

О. О. ДУНЄВ, А. В. ЄГОРОВ, А. М. МАСЛЕННИКОВ, В. Д. ЮХИМЧУК

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЕЛИЧИННИ ОБЕРТОВОГО МОМЕНТУ ТРИЗУБЦЕВОГО ДВИГУНА З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ, ВІД АКТИВНОЇ ДОВЖИНИ ЙОГО РОТОРА

Представлена 3D модель високомоментного тихохідного тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, з аксіальним магнітним потоком в роторі. Показано результати чисельно-польового розрахунку в програмі ANSYS Maxwell чотирьох конструктивних виконань, які відрізняються довжиною активної частини осердя ротора і матеріалами з яких виготовлені катки на статорі. Отримано розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку, а також значення обертового моменту для кожного виконання.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, тривимірний модель, тризубцевий, магнітний потік, чисельно-польовий розрахунок, обертовий момент.

Представлена 3D модель високомоментного тихохідного трехзубцевого двигателя с катящимся ротором с аксиальным магнитным потоком в роторе. Показаны результаты численно-полевого расчета в программе ANSYS Maxwell четырех конструктивных исполнений, отличающихся длиной активной части сердечника ротора и материалами из которых изготовлены катки на статоре. Получено распределение величины магнитной индукции в воздушном зазоре, а также значение вращающего момента для каждого исполнения.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, трехмерная модель, трехзубцовый, магнитный поток, численно-полевой расчет, вращающий момент.

Purpose. Getting the dependence of three-tooth motor with a rolling rotor (MRR) torque value from the active length of its rotor by the calculation of magnetic field distribution in four different construction of the MRR. **Methodology.** Modeling of electro-magnetic processes in ANSYS Maxwell 3D solution, which appeared in MRR with different type of construction and properties of its material. **Results.** The results of numerical and field calculation in the ANSYS Maxwell program of four design versions differing via the length of the rotor core active parts and the materials of the stator are presented. The distributions of the magnetic induction in the air gap were obtained, as well as the value of the torque for each MRR design. Also as a result we made the conclusions, that rotor with a half-length of the rotor has a best result of the torque value and less size of its main parts. **Originality.** MRR is a non-standard machine in which the rotor rolls over the stator surface with guaranteed eccentricity. **Practical value.** A 3D model of a high-torque low-speed MRR with an axial magnetic flux are presented, and the results of its modeling calculation and experimental researches are shown for various type of its construction with different size and material properties.

Keywords: motor with a rolling rotor, three-dimensional model, three-tooth, magnetic flux, numerical-field calculation, torque.

Вступ. Відомо, що редукторні електроприводи в більшості випадків мають двох- і багатоланкову конструкцію, в той час, як двигун з ротором, що котиться, (ДРК) має одноланковий механізм передачі обертового моменту, тобто має дуже низькі обороти і відносно великий обертовий момент порівняно з машинами класичного типу. Тому такий двигун може успішно виконувати роль безредукторного, високомоментного електроприводу лебідок, засувки, поворотних пристроїв, антенних систем і інших пристроїв позиціонування [1].

Коефіцієнт редукції ДРК залежить від різниці діаметрів осердя статора і ротора, що дозволяє досягати величин коефіцієнта редукції від 100 до 5000 при незмінній кількості пар полюсів і зубців статора при будь-якому габариті. Таким чином, двигун з ротором, що котиться, є найбільш тихохідною електричною машиною [2].

Двигун з ротором, що котиться, являє собою різновид синхронних тихохідних електричних машин (0,1–30 об/хв), принцип дії якого, ґрунтується на обкатуванні ротором поверхні статора під дією сили одностороннього магнітного тяжіння (СОМТ). Ця сила створюється обмоткою статора і залежить від способу живлення котушок обмотки статора і нерівномірного повітряного проміжку, створеного ексцентричним положенням ротора в розточці статора.

В роботах [3, 4] розглядаються електромагнітні процеси при живленні ДРК від трифазної системи змінної напруги в поєднанні з трифазною обмоткою на статорі. В такій конструкції обертовий момент і швидкість обертання вала залежить від пропорції головних розмірів його активних частин.

Постановка задачі. Метою роботи є визначення найкращих конструктивно-технологічних рішень при створенні нових конструкцій двигунів з ротором, що котиться, з аксіальним магнітним потоком, а саме визначення активної довжини осердя ротора, при незмінній довжині осердя статора. Визначення даного фактору можливо після проведення чисельно-польового розрахунку, з якого можна отримати значення магнітної індукції в повітряному проміжку, ступені насичення осердя статора і ротора, величини обертового моменту, при незмінній геометрії статора і варіюванні в довжині осердя ротора. Це дозволить побудувати діаграму величини максимального обертового моменту й обрати найкраще конструктивне виконання ротора.

