

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
„Харківський політехнічний інститут”

НАНІЙ ВІТАЛІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.313.17

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ
КОНСТРУКТИВНИХ ВИКОНАНЬ
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук професор
Заблодський Микола Миколайович,
Донбаський державний технічний університет,
перший проректор з навчальної роботи

доктор технічних наук, професор
Олейніков Олександр Михайлович,
Севастопольський національний технічний університет,
завідувач кафедри судових та промислових
електромеханічних систем

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

Захист відбудеться „16” жовтня 2014 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 „09” вересня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш сучасних напрямків розвитку автоматизованих систем є заміна редукторних електроприводів прямими, безредукторними. Ця проблема почала вирішуватись за рахунок застосування вентильних двигунів і асинхронних двигунів з частотним керуванням. Однак у сегменті надтихохідних (0,1–10 об/хв) електроприводів, як і раніше використовуються виключно електроприводи з багатоступеневими редукторами. Ці електроприводи є обов'язковими елементами трубопровідної арматури на електричних станціях, підприємствах паливно-енергетичного та хімічного комплексів, в комунальній сфері. Крім цього, переважну більшість цих приводів Україна закуповує за кордоном.

Одним із доцільних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування електродвигунів з ротором, що котиться (ДРК), які за своїм принципом дії відповідають технічним вимогам надтихохідних електроприводів. На базі розвитку теорії таких електродвигунів створенно ефективні конструктивні виконання, які мають поліпшені, у порівнянні з редукторними електроприводами, масогабаритні показники, мають меншу собівартість та експлуатаційні витрати, більш високу надійність.

Таким чином, проблема розбудови теорії та покращення техніко-економічних показників ДРК, як ланки автоматизованих систем є актуальною і потребує проведення теоретичних та практичних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась на кафедрі електричних машин НТУ «ХП». Здобувач, у якості наукового керівника, очолював виконання наступних НДР:

– проект МОН України «Дослідження високомоментного низькообертного електродвигуна для створення керованого безредукторного електроприводу трубопровідної арматури» (№ ДР 0106U005157);

– проект МОН України «Розробка експериментального двигуна з ротором що котиться для без-редукторного електроприводу» (№ ДР 0109U002394);

– договір з науково-технічного співробітництва з Магдебурзьким університетом ім. Отто фон Геріке (Німеччина) «Розробка високомоментних тихохідних електродвигунів і генераторів середньої потужності (10...30 кВт) з високим питомим моментом для використання в електромобілях, машинобудуванні та малих електростанціях»;

– «Розробка конструкції двигунів з ротором, що котиться, з обертовими моментами 1–250 Н·м» (ТОВ «Укртехнологіясервіс», м. Харків).

Як відповідальний виконавець проводив дослідження у рамках проекту 04.08/06125 ДКНТУ «Розробка високомоментного низькообертного електродвигуна для безредукторного електропривода» (ДКНТУ № ДР 2/1360 – 97) та госпдоговірної НДР «Техніко-економічне обґрунтування використання двигуна з ротором, що котиться у складі електроприводу мінітранспорту» (Херсонська філія ВНДІАМ, м. Херсон).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії та створення ефективних конструктивних виконань електродвигунів з ротором, що котиться, для моментного електроприводу, визначення областей раціонального їх застосування на основі удосконалення конструкції двигуна шляхом моделювання електромагнітних, теплових і міцнісних процесів.

Для досягнення зазначеної мети поставлено задачі:

1. Визначення області застосування ДРК у сфері використання тихохідного електроприводу;

2. Провести аналіз існуючих конструктивних виконань ДРК та визначення найбільш перспективних і конкурентоспроможних виконань для конкретних умов експлуатації;

3. Проаналізувати стан теоретичного обґрунтування процесів, які протікають в ДРК;

4. Розвинути теорію ДРК по таким напрямкам:

– визначення особливостей характеру та розподілу магнітного поля ДРК, електромагнітної взаємодії, теплових та міцнісних процесів у двигуні з використанням чисельних методів моделювання та сучасних програмних комплексів;

– встановлення повного складу та особливостей режимів роботи ДРК;

– визначення умов та факторів, що дозволяють реалізувати надійну і безаварійну роботу тихохідного двигуна протягом регламентованих термінів експлуатації;

– дослідження впливу тертя на роботу ДРК;

5. Проведення комплексних експериментальних досліджень двигуна з ротором, що котиться, для перевірки отриманих теоретичних положень і створення зразків, придатних для промислової експлуатації.

Об'єкт дослідження – електромагнітні, теплові, міцнісні процеси, режими роботи та області застосування двигунів з ротором, котиться.

Предмет дослідження – синхроннореактивні, надтихохідні двигуни з ротором, що котиться.

Методи дослідження. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи базуються на фундаментальних положеннях теорії електромагнітного поля, теорії теплових процесів, теорії міцності, теорії електричних машин. Чисельне рішення задач магнітного, температурних і міцнісних полів (рівняння Максвелла, закони Фур'є і Гука) здійснювалося за допомогою методу кінцевих елементів в дво- і тривимірній постановці за допомогою сучасних програмних комплексів. При дослідженні питань, пов'язаних з роллю тертя в електромеханічному перетворенні в ДРК, використано закон Амонтонна – Кулона, узагальнена модель тертя і енергетична інтерпретація коефіцієнта тертя Леонардо да Вінчі (Р. Амонтонна). Експериментальні дослідження проводилися на кафедрі електричних машин НТУ «ХП» і підтверджені комплексними випробуваннями на випробувальній станції ВАТ СКБ «Укрелектромаш» (м. Харків).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше створені дво- і тривимірні моделі (з урахуванням конструктивних особливостей об'єкту) розподілу магнітного, температурного та міцнісного полів в двигуні з ротором, що котиться, на підставі аналізу яких встановлено наступне:

- шлях найбільш точного визначення обертового моменту в двигуні;
- структуру магнітних потоків розсіяння, їх наявність у магнітопроводах статора, ротора, торцевих частинах магнітопроводу та спосіб їх урахування;
- діапазон існування реального кута навантаження при стійкій роботі двигуна;
- шлях найбільш точного визначення температури окремих частин двигуна, з урахуванням зони контакту між ротором і статором;
- розміри площадки контакту ротора зі статором, її залежність від навантаження двигуна та вплив на величину механічних втрат потужності;

2. Вперше дано повне рівняння руху ДРК та виконано аналіз складових обертового моменту, що дало змогу оцінити значення корисного моменту навантаження.

3. Вперше досліджено всі складові механічної характеристики, побудована її якісна картина та обґрунтовано, що режим короткого замикання ДРК не є аварійним, а режим неробочого ходу є найбільш небезпечним і сприяє швидкому механічному зношуванню машини.

4. Обґрунтовано об'єднання зони механічної передачі обертового моменту з активною частиною ДРК;

5. В теоретичному плані сформульовано визначення ДРК і опис принципу його дії;

6. Визначено характер, роль та вплив видів тертя на процеси, що мають місце у ДРК.

Практична значення отриманих результатів роботи для енергетики, паливного та хімічних комплексів і комунальної сфери полягає у наступному:

1. Визначено сферу раціонального використання та найбільш ефективні конструктивні виконання ДРК;

2. Запропонована класифікація конструктивних виконань ДРК;

3. Запропоновано розширити класифікацію електричних машин за частотою обертання на позицію «надтихохідні – (0,1–10) об/хв»;

4. Розроблено найбільш ефективні конструктивні виконання ДРК фрикційного типу з точки зору масогабаритних показників, питомого обертового моменту, ресурсу, технологічності, способів живлення (патенти України №№ 11546, 57152, 57154);

5. Обґрунтовано та впроваджено у реальних діючих зразках ДРК масивні магнітопроводи статора і ротора з конструкційних сталей;

6. Створено основу раціонального проектування ДРК з застосуванням чисельного розрахунку обертового моменту, теплового та міцнісного стану для різних режимів навантаження, які дозволяють вдосконалювати конструкцію

та технологію виготовлення двигунів, поліпшувати їх масогабаритні показники (на 10–20 % у порівнянні з розрахунками за аналітичними методиками);

7. Розроблено та застосовано на практиці випробувальні установки для зняття характеристик двигунів з наднизькою частотою обертання;

8. Здійснено ресурсні випробування, розробленого здобувачем ДРК, які підтвердили здатність машини витримувати наджорсткі умови експлуатації за вимогами електроприводів теплових та атомних електростанцій.

Готовність до виробництва розроблених двигунів висловило НВП «Хартрон – Плант» (м. Харків). За наслідками роботи отримано позитивні рішення та рекомендації: НТР Київського центрального конструкторського бюро арматуробудування (м. Київ, 2005 р.); керівництва Рівненський АЕС НАЕК України (м. Кузнецовськ, Рівненська обл., 2011 р.); ТОВ «Укртехнологіясервіс» (м. Харків, 2012 р.); НТР Зміївській ТЕС ВАТ Центренрго України (2012 р.); НТР Харківського представництва ТОВ «Механіка-Інжинірінг» (м. Харків, 2013 р.). Впровадження основних наукових і практичних результатів дисертаційної роботи знайшло відображення в таких актах: використання двигуна з ротором, що котиться в електроприводі горизонтальної машини безперервного лиття (ТОВ «Енергопром», м. Харків, 2011 р.); використання теоретичних результатів в науковій роботі Магдебургського Університету ім. Отто фон Геріке (Німеччина, м. Магдебург, 2012–2013 рр.); впровадження ДРК в схему електропривода регулюючої арматури блоку насосно-силового НП 15.04 виробництва ВАТ Механічний завод «Калязінський» (РФ, м. Калязін, 2014 р.); Теоретичні і експериментальні результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри електричних машин НТУ «ХП» у дисциплінах спеціальності «Електричні машини та апарати», дипломному проектуванні й науково-дослідних роботах.

Особистий внесок здобувача. До дисертаційної роботи включені теоретичні обґрунтування, положення і результати експериментальних досліджень, які виконано здобувачем особисто. Здобувач шляхом математичного та імітаційного моделювання визначив значення сили однобічного магнітного тяжіння (СОМТ), обертального моменту ДРК, кута навантаження для різних режимів роботи ДРК, для яких дав якісне обґрунтування. На підставі отриманих теоретичних результатів, розроблені конструктивні виконання ДРК, які за низкою показників випереджають зарубіжні аналоги. Також, під керівництвом здобувача створена дослідницько-експериментальна лабораторія, на базі якої було розроблено, виготовлено та випробувано більш ніж 15 експериментальних двигунів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародних симпозіумах «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA)» (Харків, 2005–2013 рр.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2005–2013 рр.), «Силова електроніка і енергоефективність»

(Алушта, 1998 р.) «Проблеми автоматизованого електроприводу» (Алушта, 1995–2000 рр., 2002, 2013 рр.), в Магдебурзькому університеті ім. Отто фон Геріке (Німеччина 2012–2013 рр.), на конференції UNITEX–2012 в Технічному Університеті Габрово (Болгарія, 2012 р.); НТР Київського центрального конструкторського бюро арматуробудування (Київ, 2005 р.); НТР Зміївської ТЕС Центренерго (Харківська обл. 2012 р.); НТР харківського представництва ТОВ «Механіка Інжиніринг» (Москва). Експериментальні зразки ДРК демонструвалися на міжнародних і республіканських промислових і галузевих виставках в Китаї, Словенії, Білорусі і постійно в Україні: «Енергетика та енергозбереження» (Харків, 2004–2012 рр., відзначено дипломом у 2005 р.), «Барвіста Україна» (Київ, 2009–2011 р.), «Промисловість, Інвестиції, Технології» (Кривий Ріг, 2013 р.), а також у постійно діючій виставці науково-технічних досягнень НТУ «ХП».

Публікації. Результати роботи відображено у 36 публікаціях, з них: 20 у фахових виданнях України і іноземних фахових виданнях (4 наукометричні бази), 4 авторських свідоцтва СРСР, 3 патенти України, 5 у матеріалах наукових конференцій, 4 в інших наукових виданнях.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації 335 сторінок, серед них 169 рисунків за текстом, 22 таблиці за текстом, список використаних джерел інформації з 181 найменування на 19 сторінках, 3 додатки на 44 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

В першому розділі проаналізовано теоретичні та технічні аспекти розвитку ДРК, намічено шляхи вдосконалення цього типу електричних машин.

