



УДК 621.313.333

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-39

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ

Єгоров О. Б.¹, к. т. н., <http://orcid.org/0000-0003-2599-1624>

Єгорова О. Ю.², к. т. н., <http://orcid.org/0000-0001-8593-1557>

Кунденко М. П.², д. т. н. <http://orcid.org/0000-0002-5841-4367>

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. Бекетова

²Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

E-mail: diaskk67@gmail.com, тел.: (057)712-28-33

Анотація – в роботі розглянуто питання оптимізації проектування асинхронних двигунів. Досліджено шляхи та розроблено рекомендації по створенню енергоефективних двигунів. Отримано конструкцію двигуна зі збільшеною перевантажувальною здатністю і зниженою собівартістю. Модернізація виконана за рахунок застосування нового підходу при формуванні пазової зони ротора, для одержання остаточного варіанта конструкції виконано параметричну оптимізацію.

Ключові слова: асинхронний двигун, геометрія пазів, кратності пускового й максимального моментів, перевантажувальна здатність.

Постановка проблеми. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є сьогодні найбільше часто використовуваними двигунами в сучасних системах електропривода. Вони застосовуються в різних механізмах, пристроях, робота яких пов'язана з важкими режимами пусків, перевантажень, підвищеною температурою, вологістю. Останнім часом проблема оптимального проектування асинхронних двигунів (АД) виходить на передній план. Необхідно, в умовах конкурентної боротьби виробників АД, створювати енергоефективні двигуни, які мають високі енергетичні показники. Для досягнення енергоефективності поряд із застосуванням сучасних матеріалів, збільшенням активних розмірів існує спосіб з відносно невеликими витратами для того щоб одержати збільшення перевантажувальної здатності АД і знизивши при цьому вартість самого двигуна. Мова йде про формування пазової зони ротора, коли для одержання остаточного варіанта конструкції розроблювач виконує параметричну оптимізацію.



Аналіз останніх досліджень. Незважаючи на відносну простоту конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, його теорія викликає безсумнівні складності при проектуванні й аналізі асинхронних машин, оскільки границі зубчастих магнітопроводів роблять завдання дослідження аналітичного розв'язку рівнянь важко здійсненою. Диференціальні рівняння в частинних похідних, якими описується електромагнітне поле в асинхронних двигунах, отримані Максвеллом Д.К. в 1861 році, довгий час не могли бути вирішені математиками й інженерами електриками. Причиною цього були обмежені можливості розрахунків таких рівнянь із одного боку, і неоднозначність формул для розрахунків електромагнітних сил і моментів з іншого [2]. У роботах вітчизняних і закордонних учених виклад теорії електричних машин і, асинхронних зокрема, починалося за допомогою введення допущень ідеалізованої електричної машини [3, 4], що значно спрощувало розрахунки. До основних допущенням ставиться гладкість повітряного зазору, тобто відсутність пазів на роторі й статорі, коли їх вплив на роботу машини враховується за допомогою коефіцієнта повітряного зазору. Провідники обмотки в цьому випадку вважають за рівномірно розподілені струмові шари в повітряному зазорі. Крім цього, ухвалюють допущення, що дія нерівномірності повітряного зазору рівною мірою впливає на всі гармоніки поля в зазорі. Магнітний ланцюг електричної машини приймається або ненасиченим, або його насичення не змінюється в досліджуваних режимах роботи. Використання комп'ютерів і сучасного програмного забезпечення в системах автоматизованого проектування асинхронних машин дозволяє по-новому організувати процес створення нової техніки, коли на виході виявляється можливим відразу одержувати готові креслення. Автоматизовані системи проектування можуть містити у своєму складі підпрограми й блоки для розрахунків електромагнітного поля.

Нові можливості в розрахунках електромагнітного поля асинхронних машин були отримані із застосуванням у розрахунках числового методу кінцевих елементів [1, 5]. Цей метод швидко поширився серед розроблювачів електричних машин. Основною його перевагою є те, що замість безпосереднього розв'язку диференціальних рівнянь електромагнітного поля можна досліджувати енергетичний функціонал на екстремум. Рішення багаторазово спрощується, при цьому точність результату залишається високою. Інакше кажучи, крайова задача безпосереднього інтегрування диференціальних рівнянь у частинних похідних замінюється варіаційною. Варіаційна постановка завдання



при дослідженні енергетичного функціонала дозволяє, по-перше, простіше одержати рішення, а, по-друге, говорити про метод кінцевих елементів як про більш точний метод розрахунків електромагнітних сил і моментів в асинхронних машинах, у порівнянні із традиційними графоаналітичними методами, що базуються на кругових діаграмах і допущеннях ідеалізованої електричної машини. Закордонні й вітчизняні публікації по використанню методу кінцевих елементів підтверджують, що даний чисельний метод знайшов широке використання для розрахунків електричних машин і, зокрема, асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором [1, 4, 5].