Об'єкт дослідження. Моделювання і дослідження проводились на експериментальному зразку високомоментного тихохідного двигуна з аксіальним магнітним потоком в роторі ДРК-50-3, який розроблено і спроектовано в НТУ «ХПІ» співробітниками кафедри «Електричні машини» (рис. 1). Цей двигун має такі геометричні розміри: висота осі обертання $h = 90$ мм, зовнішній діаметр осердя статора $d_{se} = 130$ мм, внутрішній діаметр осердя статора $d_s = 70$ мм, осьова довжина машини $l = 55$ мм, довжина осердя статора з зубцями $l_z = 20$ мм, довжина катка $l_k = 5$ мм, товщина осердя ротора $h_r = 5$ мм, діаметр осердя ротора $d_r = 69,8$ мм. Статор має кількість полюсів $2p = 1$, таким чином, завдяки коефіцієнту редукції, частота обертання ротора складає $n = 30$ об/хв. Обмотка статора – зосереджена, тобто навколо одного зубця розташована одна котушка.



Рис. 1 – Експериментальна модель ДПК-50-3

Проектування двигунів краще проводити в спеціалізованих програмних комплексах в яких можна виконувати як звичайні кресленики, так і створювати

тривимірні моделі з яких можна зробити кресленики деталей і складаних одиниць. Також потрібна специфікація, яка прив'язується і синхронізується з креслеником. Одним із таких програмних комплексів є програма АСКОН Компас-3D, яка призначена для створення тривимірних асоціативних моделей окремих деталей і складаних одиниць, що містять як оригінальні, так і стандартизовані конструктивні елементи [5, 6]. Позитивною рисою АСКОН Компас-3D є можливість збереження тривимірної моделі з розширенням *.SAT (Standard ACIS Text), що застосовується для обміну 3D-даними між різними програмами САПР.

В цьому програмному середовищі створено тривимірну модель тризубцевого ДПК з аксіальним магнітним потоком в роторі, що показано на рис. 2.

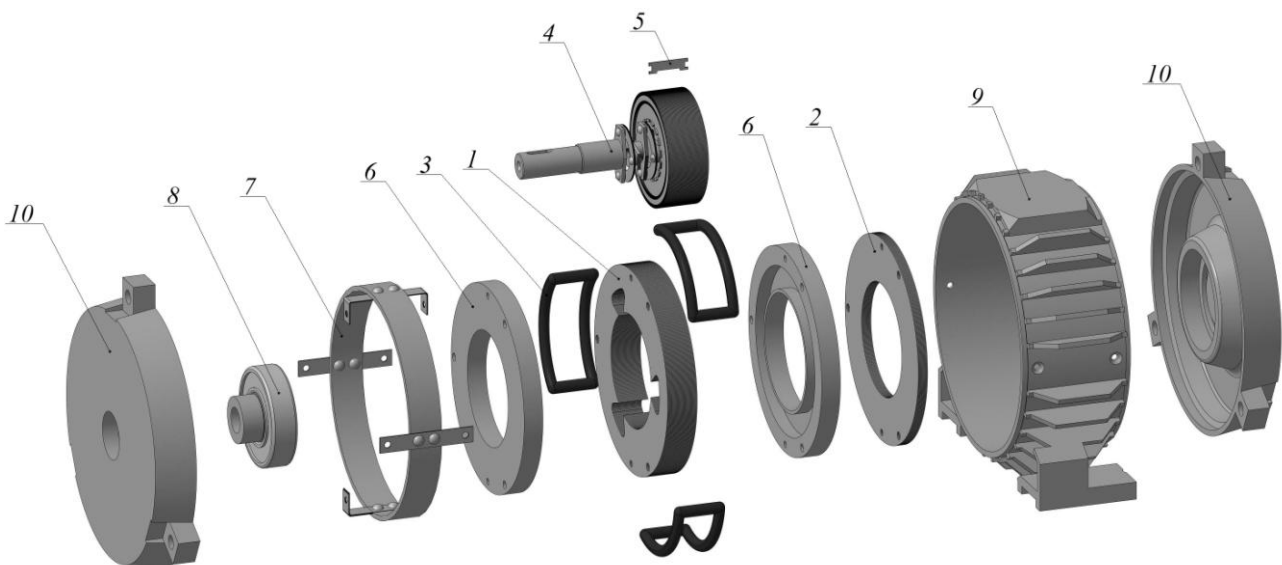


Рис. 2 – Рознесена 3D модель ДПК-50-3:

1 – центральний пакет осердя статора; 2 – боковий пакет осердя статора (каток); 3 – котушка обмотки статора; 4 – ротор; 5 – лист осердя ротора; 6 – захисна манжета; 7 – підвіс осердя статора; 8 – підшипник; 9 – станина; 10 – підшипниковий щит

Особливості тризубцевих ДПК. Розглянемо особливості тризубцевих ДПК, а також проаналізуємо фізику процесів, що є загальною для всіх ДПК з пульсуючим полем, яка найпростіше пояснюється на прикладі найпростішої електромагнітної системи, що показана на рис. 3. Вона складається зі статора з трьома полюсами (зубцями) і циліндричного ротора без обмотки. На полюсах статора, розташованих на 120° , розміщено три котушки обмотки, які підключено до джерела з симетричною трифазною напругою.

У подібній електромагнітній системі тризубцевих ДПК створюються три взаємодіючих пульсуючих магнітних потоки, що замикаються через ротор.

Така модель базується на тризубцевій магнітній системі з тангенціальним або аксіальним магнітним потоком в осерді ротора. Обмотка статора складається з трьох однакових котушок, що можуть з'єднуватися в трикутник або зірку. У кожному з трьох пазів статора розташовано котушки двох фаз.

Реверсування тризубцевих ДПК здійснюється як і у звичайних трифазних електродвигунах – переми-

канням двох фаз живлення.

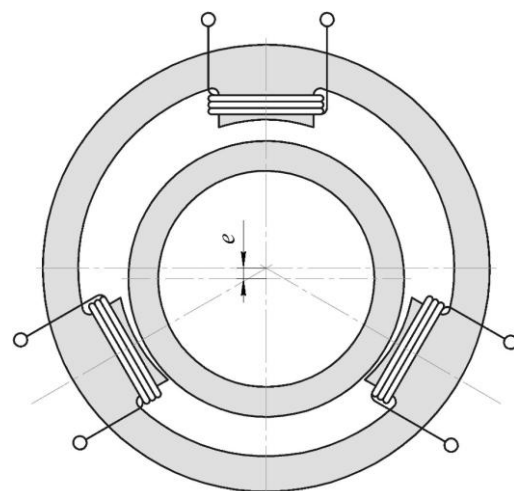


Рис. 3 – Ескіз електромагнітної системи тризубцевого ДПК

Створення оптимальної конструкції ДРК залежить від багатьох факторів, одним з яких є кількість зубців статора. Тому поряд з багатозубцевими ДРК необхідно розглянути конструкції з малим числом зубців. Електромагнітні системи ДРК з малим числом зубців можуть виконуватися з тангенціальним і аксіальним магнітним потоком в роторі [7].

Тризубцеві ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі. Електромагнітні системи тризубцевих ДРК з тангенціальним магнітним потоком (рис. 4) прості за конструкцією і складаються з осердя з зубцями 1, на яких розташовані котушки обмотки 2 (має всього три котушки) і ротора 3.

Однак дана конструкція має істотні недоліки:

- значний зовнішній діаметр двигуна по відношенню до діаметру розточки її поверхні обкатування;
- відносно велику масу сталі осердь;
- відносно великі магнітні втрати, що особливо проявляється в двигунах підвищеної частоти.

Найбільш істотним недоліком двигунів з такими системами є те, що їх ротори працюють в «жорсткому» режимі з усіма притаманними таким режимом недоліками.

На рис. 4 тонкими лініями зі стрілками показаний шлях замикання магнітного потоку, а хрестиками та точками напрям протікання струму.

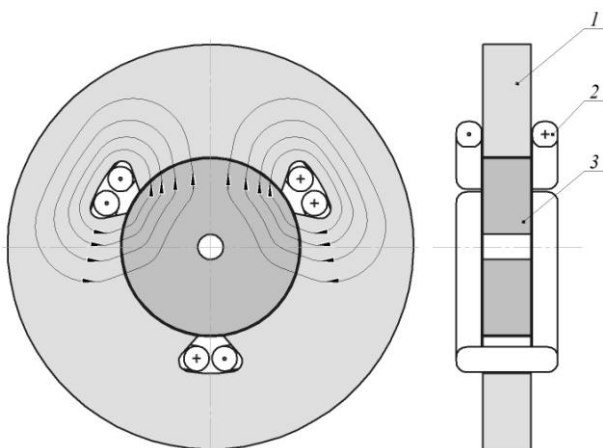


Рис. 4 – Електромагнітна система тризубцевого ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі:
1 – осердя статора; 2 – котушка; 3 – ротор

Тризубцеві ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі. Одним із шляхів усунення недоліків, властивих тризубцевим ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі, є створення конструкції, в якій магнітний потік в роторі направляє аксіально.