Значний вклад в створенні теоретичної бази і практичної реалізації ДРК було внесено А.І. Москвітіним, О.І. Бертиновим, В.В. Варлеєм, К. Розеном, Г. Щербачовим, А. Вівіані, Р. Шеном та рядом інших вчених. Ними запропоновано основні засоби створення модульованого магнітного поля: уніполярне підмагнічування, використання двох обмоток статора з різною кількістю полюсів, пульсуюче магнітне поле. Передача обертового моменту на вал двигуна здійснюється за допомогою зовнішніх, відносно осердя статора, катків та багатоступеневих передач неспіввісного обертання. У теоретичному плані задача магнітного поля вирішується аналітичними методами, які базуються на рівняннях Максвелла. Поширюється застосування чисельних методів у двовимірній постановці для аналізу фізичних процесів в ДРК. Проаналізовано існуючі проблеми теоретичного обґрунтування процесів, що

мають місце в ДРК, та практичної реалізації конструктивних виконань цих двигунів, зроблена постановка задач на дослідження.

На підставі проведеного аналізу визначена сучасна сфера застосування ДРК. Це високомоментні електроприводи з наднизькою частотою обертання 0,1–10 об/хв, електроприводи рідкісного використання (до 100 пусків на рік), які комплектуються редукторними електроприводами, також спеціальні, індивідуальні електроприводи.

Для математичного та імітаційного моделювання, а також для практичної реалізації досліджено конструктивні виконання ДРК з такими даними:

1. ДРК з дискретним магнітним полем і пульсуючим магнітним полем.
2. ДРК з Ш-подібною і трипакетною конструкціями магнітопроводу статора без окремих виносних поверхонь обкатування;
3. ДРК з циліндричним внутрішнім або зовнішнім ротором, який безпосередньо контактує зі статором в його активній частини;
4. ДРК з фрикційною передачею обертального моменту і жорсткою повідковою передачею неспіввісного обертання.

Також визначено, що активна частина ДРК – це той простір машини, де замикається головний магнітний потік і здійснюється механічна передача обертального моменту.

У зв'язку з появою в останні десятиліття електричних машин, здатних працювати при частоті обертання менше 10 об/хв, запропоновано розширити класифікацію електричних машин за частотою обертання на позицію «надтихохідні – (0,1–10) об/хв».

Згідно з генетичною теорією еволюції електромеханічних систем, на даному етапі еволюції, клас ДРК представлений 8 видами, які мають статус реально-інформаційних (існуючих) і 7 видами неявного типу, які реально відсутні на цьому етапі структурної еволюції і представляють результат генетичного передбачення, тобто представляють інноваційний резерв для вирішення перспективних завдань. Також розроблено класифікацію конструктивних виконань ДРК.

Доведено, що в теоретичному і практичному плані доцільно знайти рішення наступних проблем і питань:

- визначення об'ємного розподілу магнітного поля в ДРК для точного визначення СОМП, обертального моменту та кута навантаження при різних режимах експлуатації;
- дослідити та кваліфікувати режими роботи ДРК, їх зв'язок з кутом навантаження і силою тертя між ротором і статором;
- проаналізувати типи і складові втрат потужності і на їх основі визначити тепловий стан ДРК;
- дослідити і проаналізувати міцнісний стан ДРК в процесі роботи та визначити його вплив на режими роботи та загальний ресурс роботи двигуна;

Вирішення цих проблем здійснено методом математичного моделювання фізичних процесів в ДРК на основі наступних співвідношень:

1. Електромагнітні процеси:

– рівняння електричного кола обмотки статора

$$U = i \cdot r + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

де U – миттєва прикладена до обмотки напруга; i – миттєве значення струму в обмотці; r – активний опір обмотки; Ψ – миттєве значення потокозчеплення обмотки;

– перше рівняння Максвелла

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}, \quad (2)$$

де \vec{H} – вектор напруженості магнітного поля; \vec{J} – вектор густини струму провідності;

– рівняння безперервності магнітного поля

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (3)$$

де \vec{B} – вектор магнітної індукції;

– рівняння зв'язку між векторами магнітної індукції і напруженості магнітного поля з урахуванням нелінійності середовища намагнічування

$$B = \mu \cdot H, \quad (4)$$

де $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = f_\mu(B, x, y, z)$ – магнітна проникливість у нелінійному середовищі магнітної системи.

2). Механічні процеси:

– вирази сили однобічного магнітного тяжіння (СОМТ) і обертового моменту:

$$P = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S, \quad (5)$$

$$M = P \cdot \frac{d_r}{2} \cdot \sin\theta = \frac{\pi \cdot B_\delta^2 \cdot d_r^2 \cdot L_a \cdot k_z}{4 \cdot \mu_0 \cdot z_s} \cdot \sin\theta, \quad (6)$$

де d_r – зовнішній діаметр ротора; L_a – активна довжина осердя статора; k_z – відносна довжина зубця статора; z_s – кількість зубців статора; S – площа активної поверхні статора.

– рівняння руху електромеханічного перетворювача

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$

де J – момент інерції ротора, M_c – момент опору на валу.

3). Теплові процеси:

– рівняння теплового балансу

$$\sum P dt = Cd(\Delta\theta) + \alpha \cdot S \cdot \Delta\theta dt, \quad (8)$$

де $\sum P dt$ – сума втрат в об'ємі електричної машини; C – теплоємність машини; $\Delta\theta$ – перевищення температури поверхні машини над температурою охолоджуючого середовища; α – коефіцієнт тепловіддачі; S – поверхня охолодження;

4) Процеси механічної деформації (міцнісні):

– рівняння рівноваги пружної деформації

$$\nabla \sigma = 0, \quad (9)$$

де σ – тензор напружень у досліджуваній конструкції.

Для рішення рівнянь наведеної системи (1) – (9) введено відповідні початкові та граничні умови першого та другого роду.

Чисельні дослідження моделі (1) – (9) виконувались методом кінцевих елементів (МКЕ) за допомогою програмних комплексів FEMM, ANSYS, Solid Works у дво- і тривимірній постановці.

В другому розділі наведено особливості імітаційного моделювання електромагнітних процесів в ДРК при застосуванні МКЕ, яке здійснювалось у чотири етапи.

1. Розглянуто двовимірні польові моделі розподілу магнітного поля в ДРК і визначено значення магнітної індукції, яка входить до (5) і (6). Задача реалізована за допомогою програмного комплексу FEMM. Це дозволило виявити нерівномірність розподілу магнітної індукції в різних частинах магнітопроводу, що неможливо при аналітичних дослідженнях (рис. 1).

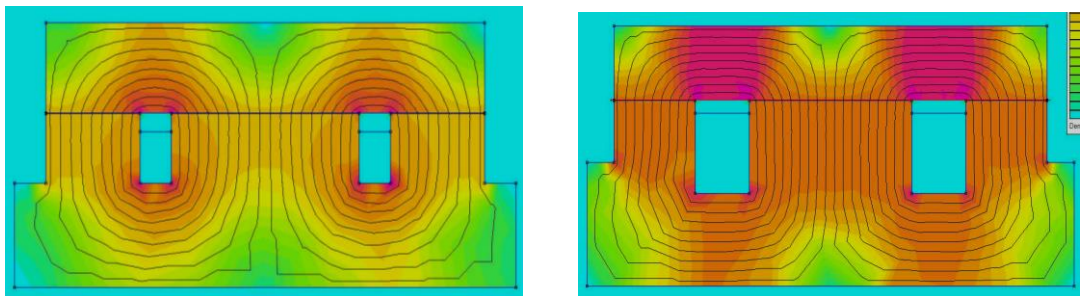


Рисунок 1 – Картини розподілу магнітної індукції при значеннях магнітної індукції 1,5 Тл та 1,8 Тл

Аналогічні картини розподілу магнітного поля отримані для поперечного перерізу магнітопроводу двигуна (рис. 2)

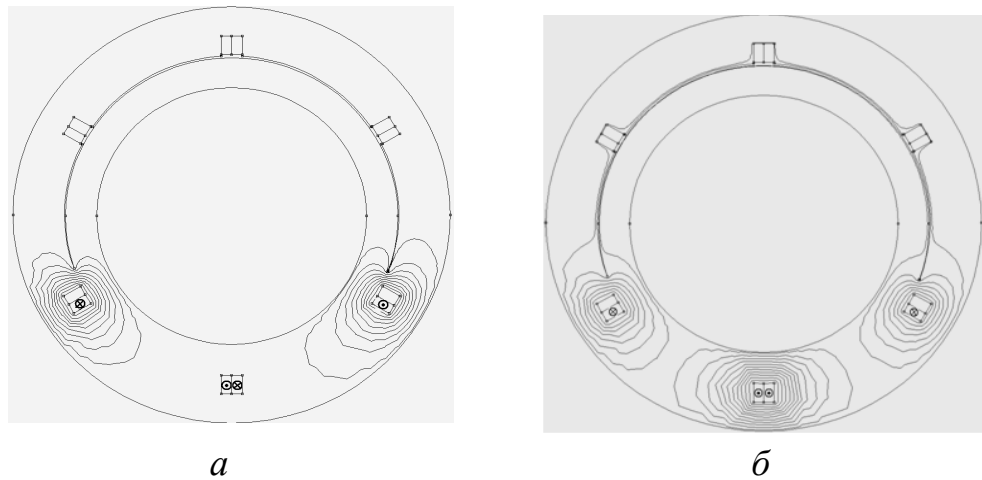


Рисунок 2 – Картини магнітного поля при згодному-*a* та при зустрічному-*б* включенні котушок обмотки статора

При накладенні розрахункової сітки, згідно з МКЕ, модифіковано зону клиновидного повітряного зазору для скорочення часу моделювання. Це зроблено двома шляхами: а) реальний повітряний проміжок, замінюється на простір з прямокутною областю у зоні контакту ротора зі статором і при цьому, між статором і ротором з'являється контактний майданчик по всій довжині магнітопроводу (рис.3);

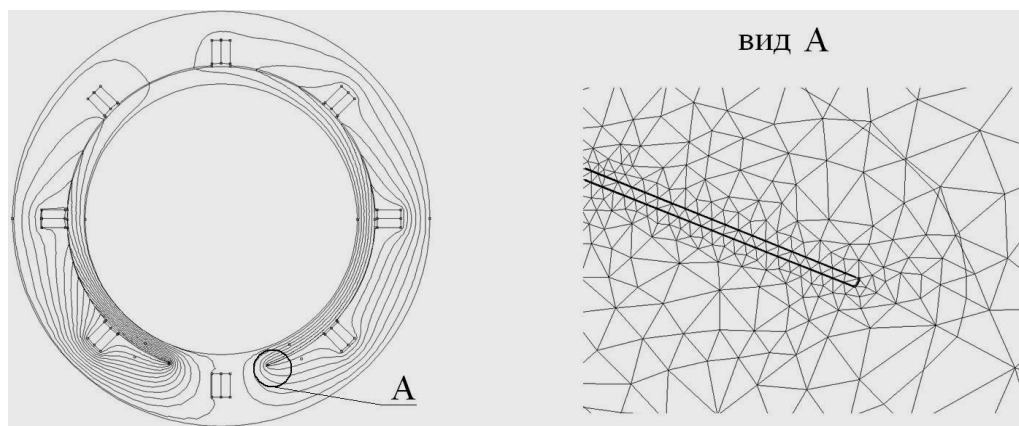


Рисунок 3 – Накладення кінцевоелементної сітки за першим підходом.

б) повітряний проміжок в зоні контакту ротора зі статором не сходиться у крапку, а має кінцеву довжину в межах 1–5 % від значення різниці діаметрів ротора і статора,

2. Чисельно розраховано інтегральне значення електромагнітної сили, діючої на ротор, яка створена обмоткою статора. Так для моделі з внутрішнім

діаметром статора 170 мм і МРС паза 300 А СОМТ складала 9,4 кН. Після чого за (б) визначався обертальний момент двигуна.