Методи, засновані на схемах заміщення, використовуються тільки для попередньої оцінки і важливі як перше наближення до вирішення завдання. Якщо оцінювати існуючі рекомендації із проектування пазів ротора в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором можна зробити наступні висновки:

По-перше, існує велика кількість даних по раціональному числу пазів ротора, перевірених багаторічною практикою виробництва даних виробів. Інакше кажучи, у технічній літературі є чіткі рекомендації з вибору числа пазів ротора і їх конфігурації для будь-якого необхідного випадку.

По-друге, площа всіх пазів ротора повинна бути якнайбільша. Хоча прямої такої вказівки немає, але це впливає із усього ходу викладення розрахункових співвідношень (активний опір ротора негативно позначається на здатності асинхронного двигуна до ефективного електромагнітного перетворення). Це викликає прагнення зменшити еквівалентний опір у короткозамкненої обмотки й підвищити ККД двигуна. Пусковий момент при цьому буде неминуче знижуватися.

По-третє, збільшення початкового пускового моменту, при застосуванні глибоких пазів, дозволяє різкіше виявитися ефекту витиснення струму.

Формулювання цілей статті. Аналіз існуючого аналогу АД, з використанням прогресивних методик проектування та дослідження можливості розробки ефективних змін в конструкції двигуна за рахунок тільки параметрів пазової зони ротора.

Основні матеріали дослідження. У якості базового двигуна (аналога) у роботі було взято АД315М4 з корисною потужністю 132 кВт. Це чотириполюсний електродвигун, що має на статорі 60 пазів, на роторі 50 пазів, матеріал обмотки ротора алюміній, зовнішній діаметр пакета статора 520 мм, пакета ротора - 318 мм.



Проаналізовані рекомендації з вибору числа пазів ротора для чотириполюсних двигунів із числом пазів статора 60 (табл. 1). При цьому враховувалися рекомендації для прямих пазів ротора. Від скосу пазів часто відмовляються, коли потужність електродвигуна перевищує 20 кВт.

Таблиця 1

Рекомендоване число пазів ротора чотириполюсних АД при числі пазів статора 60

Z1=60	Z2	
	Пази без скосу	Пази зі скосом
	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71

Проведений ряд електромагнітних розрахунків за допомогою програми ANSYS Maxwell з різними числами й формами пазів у базовому двигуні 315M4 показав наступне. Базовий електродвигун на роторі має 50 пазів кожний з яких має площу поперечного перерізу 211,4 мм². Загальна площа пазів ротора в цьому випадку рівна 10570 мм². При проведенні дослідження та ряду розрахунків варіантів було визначено кількість пазів ротора - 70, що відповідає рекомендаціям літературних джерел. Енергетичні характеристики електродвигуна з таким ротором не повинні уступати базовому варіанту. Площа кожного з пазів нового ротора суттєво уступає площі паза базового варіанта: вона дорівнює 105,4 мм². Загальна площа пазів модернізованого ротора, дорівнює 7378 мм². Це становить 69 %, від площі пазів базового електродвигуна. Через те, що дана конструкція двигуна найчастіше використовується в складі вугільного комбайна, тому висувається вимога збільшити кратність максимального моменту для збільшення перевантажувальної здатності двигуна. При цьому ставилося завдання зберегти енергетичні параметри асинхронного двигуна й добитися зниження його собівартості. Були проведені електромагнітні розрахунки й визначені основні енергетичні характеристики вихідного двигуна й пропонованого варіанта. Результати розрахунків представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати електромагнітних розрахунків

	P _{НОМ} , кВт	ККД, %	I _{НОМ} , А	cos	M _{НОМ} , Нм	K _{ММ}	K _{МП}	K _{ІП}
Вихідний двигун	132	93,8	136	0,85	852	5,3	2,6	10,3
Модерні-зований двигун	132	93,5	137	0,85	857	7,0	4,5	12,0

Природно, при зниженні сумарної площі пазів ротора відбулося зниження ККД двигуна, але це різниця не перевищує припустиме за ДСТУ відхиленням (-2%), яке пред'являється до таких двигунів. Але при цьому вдалося суттєво підвищити кратність максимального й пускових моментів, що забезпечує високу перевантажувальну здатність двигуна, що модернізується. Аналізуючи причини, які призвели до збільшення перевантажувальної здатності асинхронного двигуна, при збереженні інших його енергетичних параметрів, було визначено, що насичення магнітної системи модернізованого варіанта двигуна в порівнянні з базовим варіантом залишилося в межах припустимих значень (не більш 1,6 Тл) рис. 1, 2.

