

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

ЄГОРОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.313.17

ОЦІНКА ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА
З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ, ПРИ НАЯВНОСТІ
ВНУТРІШНІХ МЕХАНІЧНИХ ФАКТОРІВ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини й апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата 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

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
Римша Віталій Вікторович,
Одеський національний політехнічний університет
Інститут електромеханіки та енергоменеджменту,
професор кафедри електричних машин

кандидат технічних наук
Петренко Олександр Миколайович,
Харківській державний університет міського господар-
ства ім. О.М.Бекетова,
старший викладач кафедри електротранспорту

Захист відбудеться «12» лютого 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 «26» грудня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з головних елементів систем автоматичного регулювання різних автоматизованих систем керування технологічним процесом є тихохідний високомоментних електропривод, який є поєднанням швидкохідного електродвигуна і знижуючого редуктора. Наявність редуктора вимагає постійного технічного обслуговування, а наявність елементів які труться - неодмінно призведе до скорочення терміну служби, надійності і погіршення механічних характеристик електроприводу в цілому.

Тому стає доцільним завдання заміни редукторного електроприводу на безредукторний, так званий прямий привід. Одним з варіантів безредукторного електроприводу може бути застосування двигуна з ротором, що котиться (ДРК). Сучасні ДРК здатні розвивати питомий момент до 10 Н·м/кг, частоту обертання валу менше 10 об/хв, в габаритах значно менших, ніж у редукторних електроприводів. Такі можливості пояснюються принципом дії, суть якого лежить у створенні сили одностороннього магнітного тяжіння і електромеханічного способу редукції швидкості.

Маючи надтихохідну частоту обертання і високий питомий момент, ДРК позиціонує себе як альтернатива швидкохідного двигуна із знижуючим редуктором. Деякими з таких варіантів є механізм електричний однообертний і механізм електричний багатообертний. Своє застосування вони знаходять в якості регулюючих органів в трубопровідній арматурі підприємств водо-, газо- і нафтовидобутку, сільському господарстві, а також на атомних і теплових електростанціях. Перевагою ДРК є те, що він має однозвенний механізм передачі обертального моменту, в той час як всі інші, редукторні електроприводи – двох- і більш звенну конструкцію.

Світову монополію на випуск електроприводів даного типу утримують за собою Німеччина (Siemens), Росія (Чебоксариелектропривід). На Україні даний вид електроприводів практично не виготовляється, здійснюються тільки ремонтно-налагоджувальні роботи.

Таким чином, завдання розробки ДРК з гарантованим ресурсом роботи є актуальним завданням, для досягнення якого необхідний облік міцнісного стану і теплових процесів в двигуні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричних машин НТУ «ХПІ». У якості виконавця окремих етапів, здобувач брав участь у виконанні держбюджетної НДР МОН України «Розробка експериментального двигуна з ротором, що котиться для безредукторного електропривода» (ДР № 0109U002394), договору 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» та госпдоговірної НДР «Розробка конструкцій двигунів

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

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є аналіз і моделювання теплових процесів в двигуні з ротором, що котиться, з урахуванням впливу сили однобічного магнітного тяжіння та сили тертя у вузлі торкання осердь статора і ротора.

Для досягнення зазначеної мети поставлені завдання:

- проведення аналізу конструктивних виконань і методів теплового розрахунку ДРК;
- дослідження складових втрат потужності в ДРК;
- дослідження нагріву активних частин в стаціонарному і нестаціонарному режимах роботи ДРК;
- визначення доцільної марки сталі осердь ДРК;
- проведення експериментальних досліджень нагріву ДРК, в різних режимах роботи.

Об'єкт дослідження – теплові процеси в двигуні з ротором, що котиться.

Предмет дослідження – вплив на тепловий стан двигуна з ротором, що котиться, сили однобічного магнітного тяжіння та сили тертя, як внутрішнього механічного фактора.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на тривимірному моделюванні температурного поля двигуна з ротором, що котиться, на основі методу кінцевих елементів, а також використовувалися класичні методи, засновані на методі еквівалентних теплових схем з моделюванням в середовищі Matlab. Для дослідження процесу контакту осердь статора і ротора, використовувалися основні положення теорії пружних деформацій. Експериментальні дослідження проведено на лабораторних стендах кафедри електричних машин і на випробувальній станції СКБ АТ «Укрелектромаш» (м. Харків).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено спосіб визначення втрат потужності тертя кочення в двигуні з ротором, що котиться, для більш точного визначення ККД двигуна;
2. Вперше створені еквівалентні теплові схеми заміщення двигуна з ротором, що котиться, відкритого та захищеного виконань для стаціонарного та нестаціонарного режимів роботи з урахуванням тертя в зоні торкання осердь статора і ротора;
3. Отримало подальший розвиток визначення ролі тертя в двигуні з ротором, що котиться, та їх вплив на процеси в двигуні;
4. Отримало подальший розвиток визначення залежності розміру площі торкання, осердь статора і ротора в двигуні з ротором, що котиться, від матеріалу осердь та конструктивних виконань.

Практичне значення отриманих результатів роботи для електромашинобудівної галузі:

1. Створено спосіб розрахунку втрат потужності тертя кочення, який дає можливість вірно розраховувати нагрів осердь статора і ротора у вузлі торкання;

2. Розроблено спосіб розрахунку температури двигуна з ротором, що котиться, який дозволяє на стадії проектування урахувувати додаткове тепло-виділення у вузлі торкання осердь статора і ротора для різних конструктивних виконань двигунів та режимів роботи;

3. Вдосконалено конструкцію механізму передачі обертового моменту, що пройшла ресурсні випробування, яка спростила технологію його виготовлення;

4. Розроблено, виготовлено і випробувано зразок двигуна з ротором, що котиться, який відповідає основним технічним умовам для механізмів електричних однообертових ГОСТ 7192.

Впровадження основних наукових і практичних результатів дисертаційної роботи відображається у використанні теоретичних результатів у Магдебурзьком університеті ім. Отто фон Геріке (Німеччина, м. Магдебург, 2012–2013 р.р.). Зразок ДРК впроваджено у схему електроприводорегулюючої арматури блоку НП 15.04 (ВАТ Механічний завод «Калязінський», РФ, м. Калязін). Отримано позитивні рекомендації з Рівненською 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, та рекомендації щодо комплексного завершення робіт від ТОВ «Укртехнологіясервіс» (м. Харків). Основні положення дисертації використанні в лекційних курсах та для курсового та дипломного проектування електричних машин студентами спеціальності «Електричні машини і апарати» у НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. В дисертаційну роботу включено теоретичні положення і результати експериментальних досліджень, які виконані здобувачем особисто. Здобувач шляхом аналітичного та комп'ютерного моделювання дослідив питання впливу механічних втрат на коефіцієнт корисної дії ДРК, розробив спосіб розрахунку площі контакту осердь статора і ротора, розробив еквівалентну теплову схему заміщення ДРК з урахуванням підігріву від контактуючих поверхонь. Також здобувачем підготовлено пакет конструкторської документації для виготовлення різних варіантів ДРК.