Статор тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі значно складніший і складається з трьох осердь (рис. 5): середнього 1 з зубцями, на яких розташовані котушки обмотки 2, і двох кільцевих осердь (катків) 3 без зубців і обмоток, розташованих по обидві сторони осердя 1. Ротор 4 – шихтований, його пластини розташовані у напрямку магнітного потоку, тобто аксіально.

Незважаючи на те, що в такій системі кількість повітряних проміжків на шляху потоку подвоюється, це не погіршує основних характеристик двигуна, так

як всі проміжки є робочими, які беруть участь у створенні СОМТ ротора до статора.

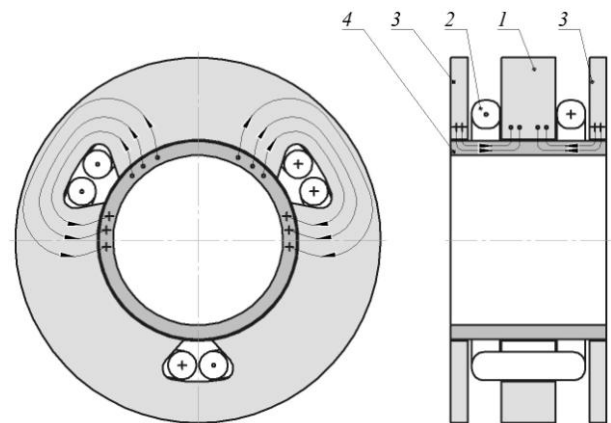


Рис. 5 – Ескіз електромагнітної системи тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі:
1 – осердя статора; 2 – котушка; 3 – каток; 4 – ротор

На рис. 5 тонкими лініями зі стрілками, хрестиками та точками показаний шлях замикання магнітного потоку, аксіальне розщеплення якого дозволяє зменшити товщину ротора, внаслідок чого діаметр двигуна також зменшується.

Основною перевагою тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі є створення гнучкого шихтованого ротора для двигунів практично будь-якого габариту.

Вихідні дані для моделювання. Дослідження та аналіз магнітних систем тризубцевих ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі з метою збільшення обертового моменту при збереженні габаритних розмірів, дозволяє визначити кращі конструктивні виконання, які є найбільш ефективними при перетворенні енергії.

Величина обертового моменту тризубцевого ДРК залежить від розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку B_δ і геометричних розмірів самого двигуна [8]

$$M = \frac{B_\delta^2 \cdot S \cdot d_r}{2 \cdot \mu_0},$$

де S – площа контакту осердь статора і ротора;

μ_0 – магнітна постійна.

Проаналізувавши конструкції тризубцевих ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі можна виділити чотири конструктивних виконання, які відрізняються довжиною активної частини осердя ротора і матеріалами з яких виготовлені катки на статорі [9]:

I) активна довжина осердя ротора дорівнює довжині всієї машини (рис. 6, а);

II) активна довжина осердя ротора дорівнює 2/3 довжини машини (рис. 6, б);

III) активна довжина осердя ротора дорівнює половині довжини машини (рис. 6, в);

IV) активна довжина осердя ротора дорівнює довжині осердя статора з зубцями (рис. 6, г).

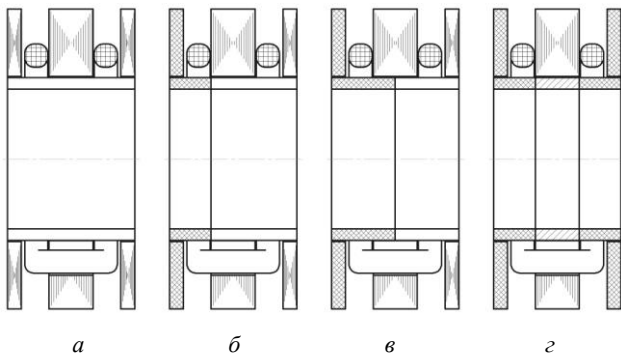


Рис. 6 – Поздовжній переріз тризубцевого ДРК:
 а – конструктивне виконання «I»; б – конструктивне виконання «II»; в – конструктивне виконання «III»;
 г – конструктивне виконання «IV»

Прийемо дану класифікацію «I», «II», «III», «IV» для подальшого розгляду та аналізу.

