

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

ВИСОКОМОМЕНТНИЙ НИЗЬКООБЕРТОВИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН З РОТОРОМ, ЩО КОТИТЬСЯ, ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ІСНУЮЧИМ МОТОР-РЕДУКТОРАМ

Представлені різновиди двигунів з ротором, що котиться, що працюють від мереж змінної та постійної напруги через комутуючий керуючий пристрій, а також приведено їхні технічні показники. Показано рознесені 3D моделі кожного конструктивного виконання створених в програмі АСКОН Компас-3D. Проведено порівняння двигуна ДРК-125 з існуючими мотор-редукторами, показано варіант заміни редукторного електропривода на безредукторний. Представлено переваги та сфери застосування двигунів з ротором, що котиться.

Ключові слова: двигун з ротором, що котиться, тривимірна модель, ексцентриситет, момент, частота обертання, мотор-редуктор, електропривод, надійність, сфери застосування.

Представлены разновидности двигателей с катящимся ротором работающие от сети переменного и постоянного напряжения через коммутирующее управляющее устройство, а также приведены их технические характеристики. Показано разнесенные 3D модели каждого конструктивного исполнения созданных в программе АСКОН Компас-3D. Проведено сравнение двигателя ДРК-125 с существующими мотор-редукторами, показан вариант замены редукторного электропривода на безредукторный. Представлены преимущества и сферы применения двигателей с катящимся ротором.

Ключевые слова: двигатель с катящимся ротором, трехмерная модель, эксцентриситет, момент, частота вращения, мотор-редуктор, электропривод, надежность, сферы применения.

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. Вважалося, що в середині минулого століття всі конструкції електродвигунів були визначені відповідно до застосування в конкретних сферах діяльності людини. Класифікація двигунів здійснювалася по виду напруги живлення (постійне, змінне, імпульсне), за принципом дії, типу конструкції (асинхронні, синхронні або постійного струму) і ряду інших ознак. Двигуни є частиною приводів і виконавчих механізмів [1].

Мотор-редуктор (від лат. Motor – що приводить до руху і лат. Reductor – що веде назад) – агрегат, що поєднує в одному корпусі понижуючий редуктор і високошвидкісний електродвигун. Як елемент електроприводу, він широко застосовується у всіх галузях промисловості. В ролі електродвигуна зазвичай використовують асинхронний короткозамкнений двигун (АД), який є найбільш надійним серед інших типів електричних машин і володіє низькою собівартістю. Вибір такого виду двигуна також обумовлюється його високим коефіцієнтом корисної дії (ККД), який досягає значень 80–90 %, (хоча для двигунів малої потужності він зазвичай дорівнює 55–70 %) [2].

Залежно від типу використовуваної передачі, виділяють планетарні, черв'ячні, циліндричні, хвильові та інші мотор-редуктори. Основою високої довговічності і економічності роботи будь-якого редуктора є, перш за все, працездатність і надійність роботи його зубчастих або черв'ячних передач. У кожного виду передачі і своє значення ККД, яке коливається в межах від 50 до 98 % [3].

Одним з головних елементів систем автоматичного регулювання різних систем управління техноло-

гічним процесом є електропривод, який є поєднанням швидкохідного електродвигуна і понижуючого редуктора. Наявність редуктора вимагає постійного технічного обслуговування, а наявність елементів тертя – призводить до скорочення терміну служби та надійності. Тому заміна редукторного електроприводу на безредукторний, є актуальним завданням. 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, засувок, поворотних пристроїв, антенних систем і інших пристроїв позиціонування.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз різних типів ДРК, які можуть замінити редукторний електропривод, виявлення сфер їх застосування, а також проведення порівняльного аналізу мотор-редукторів з ДРК. Проаналізувати особливості конструкцій та принципи дії ДРК при роботі від мережі змінної та постійної напруги. Виконати порівняння технічних показників ДРК, що працює від комутуючого керуючого пристрою з відомими черв'ячними та планетарними мотор-редукторами.