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)» (м. Харків, 2010–2013 р.р.), XVII–XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології, наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010–2013 р.р.), Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми автоматизованого електроприводу» (м. Алушта, 2013 р.), конференції в Магдебурзькому університеті ім. Отто фон Геріке (Німеччина, 2013 р.), науково-технічній раді харківського представни-

цтва ТОВ «Механіка Інжиніринг» (м. Харків), семінарах з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» НАН України «Електромагнітні та теплові процеси високовикористаних електричних машин» (м. Харків, 2010–2011 р.р.).

Експериментальні зразки демонструвалися на міжнародних та республіканських промисловотехнічних і галузевих виставках: «Енергетика та енергозбереження» (м. Харків, 2010–2013 р.р.), «Промисловість, Інвестиції, Технології» (м. Кривий Ріг, 2013 р.), «Барвіста Україна» (м. Київ, 2010–2011 р.р.), на ювілейній виставці присвяченій 125 річниці заснування НТУ «ХП», а також на виставці науково-технічних досягнень НТУ «ХП».

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 13 наукових публікаціях, з них: 7 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у закордонному періодичному фаховому виданні, 3 патенти України, 2 – у матеріалах конференцій.

Структура і склад дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки; з них 68 рисунків по тексту; 6 рисунків на 4 окремих сторінках; 14 таблиць по тексту; списку використаних джерел зі 113 найменувань на 13 сторінках, 2 додатків на 18 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 проведено огляд існуючих конструктивних виконань двигунів з ротором, що котиться, та методів розрахунку теплового та міцнісного стану електричних машин.

Концепція створення конструкції електричної машини з ротором, що котиться, виникла ще в кінці XIX століття, однак до середини 40-х років XX сторіччя залишалася поза колом інтересів електромашинобудування. У 1936 році П.Н. Крохмальов виявив ефект дії сили однобічного магнітного тяжіння (СОМП) між статором і ротором, який лежить в основі принципу дії ДРК. На сьогодні існує значна кількість конструктивних виконань ДРК.

Все розмаїття конструкцій, можна розділити за такими ознаками: 1) розташування ротора в двигуні; 2) конфігурація осердь; 3) кількість роторів і статорів; 4) спосіб передачі неспіввісного обертання; 5) спосіб передачі обертального моменту.

Майже всі конструкції працювали виключно на змінному струмі і використовували котушки з постійним струмом тільки для підмагнічування.

Для ДРК, що працює від джерела постійного струму через комутуючий управляючий пристрій, характерним є наявність значних втрат потужності, які

виникають від дії значної СОМТ та сил тертя. Ці втрати потужності призводять до додаткового нагрівання та пружної деформації машини.

В процесі нагріву електричної машини з власним тепловиділенням відбувається тепловіддача конвекцією. Тому для теплового розрахунку ДРК використано метод еквівалентних теплових схем (ЕТС), оснований на законі теплопровідності, сформульований Фур'є. Метод ЕТС набув найбільшого поширення, зважаючи на простоту і достатню точність розрахунку. Недолік методу полягає в тому, що одержується тільки деякі середні значення температури для окремих елементів машини.

Для більш комплексного дослідження теплового стану двигунів запропоновано застосування програмних комплексів чисельного моделювання, заснованих на сучасних кінцево-елементних технологіях, для розрахунку температурного поля (це ANSYS, Maxwell, SolidWorks та Elcut). Певні переваги має SolidWorks, який включає інтегровані модулі теплового та міцнісного аналізу, які дозволяють виконати статичний розрахунок і отримати тривимірну модель.

Аналіз існуючих джерел інформації показав, що для оцінки теплового стану ДРК необхідно урахувувати особливості механічного процесу, це пов'язано, в першу чергу, з неспіввісністю обертання осердь ротора відносно статора, низькими частотами обертання і режимом роботи.

Таким чином, доцільним є визначення ступеня нагріву ДРК з урахуванням всіх втрат потужності. Такий підхід дозволяє вірно вибрати головні розміри машини, необхідний клас ізоляції, визначити електромагнітні навантаження та значно розширити можливості спроектованої машини.

В другому розділі проведено дослідження складових втрат потужності в двигуні з ротором, що котиться.

Розглянуто особливості складових втрат потужності при різних засобах живлення обмотки статора ДРК. Найбільш вживаними є двигуни з надтихохідною частотою обертання, які працюють від джерела постійного струму через комутуючий керуючий пристрій. Для даного типу ДРК розглянуто перетворення енергії, яке описується наступними виразами.

При підключенні ДРК до джерела живлення, як і будь-яка електрична машина, двигун почне споживати електричну потужність

$$P_{in} = mU_{in}I, \quad (1)$$

де m – кількість одночасно підключених котушок, U_{in} – вхідна напруга, I – електричний струм однієї котушки статора.

Під час роботи, вал ДРК обертається з деякою постійною частотою і здійснює роботу з передачі обертального моменту якомусь механізму. Таким чином, на вільному кінці вала ДРК виробляється корисна потужність

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot M_r \cdot (d_s - d_r) / d_r, \quad (2)$$

де f – частота імпульсів, d_s – внутрішній діаметр осердя статора, d_r – зовнішній діаметр осердя ротора, M_r – момент на валу.

ККД ДРК, як і для будь-якої іншої електричної машини, це відношення корисної потужності P до споживаної P_{in}

$$\eta = P / P_{in}. \quad (3)$$

Перетворення електричної енергії в механічну, в ДРК супроводжується втратами енергії, які виділяються у вигляді тепла, нагріваючи електричну машину (рис. 1). Ці втрати енергії для електричних машин виражаються за допомогою втрат потужності

$$\Delta p = P_{in} - P. \quad (4)$$

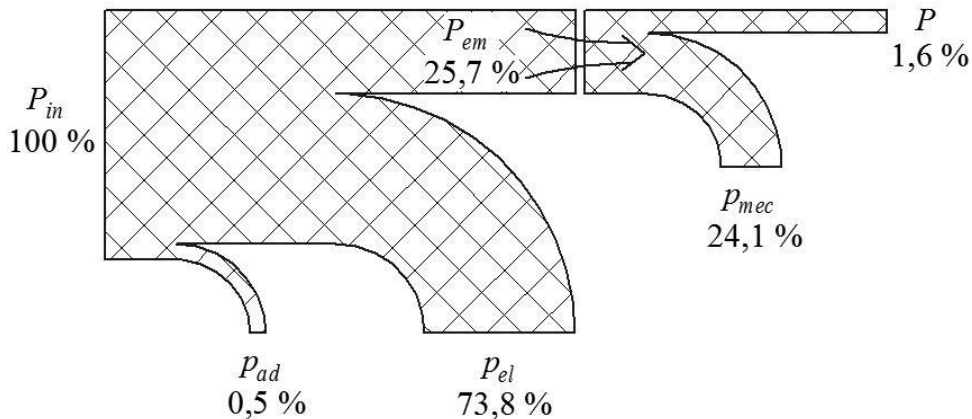


Рисунок 1 – Енергетична діаграма ДРК, отримана аналітичними розрахунками

Магнітні втрати виникають в результаті періодичної зміни в часі магнітного поля $\frac{d\Phi}{dt}$. Вихрові струми в статорі і роторі практично відсутні через низьке значення частоти напруги живлення.

Через складність конструкції аналітичне обчислення механічних втрат є трудомістким процесом. Тому, використовуючи метод поділу втрат, механічні втрати p_{mec} описуємо залежністю

$$p_{mec} = \Delta p - p_{el} - p_{ad}, \quad (5)$$

де p_{el} – електричні втрати потужності, p_{ad} – додаткові втрати.