Позитивними чинниками двовимірного моделювання є невеликі витрати часу та простота реалізації, що цілком підходить для процесу інженерного проектування при розробці відрізків типорозмірів електричних машин зі спрощеною конфігурацією магнітної системи.

3. Здійснено тривимірне моделювання магнітної системи ДРК на основі програмного комплексу ANSYS - Maxwell 3D.

Чисельно отримано та проаналізовано картини рівня насичення магнітопроводів статора і ротора окремо і спільно, векторні картини магнітного поля в статорі і роторі. Картина спільного насичення магнітопроводів статора і ротора представлена на рис. 4.

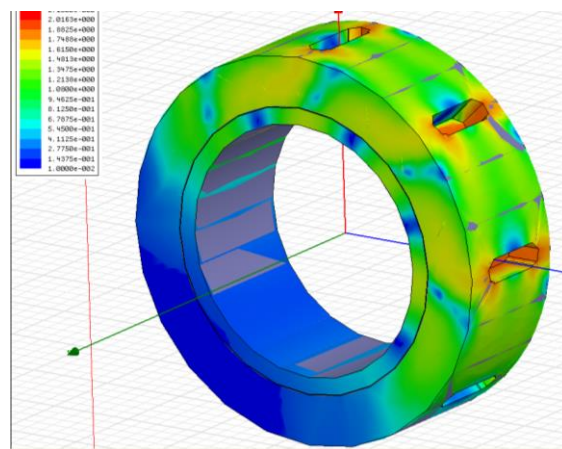


Рисунок 4 – Картина насичення магнітопроводу ДРК

На підставі отриманих картин проаналізовано розподіл магнітного поля при різній кількості котушок обмотки статора, що знаходяться під напругою і при різних значеннях струму в них. Шляхом послідовних наближень проведено комп'ютерні випробування, спрямовані на досягнення мінімальних габаритів та технологічності магнітопроводу статора (рис. 5).

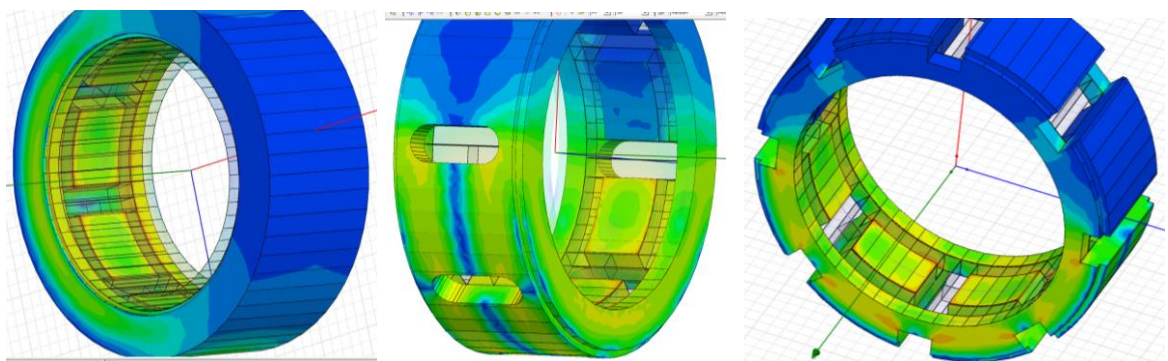


Рисунок 5 – Послідовні моделі комп'ютерних випробувань

Відправним критерієм для цих дій є значення магнітної індукції на поверхні зубців магнітопроводу статора. Це значення вибиралося з умови допустимого значення насичення матеріалу магнітопроводу (1,6–1,9) Тл. При цьому приймалося, що при роботі машини повинні бути заживлені котушки обмотки статора, що займають половину внутрішньої поверхні статора, оскільки в цьому випадку забезпечується максимальне результуюче значення СОМТ і максимальне значення кута навантаження θ .

Для кінцевої моделі комп'ютерних випробувань (рис. 5) чисельно розраховано програмним шляхом і побудовано графік розподілу магнітної індукції на поверхні зубців магнітопроводу статора на половині довжини його внутрішньої поверхні (рис. 6). Крива без провалів показує розподіл магнітної індукції у бічних частинах магнітопроводу статора, де пази відсутні.

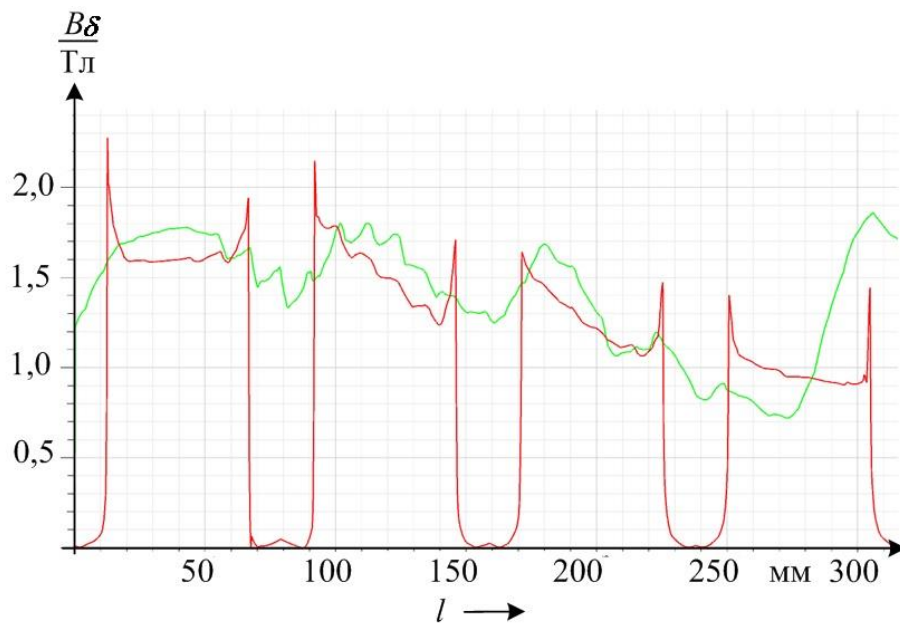


Рисунок 6 – Графік розподілу магнітної індукції

Комп'ютерне моделювання картини розподілу магнітного поля в роторі теж показало нерівномірність розподілу в тілі ротора і виявило доцільність зменшення його розмірів (рис. 7).

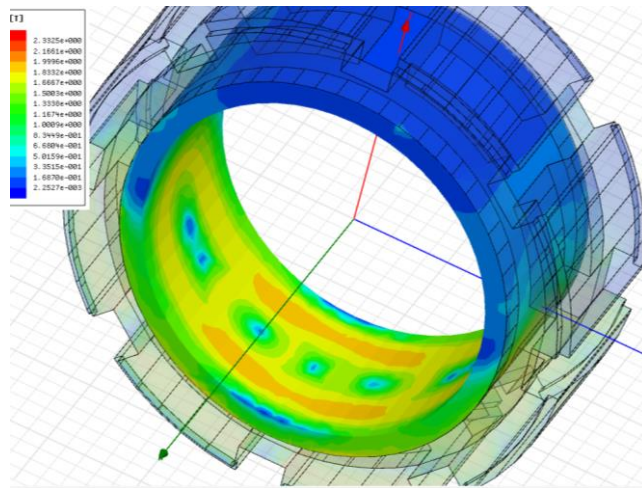


Рисунок 7 – Картина намагнічування магнітопроводу ротора

Характерною для вдосконалення конструкції ДРК виявилася ділянка в центральній частині магнітопроводу ротора, де спостерігається зниження намагніченості. На підставі цього, прийнято рішення про розміщення в ній отворів для пальців повідкового механізму передачі неспівісного обертання. До цього в двигуні застосовувався дводисковий повідковий механізм, що ускладнював та обвантажував конструкцію, а також призводив до додаткових механічних втрат потужності. У результаті вдалося в експериментальній машині знизити масу статора на 2,98 кг (14 %), а масу двигуна на 4,63 кг (12%), зменшити зовнішній діаметр на 5 мм, довжину на 6 мм. За рахунок досягнення концентрації магнітного потоку і зменшення механічних втрат вдалося збільшити обертальний момент на 12,4 % (31 Н·м).

Таким чином, тривимірне моделювання магнітної системи для нестандартних, спеціальних електромеханічних перетворювачів дозволяє поліпшити не тільки масогабаритні, енергетичні показники, але і вийти на нові конструктивні та технологічні рішення, а також безпосередньо отримувати значення СОМТ. На рис. 8 показано експериментальний ДРК, розроблений на основі аналітичних і традиційних інженерних методик і ДРК розроблений з використанням тривимірного моделювання.

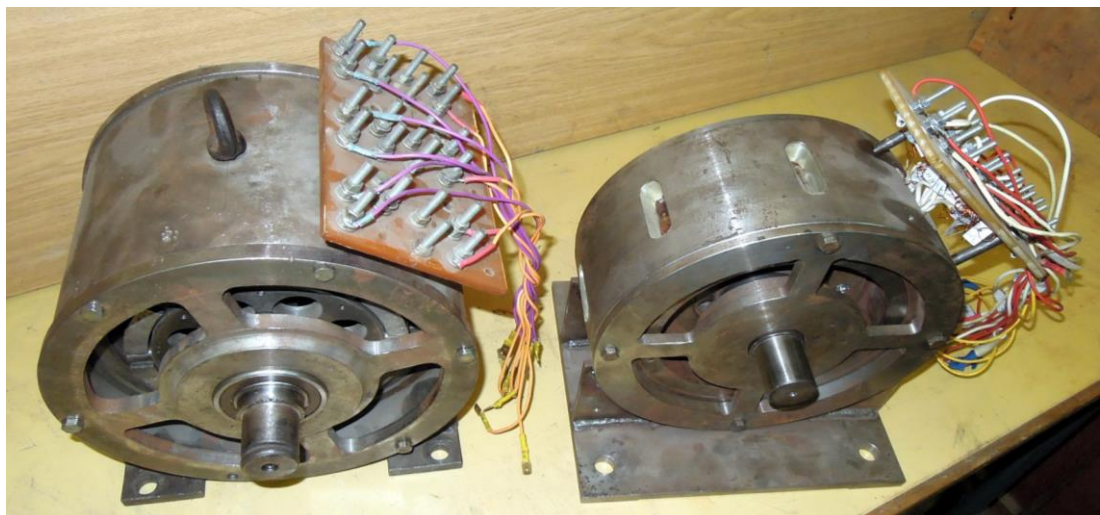


Рисунок 8 – Результати аналітичного і чисельного моделювання

Вдосконалений двигун має на 20 % кращі масогабаритні показники при поліпшеному значення обертового моменту на 12 %.

4. Здійснено урахування магнітного поля розсіяння за допомогою дво- і тривимірних моделювання електромагнітних процесів в ДРК. ДРК має свої особливості розповсюдження магнітного поля розсіювання, які пов'язані з необхідністю створення модульованого магнітного поля і нерівномірністю повітряного зазору. Результати моделювання показали, що при однаковому значенні струму котушок обмотки статора, магнітний потік розсіювання при двох і чотирьох заживлених котушках однаковий, отже, питома величина магнітного потоку розсіювання при чотирьох працюючих секціях буде вдвічі менше, ніж при двох.

Магнітні потоки розсіювання магнітопроводів статора і ротора в режимі навантаження значно менше (майже в два рази), ніж в режимі неробочого ходу. Отже, режим неробочого ходу для ДРК в електромагнітному відношенні є небажаним.

На рис. 9 наведено графік розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку ДРК. Відзначимо, що магнітний потік розсіювання магнітопроводів статора і ротора, крім вже сказаного, створює складові сил, які протидіють результуючій СОМТ. Значення цих протидіючих визначено в програмно-розрахунковому режимі.