Загальні відомості та різновиди ДРК. Великий поштовх до створення повноцінної працездатної конструкції електричної машини з ротором, що котиться, було дано в 1944 році радянським вченим А.І. Москвітіним, який запропонував для збільшення

ефекту дії сил одностороннього магнітного тяжіння уніполярне підмагнічування, власне кажучи, створив перший синхронний двигун з ротором, що котиться [4].

Принцип дії двигуна з ротором, що котиться, ґрунтується на обкатуванні ротором внутрішньої поверхні статора під дією сили одностороннього магнітного тяжіння. Ця сила створюється обмоткою статора і залежить від способу живлення котушок обмотки статора і нерівномірного повітряного проміжку, створеного ексцентричним положенням ротора в розточці статора. При цьому момент і швидкість обертання двигуна залежать від головних розмірів його активної частини.

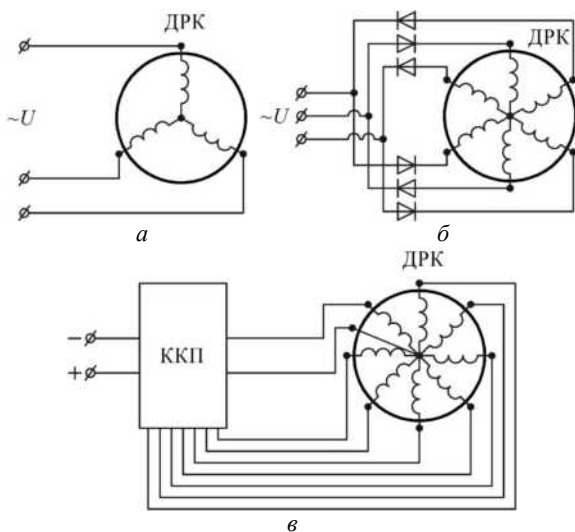
Аналіз патентної інформації і технічної літератури показує велику кількість розроблених конструкцій двигуна з ротором, що котиться, що працюють як на змінному так і на постійному струмі.

В роботі проведено порівняльний аналіз двигуна з ротором, що котиться, з внутрішнім ротором і масивними осердями статора і ротора, що працює від мережі постійного струму через комутуючий керуючий пристрій, який показано на рис. 1, і шихтованими осердями для промислової мережі змінного струму.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд комутуючого керуючого пристрою

Можна виділити три основні схеми живлення обмотки статора ДРК, які обумовлені конкретним призначенням кожного двигуна (рис. 2). Схеми живлення *a* і *б* на рис. 2 призначені в основному для багатообертових ДРК (15–40 об/хв), а схема *в* – для надтихохідних (до 2 об/хв).

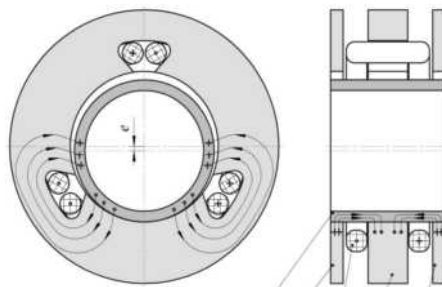


a, б – живлення від трифазної мережі змінного струму;
в – живлення від мережі постійного струму.

Рис. 2 – Схеми живлення ДРК

Найпростіша електромагнітна система тризубцевих ДРК показана на рис. 3 і складається зі статора з

трьох полюсами (зубцями) і циліндричного ротора без обмотки. Особливістю ДРК є те, що ротор ексцентрично розташований в розточці статора. На полюсах статора, зсунутих на 120° , розташовані три котушки обмотки, які підключені до джерела з симетричною трифазною напругою за схемою трикутник або зірка. Вони створюють три взаємодіючих пульсуючих магнітних потоки, що замикаються через ротор. Таким чином магнітний потік в роторі протікає в аксіальному напрямку. Реверсування тризубцевих ДРК здійснюється як і у звичайних трифазних електродвигунах – перемиканням двох фаз живлення [5, 6].