Значна частина потужності (24 %) витрачається на механічні втрати в двигуни, що не властиво для інших типів електричних машин (рис. 1). В електричних машинах з співвісним розташуванням ротора і статора механічні

втрати залежать тільки від швидкості обертання ротора і не залежать від навантаження.

У двигуні з ротором, що котиться, зі зміною навантаження на валу, змінюється кут навантаження, внаслідок цього відбувається зміна нормальної складової СОМП, що призводить до зменшення або збільшення механічних втрат.

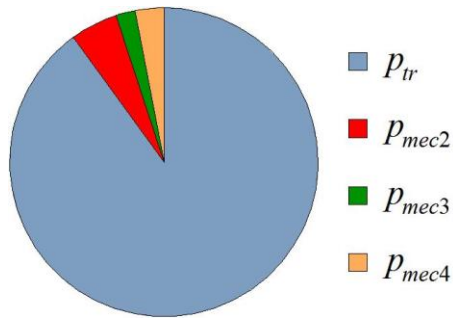


Рисунок 2 – Співвідношення механічних втрат у ДРК

Механічні втрати в роторі можна розділити на втрати на ділянках (рис. 2):

1) втрати на лінії контакту осердя ротора з осердям статора (P_{tr});

2) втрати в вузлі передачі моменту з осердя ротора на диск ротора (P_{mec2});

3) втрати в вузлі передачі моменту з диска ротора на вал (P_{mec3});

4) втрати в підшипникових вузлах (P_{mec4}).

Механічні втрати в підшипникових вузлах ДРК мізерно малі. Це пов'язано з наднизькою частотою обертання вала, а застосування якісних підшипників кочення значно зменшує коефіцієнт тертя.

У конструкції ДРК передбачено жорстке з'єднання диска ротора з валом. Такий варіант з'єднання забезпечує мінімальні втрати, при передачі моменту. Втрати в вузлі з'єднання осердя з диском ротора, при раціональному їх виборі, мають незначну величину.

Таким чином, механічні втрати потужності в ДРК можна прийняти

$$P_{mec} \approx P_{tr} \quad (6)$$

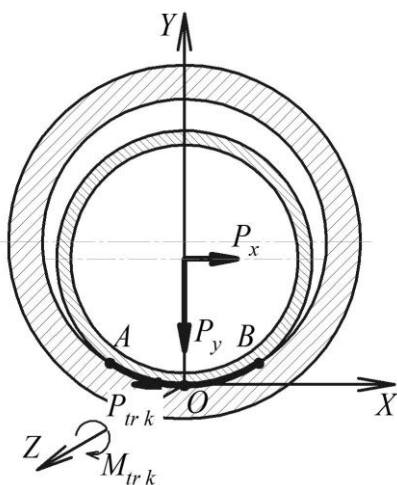


Рисунок 3 – Сили і момент, які діють на дузі AB

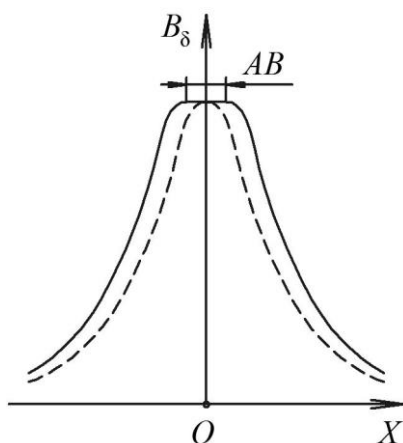
Під дією нормальної складової СОМП P_y , відбувається стиснення осердь статора і ротора. Внаслідок цього, відбувається деформація контактуючих поверхонь і можлива передача моменту M_{trk} через площу обмежену дугою AB і довжиною самого осердя (рис. 3).

Визначення реальної площі контакту є головним завданням на шляху правильного розрахунку ДРК та підвищення результуючого моменту на валу. Напівширина контакту визначається з теорії Герца відношенням

$$a = \sqrt{\frac{4P_y r^*}{\pi l_1 E^*}}, \quad (7)$$

де r^* – еквівалентний радіус кривизни, E^* – еквівалентний модуль пружності, l_1 – довжина активної частини осердя статора.

Розмір площі контакту двох осердь є важливою величиною для визначення вірного розподілу магнітного поля. У всіх попередніх розрахунках приймався до уваги той факт, що контакт осердь статора і ротора відбувається по лінії і завдяки розбіжному повітряному проміжку розподіл магнітної індукції мав вигляд, показаний пунктирною лінією на рис. 4.



З урахуванням площі

— контакту

Без урахування пло-

----- щі контакту

Рисунок 4 – Форма розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку

Як свідчать результати наступних експериментів, форма розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку ДРК, має вигляд, показаний на тому ж рисунку, але с ущільною лінією. Це пояснюється тим, що в місці контакту, відсутній повітряний проміжок, і силовим лініям магнітного поля не потрібно його подолання. Таким чином, підвищується величина магнітної індукції по всій довжині повітряного проміжку, що, призведе до більш точному розрахунку моменту.

Для аналізу деформацій осердь статора і ротора від дії СОМП проведено тривимірне моделювання міцності осердь ДРК, в режимі статичного навантаження, в програмному комплексі SolidWorks (рис. 5, 6).

Таким чином, переміщення зовнішньої поверхні осердя ротора відбувається не рівномірно, оскільки в місцях максимального переміщення розташовуються пази статора. У місці контакту двох осердь максимальна деформація осердя ротора склала $1,2 \cdot 10^{-6}$ м.

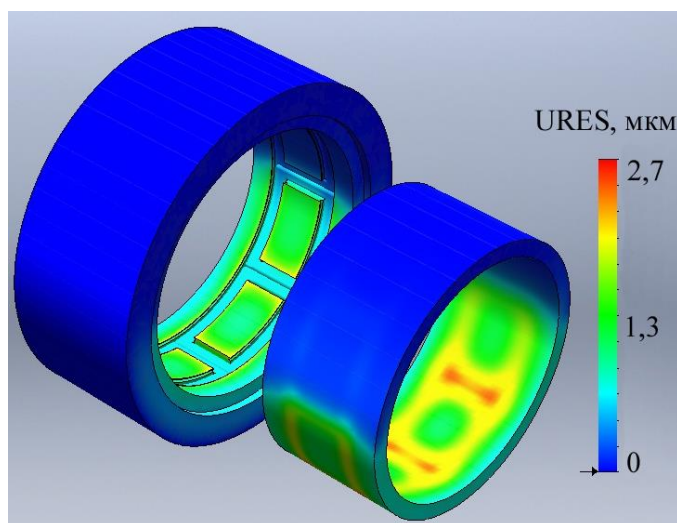


Рисунок 5 – Тривимірна картина пружної деформації осердь

Величина втрат на тертя p_{tr} осердь ротора і статора прямопропорційна значенню коефіцієнта тертя кочення μ_k . В свою чергу, значення коефіцієнта тертя кочення залежить від матеріалу осердь, а також від фізичного стану цих поверхонь

