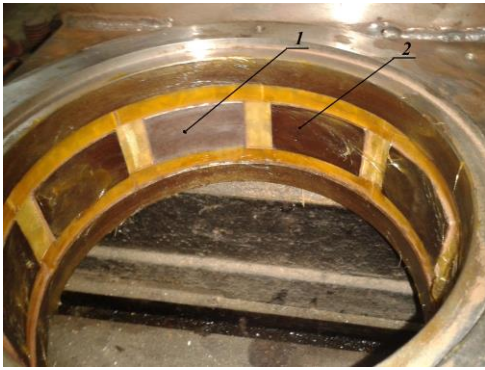


ПТ – програмований таймер; МКУ – мікроконтролерне управління;  
РА – амперметр; ДРК – двигун з ротором, що котиться

Рисунок 20 – Схема стенду ресурсних випробувань

Проведено експериментальні дослідження обертового моменту ДРК при зменшеному коефіцієнті тертя зчеплення, які дозволили підкреслити

важливу корисну роль сил тертя у забезпеченні високого вихідного моменту машини (рис. 21, рис 22).



1 – частина статора без змазки ШРБ-4 (для порівняння);

2 – поверхню статора, що покрита змазкою ШРБ-4

Рисунок 21 – Статор 8-пазового ДКР, внутрішня поверхня якого покрита змазкою ШРБ-4



1 - частина ротора без змазки ШРБ-4 (для порівняння);

2 - поверхня ротора, що покрита змазкою ШРБ-4

Рисунок 22 – Ротор 8-пазового ДКР, зовнішня поверхня якого покрита змазкою ШРБ-4

В результаті експерименту встановлено, що момент при зменшенні коефіцієнту тертя зчеплення ротора значно впав і склав замість 200 Н·м (навантажувальний момент на вихідному кінці вала  $M_{нв}$  при сухому терті) – 80 Н·м (при коефіцієнті тертя зчеплення 0,16, для змазаних сталевих поверхонь), тобто на 60%. А це свідчить про те, що умова непроковзування ротора до максимальної відмітки  $59^\circ$  не виповнилась і склала лише  $19^\circ$  градусів реального кута навантаження:

$$0,16 \geq 0,459 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

$$0,16 \geq 0,459 \cdot \operatorname{tg} 19^\circ,$$

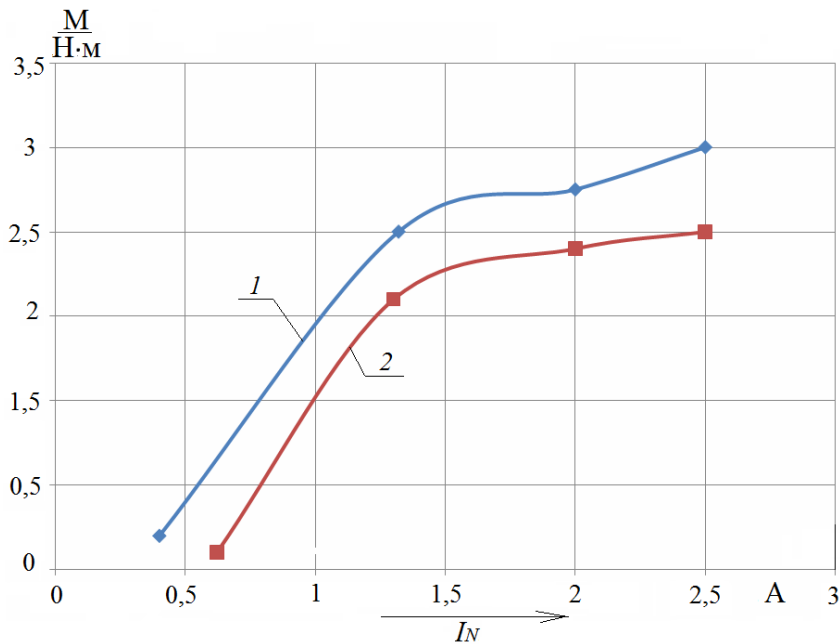
$$0,16 \geq 0,158.$$

Розрахунковий обертальний момент при такому куті навантаження складає 151,5 Н·м, що з урахуванням всіх втрат у якості моментів опору на тертя та втрат на розсіювання, збігається з отриманим експериментально із похибкою 2,6 %

$$M = M_{нв} + M_{\phi} + M_k + M_{\sigma} = 80 + 70 + 3,88 + 1,5 = 155,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