1 – осердя з зубцями; 2 – котушка; 3 – каток; 4 – ротор.

Рис. 3 – Ескіз електромагнітної системи тризубцевого ДРК

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

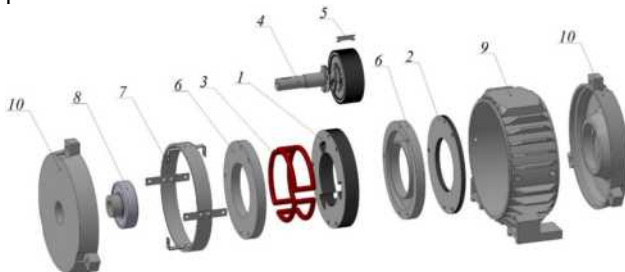
Незважаючи на те, що в такій системі число повітряних проміжків на шляху потоку подвоюється, це не погіршує основних характеристик двигуна, так як всі проміжки є робочими, які беруть участь у створенні сили одностороннього магнітного тяжіння ротора до статора. На рис. 3 тонкими лініями зі стрілками, хрестиками та точками показаний шлях магнітного потоку, аксіальне розщеплення якого дозволяє зменшити товщину ротора, внаслідок чого діаметр двигуна також зменшується.

Співробітники кафедри «Електричні машини» НТУ «ХПІ» впродовж останніх років займаються активним дослідженням ДРК, як змінного так і постійного струму. За цей час відточено методику їх проектування та спроектовано і виготовлено ланку експериментальних зразків високомоментних тихохідних двигунів.

Проектування ДРК проводиться як за аналітичною методикою, так і з використанням тривимірного моделювання його електромагнітних процесів в програмі ANSYS Maxwell. Створення самої тривимірної моделі виконується в програмі АСКОН Компас-3D з подальшою розробкою креслеників деталей і складаних одиниць зі специфікацією [7–9].

ДРК змінного струму. Найпростішою конструкцією є виконання тризубцевого ДРК з аксіальним магнітним потоком в роторі. Таке конструктивне виконання буде мати кількість полюсів $2p = 1$, а обмотка статора – зосереджена, тобто навколо одного зубця розташована одна котушка. Для зменшення втрат по-

тужності від дії токів Фуко осердя статора і ротора виконують шихтованим з листів електротехнічної сталі. При роботі за схемою, що показана на рис. 2, а, ДРК підключається до трифазної мережі змінного струму, а котушки обмотки статора з'єднуються за схемою «зірка» або «трикутник». [10] Конструкція тризубцевого ДРК змінного струму приведена на рис. 4.

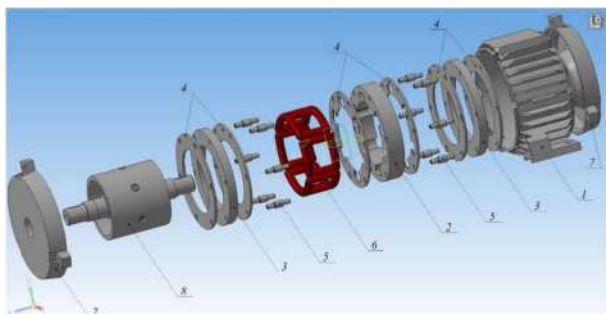


1 – центральний пакет осердя статора; 2 – боковий пакет осердя статора (каток); 3 – котушка обмотки статора; 4 – ротор; 5 – лист осердя ротора; 6 – захисна манжета; 7 – підвіс осердя статора; 8 – підшипник; 9 – станина; 10 – підшипниковий щит.
Рис. 4 – Рознесена 3D модель ДРК-50-3

Іншим варіантом ДРК змінного струму є конструкція з шістьма котушками на статорі, що принципово нічим не відрізняється від тризубцевого варіанту. Для підключення такого ДРК до трифазної системи змінної напруги необхідна наявність шести діодів, які послідовно включені до кожної із котушок за схемою, що показана на рис. 2, б. При цьому, можливо з'єднати котушки тільки за схемою «зірка» [11].