$$p_{tr} = 2\pi f \mu_k \cdot P_y \cdot \quad (8)$$

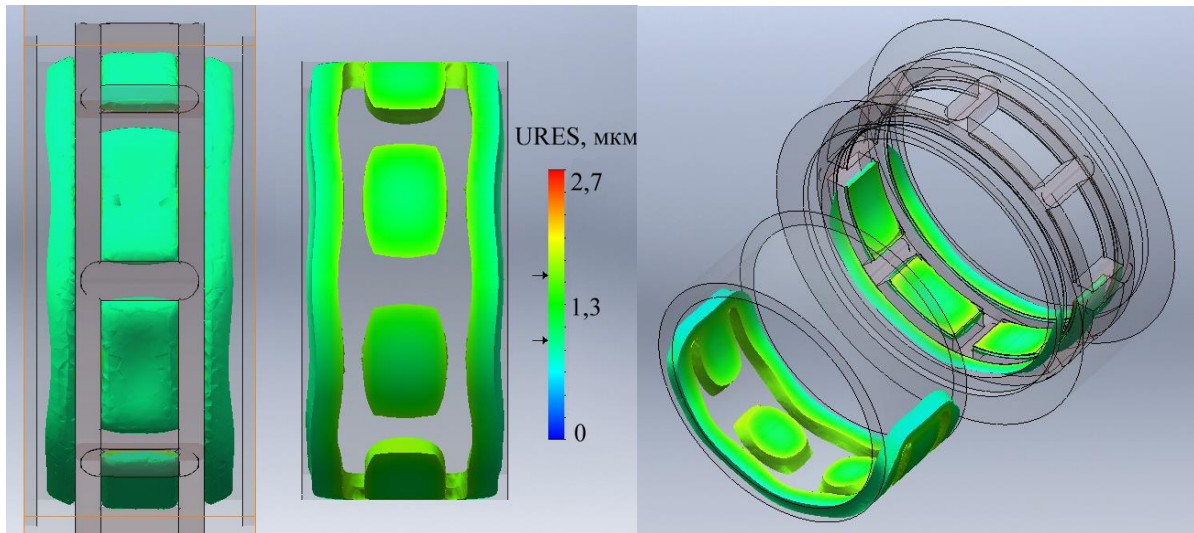


Рисунок 6 – Тривимірна картина деформації від дії СОМТ

У будь-якій електричній машині осердя будь то статора, або ротора виконують завжди одну мету – створення магнітного поля в необхідному місці і максимальної величини. У двигуні з ротором, що котиться, осердя виконують дві рівнозначні мети: проведення магнітного потоку та забезпечення редукції швидкості обертання. Під час редукції відбувається механічний вплив осердь один на одного. Тому застосування електротехнічної сталі є неможливим, внаслідок її низької механічної властивості, через наявність шихтованих пакетів. При дії механічних зусиллі більше 5000 Н відбувається розкочування бічних поверхонь і як наслідок «розпушування» бічних пакетів осердя. Це призводить до зниження результуючого моменту і можливого заклинювання.

Тому, осердя статора і ротора у ДРК, який працює від джерела постійної напруги або комутуючого керуючого пристрою, яке живить обмотку статора дискретними уніполярними імпульсами частотою 0,5–5 Гц, доцільно виконати з будь-якої магнітом'якої марки сталі.

В роботі проведено дослідження з порівняння різних марок конструкційних сталей найбільш поширених в машинобудуванні, таких як :

- сталь загального призначення Ст3сп ГОСТ 380-2005;
- сталі якісні Сталь 20 і Сталь 45 ГОСТ 1050-88;
- сталь легована Сталь 40Х ГОСТ 4543-71.

Доведено, що фізичні властивості сталей на механічні втрати тертя кочення практично не впливають. Найменші втрати виходять із застосуванням сталі марки 40Х (рис. 7). Марка 40Х відноситься до конструкційної легової сталі, яка окрім звичайних домішок в своєму складі має легуючий елемент, – хром, про що свідчить відповідне маркування. Але в цієї марки сталі високе значення твердості і низький коефіцієнт теплопровідності, що позначиться на дорожчій обробці і не ефективному охолодженні. Тому було вибрано сталь марки Ст3сп, як найбільш розповсюджену, дешевшу та з більшим коефіцієнтом теплопровідності, ніж інші марки сталей.

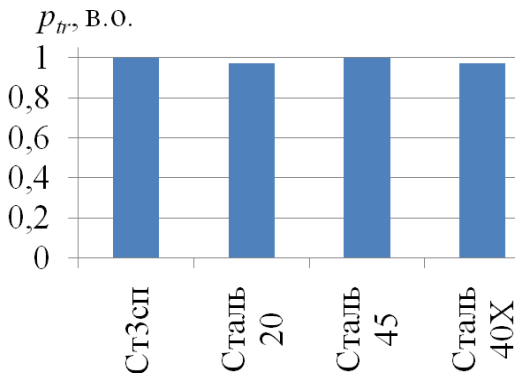


Рисунок 7 – Співвідношення втрат потужності тертя кочення для різних матеріалів осердя статора і ротора

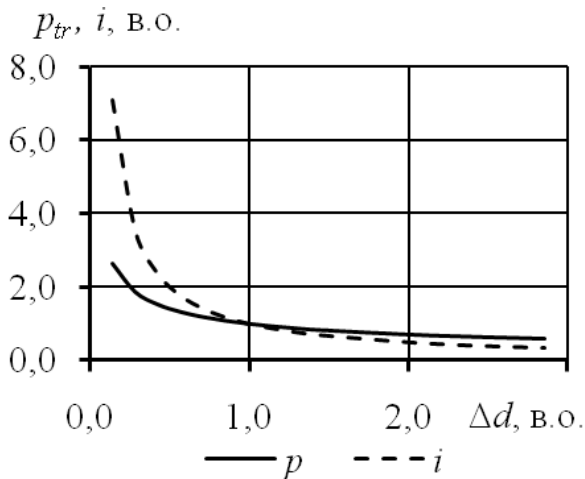


Рисунок 8 – Залежність механічних втрат потужності p_{tr} і коефіцієнта редукції i від різниці діаметрів осердь ротора і статора

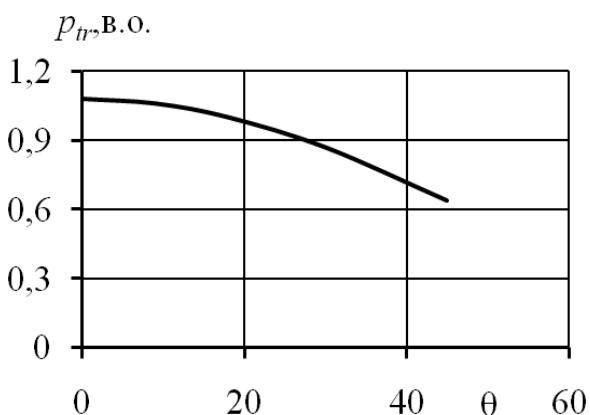


Рисунок 9 – Залежність механічних втрат потужності від кута навантаження

Другим аспектом в дослідженні є проведення розрахунків величини втрат тертя кочення залежно від різниці діаметрів осердь статора і ротора. При цьому внутрішній діаметр осердя статора залишався величиною постійною, а змінювався лише зовнішній діаметр осердя ротора.

При зміні різниці діаметрів осердь статора і ротора відбувається різка зміна втрат тертя кочення (рис. 8). Такий вигляд кривої пояснюється тим, що при різниці діаметрів, що прямує до нуля, відбувається опір руху за рахунок сил молекулярного тяжіння.