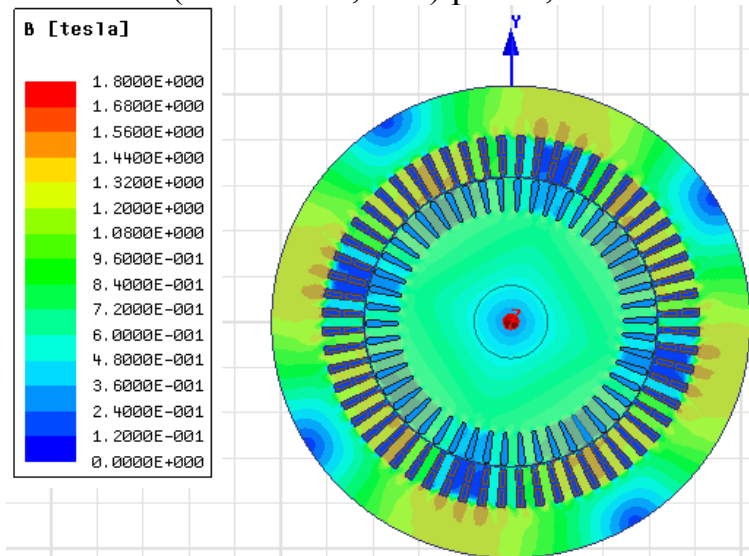


Рис. 1. Рівні магнітної індукції в номінальному режимі базового двигуна

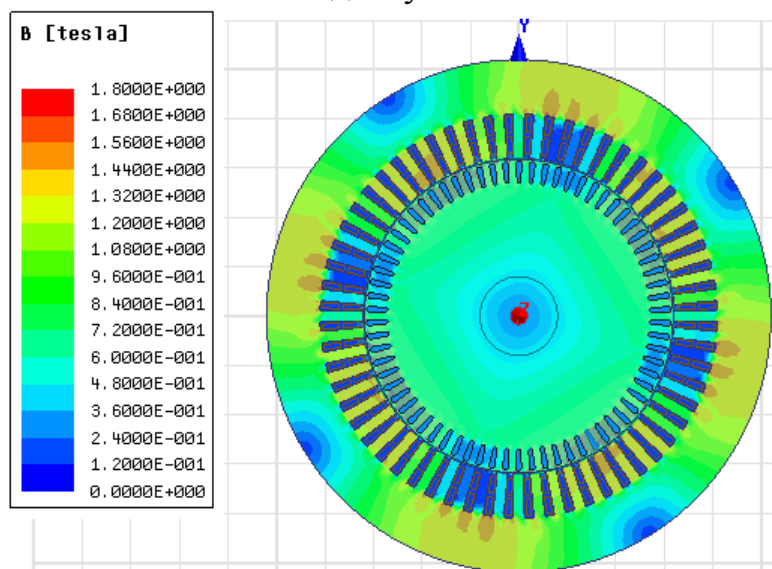


Рис. 2. Рівні магнітної індукції в номінальному режимі двигуна, що модернізується

Крім того, якщо розглянути детальне насичення коронок зубців статора й ротора обох варіантів рис. 3 і 4, видно, що у вихідному варіанті магнітної системи коронки зубців статора й ротора більш насичені в порівнянні із запропонованим модернізованим варіантом. Зниження насичення приводить до зниження втрат у сталі, зменшення перегріву сталі статора й ротора. Це дозволило при зменшенні перетину алюмінієвих стрижнів ротора зберегти значення ККД і коефіцієнта потужності модернізованого двигуна, на рівні базового.