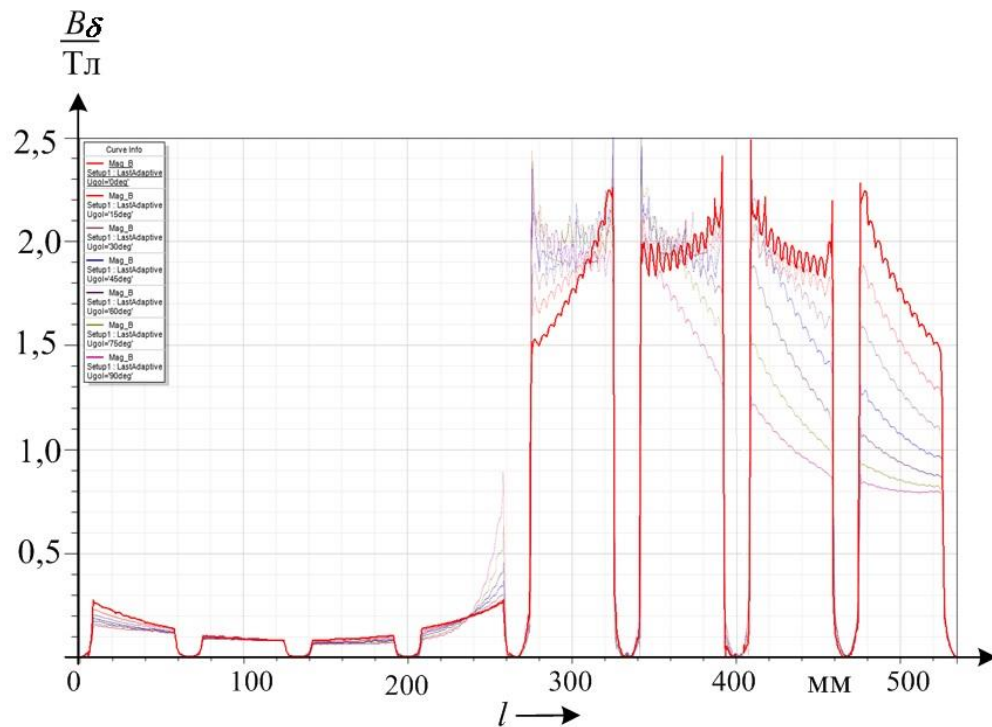


Рисунок 9 – Графік розподілу магнітної індукції по всій довжині повітряного проміжку ДРК

Знизити вплив протидіючих сил, джерелом яких є потік розсіювання, на перший погляд, можна було б шляхом збільшення повітряного проміжку, але це призведе до загального зменшення СОМТ і до погіршення динамічних властивостей машини, збільшення амплітуди вібрацій. Тому вирішення цього завдання лежить у площині удосконалення конструкції магнітопроводу статора. Ця задача вирішена за рахунок застосування останньої моделі, що представлена на рис. 5. Доведено, що магнітний потік розсіювання у магнітопроводах статора і ротора практично відсутній і прорізи на поверхні осердя статора грають роль концентраторів магнітного потоку в робочу зону машини (рис. 10).

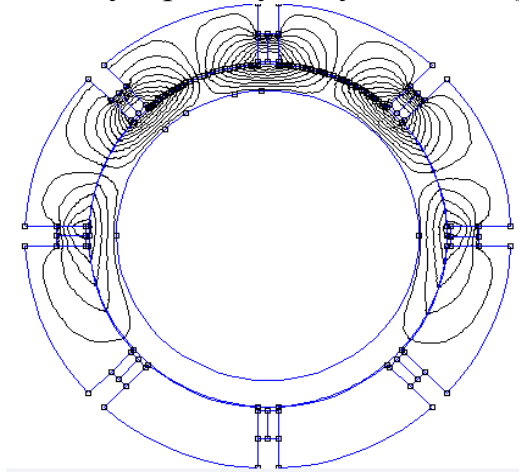


Рисунок 10 – Картина магнітного поля в магнітопроводі з зовнішніми прорізами

Тривимірне моделювання підтверджує наявність магнітних потоків розсіювання у торцевих частинах магнітопроводів, які замикаються по підшипниковим щитам (рис. 11).

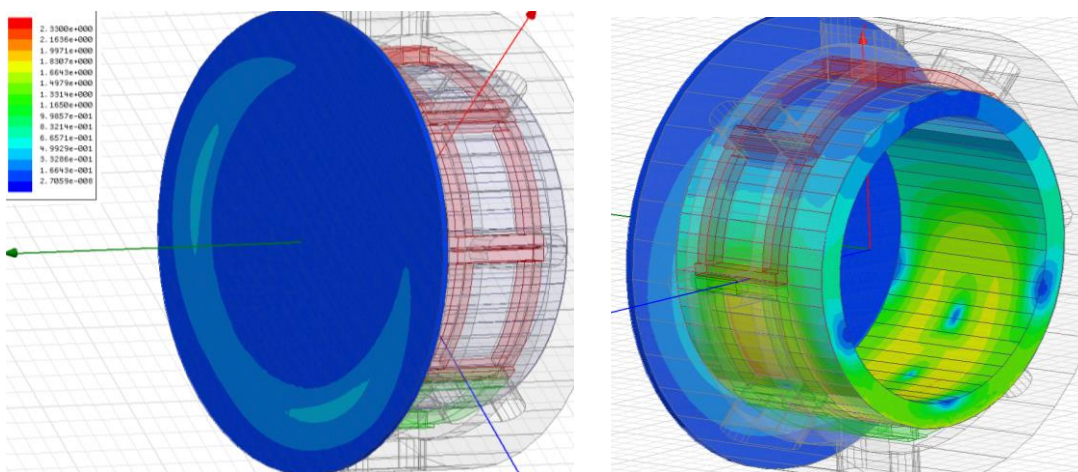


Рисунок 11 – Картина магнітного поля від торцевих магнітних потоків розсіювання

Таким чином, магнітний потік розсіювання ДРК складається з потоків магнітного розсіювання магнітопроводів статора і ротора та торцевих частин магнітопроводу. У загальному випадку значення цих магнітних потоків розсіювання визначається за допомогою наступного співвідношення

$$\Phi_{\sigma} = B_{\sigma r} \cdot S_r + \Phi_{\sigma t}, \quad (10)$$

де Φ_{σ} – сумарний магнітний потік розсіювання, $B_{\sigma r}$ – середнє значення магнітної індукції в ділянках магнітопроводів статора і ротора, що знаходяться в межах котушок обмотки статора, які не живляться і кількість їх не змінюється в процесі роботи, $\Phi_{\sigma t}$ – торцевій потік розсіювання, який дорівнює

$$\Phi_{\sigma t} = \sum_1^k B_{it} \cdot S_{it}, \quad (11)$$

де $\sum_1^k B_{it} \cdot S_{it}$ – сума добутків значень магнітної індукції на значення площ, в межах яких діє дана магнітна індукція.

Розрахункові дані показують, що залежно від насичення магнітопроводів і режиму навантаження машини, магнітний потік розсіювання ДРК розглянутої конструкції, складає 5–12 % від основного магнітного потоку двигуна. Неврахування магнітних потоків розсіювання в ДРК – це одна з причин похибки розрахунків двигуна, яка призводить до неможливості створення високовикористовуваної машини.

В третьому розділі проаналізовано особливості механічного процесу в ДРК.

Для синхронних машин при аналізі рухового режиму роботи використовується кутова характеристика $M(\theta)$. Кут навантаження ДРК θ – це кут між лінією контакту ротора зі статором і напрямом вектора СОМТ. Реальний робочий діапазон зміни кута навантаження до теперішнього часу досліджено не було і тому, при проектуванні перевантажувальна здатність машини оцінювалася емпіричними міркуваннями. У роботі застосовано інший підхід, оснований на наступних положеннях.

Для цього, поперше складається баланс моментів, що діють у ДРК

$$M = M_c + M_d, \quad (12)$$

де M – обертальний момент двигуна(6), M_c – момент опору на валу двигуна, M_d – динамічний момент ротора, який визначається як

$$M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = m_r \cdot \frac{R_r^2 + R_{ri}^2}{2} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (13)$$

де m_r – маса ротора, R_r і R_{ri} – зовнішній і внутрішній радіуси ротора.

Момент опору M_c ДРК носить набагато більш складний характер, ніж момент опору у звичайних обертових машинах

$$M_c = M_{нг} + M_{\phi} + M_k + M_{\sigma}, \quad (14)$$

де $M_{нг}$ – момент навантаження; M_{ϕ} – фрикційний момент, що виникає через силу тертя в зоні контакту ротора зі статором який дорівнює $M_{\phi} = P \cdot f \cdot R_r \cdot \cos \theta$, f – коефіцієнт тертя, (зчеплення); M_k – момент опору конструкції, що залежить від конструкції механізму передачі неспіввісного обертання; M_{σ} – момент опору від магнітного поля потоків розсіяння.

Фрикційний момент M_{ϕ} має складний характер, тому що в процесі роботи двигуна створюється позмінно силами тертя спокою, кочення і ковзання. Із зростанням моменту навантаження $M_{нг}$, фрикційний момент M_{ϕ} зменшується пропорційно збільшенню кута навантаження θ . Цей момент M_{ϕ} спільно з моментом M_k будуть визначати значення кута навантаження θ при неробочому ході.

В існуючих електричних машинах синхронно-реактивного типу (синхроннореактивні двигуни, хвильові двигуни, крокові двигуни) результуючий вектор головного магнітного поля в режимі ідеального неробочого ходу спрямований строго посередині полюса або зубця, на яких розташована обмотка, яка створила це магнітне поле.

Під дією навантаження на валу двигуна, відбувається перерозподіл насичення полюса або зубця в бік з меншим повітряним проміжком, і вектор магнітного поля зміщується в бік більшого насичення. Аналогічно відбувається і в ДРК.

З урахуванням змінення розміру площі повітряного проміжку встановлюється величина та напрямок вектору сили однобічного магнітного тяжіння для кожного зубця окремо (рис. 12). Порівнюючи розмірі площ I та II секторів на (рис. 12) вираховується реальний кут навантаження і напрямок вектора сили однобічного магнітного тяжіння $P_{\text{реал}}$.

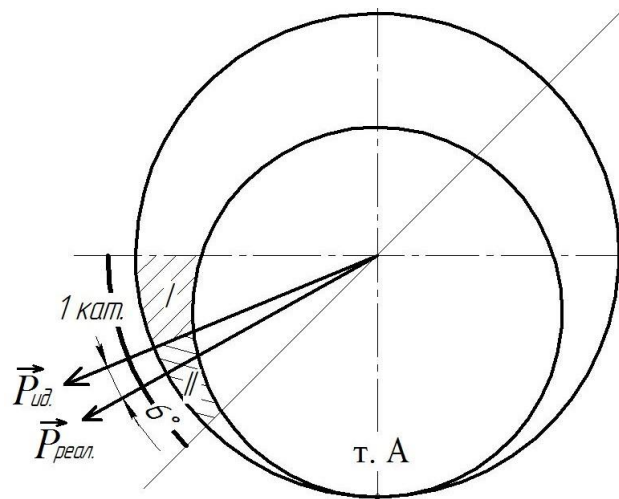


Рисунок 12 – Положення реального вектора СМП котушки обмотки статора.

Наступним кроком визначається величина і напрямок результуючої СМТ діючої частини обмотки статора (рис. 13), що показує реальний кут навантаження θ .

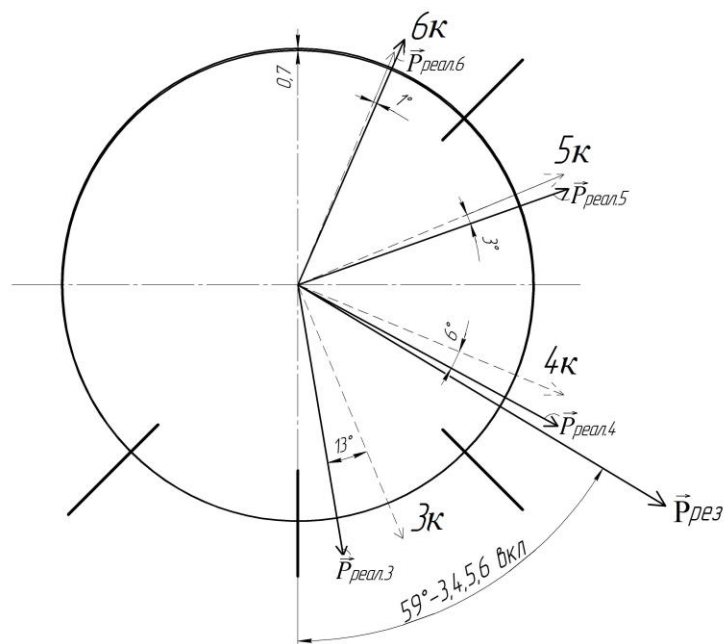


Рисунок 13 – До питання визначення максимального значення кута навантаження θ

Для експериментального ДРК максимальний кут навантаження θ склав 59° і кут навантаження θ залежить від різниці діаметрів ротора і статора.