Третій аспект в дослідженні пов'язан з виявленням залежності величини втрат на тертя від кута навантаження. ДРК є синхронною машиною, оскільки осердя ротора синхронно обкачується услід за магнітним полем, створеним обмоткою статора. Таким чином, одним з важливих параметрів машини є електромагнітний момент M , який залежить від кута навантаження θ (рис. 9).

$$M = kd_r^2 l_s k_z B_{0m}^2 \sin \theta, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт пропорційності; l_s – довжина осердя статора; k_z – відносна ширина зубця; B_{0m} – максимальне значення магнітної індукції в повітряному проміжку.

Таким чином, на механічні втрати потужності в ДРК мають вплив в різній мірі матеріал, з якого виготовлені осердя, геометричні розміри двигуна і кут навантаження.

В третьому розділі проведено теоретичні дослідження нагріву двигуна з ротором, що котиться.

З теплової точки зору, в якості матеріалу осердь статора і ротора двигуна з ротором, що котиться, розглядалися ті самі марки сталей, що і в механічному аналізі у 2 розділі. В магнітному відношенні найкращі показники відносяться до сталей 2013 і Ст3. Механічний розрахунок показав, що з цієї точки зору, кращі показники у сталей марок Сталь 40Х і Сталь 20. Після термічної обробки кращі магнітні властивості починає набувати Сталь 40Х. Ці марки сталей відрізняються наявністю домішок і кількісним вмістом кремнію. Відповідно у них різні коефіцієнти теплопровідності.

Можливі області застосування і конструктивні особливості ДРК, диктують свої різновиди виконання двигуна за ступенем охолодження і захисту. Це такі, як *IP44*, *IP45*, *IP54*, *IP55*, *IP65*. В деяких випадках, коли ДРК є частиною електропривода, у якого є своя захисна оболонка, допускається виготовлення ДРК відкритого виконання *IP00*.

В якості об'єкта дослідження в роботі вибрані дві електричні машини: перша – зі ступенем захисту *IP00* та способом охолодження *IC00*; друга – зі ступенем захисту *IP54* та способом охолодження *IC00*. Крім цього, ДРК повинен працювати в повторно-короткочасному режимі *S4* з частими пусками. Частота циклів становить 630 включень на годину, ПВ – 25 % або 50 %.

Для розрахунку теплового стану ДРК застосовано метод еквівалентних теплових схем.

У двигуні з ротором, що котиться, структура ЕТС та її якісний склад, як і в інших двигунах, визначається конструктивним виконанням. В порівнянні з іншими класичними електричними машинами, при розрахунку теплового стану ДРК треба враховувати втрати на тертя кочення між ротором і статором. Досить відзначити, що сила одnobічного магнітного тяжіння ротора до статора може досягати $(3-6) \cdot 10^3$ Н. При цьому швидкість обкатування лінії торкання ротора зі статором становить від 5 до 100 км/год при різних частотах живлення.

У класичних електричних машинах основними джерелами тепловиділення є обмотки та магнітопровід. В ДРК, через особливості конструкції і принципу дії, тепло виділяється ще додатково у вузлі торкання осердь статора і ротора. Це необхідно враховувати при розрахунку нагріву двигуна.

Тепловий розрахунок ДРК проведено з використанням універсальних ЕТС, адаптованих до умов поставленого завдання (рис. 10, 11).

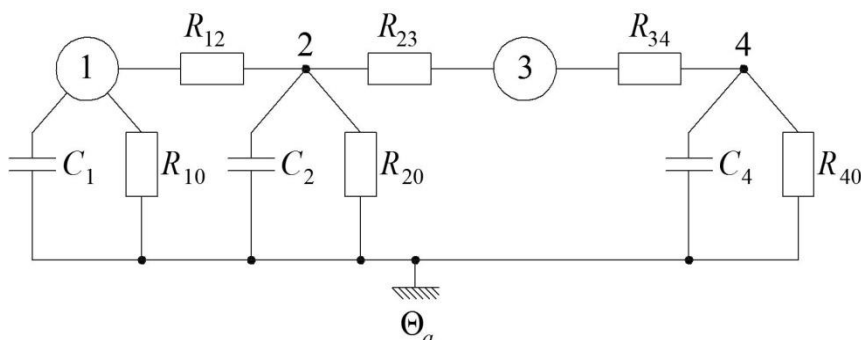


Рисунок 10 – ЕТС ДРК відкритого виконання

Обидві ЕТС складені для випадку живлення ДРК від напівпровідникового перетворювача прямокутними імпульсами напруги частотою 1 Гц і містить 4 вузли:
– вузол 1 – обмотка ДРК, потужність теп-