Оскільки зміна напруги відбувається за синусоїдальним законом, то діоди як би зрізають від'ємні напівхвилі в синусоїді. В результаті такої дії діода змінний струм перетворюється в струм пульсуючий, який протікає по котушці ДРК. Чергування полярності підключення діодів до котушок в кожній фазі створить пульсуюче магнітне поле, а ексцентричне положення ротора утворює нерівномірний повітряний проміжок між ротором та статором, що створює необхідні умови для появи СОМТ [12].

Конструкція шестизубцевого ДРК змінного струму приведена на рис. 5.



1 – станина; 2 – центральний пакет осердя; 3 – боковий пакет осердя; 4 – натискна шайба; 5 – втулка; 6 – котушка; 7 – підшипниковий щит; 8 – ротор; 9 – підшипниковий щит.
Рис. 5 – Рознесена 3D модель ДРК-50-6

При виготовленні експериментальних зразків були використані стандартні елементи корпусу асинхронного двигуна, а саме станина та підшипникові щити з підшипниками кочення. Зовнішній вигляд ДРК

змінного струму показано на рис. 6, а їх технічні показники зведено до табл. 1.

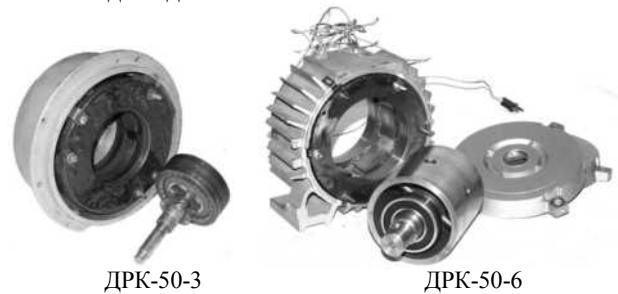


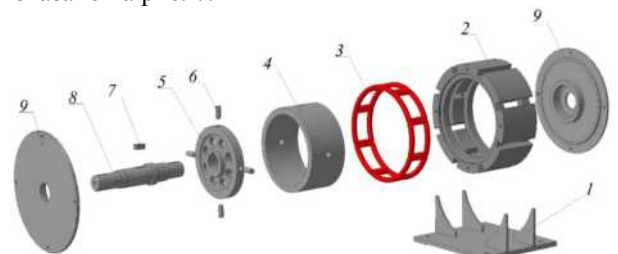
Рис. 6 – Експериментальні зразки ДРК змінного струму

Табл. 1 – Технічні показники ДРК змінного струму

Параметр	ДРК-50-3	ДРК-50-6
Висота осі обертання, мм	90	90
Зовнішній діаметр, мм	130	146
Довжина, мм	55	90
Номінальний момент, Н·м	4,2	14
Частота обертання, об/хв	30	16
Маса, кг	5,1	12,3

ДРК постійного струму. Найбільший інтерес представляє ДРК, що працює від мережі постійного струму через комутуючий керуючий пристрій з імпульсною системою подачі напруги на обмотки статора (рис. 2, в). Розвиток мікропроцесорної техніки і силових електронних ключів дозволяють виготовити блок керування, який дозволить підключитися до мережі постійної або змінної напруги через АС-DC перетворювач.