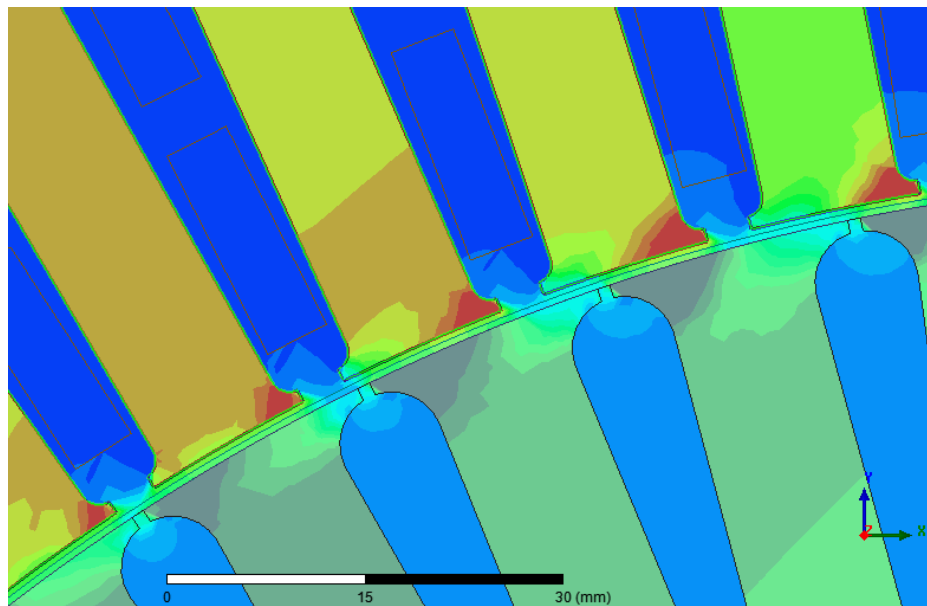


Рис. 3. Рівні магнітної індукції коронок зубців базового двигуна

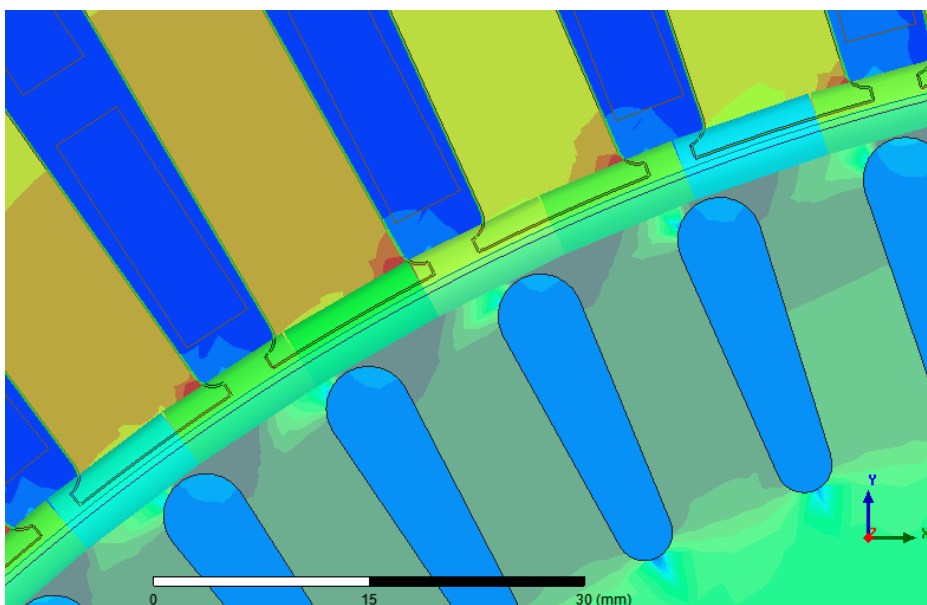


Рис. 4. Рівні магнітної індукції коронок зубців двигуна, що модернізується

Був збільшений активний опір обмотки ротора в трифазному асинхронному двигуні, але замість істотних погіршень енергетичних характеристик (зниження ККД і коефіцієнта потужності, збільшення струму статора) був отриманий двигун з підвищеною перевантажувальною здатністю й збережені ККД, коефіцієнту потужності, номінального струму. Причини досягнутого ефекту полягають у кардинальній зміні кількості і форма пазів ротора, змінили спектральний склад вищих гармонік електромагнітного поля, причому настільки, що такий фактор як активний опір ротора виявився менш значимим при визначенні ефективності електромеханічного перетворення. Крива магнітної індукції в повітряному зазорі базового й двигуна, що модернізується, наведено на рис. 5 і 6 відповідно. З рис. 6 видно, що спектральний склад електромагнітного поля помітно змінився в порівнянні з рис. 5 базового варіанта електродвигуна.