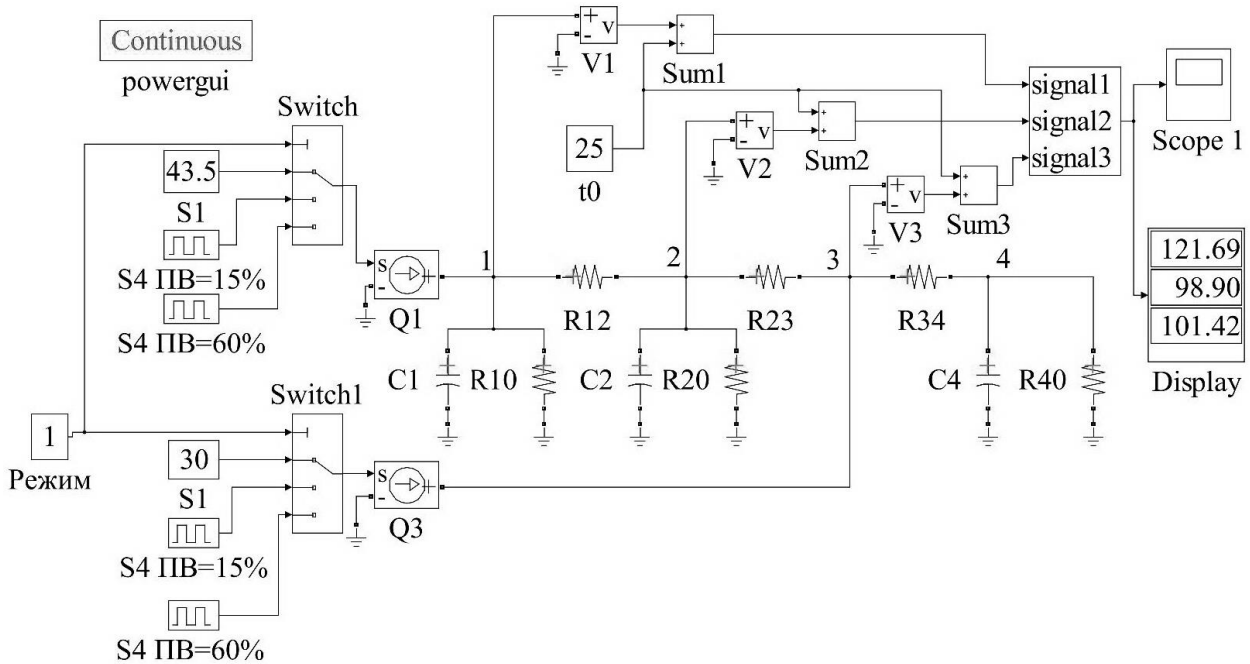


Рисунок 12 – Структурна схема ДРК для визначення його температури

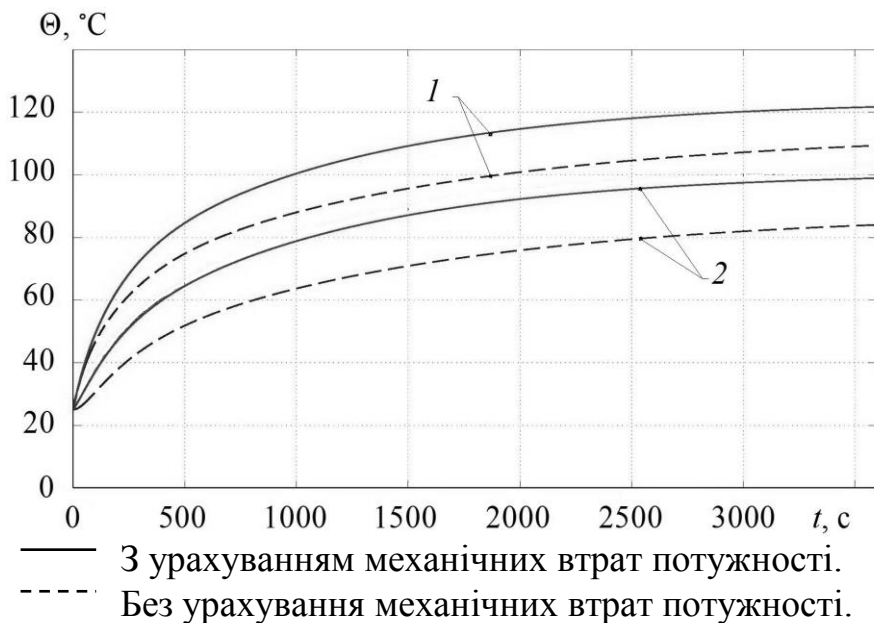


Рисунок 13 – Графік нагріву обмотки статора 1 та осердя статора 2

Таким чином, відмінність в температурах нагріву обмотки статора склала $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10%), а осердя статора – $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (15%).

Аналогічно до ДРК відкритого виконання, побудовано структурну схему в середовищі MATLAB в системі Simulink для захищеного виконання.

Метод ЕТС дозволяє знайти середні значення температур джерел тепловідділення. За допомогою інструменту SolidWorks Flow Simulation отримано дані не тільки про деяку усередненої температури в основних елементах конс-

Важливість обліку додаткового підігріву осердь статора і ротора від втрат на тертя кочення демонструє рис. 13. На ньому наведено порівняння нагріву обмотки і осердя статора, для двох випадків: перший, всі складові втрат потужності враховувалися; і другий – втратами потужності у вузлі торкання осердь знехтували.

трукції двигуна з ротором, що котиться, але і отримуємо більш точні дані про розподіл температури в кожній точці його простору (рис. 14).

На тривимірній моделі збірки проведено моделювання стаціонарного нагріву двигуна з ротором, що котиться. Для цього запропоновано такі параметри: температура навколишнього середовища $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, потужність тепловиділення в обмотках і на площі контакту, коефіцієнти теплопровідності і тепловіддачі. Для зменшення максимуму локального нагріву запропоновано зробити в осерді статора вентиляційні вікна для безпосереднього контакту максимально нагрітої частини обмоток з навколишнім середовищем. Крім цього, виконання цих вікон, дозволить полегшити механічне виготовлення статора.

В результаті моделювання розподілу температурного поля обрано оптимальну конструкцію і марку сталі для масивного осердя двигуна з ротором, що котиться. Застосування марки сталі Ст3пс дозволило зменшити максимальний нагрів двигуна на $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, порівняно зі Сталь 40Х, а виготовлення вентиляційних вікон в осерді статора, зменшило локальний нагрів на $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналізуючи результати, отримані методом ЕТС і МКЕ, відзначається, що максимальний нагрів елементів двигуна відрізняється не більш ніж на 5% .

Таким чином, розроблено ЕТС ДРК яка дозволяє знаходити середнє значення температури обмоток двигуна з урахуванням додаткового нагріву від втрат тертя кочення.

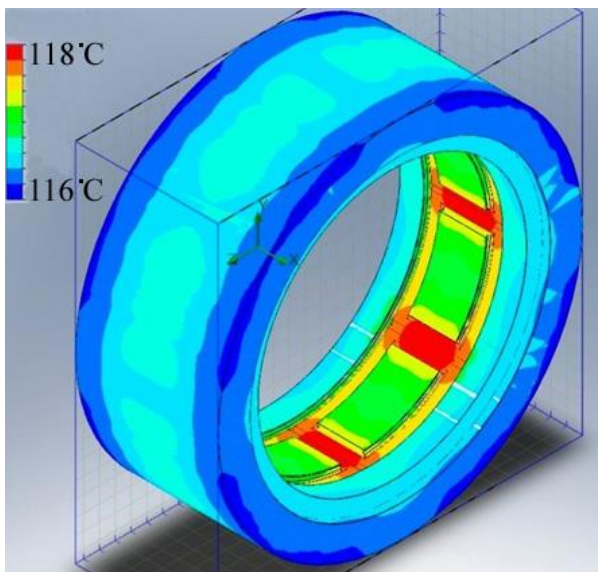


Рисунок 14 – Розподіл температурного поля в ДРК

В четвертому розділі наведені експериментальні дослідження з нагріву ДРК і конструкторські розробки ДРК.

До теперішнього часу осердя статора і ротора ДРК виготовлялися тільки у вигляді пакетів, набраних з листів електротехнічної сталі. У ряді конструкцій успішно застосовувалися ротори, які виготовленні з конструкційних сталей.

Відзначалося, що при роботі двигуна в режимах $S3$ і $S4$ доцільно застосовувати сталь Ст3сп. Це

пояснюється тим, що приводи з ДРК, мають короткий час роботи.

Для проведення експериментів, ресурсних випробувань спроектовано, запатентовано і виготовлено навантажувальний пристрій, що дозволяє проводити експерименти при частоті обертання менше 1 об/хв . Проведення ресурсних випробувань відбувалося за складеною програмою випробувань, згідно з якою забезпечувалась частота включення ДРК рівна 630 включень на годину, $\text{ПВ} = 50\%$ і забезпечувалось навантаження на валу $0,7M_N$.

В результаті випробувань зроблено більш ніж 100 тисяч робочих циклів, причому кількість безперервних циклів склала 2500 .

Ще одним контрольованим параметром при ресурсних випробуваннях є частота обертання, контроль якої здійснювався кожні 10 тисяч циклів. Після закінчення ресурсних випробувань, частота обертання склала 0,21 об/хв, що відповідає збільшенню частоти обертання до ресурсних випробувань на 4,8 %. Це відповідає технології зміцнення сталей – накатка або нагартування. Таким чином, можна стверджувати, що різниця діаметрів практично не змінилася (зміна знаходиться в межах інженерних похибок), і як наслідок, осердя ротора і статора не зазнали пластичної деформації

Вимірювання температури проводилося за допомогою термопари, вимірювальний спай якої був поміщений в місце зіткнення обмоток двох сусідніх полюсів. Початкова температура склала 25 °С. Наведено криві нагріву ДРК відкритого (рис. 15) і захищеного (рис. 16) виконання при тривалому та повторно-короткочасному режимах роботи з ПВ = 15 % і ПВ = 60 %. Суцільною лінією показані експериментальні дані знятої температури, а пунктирною лінією – розраховані за допомогою програми Simulink, що входить до складу пакету MATLAB.