При роботі ДРК через ККП, частота імпульсів напруги живлення становить одиниці герц ($f = 0,5\text{--}5\text{ Гц}$). Таким чином, для даного варіанту двигуна, магнітні втрати незначні і їх можна віднести до додаткових втрат потужності. Крім цього, з'являється можливість виготовляти осердя статора і ротора масивними і повністю відмовитися від шихтовки. Таке рішення дозволяє використовувати поверхню самих осердь для обкатування і відмовитися від катків, що тим самим зменшує осьову довжину двигуна. ДРК постійного струму має конструктивне виконання, що показано на рис. 7.



1 – опорна плита; 2 – осердя статора; 3 – котушки статора; 4 – осердя ротора; 5 – диск ротора; 6 – палець; 7 – шпонка; 8 – вал; 9 – підшипниковий щит.
Рис. 7 – Рознесена 3D модель ДРК-132

В результаті моделювання і конструкторської проробки виготовлено 7 дослідних зразків ДРК змінного струму різного габариту і потужностей, частина яких представлена на рис. 8, а їх технічні показники

наведені в табл. 2.



Рис. 8 – Експериментальні зразки ДРК постійного струму

Табл. 2 – Технічні показники ДРК постійного струму

Параметр	ДРК-63	ДРК-100	ДРК-125	ДРК-132	ДРК-125М
Висота осі обертання, мм	63	100	125	132	125
Зовнішній діаметр, мм	120	190	230	265	240
Довжина, мм	90	120	100	130	130
Номинальний момент, Н·м	15	55	100	210	80
Частота обертання, об/хв	0,14	0,1	0,18	0,3	0,6
Маса, кг	4,7	11,6	28,1	32,1	17,5

Порівняння ДРК з мотор-редукторами. ДРК має дуже низьку частоту обертання і відносно великий момент порівняно з машинами класичного типу. Тому такий двигун може успішно виконувати роль безредукторного, високомоментного електроприводу лебідок, засувок, поворотних пристроїв, антенних систем і інших пристроїв позиціонування.

Відмінною рисою ДРК є те, що виходячи з принципу дії і особливостей конструкції, досягається редукція частоти обертання вихідного вала в межах 100–2000. Коефіцієнт редукції ДРК залежить від різниці діаметрів осердь статора і ротора, при незмінному числі пар полюсів і зубців статора при будь-якому габариті. З чого можна зробити висновок, що ДРК є найбільш тихохідною електричною машиною. Таким чином, в ДРК поєднуються функції електродвигуна і редуктора. Таке високе значення редукції можуть отримати ще мотор-редуктора з черв'ячною передачею. Це пояснюється тим, що даний тип передачі здатний забезпечити передаточне число від 4 до 80 в одноступеневому виконанні і від 63 до 4000 для двоступеневого виконання.

Залежно від типу використовуваної передачі, відносять планетарні, черв'ячні, циліндричні, хвильові

та інші мотор-редуктори. Основою високої довговічності і економічності роботи будь-якого редуктора є, перш за все, працездатність і надійність роботи його зубчастих або черв'ячних передач. У кожного виду передачі і своє значення ККД, яке коливається в межах 50-98% [13].

Особливістю ДРК є те, що він має одноланковий механізм передачі обертового моменту, в той час як всі інші, редукторні електроприводи – двох- і багатоланкову конструкцію. Порівняння параметрів ДРК з існуючими мотор-редукторами проведено на основі одного двигуна ДРК-125 і зведено до табл. 3.

Табл. 3 – Технічні характеристики електроприводу

Тип електропривода	ДРК-125	5МЧ2Н-63А	МЭО-100/25-0,25	2МРЧ-40/63М	NMRV-030/040	МЦЧ-63М
Номинальний момент, Н·м	100	210	100	120	103	100
Частота обертання, об/хв	0,18	0,19	0,6	1,7	1,9	6
Споживана потужність, Вт	170	180	240	180	60	100
Передаточне число i	240	4000	немає даних	800	750	250
Використовуваний двигун	–	немає даних	ЗДСО Р-135	АИР 63В4	АИР 56В4	АИР 63В4
Кратність пускового струму	1,0	немає даних	немає даних	4,0	5,3	4,0

Як видно з табл. 2, для приводів з відносно однаковим номінальним моментом, частота обертання вихідного вала зворотно пропорційне передаточному відношенню i .