Конструктивне виконання «I». Класичне конструктивне виконання тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі складається з осердя статора з зубцями і системи обкатування, яка рознесена одна відносно іншої. Обмотка статора виконана у вигляді котушок, які розташовано в пазах осердя статора з зубцями. Осердя статора з зубцями, система обкатування та осердя ротора виконуються шихтованими з електротехнічної сталі. Різниця між ними полягає в напрямку шихтування: пакети статора мають осьовий напрям, а осердя ротора – радіальний, як у колекторів машин постійного струму. Ескіз даної моделі приведено на рис. 6, а.

Конструктивне виконання «II». Зменшення активної довжини осердя ротора призводить до не участі одного з катків статора у замиканні магнітного потоку, тому його можна виключити з електромагнітного розрахунку, а сам каток виконати з немагнітного фрикційного матеріалу. Другий каток, як і осердя статора з зубцями, все так само, виконується шихтованим з електротехнічної сталі (рис. 6, б). Осердя ротора виконується комбінованим з магнітного і немагнітного матеріалів. Активна довжина осердя ротора при цьому буде дорівнювати сумі довжин осердя статора з зубцями, товщині котушки та довжині одного катка.

Конструктивне виконання «III». Наступний варіант конструктивного виконання двигуна подібний

до попереднього, але відрізняється зменшенням активної довжини осердя ротора до половини довжини осердя статора. Один з катків на статорі виконано з немагнітного матеріалу, а інший з електротехнічної сталі. Осердя ротора все також виконується комбінованим з магнітного і немагнітного матеріалів. (рис. 6, в).

Конструктивне виконання «IV». Останнім виконанням є модель у котрій осердя статора виконано шихтованим з електротехнічної сталі, система обкатування складається з двох катків, які виконано з немагнітного фрикційного матеріалу, а осердя ротора комбіноване: середня його частина з магнітного матеріалу, а бокові – немагнітні (рис. 6, г). Таким чином магнітний потік замикається тільки по осердям статора з зубцями і ротора, що являє собою модель тризубцевого ДРК з тангенціальним магнітним потоком в роторі.

Результати моделювання. Для можливості порівняння результатів, що будуть отримані, кожне з конструктивних виконань має однакові геометричні розміри статора і ротора, а відрізняється лише активною довжиною осердя ротора. Розміри котушок та значення їх магніторушійних сил для кожного з варіантів також приймаються однаковими і складає 420 А для кожної котушки.

Для оцінки впливу активної довжини осердя ротора на величину обертового моменту проведено чисельно-польовий розрахунок магнітного поля тризубцевих ДРК на тривимірних моделях для кожного з чотирьох конструктивних виконань, які виконано в програмі АСКОН Компас-3D.

Для моделювання електромагнітних процесів в електричних машинах найбільшу популярність отримала програма ANSYS Maxwell завдяки простоті інтерфейсу і адекватності результатів розрахунку, одержуваних в наслідок моделювання. Особливістю пакету Ansys Maxwell, в порівнянні з аналогічними програмами, є можливість проводити моделювання на тривимірних моделях, що дозволяє врахувати конструктивні особливості кожної машини [10].

Після проведення електромагнітного розрахунку кожного конструктивного виконання з різною активною довжиною осердя ротора в програмі Ansys Maxwell отримано розподіл значень магнітної індукції в кожній точці тривимірної моделі і показано на рис. 7.