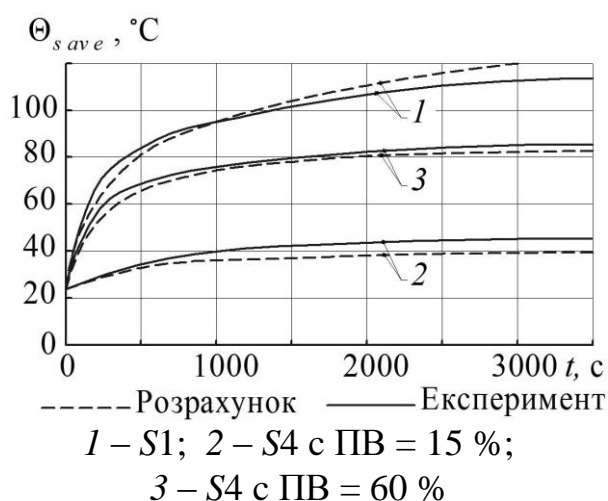


Рисунок 15 – Порівняння експерименту з аналітичним моделюванням ДРК відкритого виконання

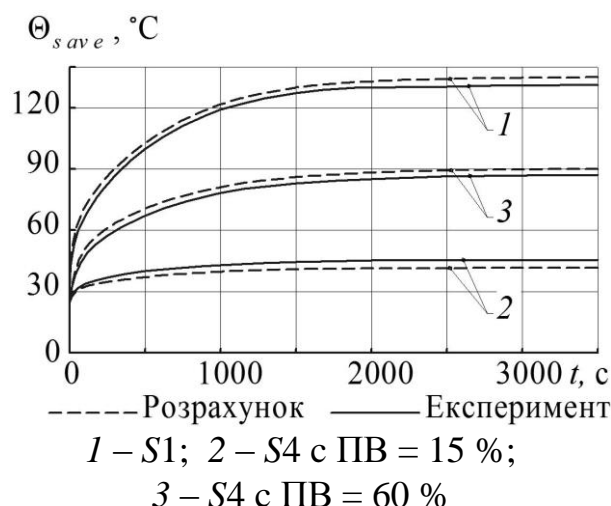


Рисунок 16 – Порівняння експерименту з аналітичним моделюванням ДРК захищеного виконання

Для підтвердження рівня достовірності проведених лабораторних випробувань були проведені випробування в сертифікованому випробувальному центрі АТ СКБ «Укрелектромаш». Випробування були проведені по взаємоузгодженій програмі.

Здобувач взяв участь в розробці, проектуванні, розрахунку різних конструктивних виконань двигунів з ротором, що котиться. Всього було спроектовано та виготовлено 5 діючих зразків двигунів. З яких два зразки – ДРК з внутрішнім розташуванням ротора, один – ДРК із зовнішнім розташуванням ротора, два – ДРК з дисковим ротором. Деякі конструкції виготовлених ДРК були впроваджені у виробництво про що свідчать отримані акти про впровадження.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача аналізу і моделювання теплових процесів в ДРК з урахуванням впливу сили однобічного магнітного тяжіння та сил тертя у вузлі торкання осердь статора і ротора з використанням тривимірної моделювання. Вирішення цього завдання дозволило створити зразок ДРК, відповідний вимогам зазначених в ГОСТ 7192 для механізмів електричних однообертових.

Основні наукові та практичні висновки:

1. В ході аналізу існуючих конструктивних виконань і методів теплового розрахунку двигуна з ротором, що котиться, запропонована масивна Ш-подібна конструкція магнітопроводу, та виявлено, що тепловий стан ДРК оцінювався без урахування особливостей електромеханічної редукації швидкості.

2. Проведено дослідження складових втрат потужності в двигуні з ротором, що котиться, серед яких значний вплив на ККД мають механічні втрати потужності, що виникають в результаті безпосереднього контакту осердь статора і ротора. Отримана тривимірна картина деформацій цих осердь, від дії СОМТ. Це дозволило вірно, розрахувати коефіцієнти тертя кочення і визначити величину механічних втрат в двигуні.

3. Визначено матеріали, які можуть бути використані як осердя в двигуні з ротором, що котиться, за умови, що він працює від джерела постійного струму або від комутуючого керуючого пристрою, який живить обмотку статора дискретними уніполярними імпульсами частотою 0,5–5 Гц – це сталь СтЗсп, Сталь 20, Сталь 40Х і Сталь 45. Проведено тривимірне моделювання механічних напружень в ДРК із застосуванням цих марок сталей і зроблено однозначний вибір у бік сталі СтЗсп.

4. Проведено дослідження нагріву активних матеріалів двигуна з ротором, що котиться з урахуванням усіх джерел тепловиділення. Створено еквівалентні теплові схеми заміщення для двигунів з ротором, що котиться відкритого та закритого виконання з урахуванням втрат потужності від тертя кочення в стаціонарному і не стаціонарному режимах роботи. Моделювання нестационарних теплових процесів підтвердило правильність вибору сталі СтЗсп для застосування як магнітопровід.

5. Експериментальні дослідження двигуна з ротором, що котиться підтвердили теоретичні дослідження і показали адекватність запропонованої ЕТС для знаходження температур активних частин двигуна в різних режимах роботи. Отримані результати відрізняються від експериментальних на 5,2 %

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ВАТ Механічний завод «Калязинский» (РФ, Тверська обл, м. Калязін, акт впровадження від 17.01.2014 р.) і в начальний процес кафедри електричних машин НТУ «ХПІ» (акт впровадження від 21.10.2010 р.), а також використані в теоретичних дослідках Магдебурзьким університетом ім. Отто фон Геріке (Німеччина, м. Магдебург, акт впровадження від 12.04.2013 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Егоров А.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. 107–110.

Здобувач запропонував еквівалентну теплову схему двигуна з ротором, що котиться.

2. Егоров А.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. Потоцкий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 55. – С. 84–88.

Здобувач узагальнив результати виконаних випробувань.

3. Егоров А.В. Применение материалов, изготовленных по нанотехнологиям, в электрических машинах / В.В. Наний, А.В. Егоров, А.Г. Мирошниченко, Д.В. Потоцкий, Л.В. Шилкова // Вісник Кременчуцького державного університету. – Кременчук : КДУ, 2010. – №4, ч.2 (63). – С.76–78.

Здобувач провів порівняльний аналіз наноматеріалів з матеріалами використовуваними в електричних машинах.

4. Егоров А.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. Потоцкий, В.Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 4. – С. 49–53.

Здобувач провів порівняльний аналіз нагрівання та охолодження двигуна при різних режимах роботи.

5. Егоров А.В. Выбор оптимального материала для сердечника двигателя с катящимся ротором, с применением численных методов / В.В. Наний, В.Д. Юхимчук, А.В. Егоров, Д.В. Потоцкий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 60. – С. 59–62.

Здобувач запропонував матеріали, які могли б бути використані в якості осердь двигуна.