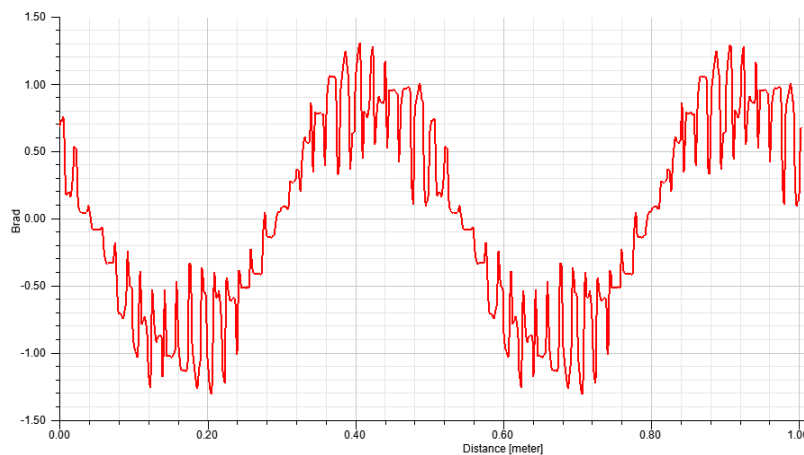


Рис. 5. Розподіл кривої магнітної індукції в повітряному зазорі при номінальному навантаженні базового двигуна

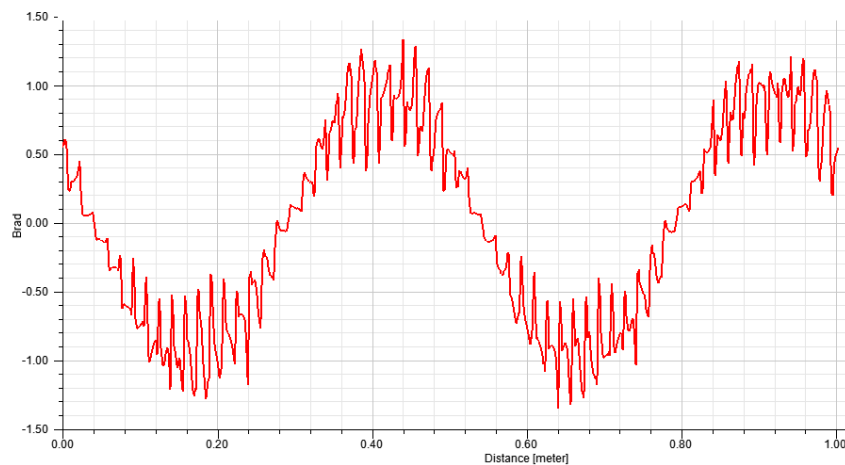


Рис. 6. Розподіл кривої магнітної індукції в повітряному зазорі при номінальному навантаженні двигуна, що модернізується

У програмі ANSYS Maxwell сформовані масиви, які містили по 1000 значень індукції в повітряному зазорі на всій довжині розточення статора. За допомогою спеціально написаної авторами програми в середовищі програмування Mathcad ці масиви оброблялися й виділялися гармонійні складові від першої до вищих гармонік. Були проаналізовані перша й вищі гармонійні складові магнітної індукції в повітряному зазорі обох варіантів асинхронного двигуна.

З рис. 7 і 8 видно, що для базового варіанта форма кривої далека від синусоїди. Для модернізованого варіанта вона практично збігається із синусоїдальною формою. Це говорить про те, що в запропонованому варіанті вдалося знизити негативний вплив третьої гармоніки, тобто її амплітуду. Були розраховані й проаналізовані вищі гармонійні складові, які впливають на характеристики асинхронного двигуна: третя, п'ята, сьома. Результати розрахунку амплітуд цих гармонік представлено в табл. 3.