Таким чином, для отримання наднизької частоти обертання, а саме менше 1 об/хв, необхідний двох-, а то і триступеневий черв'ячний мотор-редуктор. Відомо, що зі збільшенням ступенів редукції збільшуються і габарити електропривода, що показано в табл. 3.

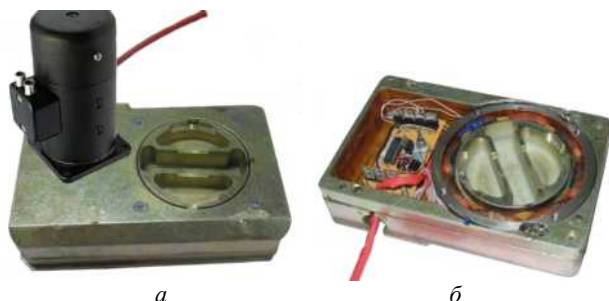
Табл. 4 – Масо-габаритні показники електроприводів

Тип електропривода	Габаритні розміри, Ш×В×Д, мм	Об'єм електропривода, $\times 10^7$ мм ³	Маса електропривода, кг
ДРК-125	240×230×200	1,2	28,1
5МЧ2Н-63А	245×247×520	3,1	25
МЭО-100/25-0,25	465×315×300	4,4	27,5
2МРЧ-40/63М	240×255×540	3,3	26
NMRV 030/040	290×260×510	3,8	28
МЦЧ-63М	310×223×540	3,7	24
МЧ-63М	245×223×560	3,1	30

Із запропонованих електроприводів, найменші габаритні розміри має двигун ДРК-125. Його питомий об'єм в 3 рази менше, а маса не перевищує масу аналогічних приводів. Крім цього, варто відзначити, відсутність кидків пускового струму у ДРК, що дозволяє

йому працювати в повторно короткочасному режимі з частотою 630 увімкнень на годину.

Цікавим варіантом використання ДРК постійного струму є заміна існуючого редукторного електропривода на новий безредукторний. Не завжди електропривод може розташовуватися окремо від об'єкта керування і простір, який він займає, може бути обмежений. В такому випадку доцільно використовувати вбудовані електроприводи. Оскільки ДРК займають менший об'єм ніж редукторний електропривод, то його можна розмістити в корпусі вже існуючого електропривода без високообертового електродвигуна. Для цього в корпусі існуючого редуктора фрезерується по максимуму вільний простір в якому розміщується сам ДРК і комутуючий керуючий пристрій. Таким чином, замість приводного двигуна з редуктором залишається тільки сам корпус редуктора з «начинкою» ДРК постійного струму. Приклад такого розташування показано на рис. 8.



а – редукторний електропривод з ДПС;
б – електропривод з ДРК, що розміщено в корпусі редуктора
Рис. 8 – Заміна редукторного електропривода на безредукторний.

Сфери застосування. ДРК застосовують для систем автоматики в якості безредукторних тихохідних малоінерційних виконавчих двигунів. Для даних систем важлива висока швидкодія, відсутність вибігу та точність позиціонування робочого органу. Використання сучасних низькообертових електродвигунів та мотор-редукторів не завжди відповідають даним вимогам. Використання ДРК постійного струму може стати хорошою альтернативою існуючим електроприводам, оскільки мають низку переваг, що полягають у наступному:

- даний тип двигунів не вимагає унікального обладнання і таким чином може бути виготовлений на будь-якому машинобудівному підприємстві.

- унікальною особливістю є те, що ДРК володіє наднизькою частотою обертання вала, менше 1 об/хв, що неможливо ні для якої іншої електричної машини.