Розраховано залежності моменту, кута навантаження θ та значення результуючої СМТ від місцеположення лінії контакту ротор-статор відносно зони котушок статора, які знаходяться під напругою (рис. 14).

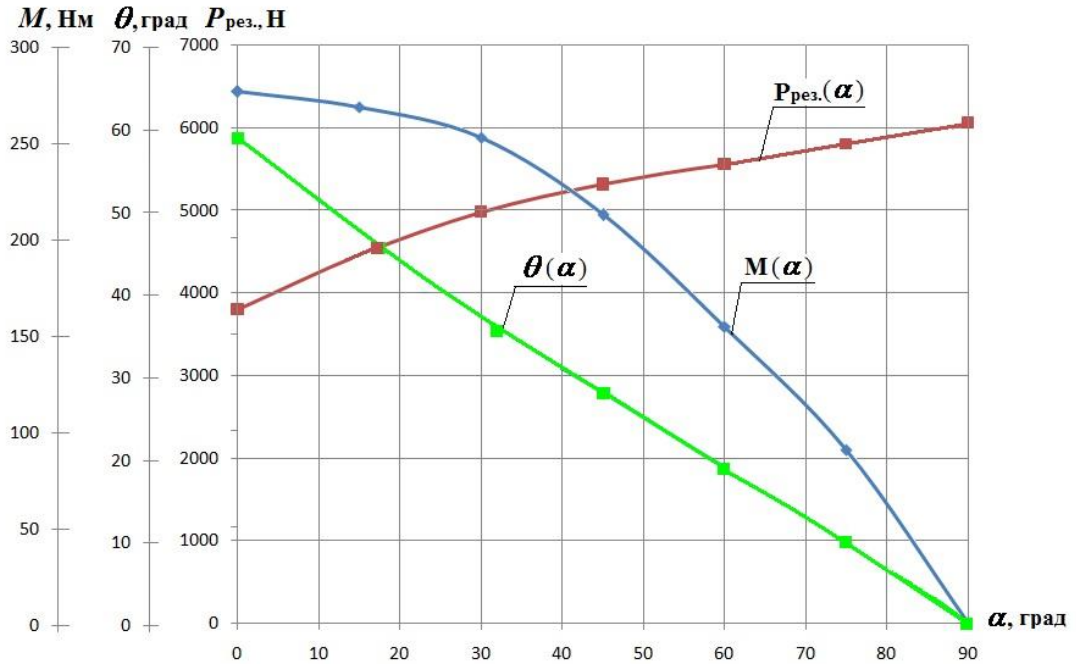


Рисунок 14 – Залежність моменту, кута навантаження θ і результуючої СОМП від розташування лінії контакту щодо активної зони магнітопроводу статора

Згідно отриманим розрахунковим даним максимальний обертальний момент склав 276 Н·м, а корисний момент навантаження $M_{нг}$, згідно випробуванням складає 200 Н·м. Різницю цих моментів складають внутрішні моменти ДРК, які визначаються за формулою (14).

Момент опору конструкції від тертя в механізмі передачі неспіввісного обертання

$$M_k = f \cdot k_t \cdot P \cdot R_r \cdot \sin \theta, \quad (16)$$

де k_t – коефіцієнт тертя ковзання.

Вираз для моменту опору потоків розсіювання описується формулою

$$M_\sigma = \frac{k_z \cdot B_\sigma^2 \cdot D_r^2 \cdot L_a}{32} \cdot \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot 10^7, \quad (17)$$

де B_σ – магнітна індукція, викликана магнітним потоком розсіювання магнітопроводів статора і ротора, k_z – коефіцієнт довжини активної частини зубців розрахункової зони,

В існуючих даних по ДРК режими роботи розглянуто недостатньо, тому в роботі проведено їх аналіз та визначено особливості. До режимів роботи ДРК відносяться пусковий режим, режим неробочого ходу, режим навантаження (руховий режим), режим короткого замикання, режим супутнього навантаження (генераторний режим) режим електромагнітного гальма, режим

утримання навантаження. В роботі проведено повний аналіз цих режимів роботи ДРК.

1. Пусковий режим. Характеризується електромеханічною постійною часу яка має наступний вигляд

$$T_M = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_P}{M_\Pi} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot m_r \cdot e^2}{M_\Pi}, \quad (18)$$

де ω_P – частота обертання СОМТ, e – ексцентриситет, M_Π – пусковий момент ДРК.

Електромеханічна постійна часу T_M у середньому на один порядок менша за електромагнітну постійну часу T_E за рахунок того, що момент інерції ротора ДРК залежить від ексцентриситету ротора e , а не від його радіусу, як у звичайних електричних машинах.

В результаті аналізу пускового режиму роботи ДРК отримано умови плавного пуску двигуна, виходячи з якого виведено критерій допустимого значення маси ротора

$$m_r \leq \frac{\cos\theta - \frac{M_c}{M_m} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}{2 \cdot e \cdot \omega_p^2} \cdot P, \quad (19)$$

де M_m – теоретично максимальний момент: $M_m = P \cdot R_r$

З формули (14) отримано вираз для кута навантаження при пуску, який залежить від коефіцієнта тертя спокою,

$$\theta = \arctg f_\Pi. \quad (20)$$

В режимі пуску ДРК не потребує пристроїв запуску і може здійснюватися під навантаженням, пускові струми практично відсутні.

2. Режим неробочого ходу. Характеризується максимальним значенням нормальної складової СОМП, яка майже втричі більша ніж у режимі номінального навантаження. Тому цьому режиму властиве максимальне механічне зношування поверхонь обкатування.

Кут навантаження при неробочому ході має вигляд

$$\theta = \arctg \frac{f_{сц}}{1 - f_{сц} \cdot k_t}, \quad (21)$$

де $f_{сц}$ та k_t – коефіцієнти зчеплення та тертя ковзання відповідно.

Коефіцієнт зчеплення $f_{\text{цц}}$ діє в зоні контакту ротор-статор, а коефіцієнт тертя ковзання k_t – в механізмі передачі неспівісного обертання.

3. Режим навантаження. Рівняння балансу моментів без урахування складової моменту від магнітного потоку розсіяння, має наступний вигляд

$$M = M_{\text{нг}} + f_{\text{цц}} \cdot P \cdot R_r \cdot \cos\theta + f_{\text{цц}} \cdot k_t \cdot P \cdot R_r \cdot \sin\theta. \quad (22)$$

Значення кута навантаження в режимі навантаження має вигляд

$$(\theta - \varphi) = \arcsin\left(\frac{M_{\text{нг}}}{M_m \cdot \sqrt{1 + f_{\text{цц}}^2}} + \frac{f_{\text{цц}} \cdot k_t}{\sqrt{1 + f_{\text{цц}}^2}}\right), \quad (23)$$

де φ – значення кута, яке залежить від коефіцієнту тертя.

4. Режим короткого замикання. Момент опору на валу двигуна починає перевищувати момент ДРК, який досягає свого максимального значення, ротор практично повністю зупиняється (випадає з синхронізму) і далі відбувається «підтиснення» привода, тобто збільшення корисного моменту навантаження. Це пояснюється тим, що при зупинці ротора вектор СОМП продовжує обертатися, а ротор не обертаючись, починає коливатися в середині статора з частотою обертання СОМП, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя між ротором і статором, а отже до послідовного зменшення фрикційного моменту. Разом з цим зникає складова моменту опору конструкції і вираз для балансу моментів набуває вигляду

$$M = M_{\text{нг}} + f_c \cdot P \cdot R_r \cdot \cos\theta, \quad (24)$$

де f_c – коефіцієнт тертя ковзання.

Кут навантаження має вигляд

$$\theta = \arcsin\left(\frac{M_{\text{нг}}}{M_m \cdot \sqrt{1 + f_c^2}}\right) + \varphi. \quad (25)$$

У режимі короткого замикання ДРК максимально використовує свій потенціал моментного двигуна. Питома вага моментів сил тертя зменшується порівняно з режимом навантаження в 1,5–2 рази. Цей режим є досить сприятливим і ефективним, оскільки при ньому досягається максимальне корисне значення моменту навантаження і мінімальний тиск ротора на статор.

5. Режим електромагнітного гальма. Виникає тоді, коли під дією зовнішнього моменту ротор починає обертатися в протилежному напрямі відносно напрямку обертання магнітного поля статора, тобто двигун виступає в

ролі електромагнітного гальма. У цьому випадку момент навантаження $M_{нг}$ змушує ротор обертатися у зворотний бік, а моменти фрикційний M_f і опору конструкції M_k змінюють свій напрямок. Але до настання стійкого протворуху, ротор деякий час здійснює коливальні рухи в середині статора.

Баланс моментів для сталого руху в гальмівному режимі має наступний вигляд

$$M + f_c \cdot P \cdot R_r \cdot \cos\theta + f_c \cdot k_t \cdot P \cdot R_r \cdot \sin\theta = M_{нг}. \quad (26)$$

Кута навантаження має вигляд

$$\theta = \arcsin\left(\frac{M_{нг}}{M_m \cdot \sqrt{(1 + f_c \cdot k_t)^2 + f_c^2}}\right) + \varphi. \quad (27)$$

6. Режим супутнього навантаження. Виникає тоді, коли зовнішній момент діє в напрямку обертання ротора і вектора результуючої СОМП. Для приводів запірно-регулюючої арматури він входить до складу одного з основних режимів роботи, і тому режим супутнього навантаження регламентований ГОСТ 7192.

Рівняння балансу моментів для режиму супутнього навантаження (генераторний режим)

$$M_{нг} = M + f_{сц} \cdot P \cdot R_r \cdot \cos\theta + f_{сц} \cdot k_t \cdot P \cdot R_r \cdot \sin\theta. \quad (28)$$

Вираз для кута навантаження має вигляд аналогічний (27), як для гальмівного режиму.

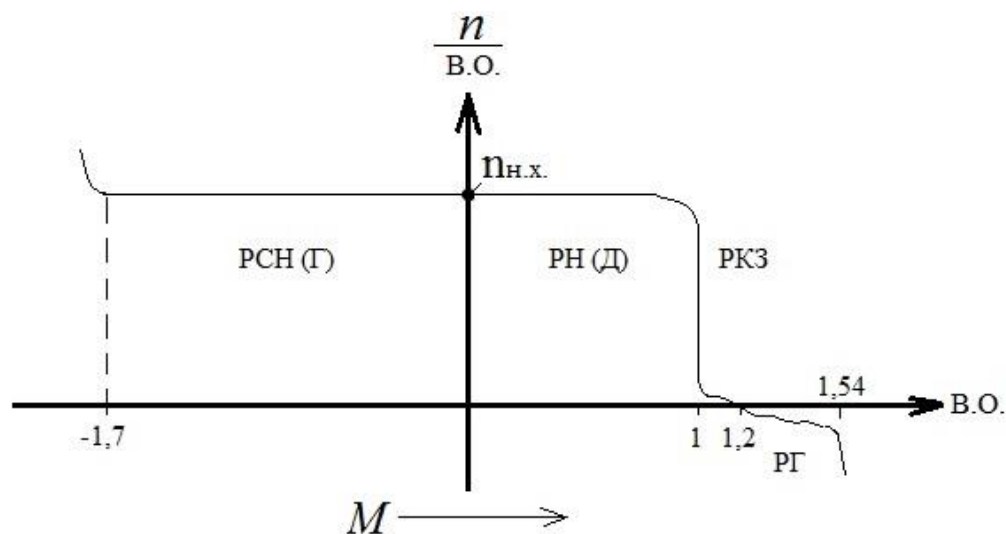
7. Режим утримання навантаження. Діє в ДРК при нерухомому магнітному полі і максимальне утримуюче зусилля досягається тоді, коли активна частина магнітопроводу займає половину внутрішньої поверхні статора (180°). Ротор розташовується в середині цієї зони і таким чином займає максимально стійке положення. У цьому випадку електромагнітний момент ДРК і момент тертя спокою будуть протидіяти зовнішньому моменту навантаження

$$M_{нг} = M + f_n \cdot P \cdot R_r \cdot \cos\theta. \quad (29)$$

Кут навантаження

$$\theta = \arcsin\left(\frac{M_{нг}}{M_m \cdot \sqrt{1 + f_n^2}}\right) - \varphi. \quad (30)$$

В результаті аналізу характеру моментів, тертя та кутів навантаження та розрахунків, проведених на підставі отриманих виразів, отримана повна механічна характеристика ДРК, що показана на рис. 15.