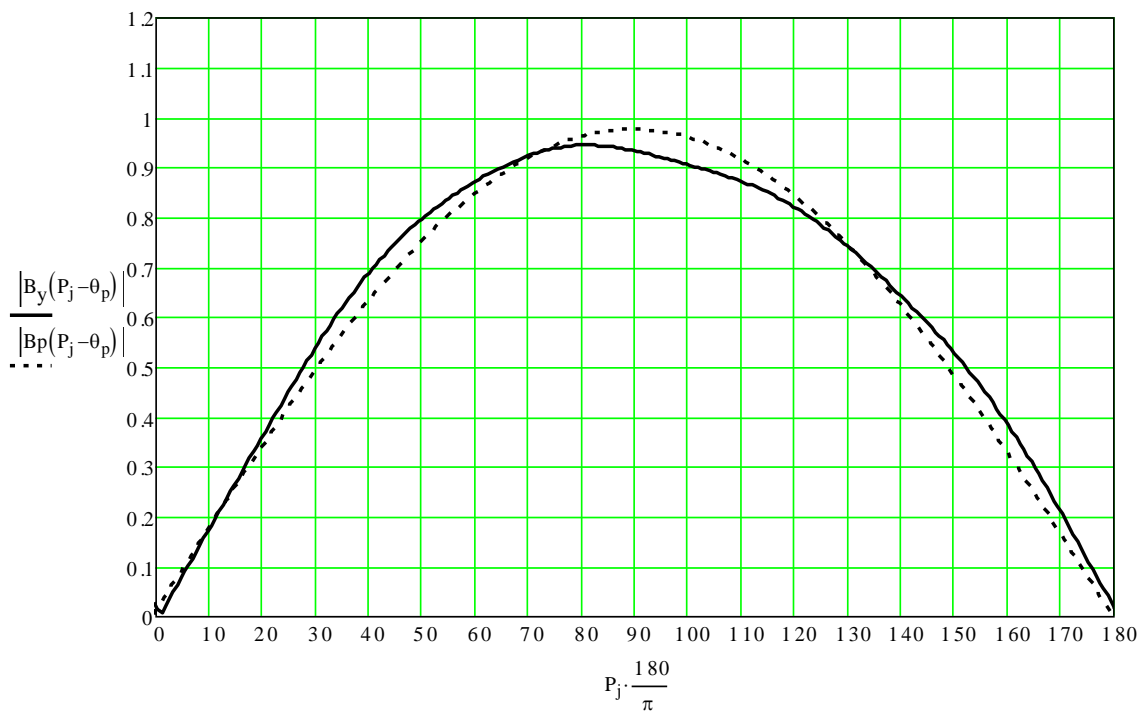


Рис. 7. Форма кривої індукції в повітряному зазорі (суцільна лінія) для базового варіанта двигуна

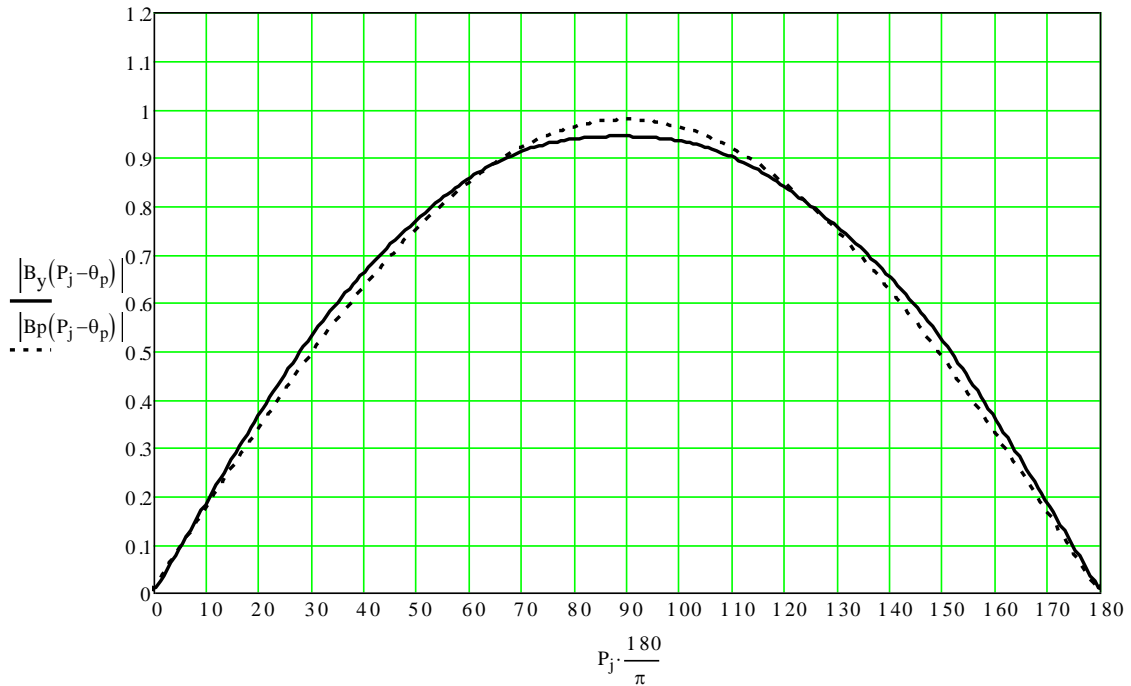


Рис. 8. Форма кривої індукції в повітряному зазорі (суцільна лінія) для модернізованого варіанта двигуна