В результаті встановлено, що величина коефіцієнта тертя грає важливу роль у створенні результуючого обертального моменту двигуна і впливає на перевантажувальну здатність роботи двигуна в цілому.





1 – залежність  $I_N(M)$  без кульок усередині ротора;

2 – залежність  $I_N(M)$  із кульками усередині ротора (0,2 кг)

Рисунок 23 – Експериментальні моментні характеристики подрібнювача на базі ДРК

У ході проведення експериментальних досліджень подрібнювача на базі ДРК встановлено, що цей варіант конструктивного виконання двигуна за рахунок особливостей його принципу дії, має якісний шліфувальний ефект, шляхом застосування металевої дробини (кульок) в якості подрібнювачів, а також непоганий початковий момент за рахунок застосування схеми з'єднання його обмотки у «зірку» через діодний міст. Досліджений двигун з ротором, що котиться, дозволяє здійснити процес подрібнення без залипання металевої дробини у середині немагнітного стакану, що безумовно можна віднести до експлуатаційних переваг (рис. 23).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача визначення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, при дискретно-імпульсному живленні, шляхом виявлення реального напрямку розподілу сил, створених обмоткою статора. Проведено процес удосконалення конструкції магнітопроводу для збільшення обертового моменту машини та розглянуто питання роботи двигуна в якості подрібнювача, що працює від мережі змінного струму частотою 50 Гц. Розкрито питання впливу коефіцієнта тертя зчеплення ротора на обертовий момент машини, підтверджений експериментально, та описані умови роботи ДРК без проковзування.

1. В ході аналізу існуючих конструкцій ДРК та методів розрахунку його магнітного поля запропонована масивна Ш-подібна конструкція магнітопроводу для ДРК, як найбільш вдала в плані замикання максимально можливого магнітного потоку та створення ефективного обертового моменту.

2. Виконано дослідження магнітного поля ДРК чисельними методами в об'ємному моделюванні, на підставі яких удосконалено конструкцію магні-

топроводу машини і зроблено висновки в плані зменшення впливу гальмівних моментів на основний момент двигуна.

3. У ході аналізу зони стійкої роботи ДРК, яка характеризується кутом навантаження, визначено, що на обертальний момент машини значно впливає коефіцієнт тертя, а також нерівномірність повітряного проміжку, що вливається в зміщенні сили одностороннього магнітного тяжіння на певний кут навантаження.

4. Визначено умову стабільного кочення ротора ДРК без проковзування, в результаті чого встановлено сприятливі умови для створення стійкого обертального моменту, який обмежено максимально можливим кутом навантаження.

5. Проведені експериментальні дослідження ДРК з живленням від мережі змінного струму через діодний міст підтвердили теоретичні викладки і показали, що розроблений ДРК здатен працювати на досить високій для нього швидкості обертання (до 100 об/хв), але при певній величині критичної маси ротора.

6. Проведено ресурсні випробування обкатуваних поверхонь двигуна та експериментальні дослідження обертального моменту при зниженому коефіцієнту тертя, які підтвердили теоретичні розрахунки та дали якісну оцінку перевантажувальних властивостей масивних магнітопроводів ДРК.