6. Егоров А.В. Особенности проектирования двигателя с катящимся ротором, с дисковой конструкцией ротора / В.В. Наний, А.В. Егоров, А.Г. Мирошниченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 28. – С. 70–73.

Здобувач розробив конструкцію двигуна з ротором, що котиться, з дисковим ротором.

7. Егоров А.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 створенні тривимірної моделі двигуна з ротором, що котиться.

8. Егоров А.В. Сравнение мотор-редукторов с высокомоментным двигателем для безредукторного электропривода / В.В. Наний, А.В. Егоров // Электрика. – Москва, 2013. – № 3. – С.13–16.

Здобувач провів порівняння двигуна з ротором, що котиться з мотор-редукторами.

9. Пат. 57152 Україна, МПК⁷ G 01 L 3/06. Пристрій для вимірювання обертового моменту електродвигуна. / Юхимчук В. Д., Наний В. В., Мірошниченко А. Г., Масленніков А. М., Дунев О. О., Єгоров А. В.; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – 2011, Бюл. №3.

Здобувач запропонував фрикційні матеріали для елементів пристрою.

10. Пат. 76969 Україна, МПК⁷ F 16 C 3/00. Пристрій для передачі обертового моменту між ексцентрично розташованим ротором та валом. / Юхимчук В. Д., Наний В. В., Мірошниченко А. Г., Масленніков А. М., Дунев О. О., Єгоров А. В.; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – 2013, Бюл. №2.

Здобувач запропонував спрощене виготовлення вузлів пристрою.

11. Пат. 76970 Україна, МПК⁷ F 01 D 25/34. Валоповоротний пристрій турбіни / Юхимчук В. Д., Наний В. В., Мірошниченко А. Г., Масленніков А. М., Дунев О. О., Єгоров А. В.; заявник та власник патенту НТУ «ХПІ». – 2013, Бюл. №2.

Здобувач запропонував один із варіантів використання двигуна з ротором, що котиться.

12. Егоров А.В. Выбор оптимальной марки стали сердечника ДКР, с применением программного комплекса, основанного на методе конечных элементов / А.В. Егоров В.В. Наний, В.Д. Юхимчук, Д.В. Потоцкий // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я – 2013: тр. XIX Міжнар. наук.-практ. конф., 01–03 червня 2011 р. – Харків, НТУ «ХПІ», 2011. – С. 149. *Здобувач провів розрахунки для різних марок сталей.*

13. Егоров А.В. Влияние механических напряжений в ДКР на величину магнитной индукции и вращающего момента / В.В. Наний, А.Г. Мірошниченко 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 провів порівняльний аналіз розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку.

АНОТАЦІЇ

Єгоров А.В. Оцінка теплового стану електродвигуна з ротором, що котиться, при наявності внутрішніх механічних факторів. На правах рукопису.

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

Дисертація присвячена створенню методів теплового розрахунку двигунів з ротором, що котиться. Визначено складові втрат потужності, та методи їх розрахунків, що дозволяє більш точно проводити проектування двигунів з ротором, що котиться. Наведено розрахунки втрат тертя кочення, їх залежність від матеріалу, різниці діаметрів осердь статора і ротора, а також кута навантаження. Розроблено еквівалентні теплові схеми заміщення двигунів з ротором, що котиться, відкритого та захищеного виконання. Створені тривимірні моделі пружних деформацій осердь статора і ротора від дії сили однобічного магнітного тяжіння і проведено моделювання стаціонарного нагріву. Проведено експериментальні дослідження з нагріву двигунів з ротором, що котиться, в різних режимах роботи, отримані результати відрізняються від розрахункових на 10 %. Створено працездатні зразки двигунів з ротором, що котиться, на яких випробувано запропонований метод визначення температури.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, еквівалентна тепла схема заміщення, моделювання, сила однобічного магнітного тяжіння, режими роботи, тертя, втрати потужності.

Егоров А.В. Оценка теплового состояния электродвигателя с катящимся ротором, при наличии внутренних механических факторов. 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, 2014.

Анализ существующих конструкций и методов расчета двигателей с катящимся ротором показал, что аналитических методов расчета температурного поля на данный момент не существует.

Диссертация посвящена созданию методов теплового расчета двигателей с катящимся ротором. Определены составляющие потерь мощности, и методы их расчетов, что позволяет более точно проводить проектирование двигателей с катящимся ротором. Детально рассмотрены причины высокого значения и составляющих механических потерь в двигателе и как следствие низкого значения КПД. Приведены расчеты потерь трения качения, их зависимость от материала, разницы диаметров сердечников статора и ротора, а также угла нагрузки. Созданы трехмерные модели упругих деформаций сердечников статора и ротора от действия силы одностороннего магнитного притяжения, благодаря которым определены размеры площади контакта

сердечников. Определена форма распределения магнитной индукции в воздушном зазоре ДКР. Т.к. в месте контакта, отсутствует воздушный зазор, и силовым линиям магнитного поля не нужно его преодоление, то этот факт необходимо учитывать при расчете величины магнитной индукции по всей длине воздушного зазора, что приведет в конечном итоге к более точному расчету момента.

Разработаны эквивалентные тепловые схемы замещения двигателя с катящимся ротором, открытого и защищенного исполнения, для стационарного и не стационарного режимов работы, которые были реализованы в приложении Simulink программы MATLAB. Проанализированы материалы возможные для применения в качестве сердечников статора и ротора ДКР и сделан однозначный выбор в сторону стали марки СтЗсп.

Проведены экспериментальные исследования по нагреву двигателя с катящимся ротором в разных режимах работы, полученные результаты отличаются от расчетных на 10 %.

Созданы работоспособные образцы двигателей с катящимся ротором, на которых опробован предложенный метод определения температуры. Проведены ресурсные испытания, которые подтвердили работоспособность двигателя и неизменность номинальных данных за весь период испытаний.


Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, эквивалентная тепловая схема замещения, моделирование, сила одностороннего магнитного притяжения, режимы работы, трение, потери мощности.

A.V. Egorov. Evaluation of the Thermal State the Electric Motor with a Rolling Rotor with Internal Mechanical Factors. As a manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.01 – electrical machinery and apparatus. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, 2014.

Thesis is devoted to the creation of methods of calculating the thermal motor with rolling rotor. The components of the power loss and their methods of calculation were identified for more accurate conduct design motor with rolling rotor. Rolling friction losses and their dependence of the material, the difference in diameters of the stator and rotor cores and load angle are given in the thesis. Thermal equivalent circuits motors with a rolling rotor were developed for open and closed execution. A three-dimensional model of elastic deformation stator's and rotor's core was created for the unilateral action of the force magnetic attraction and was modeled for the stationary heat. Experimental investigations of the heat motor with a rolling rotor in different modes of operation are showed differ from the calculated results at 10%. Workable samples of motor with a rolling rotor were created and proposed method of determining the temperature was tested on them.

Key words: motor with a rolling rotor, equivalent thermal equivalent circuit, modeling, unilateral force of magnetic attraction, modes of operation, the friction, power loss.



Підписано до друку 25.12.2014 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman Cyr. Віддруковано на різнографі
Ум. друк. арк. 0,9.
Зам. №670/14. Тираж 100 прим. Ціна договірна

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.
Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua

Свідотство Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04.2002 р.