Таблиця 3

Амплітуда гармонійних складових індукції в зазорі

	1-я гармоніка, Тл	3-я гармоніка, Тл	5-я гармоніка, Тл	7-я гармоніка, Тл
Базовий двигун	0,973	0,051	0,028	0,013
Модернізований двигун	0,976	0,033	0,022	0,012

Проаналізовані зубцеві гармоніки статора базового й модернізованого варіантів асинхронних двигунів (рис. 9 і 10). З рис. 9 і 10 видно, що зубцеві гармоніки двигуна, що модернізується, менші, ніж у базового на 15-18%. Це дозволяє при збільшенні активних втрат у роторі через зменшення перетину стрижнів обмотки в модернізованому двигуні, одержати високі енергетичні характеристики за рахунок зниження втрат у магнітній системі.

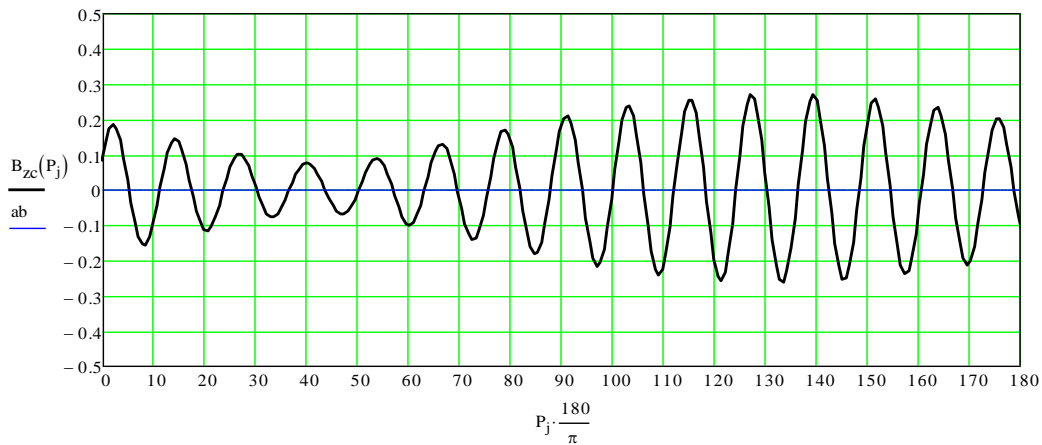


Рис. 9. Зубцеві гармоніки статора для базового варіанта двигуна

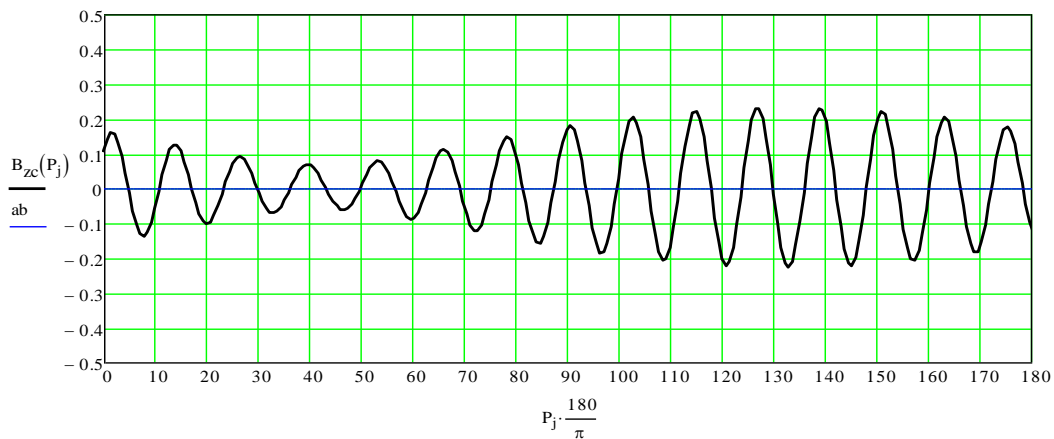


Рис. 10. Зубцеві гармоніки статора для модернізованого варіанта двигуна

Таким чином, очевидним стає наступне твердження. Важливим при проектуванні асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є не тільки співвідношення чисел пазів, але і їх форма паза ротора, відношення висоти паза до ширини, а також площа поперечного перерізу.