7. Отримано позитивні відгуки та рекомендації на дослідну експлуатацію двигуна з ротором, що котиться, на енергоблоках АЕС України від керівництва Рівненської АЕС, від НПП «Хартрон-Плант», від ТОВ «Укртехнологіясервіс», що схвалені на НТС Зміївської ТЕС. Основні положення дисертації використовуються в навчальному процесі для курсового та дипломного проектування електричних машин студентами спеціальності 05.07.02 - електричні машини і апарати НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дунев А.А. Влияние конструкции вентиляющего ДРК на параметры его магнитного поля / В.В. Наний, А.Г. Мирошниченко, В.Д. Юхимчук, А.А. Дунев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – №25 – С. 76–78. *Здобувачем досліджено вплив трипакетної конструкції на розподіл магнітного поля.*

2. Дунев А.А. Угол нагрузки двигателя с катящимся ротором вертикального исполнения / В.В. Наний, А.А. Дунев, А.Г. Мирошниченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХП». – 2008. – №21 – С.43–46. *Здобувачем досліджено залежність кута навантаження від конструктивних параметрів машини та визначено його максимальне значення при режимі короткого замикання.*

3. Дунев А.А. Экспериментальные исследования двигателя с катящимся ротором / В.В. Наний, А.А. Дунев, А.В. Егоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків:

НТУ «ХП». – 2009. – № 41. – С.103–106. *Здобувачем розраховано індуктивність та електромагнітна стала часу двигуна з ротором, що котиться.*

4. Дунев О.О. Чисельно-аналітичне дослідження магнітної індукції у двигуні з ротором, що котиться при різних засобах живлення / В.В. Наний, А.М. Масленников, О.О. Дунев, В.Д. Юхимчук // Вісник Кременчуцького державного університету. – Кременчук. 2010. – №4, ч.1 (63). – С.76–78. *Здобувач виконав частину чисельних розрахунків об'ємної моделі двигуна.*

5. Дунев А.А. Аспекты проектирования и испытания двигателей с катящимся ротором / В.В. Наний, А.М. Масленников, А.А. Дунев, А.В. Егоров, В.Д. Юхимчук, Д.В. Потоцкий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – № 55 – С.84–88. *Здобувач узагальнив рекомендації по проектуванню двигуна з ротором, що котиться.*

6. Дунев А.А. Оценка теплового состояния двигателя с катящимся ротором при различной продолжительности включения / В.В. Наний, А.А. Дунев, А.В. Егоров, А.Г. Мирошниченко, Д.В. Потоцкий, В.Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2011. - №4 – С.49–53. *Здобувач узагальнив результати дослідження теплового стану двигуна.*

7. Дунев А.А. Место двигателя с катящимся ротором в общей эволюции электромеханических преобразователей / В.В. Наний, А.А. Дунев // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2011. – Том 5. – № 8 (53). – С.11–14. *Здобувач приймав участь у пошуку місця для двигуна з ротором, що котиться, у загальній класифікації електромеханічних перетворювачів енергії.*

8. Дунев А.А. Влияние неравномерности воздушного зазора ДРК на величину угла нагрузки / В.В. Наний, А.А. Дунев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХП». – 2012. – №28. – С.65–69. *Здобувач вивів залежність кута навантаження двигуна від його повітряного проміжку.*

9. Дунев А.А. Генетическая программа структурной эволюции электродвигателей с катящимся ротором / В.В. Наний, В.Ф. Шинкаренко, В.В. Котлярова, А.А. Дунев // Електротехніка та Електроенергетика. – Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет. – 2012. – №2 – С.42–48. *Здобувач приймав участь у дослідженні першоджерел створення двигунів з ротором, що котиться.*

10. Дунев А.А. Двигатель с поперечным магнитным полем – компьютерные и экспериментальные исследования / В.В. Наний, Ф. Палис, М. Штаман, Ю. Киришнер, А.А. Дунев, А.В. Егоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП». – 2013. - №36(1009). – С.287–290. *Здобувачем розрахована математична модель магнітного поля двигуна з ротором, що котиться.*

11. Дунев А.А. Зависимость вращающего момента от реального угла нагрузки двигателя с катящимся ротором / В.В. Наний, А.А. Дунев // Электрика. – Москва – 2013. – №3. – С.13–16. *Здобувач узагальнив розрахунки обе-*