РСН – режим сполучного навантаження (генераторний);
 РН – режим навантаження; РКЗ – режим короткого замикання;
 РГ – режим гальма

Рисунок 15 – Повна механічна характеристика ДРК

Встановлено, що найбільш небезпечним режимом роботи ДРК є режим неробочого ходу, а найбільш безпечним – режим двигуна з найбільш допустимим навантаженням. Режим короткого замикання ДРК не є аварійним і в ньому можна працювати у продовж тривалого часу.

В четвертому розділі досліджені питання особливостей визначення потужності, складових її втрат, ККД і проаналізовано тепловий стан ДРК.

Споживана та корисна потужності для ДРК визначаються як для звичайних класичних електричних машин, а точніше як для крокових двигунів. Складові втрати потужності в ДРК теж на перший погляд ті ж самі, що і у класичних машин, але має місце суттєвий їх перерозподіл з одного виду в інший. Для обраного виду надтихохідних ДРК з частотою живлення 0,5–10 Гц магнітні втрати потужності переходять до розряду додаткових втрат. Електричні втрати в ДРК є основними, але носять незмінний характер.

Найбільш складним досі у теоретичному плані є визначення механічних втрат потужності ДРК і до теперішнього часу їх характер не досліджено. Ці втрати потужності складаються як мінімум з двох складових: втрати у зоні контакту ротор-статор, втрати у механізмі передачі обертового моменту. Кожна з них залежить від різних видів механічної взаємодії контактуючих ланок конструкції двигуна. Найбільш складною є взаємодія в зоні ротор-статор. Тут діють сили пружно-пластичної деформації, які визначають втрати потужності від сил тертя. Їх значення залежать від площі контакту між ротором та статором, яка в свою чергу залежить від нормальної складової СОМТ. Для

визначення значення цієї площадки в роботі застосовано програмний комплекс Solid Works, який реалізує тривимірний МКЕ задач механіки. В основі розрахунку лежить диференційне рівняння рівноваги пружної деформації (9). В результаті чисельного моделювання отримані картини деформацій (рис. 16). Це дозволило отримати залежність площі контакту ротор-статор від різниці діаметрів ротора і статора при незмінній нормальній складовій СОМТ.

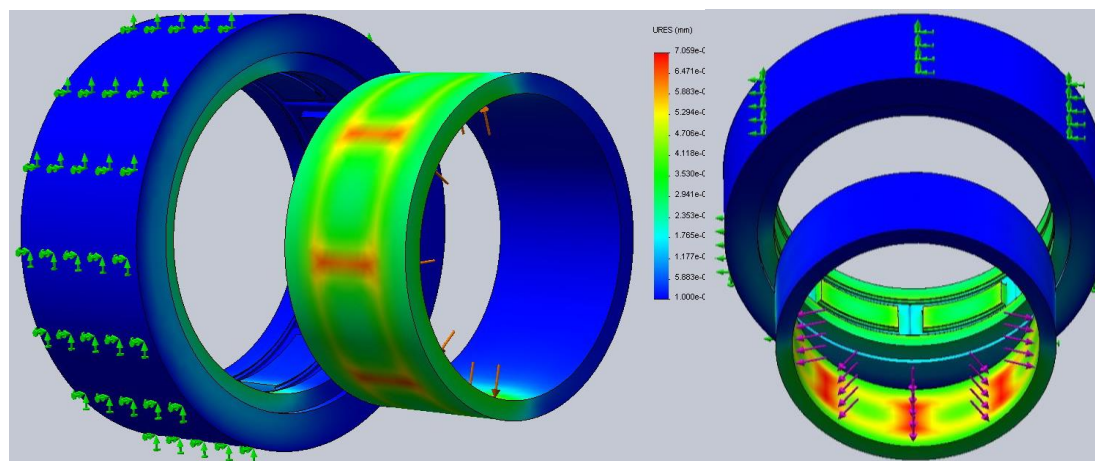


Рисунок 17 – Картина переміщення зовнішньої і внутрішньої поверхонь ротора

Механічні втрати потужності в зоні ротор-статор визначаються за формулою

$$P_{mecrs} = f \cdot P \cdot \omega_P \cdot \cos\theta, \quad (32)$$

де f – коефіцієнт тертя кочення, який у даному випадку дорівнює половині ширини площі контакту ротора зі статором.

Механічні втрати потужності в конструкції передачі обертального моменту залежать від тангенційної складової СОМТ, тому в цілому механічні втрати в процесі роботи змінюватись не будуть. Розрахункові дані наведено у табл. 1 та мають розходження з експериментом у межах 10 %.

Таблиця 1 – Залежність механічних втрат в ДРК від навантаження

| P , Н | θ , град | f , 10^{-3} м | P_{mecrs} , Вт | $P_{mecê}$, Вт |
|---------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 3800 | 59 | 1,25 | 15,4 | 61 |
| 4460 | 45 | 1,56 | 31 | 45,35 |
| 4980 | 36,5 | 1,75 | 44 | 32,35 |
| 5316 | 28 | 1,9 | 56 | 20,35 |
| 5560 | 19 | 2,01 | 67 | 9,35 |
| 5708 | 10,7 | 2,08 | 73 | 3,35 |

В результаті досліджень встановлено, що основними втратами потужності в ДРК є електричні і механічні втрати, які мають постійний характер. Розподіл втрат потужності у ДРК наведено на (рис. 17).

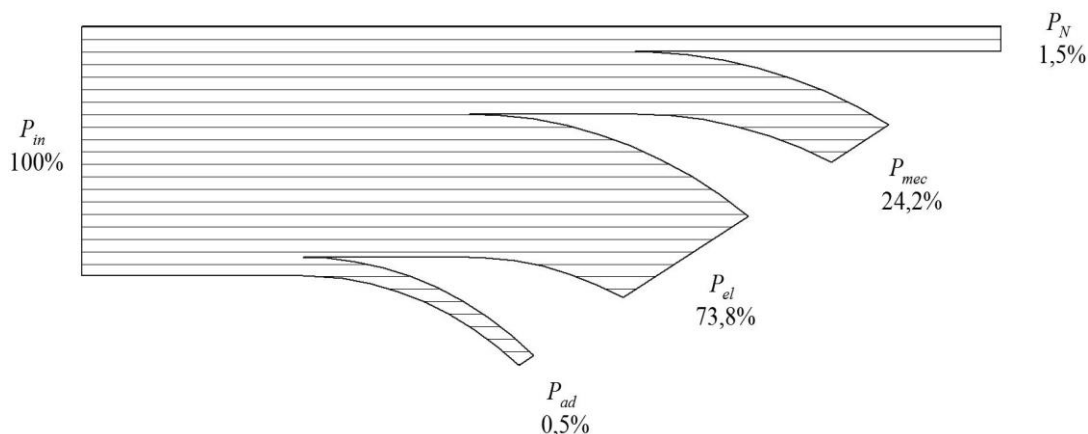


Рисунок 17 – Енергетична діаграма ДРК

З урахуванням виявленого розподілу втрат потужності в ДРК, проведено аналіз теплового стану цього типу двигунів.

Чисельне тривимірне моделювання розподілу температурного поля в ДРК реалізовано програмним комплексом Solid Works. Отримані дані представляють усереднену температуру в основних елементах конструкції ДРК, а також розподіл температури в кожній точці його об'єму. Базове рівняння – рівняння теплового балансу (8), режим роботи – S4, ПВ-25 %. В результаті отримано картину температурного поля (рис. 18). Температура найбільш нагрітої частини – обмотки склала майже 114 °С. За результатами вимірів температура в цій частині – обмотки – склала 123 °С після 600 пусків протягом однієї години роботи при номінальному навантаженні. Завдяки розробленому способу визначення теплового стану ДРК у пропонованому типі конструкцій вдалося визначити межі зміни густин струмів в обмотці статора для заданих режимів роботи і спосіб живлення. Густина струму в обмотці прийнята на рівні 12–15 А/мм².

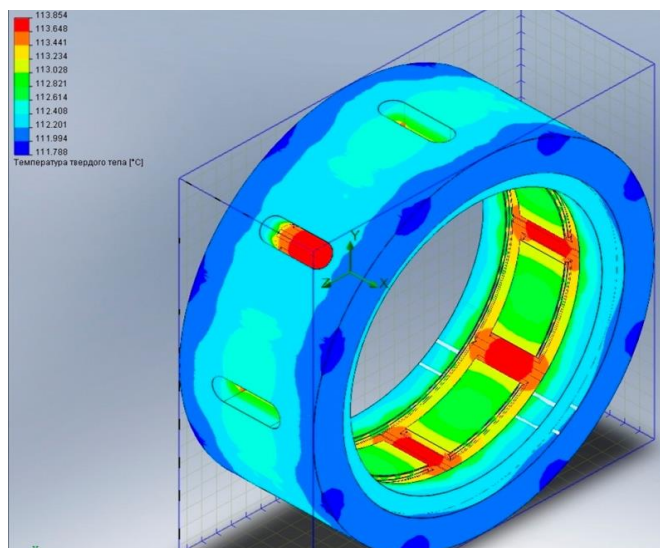


Рисунок 18 – Розподіл температурного поля в статорі ДРК

Аналіз питання нагріву ДРК і насамперед його особливостей дозволяє більш комплексно підійти до процесу його проектування, домогтися поліпшення масогабаритних і енергетичних показників.

У п'ятому розділі обґрунтовано вибір матеріалів магнітопроводів осердь статора і ротора ДРК.

Для багатообертальних (5–20 об/хв) електроприводів рідкісного використання з прямим живленням від промислової мережі 50 Гц застосовувалися трипакетні шихтовані осердя з електротехнічної сталі. Шихтовані магнітопроводи також застосовуються для виконавчих двигунів, які не виконують роль моментних приводів. В процесі випробувань ідентичних зразків ДРК, які розраховувалися за однаковою методикою проявлявся неоднаковий нагрів, тобто одні з них швидко перегрівалися, а інші при тих самих навантаженнях і режимах працювали без відхилень. Тому постало питання вхідної діагностики властивостей електротехнічної сталі. З цією метою проведені поопераційні дослідження магнітних властивостей електротехнічних сталей за допомогою установки магнітних випробувань елементів конструкції електродвигунів. В ході досліджень встановлено наступне:

1. Після штампування статорних пластин розкид магнітних параметрів зразків в межах однієї партії сталі незначний, а для різних партій може змінюватися в межах 5–15 %;

2. Термообробка виробів призводить до деякого покращення магнітних властивостей і одночасно до суттєвого зменшення їх анізотропії;

3. Магнітні характеристики статорної пластини визначаються в основному характеристиками спинки пластини;

4. Порушення технології виготовлення осердь статора на будь-якому етапі призводить до значного погіршення магнітних характеристик;

5. При практичному проектуванні доцільно враховувати розкид магнітних характеристик електротехнічної сталі і осердь статора і зокрема вносити зміни в дані кривої намагнічування при комп'ютерному моделюванні.

Визначено, що для приводів рідкісного використання з режимами роботи ПВ-25 %, ПВ-60 % з тривалістю робочого циклу до однієї хвилини і живленні від промислової мережі з частотою 50 Гц цілком допустимо застосування масивних осердь магнітопроводів ротора. Для надтихохідних приводів з частотою живлення до 10 Гц раціонально застосовувати масивні осердя магнітопроводів як для ротора, так і для статора.