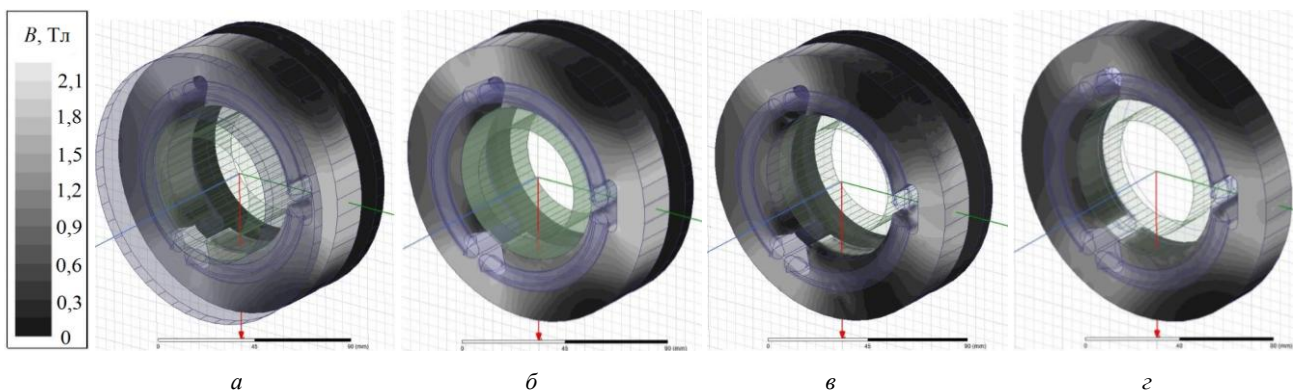


Рис. 7 – Ступінь насичення осердя статора тризубцевого ДРК:
 а – конструктивне виконання «I»; б – конструктивне виконання «II»;
 в – конструктивне виконання «III»; г – конструктивне виконання «IV»

Програма Ansys Maxwell дозволяє отримати не тільки розподіл значень магнітної індукції в кожній точці тривимірної моделі, але і розрахувати значення обертового моменту. Це є позитивною рисою даної програми, оскільки при аналітичному розрахунку обертового моменту урахування матеріалів, сил одностороннього магнітного тяжіння, інерції ротора є непростою задачею.

В результаті моделювання отримано розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку (рис. 8), а також значення максимального обертового моменту (рис. 9) для кожного з варіантів конструктивного виконання. Результати моделювання зведено до єдиної системи координат для зручності порівняння.

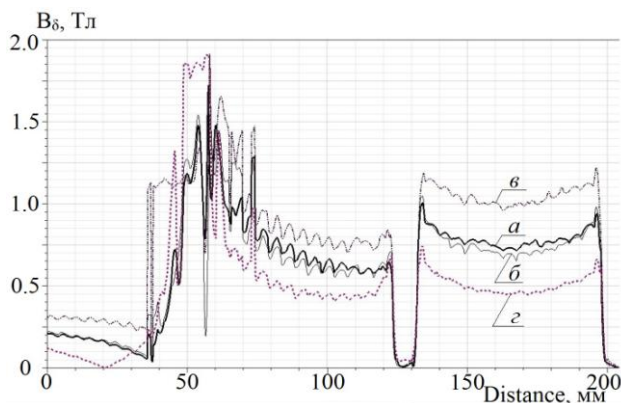


Рис. 8 – Розподіл величини магнітної індукції у повітряному проміжку тризубцевих ДРК: а – конструктивне виконання «I»; б – конструктивне виконання «II»; в – конструктивне виконання «III»; г – конструктивне виконання «IV»

Розглядаючи графіки розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку та ступені насичення магнітопроводів ДРК, можна визначити, що обертовий момент двигуна в високій мірі залежить від площі контакту магнітопроводів поверхонь статора та ротора, та від шляху замикання силових ліній магнітного поля.

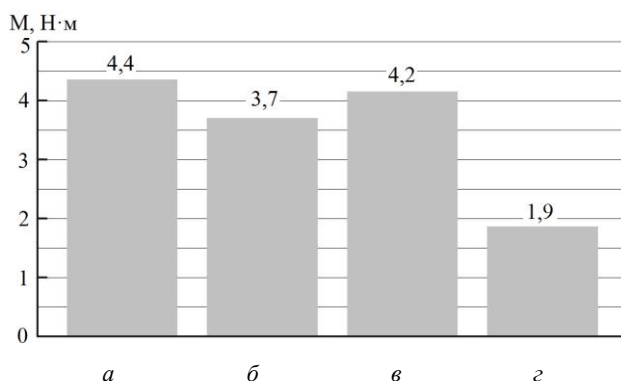


Рис. 9 – Величини обертового моменту тризубцевих ДРК: а – конструктивне виконання «I»; б – конструктивне виконання «II»; в – конструктивне виконання «III»; г – конструктивне виконання «IV»

Класичне конструктивне виконання тризубцевого ДРК «I», що має максимальну активну довжину осердя ротора та два магнітопровідних катка з електротех-

нічної сталі на статорі, має найбільший показник обертового моменту, що складає 4,4 Н·м. Це пов'язано із рівномірним розподілом магнітного поля вздовж шихтованих осердь статора і ротора та їх замиканням без значних втрат через катки із статора до ротора. Це значення приймемо за «одиницю» для можливості порівняння з іншими виконаннями.