*ртального моменту двигуна та скорегував реальний кут навантаження.*

12. Дунев А.А. Алгоритм работы программного пакета Maxwell 3D, применяемого для численного анализа магнитного поля в двигателе с катящимся ротором / А.А. Дунев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2013. – № 11, С.161–167. *Здобувач описав алгоритм роботи програмного пакету Maxwell 3D на прикладі розрахунку магнітного поля у двигуні з ротором, що котиться.*

13. Пристрій для вимірювання обертового моменту електродвигуна. Патент України №57152 МПК G01L 3/06/ В.Д.Юхимчук, В.В.Наній, А.Г.Мірошніченко, А.М. Масленніков, О.О. Дунев, А.В. Єгоров // Бюл. №3 2011. *Здобувач прийняв участь у розробці пристрою для вимірювання обертового моменту надтихохідного двигуна з ротором, що котиться.*

14. Пристрій для передачі обертового моменту між ексцентрично розташованим ротором та валом. Патент України №76969 МПК F16C3/00 // В.Д. Юхимчук, В.В. Наній, А.Г. Мірошніченко, А.М. Масленніков, О.О. Дунев, А.В. Єгоров // Бюл. №2 2013. *Здобувач прийняв участь у розробці конструкції пристрою.*

15. Валоповеротний пристрій турбіни. Патент України №76970 МПК F01D25/34 / В.Д. Юхимчук, В.В. Наній, А.Г. Мірошніченко, А.М. Масленніков, О.О. Дунев, А.В. Єгоров // Бюл. №2, 2013. *Здобувач прийняв участь у аналізі принципу дії пристрою.*

16. Дунев. А.А. Определение магнитной индукции в двигателе с катящимся ротором численно-аналитическим методом / Мирошніченко А.Г., Наній В.В., Масленніков А.М., Дунев А.А. // Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 12-14 травня 2010 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – С.181. *Здобувач брав участь у розрахунку двовимірної картини магнітного поля двигуна з ротором, що котиться, за допомогою програми FEMM.*

17. Дунев. А.А. Статическое и динамическое моделирование магнитного поля в двигателе с катящимся ротором. / Наній В.В., Дунев А.А., Шилкова Л.В. // Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 29-31 травня 2013 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – С.156. *Здобувач провів розрахунок магнітного поля двигуна з ротором, що котиться, з метою покращення масогабаритних показників машини.*

## АНОТАЦІЇ

**Дунев О.О. Визначення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться, на основі об'ємного чисельного моделювання електромагнітних процесів.** 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, 2015.

Дисертація присвячена вдосконаленню існуючих конструкцій двигунів

з ротором, що котиться, та збільшенню їх моментних показників за рахунок вдосконаленні процесів проектування цих двигунів, шляхом визначення зони їх стійкої роботи, яка характеризується таким параметром, як кут навантаження. Визначені питання впровадження таких двигунів у якості безредукторних при їх можливому живленні від мережі постійного чи змінного струмів, що досягається за рахунок визначення зони стійкої роботи двигуна з ротором, що котиться. Наведено розрахунки сили однобічного магнітного тяжіння із урахуванням нерівномірності повітряного проміжку двигуна на основі розрахунків розподілу магнітного поля у ANSYS Maxwell. Вперше проаналізовано умову стабільного кочення ротора без проковзування. Теоретично і експериментально досліджено вплив коефіцієнта тертя зчеплення ротора на реальний кут навантаження двигуна і його обертальний момент. Розроблено, виготовлено та випробувано дослідний зразок двигуна з ротором, що котиться, здатний працювати при різних схемах включення від мережі змінного струму частотою 50 Гц і вживаний у якості подрібнювача. Отримані розрахункові результати відрізняються від експериментальних на 2,6 %.

*Ключові слова:* двигун з ротором, що котиться; кут навантаження; проковзування; сила однобічного магнітного тяжіння; чисельне дослідження електромагнітних перехідних процесів; експериментальні дослідження обертального моменту; об'ємне чисельне моделювання; надійність конструкції.