Застосування масивних осердь магнітопроводів надтихохідних, моментних ДРК, виготовлених з конструкційних сталей виправдано з конструкторської, технологічної, електромагнітної, міцнісної, теплової та технологічної точок зору. Найбільш прийнятними в цьому плані є конструкційні сталі Ст.3, Ст.40Х і Ст.20.

Застосування масивних сталевих осердь магнітопроводів ротора і статора дозволило поєднати активну частину машини з зоною фрикційної передачі обертального моменту без додаткових поверхонь обкатування і зменшити масогабаритні показники на 10–30 %, отримати обертаючі моменти на 10–20 % вище, ніж в конструкціях з шихтованими осердям; забезпечити гарантовану тривалість експлуатації; спростити технологію і тим самим знизити собівартість виготовлення машини. ДРК такого конструктивного виконання можуть виготовлятися практично на всіх підприємствах машинобудівного комплексу без значних додаткових капіталовкладень.

Шостий розділ присвячено експериментальним дослідженням, конструкторським розробкам та рекомендаціям по проектуванню ДРК.

Експериментальними дослідженнями підтверджено отримані теоретичні положення: розрахунок обертального моменту в залежності від значення магнітної індукції в повітряному проміжку та кута навантаження θ ; вплив тертя між ротором і статором, а також у механізмі передачі обертального моменту та інших елементах конструкції на баланс втрат потужності в машині; вигляд повної механічної характеристики ДРК; визначення теплового стану машини; рівень механічного зношування в зоні ротор-статор в залежності від рівня навантаження.

Підтверджена відповідність технічних параметрів і характеристик розробленого ДРК вимогам ДСТУ і ТУ на найбільш вживані види редукторних електроприводів.

Для вимірювання обертальних моментів розроблено пристрої вимірювання моменту магнітофрикційного типу (патент України № 57152) і гідрофрикційного типу, які дозволяють плавно регулювати момент опору при обертах від 0,1 об/хв.

Результати випробувань підтвердили розрахункові дані. Розбіжність результатів по всім видам параметрів не перевищувала 10–15 %.

В табл. 2 надані вибіркові дані розроблених ДРК.

Таблиця 2 – Технічні дані ДРК

| | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Рік ДРК | 2005 | 2003 | 1992 | 2002 | 2005 | 1993 | 2010 | 2011 | 2014 |
| М, Н·м | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 80 | 160 | 185 | 250 |
| <i>n</i> об/хв | 1 | 5 | 25 | 15 | 4 | 20 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Маса, кг | 0,9 | 2,1 | 2,3 | 2,2 | 5,7 | 14,3 | 32 | 26,4 | 37 |

В табл. 3, 4 і 5 надані дані ДРК, що розроблені в НТУ «ХПІ» у порівнянні з зарубіжними аналогами.

Таблиця 3 – Значення питомих обертальних моментів для ДРК з обертальним моментом 2–4 Н·м

| | | | | |
|-------------------|------------|----------------|-----------------|------------|
| Тип ДРК | ДРК ХПІ | Р-5 Франція | Р-52 Франція | ДРК МАІ |
| M_{II} , Н·м/кг | 2,7 | 1,2 | 1,6 | 1 |

Таблиця 4 – Значення питомих обертальних моментів для ДРК з обертальним моментом 10 Н·м

| | | | | |
|-------------------|------------|----------------|------------|---------------|
| Тип ДРК | ДРК ХПІ | Р-5 Франція | ДРК МАІ | ДРК Японія |
| M_{II} , Н·м/кг | 3,42 | 2,25 | 1,33 | 0,74 |

Таблиця 5 – Значення питомих обертальних моментів для ДРК з обертальним моментом 150–200 Н·м

| | | | |
|-------------------|------------|-----------------|-----------------|
| Тип ДРК | ДРК ХПІ | ДРК Норвегія | ДРК Норвегія |
| M_{II} , Н·м/кг | 8,2 | 6,14 | 5,34 |

В цілому експериментальні дослідження підтвердили більш високу ефективність восьмикотушкових обмоток статора порівняно з шостикотушковими.

В режимі супутнього навантаження момент, який розвивається двигуном, перевищив номінальне значення моменту в 1,58 рази, в той час, як за розрахунком це перевищення становить 1,7. В режимі утримання навантаження двигун здатний утримувати більш ніж подвійне перевантаження, а для утримання номінальною навантаження необхідний струм приблизно в чотири рази менший, ніж його номінальне значення.

Ресурсні випробування підтвердили гарантовану працездатність розробленого типу ДРК, яка перевищує вимоги ДСТУ та ТУ на механізми електричні однообертальні. Випробування на випробувальній станції АТ СКБ «Укрелектромаш» підтвердили коректність проведених експериментів в лабораторії кафедри електричних машин НТУ «ХПІ».

В рекомендаціях з проектування надано етапи проектування, основні діапазони параметрів розрахунку, також наведено тепловий розрахунок ДРК за методом еквівалентних теплових схем з урахуванням квазістаціонарного нагріву в зоні ротор-статор.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема, яка має два напрямки:

– отримано розвиток теоретичних положень, на яких базуються електромагнітні, механічні, теплові і міцнісні процеси в ДРК та електричних машин в цілому;

– створені ефективні конструктивні виконання ДРК, які відповідають вимогам ДСТУ і ТУ та мають переваги по питомим показникам над зарубіжними аналогами.

Головним підсумком роботи є створення наукових основ, які описують електромеханічне перетворення в ДРК та розробка на їх основі ефективних, конкурентоспроможних, надтихохідних електричних машин для безредукторного електроприводу, придатних для промислового виробництва.

В результаті проведених комплексних досліджень сформульовані наступні основні висновки:

1. Визначено області застосування двигуна з ротором, що котиться, у сфері використання тихохідного електроприводу – високомоментні електроприводи з наднизькою частотою обертання 0,1–10 об/хв та електроприводи рідкісного використання (до 100 пусків на рік). Розширено класифікацію електричних машин на вид «надтихохідні».

2. Проведено аналіз існуючих конструктивних виконань двигунів з ротором, що котиться, та визначенні найбільш перспективні і конкурентоспроможні їх виконання для конкретних умов експлуатації: ДРК з Ш-подібною і трипакетною конструкціями магнітопроводу статора без окремих зовнішніх поверхонь обкатування; ДРК з ротором, який безпосередньо контактує зі статором в його активній частини; ДРК з фрикційною передачею обертального моменту і жорсткою повідкової передачею неспіввісного обертання. Обґрунтовано об'єднання зони механічної передачі обертального моменту з активною частиною ДРК. Конкурентоспроможними можуть бути лише ДРК синхронно-реактивного типу. Надана класифікація конструктивних виконань ДРК.

3. Визначено стан теоретичного обґрунтування процесів, які протікають в ДРК, і здійснено дво- і тривимірне комп'ютерне моделювання електромагнітних, теплових і механічних полів, що дозволило встановити розподіл відповідних полів і магнітних потоків розсіяння магнітного поля, поліпшити масогабаритні показники і визначати режими роботи і експлуатації

двигуна. Шляхом вказаного моделювання визначено діапазон зміни кута навантаження θ ДРК і його перевантажувальну здатність.

4. Встановлено повний склад і особливості режимів роботи ДРК та втрат потужності. Визначено складові обертального моменту, їх зв'язок з кутом навантаження θ і тертям між ротором і статором та в інших елементах конструкції двигуна. Отримано критерій гарантованого втягування ДРК в синхронізм. Розроблено спосіб урахування впливу механічного взаємодії в зоні ротор-статор на тепловий стан і надійність роботи ДРК;

5. Визначено умови та фактори, що дозволяють реалізувати надійну і безаварійну роботу ДРК протягом регламентованих термінів експлуатації. Обґрунтовано, що режим короткого замикання двигуна з ротором, що котиться, не є аварійним, а режим неробочого ходу є найбільш небезпечним і сприяє швидкому механічному зношуванню машини. Показана можливість і перспективність застосування масивних осердь магнітопроводів для ДРК і деяких інших типів електричних машин. Вдосконалена конструкція механізму передачі обертального моменту (захищена патентами України), ефективність якої підтверджена ресурсними випробуваннями.

6. Проведено комплексні експериментальні дослідження ДРК для перевірки отриманих теоретичних положень і створення зразків, придатних для промислової експлуатації. Розроблена і реалізована на практиці випробувальна установка для зняття механічних характеристик для двигунів з частотою обертання 0,1–10 об/хв, проведено ресурсні випробування об'єктно орієнтованого ДРК в об'ємі 100 тисяч робочих циклів. В ході виконання роботи розроблено та виготовлено 15 діючих та виставкових зразків двигунів. Експериментальні дані відрізняються від розрахунків на 10–15 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наний В.В. Определение квазиоднородных характеристик материала замкнутых образцов / В.В.Наний, В.П.Себко, Ф.Ф.Лапцевич // Технічна електродинаміка. – Київ – 1998. Спец. випуск 2. Том 1 – С. 255 – 258. *Здобувачем запропонована форма зразків та методика зняття характеристик.*

2. Оценка аппаратурных погрешностей определения магнитных характеристик статорных пластин в постоянных и переменных магнитных полях / В.П.Себко, Ф.Ф.Лапцевич, В.В. Наний // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харків: ХДПУ. – 2000. Спец.випуск – С. 152 – 156. *Здобувачем досліджені апаратурні похибки у змінних магнітних полях.*

3. Наний В.В. Исследование электродинамических параметров двигателей с катящимся ротором / В.В.Наний, А.М.Арсеньев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків:

НТУ «ХПІ». – 2002. – №9 – С. 71 – 75. *Здобувач здійснив дослідження параметрів двигуна.*

4. Наний В.В. Автоматизированный безредукторный привод трубопроводной арматуры / В.В.Наний, В.В.Лисенко, В.А.Макуха, М.В.Трохин, М.В.Мараховский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №17 – С. 48 – 52. *Здобувачем обґрунтував застосування двигуна з ротором, що котиться, у якості основи автоматизованого безредукторного електроприводу.*

5. Наний В.В. Динамика ДКР с фрикционной передачей вращающего момента / В.В.Наний, А.Г.Мирошниченко, В.Д.Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», – Харків: НТУ «ХПІ» – 2006. – № 38 – С. 129 – 133. *Здобувачем розраховані динамічні характеристики двигуна.*

6. Наний В.В. Влияние конструкции вентильного ДКР 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 «ХПІ». – 2007. – №25 – С. 76–78. *Здобувачем досліджено вплив Ш-подібної конструкції на розподіл магнітної індукції.*

7. 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 «ХПІ». – 2008. – №21 – С. 43 – 46. *Здобувачем досліджено значення кута навантаження та визначено його значення при неробочому ході.*

8. Наний В.В. Особенности теплового расчета двигателя с катящимся ротором / В.В.Наний, А.В.Егоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 41. – С. 98 – 102. *Здобувач обґрунтував необхідність урахування нагріву у зоні ротор-статор.*

9. Наний В.В. 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 політехнічного університету. – Кременчук. – 2010 – №4, ч.1 (63). – С. 76 – 78. *Здобувач розробив чисельну та аналітичну математичну моделі розрахунку.*

10. Наний В.В. 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.Потоцький // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 55 – С. 84 – 88. *Здобувач розробив рекомендації по проектуванню та випробуванням.*

11. Наний В.В. 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. Потоцький, В.Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. - №4 – С. 49 – 53. *Здобувач дослідив тепловий стан двигуна при різних режимах роботи.*

12. Наний В.В. 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 визначив місце двигуна у загальній класифікації електричних машин.*

13. Наний В.В. Зависимость максимального вращающего момента ДКР от количества статорных катушек при дискретном импульсном питании / В.В.Наний, А.М.Масленников // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 28 – С. 74 – 78. *Здобувач дослідив залежність обертового моменту двигуна від кількості працюючих обмоток.*

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

15. Наний В.В. Генетическая программа структурной эволюции электродвигателей с катящимся ротором / В.В.Наний, В.Ф.Шинкаренко, В.В.Котлярова, А.А.Дунев // «Електротехніка та Електроенергетика». – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – №2 – С. 42 – 48. *Здобувачем досліджено кількість існуючих конструкцій двигуна та перспектива отримання нових варіантів.*

16. Наний В.В. Повышение качества непрерывнолитых заготовок из медных сплавов / В.В.Наний, О.Н.Хорошилов, О.И.Пономаренко, А.В.Кипенский, В.В.Куличенко // Металлургия машиностроения. – Москва. – 2012. – №6 – С. 29 – 31. *Здобувач описав особливості та переваги застосування двигуна в реально діючу установку з позицій дотримання технологічного процесу.*

17. Наний В.В. Двигатель с поперечным магнитным полем – компьютерные и экспериментальные исследования / В.В.Наний, Ф.Палис, М.Штаман, Ю.Киршнер, А.А.Дунев, А.В.Егоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36(1009). – С. 287 – 290. *Здобувач прийняв участь в розробці математичних моделей, їх розрахунку та в організації експериментальних досліджень.*

18. Наний В.В. 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 розробив спосіб розрахунку кута навантаження.*

19. Наний В.В. История и современные сферы применения двигателя с катящимся ротором / В.В.Наний // Вопросы теории и проектирования электрических машин Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах. – Ульяновск: УлГТУ. – 2013. – №1 – С. 65 – 68.