Конструкції «II» та «III» виконані із одним магнітопровідним катком, різниця між ними лише у активній довжині осердя ротора. Так у конструкції «II» магнітне поле розподіляється із значним витісненням на поверхню статора і створює обертовий момент, що не перевищує 3,7 Н·м, тобто 0,84 в.о. У конструкції «III», розподіл магнітного поля є більш ефективним та рівномірним, а значення обертового моменту становить 4,2 Н·м (0,95 в.о.), що майже не відрізняється від «класичного» виконання.

У конструктивному виконанні «IV» контактна поверхня найменша і силові лінії магнітного поля замикаються із осердя статора у осердя ротора не вздовж, а поперек осі машини, без допоміжного замикання через катки. Таким чином, сила одностороннього магнітного тяжіння, що обкатує ротор і, як наслідок, обертовий момент – незначні, і складає 1,9 Н·м, тобто 0,43 в.о.

Експериментальне дослідження. Конструкція ДРК-50-3 являє собою конструктивне виконання «III», де активна довжина осердя ротора складає 50% осьової довжини статора. Зняття механічної характеристики відбувалося в лабораторних умовах з підтримкою незмінної трифазної напруги живлення 220 В.

Експеримент почався з режиму неробочого ходу, в ході якого було зафіксовано частоту обертання 30 об/хв, а потім, поступово навантажуючи сам двигун, була знята його механічна характеристика до короткого замикання. Механічна характеристика показана на рис. 10, а крапкою на ній показано результат розрахунку в Ansys Maxwell і, як видно, різниця розрахункового значення максимального обертового моменту на 3% менша за експериментальну.

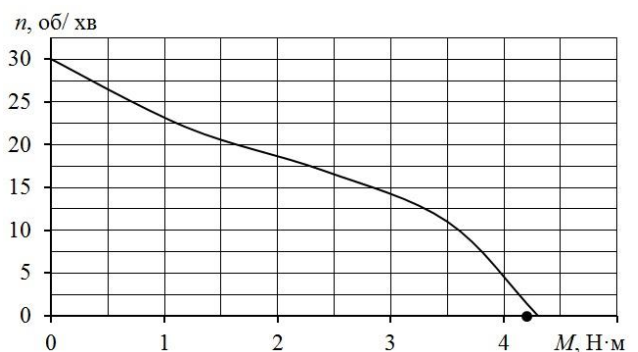


Рис. 10 – Механічна характеристика ДРК-50-3

Слід відзначити, що впродовж всього експерименту постійно фіксувалась температура обмотки статора, і її максимальне значення не перевищило 122 °С. Значення фазного струму в усіх режимах роботи складало 0,72 А, що ще раз підтвердило, що ДРК не «боїться» роботи в режимі короткого замикання на відміну від усіх інших електричних машин.

Висновки.

1. Конструктивне виконання тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі з активною довжиною осердя ротора, що дорівнює половині довжини машини, вважається найбільш вдалою в плані створення максимального обертового моменту. Різниця в значенні корисного обертового моменту, у порівнянні з «класичним» виконанням, складає менше 5%.

2. Дане конструктивне виконання можна робити лише з одним магнітопровідним катком і відмовитися від додаткового немагнітного катка з іншої сторони. Це призведе до покращення масо-габаритних показників, а саме: зменшення осьової довжини машини на 15%, зменшення маси на 10%, економії матеріалів на виготовлення і, як наслідок, до зменшення собівартості машини.

Список літератури

1. Наний В.В. Сравнение мотор-редукторов с высокомоментным двигателем для безредукторного электропривода / В.В. Наний, А.В. Егоров // Электрика – Курск : – 2013. – № 3. – С. 13–17.
2. Бертинов А. И. Электрические машины с катящимся ротором / А. И. Бертинов, В. В. Варлей. – М. : Энергия, 1969. – 200 с.
3. Бертинов А. И. Электромагнитный момент двигателя с катящимся дисковым ротором / А. И. Бертинов // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 32–36.
4. Вплив схеми з'єднання котушок обмотки статора двигуна з ротором, що котиться, на його енергетичні показники / А. В. Єгоров [та ін.] // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 106–113.
5. Ганин Н. Б. Трёхмерное проектирование в КОМПАС-3D / Н. Б. Ганин. – ДМК-Пресс, 2012. – 784 с.
6. Большаков В. П. Твёрдотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков – Питер, 2014. – 304 с.
7. Борзяк Ю. Г. Электродвигатели с катящимся ротором / Ю. Г. Борзяк, М. А. Зайков, В. П. Наний. – К. : Техніка, 1982. – 120 с.
8. Наний В. В. Влияние формы импульса питающего напряжения на вращающий момент двигателя с катящимся ротором / В. В. Наний, А. М. Масленников, А. В. Егоров, А. А. Дунев // Электрика. – 2014. – № 7. – С. 19–21.
9. Дунев О.О. Влияние активной длины осердя ротора на величину обертового момента в двигуні з ротором, що котиться / О.О. Дунев, А.В. Єгоров, А.М. Масленніков // Тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук» : Секція № 4

Електротехніка, 27-28 грудня 2017 р. – Радом, Польща. – 2017. – С. 60–64.

10. Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.

References (transliterated)

1. Naniy V.V., Yehorov A.V. *Sravnienie motor-reduktorov s vyisokomomentnyim dvigatelem dlya bezreduktornogo elektroprivoda* [Comparison of gearmotors with high torque motor for gearless electric drive], *Electrics - Kursk*: – 2013. – № 3. – p. 13–17.
2. Bertinov A. I. *Elektricheskie mashiny s katyashhimsja rotorom* [Electric machines with a rolling rotor], Moscow : Energia Publ., 1969, 200 p.
3. Bertinov A. I. *Elektromagnitnyy moment dvigatelja s katyashhimsja diskovym rotorom* [Electromagnetic moment of the motor with a rolling disk rotor]. *Jelektrichestvo* [Electricity], 1971, no 12, pp. 32–36.
4. Duniev O. O., Yehorov A. V., Masliennikov A. M. *Vliyanie shemy soedineniya katushek obmotki statora dvigatelya s rotorom, katitsya, po ego energeticheskie pokazateli* [Influence of the stator coils scheme connection in the motor with a rolling rotor on its energy performance]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion."* - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - No. 1 (1223). - P. 106-113.
5. Ganin N. B. *Trehmernoe proektirovanie v KOMPAS-3D* [Three-dimensional design in KOMPAS-3D], DMK-Press Publ., 2012, 784 p.
6. Bolshakov V. P. *Tverdotelnoe modelirovanie detaley v CAD-sistemah: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo* [Solid modeling of parts in CAD systems: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo], Piter Publ., 2014, 304 p.
7. Borzyak Y. G. *Jelektrodvigateli s katyashhimsja rotorom* [Electric motors with a rolling rotor], Kyiv, Technics Publ., 1982, 120 p.
8. Naniy V.V., Masliennikov A. M., Yehorov A. V., Duniev O. O. *Vliyanie formy impulsa pitayuschego napryazheniya na vraschayushchiy moment dvigatelya s katyashhimsja rotorom* [Influence of the supply voltage pulse shape the torque of the motor with a rolling rotor] *Electrics*. – 2014. – № 7. – p. 19–21.
9. Duniev O. O., Yehorov A. V., Masliennikov A. M. *Vliyanie aktivnoy dliny serdechnika rotora na velichinu krutyaschego momenta v dvigatele s rotorom, katitsya* [The effect of the active length of the rotor core the amount of torque in the motor with a rolling rotor]. *Abstracts of Intern. scientific and practical. conf. "Modern methods, innovations, and practical application in the field of technical sciences: Section № 4 Electricity, December 27-28, 2017 - Radom, Republic of Poland.* – 2017. – p. 60–64.
10. Ansys Inc. *Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide*, Pittsburgh, 2012, 1006 p.

Надійшло (received) 14.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Залежність величини обертового моменту тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, від активної довжини його ротора / О. О. Дунев, А. В. Єгоров, А. М. Масленніков, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 97–103. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Зависимость величины вращающего момента трехзубцевого двигателя с катящимся ротором, от активной длины его ротора / А. А. Дунев, А. В. Егоров, А. М. Масленников, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 97–103. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

The dependence of three tooth motor with a rolling rotor torque value from the active length of its rotor / O. O. Duniev, A. V. Yehorov, A. M. Masliennikov, V. D. Yuhimchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 97–103. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Дунев Олексій Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com

Дунев Алексей Александрович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com.

Duniev Oleksii Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: duniev.khpi@gmail.com.

Егорев Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Егорев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Yehorov Andrii Volodimirovych – Candidate of Technical Sciences, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: yehorov.andrii@gmail.com.

Масленніков Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Масленников Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Masliennikov Andrii Mikhailovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua.

Юхимчук Володимир Данилович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних машин, тел. (057) 707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.

Юхимчук Владимир Данилович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.

Yuhimchuk Vladimir Danilovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: uhimchuk.vladimir@gmail.com.