**Дунев А.А. Определение зоны устойчивой работы двигателя с катящимся ротором на основании объемного численного моделирования электромагнитных процессов.** 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, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию существующих конструкций двигателей с катящимся ротором и увеличению их моментных показателей за счет совершенствовании процессов проектирования этих двигателей, путем определения зоны их устойчивой работы, которая характеризуется таким параметром, как угол нагрузки. Определены вопросы внедрения таких двигателей в качестве безредукторных при возможном питании от сети постоянного или переменного токов. Проведены расчеты силы одностороннего магнитного притяжения с учетом неравномерности воздушного зазора двигателя на основании картины распределения магнитного поля, полученной в ANSYS Maxwell. Учтено влияние тормозных моментов, созданных магнитным полем рассеяния на неактивную зону магнитопровода, и предложены способы их устранения. Выявлено, что сила одностороннего магнитного притяжения в значительной мере зависит от величины воздушного зазора машины и ее направление имеет некое отличие в сравнении равномерного и неравномерного (расходящегося) зазоров. Впервые проанализированы условие стабильного качения ротора без проскальзывания, в ходе которых подчеркнута влияние сил трения на создания полезного момента на валу

двигателя, вплоть до максимально возможного угла нагрузки машины. Разработан и изготовлен гидравлический узел гидро-фрикционного испытательного стенда для одновременного измерения вращающего момента и частоты вращения вала двигателя (0,2–2 об/мин) при дискретном импульсном питании. Проведен анализ работы двигателя с катящимся ротором от сети переменного тока, в ходе которого сделаны пояснения о уменьшении вращающего момента с ростом частоты питающей сети. Проведены расчеты критической массы ротора, необходимой для втягивания его в синхронизм при работе от сети переменного тока частотой 50 Гц. Теоретически и экспериментально исследовано влияние коэффициента трения сцепления ротора на реальный угол нагрузки двигателя и его вращающий момент. Разработан, изготовлен и испытан опытный образец двигателя с катящимся ротором способный работать при различных схемах включения от сети переменного тока частотой 50 Гц и применяемый в качестве измельчителя. Полученные расчетные данные отличаются от экспериментальных на 2,6%.

*Ключевые слова:* двигатель с катящимся ротором; угол нагрузки; проскальзывание; сила одностороннего магнитного притяжения; численное исследование электромагнитных переходных процессов; экспериментальные исследования вращающего момента; объемное численное моделирование; надежность конструкции.

**A.A. Duniev. Definition of the Stability Work Zone of the Motor with a Rolling Rotor Based on the Numerical Simulation Volume of Electromagnetic Processes. Manuscript.**

Ph.D. thesis in Engineering Science with a specialization 05.09.01 in electrical machine and devices. National technical university "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2015.

The dissertation is devoted to the improvement of the existing motor designs with a rolling rotor and increase their torque performance by improving the processes of designing these motors, by identifying areas of stable work, which is characterized by parameters such as load angle. Identified implementation issues such as gearless motors with possible power supply AC or DC current, which is achieved by determining the area of sustainable work of the motor with a rolling rotor. The calculations of the magnetic attraction force of a taking into account the uneven air gap of motor based on the distribution pattern of the magnetic field, resulting in ANSYS Maxwell. For the first time the conditions of stable rolling of the rotor without slipping is analyzed. Theoretically and experimentally investigated the influence of the friction coefficient of coupling the rotor to the real angle of the motor load and torque. Designed, manufactured and tested a prototype motor with a rolling rotor capable to work at different circuits of AC frequency 50 Hz and used as the chopper. The calculated data differ from the experimental at 2,6 %.

*Keywords:* motor with a rolling rotor; load angle; slipping; one-sided magnetic attraction force; numerical investigation of the electromagnetic transients; experimental research of the torque; three-dimensional numerical simulation; structural reliability.



Підп. до друку 09.01.2015 р.  
Формат 60×84 1/16 . Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.  
Зам. № 4. Ціна договірна.

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
Тел. (057) 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)