20. Наний В.В. Угол нагрузки двигателей с катящимся ротором / В.В.Наний // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: – 2013 – №70(1043) – С. 167 – 170.

21. А.с. СРСР № 1141529 МКІ Н 02 К 41/06 Электродвигатель с катящимся ротором / В.П.Наний, В.В.Наний, Б.И.Грива 1982., БИ №7 *Здобувач прийняв участь у розробці конструкції двигуна.*

22. А.с. СРСР № 1010706 МКІ Н 02 К 41/06 Электродвигатель с катящимся ротором / В.П.Наний, В.В.Наний, Б.И.Грива 1984., БИ № 13 *Здобувач прийняв участь у розробці конструкції двигуна.*

23. А.с. СРСР № 1379113 МКІ Н 01 Н 51/28 Многоканальный герметизированный коммутатор / В.П.Наний, В.В.Наний, Б.И.Грива 1987., БИ № 17 *Здобувач прийняв участь у розробці конструкції приводного двигуна.*

24. А.с. СРСР № 1379828 МКІ Н 01 Н 51/28 Многоканальный герметизированный коммутатор / В.П.Наний, В.В.Наний, Б.И.Грива. П.М. Пушков 1988., БИ № 9 *Здобувач прийняв участь у розробці конструкції приводного двигуна.*

25. Пат. 11546 України МПК Н 02 К 41/00. Процесс визначення основних параметрів електродвигуна з ротором, що котиться. / В.В.Наний, В.В.Лисенко, В.А.Макуха, М.Б.Мараховський, М.В.Трохін. – № u2005 09977; заявл. 24.10.2005; опубл. 15.12.2005. Бюл. № 12. *Здобувач сформулював принцип дії та необхідні для його визначення параметри.*

26. Пат. 57152 України МПК G01L 3/06. Пристрій для вимірювання обертового моменту електродвигуна. / В.Д.Юхимчук, В.В.Наний, А.Г.Мірошниченко, А.М.Масленніков, О.О.Дунев, А.В.Єгоров. – № u201009539; заявл. 30.07.2010; опубл. 10.02. 2011. Бюл. №3. *Здобувач запропонував принцип дії пристрою.*

27. Пат. 57154 України МПК F16С 3/03. Пристрій для передачі обертового моменту між ексцентрично розташованим ротором та валом. П/ В.В.Наний, В.Д.Юхимчук, А.М.Масленніков – № u201009548; заявл. 30.07.2010; опубл. 10.02.2011. Бюл. №3 2011. *Здобувач запропонував принцип дії пристрою.*

28 Наний В.В. Микропроцессорное управление двигателем с катящимся ротором / В.В.Наний, А.В.Кипенський //Труды 3-й международной научно-технической конференции «Unconventional electro-mechanical and electrical systems», Алушта, Крым, Украина, 19–21 сентября, 1997. – С. 999 – 1006. *Здобувач запропонував часові послідовності імпульсів управління.*

29. . Наний В.В. Сравнение конструкций двигателей с катящимся ротором / А.А. Дунев, А.М. Масленников, Н.Я. Петренко // II Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного

технічного університету «Харківський політехнічний інститут», (Харків, 25-27 березня 2008 р.). – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2008. – Том 2. – С. 57 – 58. *Здобувач запропонував базові конструктивні виконання двигунів з ротором, що котиться.*

30. Наний В.В. Дискретное магнитное поле в двигателе с катящимся ротором / В.В. Наний, А.М. Масленников // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я, Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції (Харків, 1-3 червня 2011 р). – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2011. – 312с. – С. 170. *Здобувач обґрунтував роботу двигуна при дискретному імпульсному живленні.*

31. Наний В.В. Условия создания максимального вращающего момента ДКР при дискретном импульсном питании / В.В. Наний, А.М. Масленников // Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 15-17 травня 2012 р.). – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2012. – 324с. – С. 179. *Здобувач обґрунтував умови створення максимального обертового моменту.*

32. В.В. Наний. Влияние механических напряжений в ДКР на величину магнитной индукции и вращающего момента / В.В. Наний, А.Г. Мирошниченко А.В. Егоров // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2013: тр. XXI Міжнар. наук.-практ. конф., 29 – 31 травня 2013 р. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2013. – С. 155. *Здобувач дослідив вплив механічних напруг в зоні контакту ротора зі статором.*

33. Наний В.В. Установка для магнитных испытаний элементов электродвигателей. / Н.Н. Сиренко, Ф.Ф. Лапцевич, В.В. Наний // Вестник харьковского государственного политехнического университета. Харьков. ХДПУ. – 1998. Спец выпуск – С. 349–350. *Здобувач обґрунтував види магнітних випробувань.*

34. Наний В.В. Сравнение конструкций двигателей с катящимся ротором / В.В.Наний, А.А.Дунев, А.В.Егоров, В.Д.Юхимчук, А.Г.Мирошниченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – № 41. – 2009. – С. 64 – 66. *Здобувачем досліджено порівняння різноманітних конструкцій магнітопроводів статора.*

35. Наний В.В. Экспериментальные исследования двигателя с катящимся ротором / В.В.Наний, А.А.Дунев, А.В.Егоров // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – № 41. – 2009. – С. 103 – 106. *Здобувач розробив програму випробувань та провів аналіз їх результатів.*

36. Наний В.В. Двигатель с катящимся ротором с дисковым ротором / В.В.Наний, А.В. Егоров // Электрика. – Москва – 2013. – №3. – С. 13 – 16. *Здобувач запропонував конструкцію двигуна.*

АНОТАЦІЇ

Наній В.В. Розвиток теорії та створення ефективних конструктивних виконань електродвигунів з ротором, що котиться. На правах рукопису.

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

Дисертація присвячена розвитку теорії та створенню ефективних конструктивних виконань електродвигунів з ротором, що котиться. Визначено сучасну сферу застосування двигунів з ротором, що котиться, та розроблено класифікацію їх конструктивних виконань. Створено теоретичні положення, що визначають електромагнітні, теплові, механічні та міцнісні процеси в двигуні з ротором, що котиться, на базі аналізу дво- і тривимірних моделей магнітних полів, які мають місце у двигуні, і за рахунок цього показано шляхи до поліпшення масогабаритних показників, вдосконалення конструкції та технології виготовлення машини.

Визначено роль та характер тертя в електромеханічному перетворенні енергії, складові обертового моменту, вигляд робочих та повної механічної характеристик, обґрунтовано діапазон існування кута навантаження.

Створено діючі зразки двигунів з ротором, що котиться, які відповідають вимогам експлуатації електроприводів трубопровідної арматури і за показником питомого обертового моменту перевищують зарубіжні аналоги.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, теоретичні дослідження, моделювання, сила однобічного магнітного тяжіння, обертовий момент, кут навантаження, режими роботи, тертя, втрати потужності, ресурс експлуатації.

Наний В.В. Развитие теории и создание эффективных конструктивных исполнений электродвигателей с катящимся ротором. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины и аппараты. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков 2014.

Диссертация посвящена развитию теории и созданию эффективных конструктивных исполнений электродвигателей с катящимся ротором, которые являются тихоходными высокомоментными электрическими машинами, которые предназначены для создания безредукторного электропривода систем автоматизации. Определена современная сфера применения двигателей с катящимся ротором и разработана классификация их конструктивных исполнений, расширена классификация электрических машин по скорости на пункт «сверхтихоходные – (0,1–10 об/мин)».

Созданы теоретические положения, определяющие электромагнитные, тепловые, механические и прочностные процессы в двигателе с катящимся ротором на базе анализа двух- и трехмерных моделей соответствующих полей, которые имеют место в двигателе, и за счет этого показаны пути улучшения

массогабаритных показателей, совершенствования конструкции и технологии изготовления машины.

Выяснен характер магнитных потоков рассеяния, предложены способы их учета и пути минимизации. Разработаны способы определения значения и направления результирующего вектора силы одностороннего магнитного притяжения ротора к статору.

Определены роль и характер трения в электромеханическом преобразовании энергии, составляющие крутящего момента, вид рабочих и полной механической характеристик, обоснован диапазон существования угла нагрузки, который в реальных двигателях с катящимся ротором синхроннореактивного типа могут достигать 50–80°. Проанализированы режимы работы двигателя с катящимся ротором, получены критерии втягивания машины в синхронизм, электромагнитная постоянная времени в среднем на порядок больше, чем его электромеханическая постоянная времени. Установлено, что наиболее неблагоприятным режимом работы для двигателя с катящимся ротором является режим холостого хода, а режим короткого замыкания не является для него аварийным. В генераторном режиме двигатель с катящимся ротором развивает момент сопротивления в 1,5–2 раза больший, чем момент в двигательном режиме.

Проанализированы особенности составляющих потерь мощности, электрические потери мощности являются постоянными, а механические потери достигают 25 % значения суммарных потерь мощности. Учтено влияние механических потерь в зоне контакта между ротором и статором на тепловое состояние двигателя. Обосновано применение конструкционных сталей в качестве материала магнитопроводов статора и ротора.

Разработаны и применены испытательные установки для измерения вращающих моментов на сверхнизких частотах вращения. Созданы действующие образцы двигателей с катящимся ротором, которые соответствуют требованиям эксплуатации электроприводов трубопроводной арматуры и по показателю удельного крутящего момента превышают зарубежные аналоги.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, теоретические исследования, моделирование, сила одностороннего магнитного притяжения, крутящий момент, угол нагрузки, трение, потери мощности, режимы работы, ресурс эксплуатации.

Nanii V.V. The development of the theory and creating the effective design versions of electric motors with the rolling rotor. The rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on specialty 05.09.01 - electrical machinery and apparatus. National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv 2014.

The dissertation is devoted to development of the theory and creating effective design versions of electric motors with the rolling rotor. Defined the modern sphere of application of motors with rolling rotor and the classification of their designs.

Established theoretical framework for electromagnetic, thermal, mechanical processes in the motor with rolling rotor, based on the analysis of two - and three-dimensional models of the fields that are in the motor, and this shows the ways of improvement of mass and size parameters, improvement of design and technology of manufacturing of the machine.

Define the role and nature of friction in electromechanical energy conversion, components of torque, the views of workers and full mechanical characteristics, a reasonable range for the existence of load angle. Developed and used test equipment for measuring torque at very low speeds. Created acting samples motor with rolling rotor, which meet the requirements for use of electric drives for pipeline valves and the indicator of unit of torque exceed foreign analogs.

Key words: motor with rolling rotor, theoretical research, modeling, unilateral magnetic attraction force, torque, load, angle, power loss, operating modes, friction, exploitation resource.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and lines, positioned in the lower right quadrant of the page.

Підписано до друку 08.09.2014 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Times. Ум.друк.арк. 2,09.
Наклад 120 прим. Зам. № 21049

Віддруковано в ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м.Харків, вул. Ольмінського, 11
Тел.: (057) 756-53-25

www.madrid.in.ua e-mail: info@madrid.in.ua