Висновки:

1. Обчислювальний експеримент, проведений методом кінцевих елементів, дозволив уточнити раціональну геометрію й число пазів ротора для досягнення мети одержати двигун з більш високою переважувальною здатністю.

2. Показано, що збільшення активного опору обмотки ротора не завжди приводить до зменшення ККД. Це обумовлене зміною гармонійного состава електромагнітного поля в повітряному зазорі асинхронного двигуна, що відбувається при зміні співвідношень геометричних розмірів зубцевої зони.

3. Використовуючи 70 пазів на роторі, замість 50 у базовому варіанті, при незмінних параметрах статора, вдається на 44% заощаджувати масу алюмінію у пазовій частині електродвигуна (8,62 кг у базовому варіанті до 5,97 кг у модернізованому двигуні). При цьому основні характеристики електродвигуна не погіршуються, зростають пусковий момент на 73%, максимальний момент на 32%.

Список використаних джерел

1. *Tikhonova O., Malygin I., Plastun A.* Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by ANSYS Maxwell. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2017. P. 224-226. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076294.
2. *Егорова О. Ю., Егоров А. Б.* К вопросу определения текущего остаточного ресурса изоляции электрических машин. *Технические науки - от теории к практике*. 2013. № 28. С. 126-132.
3. *Егоров О. Б., Бондаренко І. О.* Визначення максимального проміжку часу зниження живлячої напруги асинхронного двигуна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. № 164. С. 81-82.
4. *Yegorov A., Yegorova O.* Analysis of transient processes in an asynchronous motor as part of a complex load. *World science: International Scientific and Practical Conference*. ROST, 2017. Vol. 1, № 10. P. 12-14.
5. *Shaltout A. A.* Analysis of torsional torques in starting of large squirrel cage induction motors. *IEEE transactions on energy conversion*. 1994. Vol. 9, № 1. P. 135-142.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

Егоров А. Б., Егорова О. Ю., Кунденко Н. П.

Аннотация - В работе рассмотрены вопросы оптимизации проектирования асинхронных двигателей. Исследованы пути и разработаны рекомендации по созданию энергоэффективных двигателей. Получено конструкцию двигателя с увеличенной перегрузочной способностью и сниженной себестоимостью. Модернизация выполнена за счет применения нового подхода при формировании пазовой зоны ротора, для получения окончательного варианта конструкции выполнена параметрическая оптимизация.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, геометрия пазов, кратности пускового и максимального моментов, перегрузочная способность.



OPTIMIZATION OF THE BLADE FIELD OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH THE PURPOSE OF IMPROVING YOUR TRANSPORTABILITY

O. Iegorov, O. Iegorova, M. Kundenko

Summary

The induction motors (IM) with short-circuited rotors are today the most commonly used motors in modern electric drive systems. They are used in various mechanisms, devices, the work of which is associated with severe modes of startup, overload, high temperature, humidity. In order to achieve energy efficiency, along with the use of modern materials, an increase in active sizes, there is a method with relatively low costs in order to obtain an increase in reloading ability of blood pressure while reducing the cost of the engine itself. During the research and a number of calculations of the variants, the optimal number of rotor slots was determined. Power characteristics of an electric motor with such a rotor are not inferior to the basic variant. The requirement to increase the multiplicity of the maximum moment to increase the reloading capacity of the engine was performed. At the same time, the task was to preserve the power parameters of the induction motor and achieve a reduction in its cost. Electromagnetic calculations were carried out and the main energy characteristics of the output motor and the proposed variant were determined. The active resistance of the rotor winding in the three-phase induction motor was increased, but instead of significant deterioration of the power characteristics (reduction of efficiency and power factor, increase of stator current), an engine with an increased reloading capacity was obtained and the efficiency, power factor, and nominal current were maintained. The computational experiment carried out by the finite element method allowed to clarify the rational geometry and the number of rotor slots to achieve the task of obtaining an engine with a higher transshipment capacity. It is shown that an increase in the active resistance of the rotor winding does not always lead to a decrease in the efficiency. This is due to the change in the harmonic composition of the electromagnetic field in the air gap of the induction motor, which occurs when the ratio of geometric dimensions of the toothed zone changes.

Keywords: asynchronous motor, geometry of grooves, multiplicity of starting and maximum moments, reloading ability.