- одночасно з понад низькою частотою обертання, ДРК розвиває відносно високий питомий момент: 6–8 Н·м/кг.

- варто так само відзначити, що в ДРК відсутнє перевищення значення струму в обмотці статора в момент пуску і в режимі короткого замикання. Таким чином ДРК може тривало довго працювати в режимі короткого замикання.

Такі унікальні поєднання частоти обертання і

моменту визначають області застосування ДРК.

1. Альтернатива мотор-редукторам (рис. 9)

Для досягнення частоти обертання менше 1 об/хв в даний момент використовується швидкохідний електродвигун і двоступеневий черв'ячний редуктор або комбінація черв'ячно-планетарний редуктор.



Рис. 9 – Існуючі мотор-редуктори

2. Електропривод засувки (рис. 10)

З'являється можливість автоматизувати систему водо-, газо- подачі від найпростішого увімкнено/вимкнено до точного підрегулювання.



Рис. 10 – Існуючі електроприводи засувки

3. Електропривод систем вентиляції (рис. 11)

Призначені для управління повітряними заслінками в системах вентиляції і кондиціонування. А також використовувати в якості електроприводу протипожежного (протидимного) вентиляційного клапана.



Рис. 11 – Існуючі електроприводи систем вентиляції

4. Електропривод автоматизованих антен та сонячних панелей (рис. 12)

Головні робочі елементи сонячних електростанцій, це фотогальванічні панелі, концентратори сонячної енергії або промислові фокусні дзеркала з парогенераторами. У будь-якому випадку, яким би не був

основний робочий елемент, його потрібно переміщати для забезпечення оптимального кута падіння сонячних променів.



Рис. 12 – Існуючі електроприводи автоматизованих антен та сонячних панелей

Висновки.

1. ДРК постійного струму, що працює через комутуючий керуючий пристрій, має наднизьку частоту обертання вала, що неможливо ні для якої іншої електричної машини.

2. Застосування його як електропривода поліпшить загальний енергетичний показник підприємства за рахунок відсутності пускових струмів та можливості роботи в режимі короткого замикання.

3. ДРК являє собою одноланковий механізм передачі обертового моменту, що безсумнівно має більшу надійність у порівнянні з дво- і багатоланковими конструкціями, що мають мотор-редуктори.

4. При рівних значеннях споживаної потужності і моменту, ДКР має набагато кращі масо-габаритні показники.

Список літератури

- Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
- Афанасьев А. Ю. Моментный электропривод / А. Ю. Афанасьев. – Казань: Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, 1997. – 250 с.
- Бойко Л. С. Редукторы и мотор - редукторы общемашиностроительного применения: Справочник / Л. С. Бойко, А. З. Высоцкий, Э. Н. Галиченко и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 247 с.
- Бертинов А. И. Электрические машины с катящимся ротором / А. И. Бертинов, В. В. Варлей. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
- Бертинов А. И. Электромагнитный момент двигателя с катящимся дисковым ротором / А. И. Бертинов // Электричество. – 1971. – № 12. – С. 32–36.
- Борзяк Ю. Г. Электродвигатели с катящимся ротором / Ю. Г. Борзяк, М. А. Зайков, В. П. Наний. – К.: Техніка, 1982. – 120 с.
- Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide / Ansys Inc. – Pittsburgh, 2012. – 1006 p.
- Ганин Н. Б. Трехмерное проектирование в КОМПАС-3D / Н. Б. Ганин. – ДМК-Пресс, 2012. – 784 с.
- Большаков В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков – Питер, 2014. – 304 с.
- Сгоров А. В. Влияние схемы соединения катушек обмотки статора двигателя с ротором, что катится, на его энергетичні показники / А. В. Сгоров [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.
- Дунев О. О. Залежність величини обертового моменту тризубцевого двигуна з ротором, що котиться, від активної довжини його ротора / О. О. Дунев, А. В. Сгоров, А. М. Масленников, В. Д. Юхимчук // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 97–103.
- Наний В. В. Влияние формы импульса питающего напряжения на вращающий момент двигателя с катящимся ротором / В. В. Наний, А. М. Масленников, А. В. Сгоров, А. А. Дунев // Электрика. – 2014. – № 7. – С. 19–21.
- Наний В. В. Сравнение мотор-редукторов с высокомоментным двигателем для безредукторного электропривода / В. В. Наний, А. В. Сгоров // Электрика – Курск: – 2013. – № 3. – С. 13–17.

References (transliterated)

- Braslavsky I. Ya. *Energoberegayushchiy asinhronniy elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive], Moscow: Academy, 2004, 256 p.
- Afanasyev A. Yu. *Momentniy elektroprivod* [Moment electric drive], Kazan: Kazan publishing house. state those. University, 1997, - 250 p.
- Boyko L. S. *Reduktory i motor - reduktory obshcheshiroitel'nogo primeneniya: Spravochnik* [Gearboxes and motor - gearboxes of general-purpose building application: A Handbook], Moscow: Mashinostroenie, 1984, - 247 p.
- Bertinov A. I. *Elektricheskie mashiny s katyashimsya rotorom* [Electric machines with a rolling rotor], Moscow: Energia Publ., 1969, 200 p.
- Bertinov A. I. *Elektromagnitnyy moment dvigatelya s katyashimsya diskovym rotorom* [Electromagnetic moment of the motor with a rolling disk rotor]. *Jelektrichestvo* [Electricity], 1971, no 12, pp. 32-36.
- Borzyak Y. G. *Jelektrodvigateli s katyashimsya rotorom* [Electric motors with a rolling rotor], Kyiv, Technics Publ., 1982, 120 p.
- Ansys Inc. *Ansys Maxwell 3D v.15 – Electromagnetic and Electro-mechanical Analysis: user's guide*, Pittsburgh, 2012, 1006 p.
- Ganin N. B. *Trehmernoe proektirovaniye v KOMPAS-3D* [Three-dimensional design in KOMPAS-3D], DMK-Press Publ., 2012, 784 p.
- Bolshakov V. P. *Tverdotelnoye modelirovaniye 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.
- A. V. Yehorov, O. O. Duniev, A. M. Masliennikov *Vliyaniye shemyi 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.
- O. O. Duniev, A. V. Yehorov, A. M. Masliennikov *Zalezhnist velichini obertovogo momentu trizubtseвого dviguna z rotorom, scho kotitsya, vld aktivnoyi dozhini yogo rotora* [The magnitude of the wrap-up moment of the trident dvigun with the rotor, scoop up, active of the dovgin of the second rotor]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion."* - Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. - No. 5 (1281). - P. 97-103.
- Naniy V.V. *Vliyaniye formy impulsa pitayuschego napryazheniya na vraschayushchiy moment dvigatelya s katyashimsya rotorom* [Influence of the pulse shape of the supply voltage on the torque of a motor with a rolling rotor], *Elektrika*. - 2014. - № 7. - p. 19–21.
- 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.

Надійшла (received) 11.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Високомоментний низькообертовий електродвигун з ротором, що котиться, як альтернатива існуючим мотор-редукторам / А. В. Єгоров, О. О. Дунєв, А. М. Масленников, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 83-89. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

Высокомоментный низкооборотный электродвигатель с катящимся ротором, как альтернатива существующим мотор-редукторам / А. В. Егоров, А. А. Дунев, А. М. Масленников, В. Д. Юхимчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 83-89. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2409-9295.

High-torque low-speed electric motor with a rolling rotor, as an alternative to existing gear motors / A. V. Yehorov, O. O. Duniev, A. M. Masliennikov, V. D. Yuhimchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 83-89. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єгоров 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.

Егоров 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.

Дунєв 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 Oleksandrovyich – 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.

Масленников 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.