

## ТРИФАЗНА ДВОПОЛЮСНА ШАБЛОННА ОДНОШАРОВА ОБМОТКА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

*М. М. Заблодський, доктор наук, професор*

*Р. М. Чуєнко, кандидат наук, доцент*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [roman\\_chuenko@ukr.net](mailto:roman_chuenko@ukr.net)*

**Анотація.** Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором є основою електроприводу робочих машин в промисловості та сільському господарстві. Покращення енергоефективності асинхронних електродвигунів – актуальна задача, одним із шляхів вирішення якої є використання модернізованої обмотки статора із застосуванням внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності.

Метою дослідження було удосконалення трифазної одношарової обмотки статора із повним кроком із забезпеченням покращення форми кривої магнітного поля у повітряному зазорі, підвищенням коефіцієнту корисної дії та коефіцієнту потужності машини.

До використання запропоновано трифазну двополюсну шаблонну одношарову обмотку із повним кроком у якій кожна фазна обмотка статора виготовляється у вигляді двох напівобмоток, зсунутих у просторі на певний кут за напрямом обертання магнітного поля. До центральних точок фазних обмоток статора за певною схемою підключені електричні конденсатори, що дозволяє покращити форму кривої магнітного поля у повітряному зазорі, підвищити коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності машини.

Магнітне поле асинхронного двигуна із запропонованою обмоткою статора має кращі характеристики, ніж у серійному двигуні, обраному за прототип. Зокрема крива магніторушійної сили обмотки статора уздовж довжини повітряного проміжку більш наближена до синусоїдальної, а значення обмотувальних коефіцієнтів для найбільш суттєвих 5-ї та 7-ї гармонік зменшені в 3,5... 4 рази у порівнянні з серійним двигуном-прототипом

**Ключові слова:** обмотка, асинхронний двигун, крок обмотки, коефіцієнт розподілу, коефіцієнт вкорочення кроку, обмотковий коефіцієнт, конденсатор

**Актуальність.** В умовах постійного зростання цін на енергоносії та підвищення собівартості виробництва 1 кВт·год електричної енергії особлива увага приділяється питанню підвищення енергетичних показників асинхронних електродвигунів, які споживають від 40 до 80 % електроенергії для різних галузей

промисловості та сільського господарства. Тому чільне місце посідають розробки, які дозволяють підвищити енергетичні показники асинхронних електродвигунів зі збереженням їх простоти та надійності.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Нині для покращання енергоефективності пропонується застосовувати як симетричні, так і асиметричні схеми обмоток статора асинхронних двигунів [2]. Проте такий підхід вимагає виконання обмотки статора двигуна двошаровою, що суттєво ускладнює виготовлення обмотки.

Іншим можливим підходом є використання шестифазної обмотки статора асинхронного двигуна за трифазного живлення [3]. При цьому технологія виготовлення також ускладнюється, оскільки передбачається виготовлення різних частин обмотки проводом різного поперечного перерізу.

**Мета дослідження** – удосконалення трифазної одношарової обмотки статора із повним кроком із забезпеченням покращення форми кривої магнітного поля у повітряному зазорі, підвищенням коефіцієнту корисної дії та коефіцієнту потужності машини.

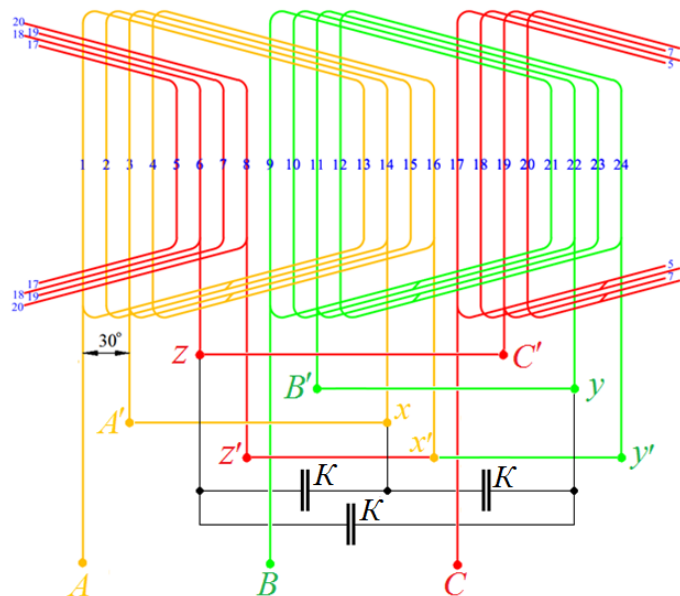
**Матеріали та методи дослідження.** Проведено розрахунок магніторушійної сили фази запропонованої обмотки статора асинхронного двигуна із використанням теорії електричних кіл та аналіз електромагнітного поля в активній зоні двигуна із використанням теорії електромагнітного поля.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Пропонується удосконалити трифазну одношарову обмотку із повним кроком шляхом виготовлення кожної фазної обмотки статора у вигляді двох напівмоток, зсунутих у просторі на певний кут за напрямом обертання магнітного поля, та підключення за певною схемою електричних конденсаторів, що дозволить покращити форму кривої магнітного поля у повітряному зазорі, підвищити коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності машини.

Зокрема, на рис. 1 зображена розгорнута електрична схема трифазної одношарової обмотки із повним кроком. Ця обмотка складається із двох

симетричних трифазних обмоток (або напівобмоток), розташованих у пазах єдиного осердя статора із просторовим зсувом їх фазних осей на кут  $\delta = 30^\circ$  (зсув на 2 пази). У межах кожної трифазної обмотки зберігається часовий і просторовий зсув між струмами фаз, який дорівнює  $120^\circ$ . Виводи першої (основної) трифазної обмотки позначаються таким чином:  $A, B, C$  – початки,  $x, y, z$  – відповідно кінці. Виводи другої (додаткової) трифазної обмотки, зміщеної у просторі відносно основної на кут  $\delta = 30^\circ$  позначені так:  $A', B', C'$  – початки,  $x', y', z'$  – відповідно кінці. Основні та додаткові фазні обмотки статора складаються із двох шаблонних котушок із повним кроком (1→13) кожна.

Для утворення єдиної трифазної обмотки статора необхідно у межах кожної фазної обмотки з'єднати послідовно між собою напівобмотки основної та додаткової обмоток: до кінця основної напівобмотки приєднати початок додаткової із можливістю приєднання до даної точки електричних конденсаторів. Наприклад, для утворення фази  $A$  необхідно з'єднати кінець фазної напівобмотки  $A - x$  із початком фазної напівобмотки  $A' - x'$ .



**Рис. 1. Розгорнута електрична схема трифазної одношарової обмотки із повним кроком**

Фазні обмотки статора запропонованої одношарової обмотки статора з'єднуються «зіркою», а до місць приєднання початків та кінців основних та

додаткових напівобмоток фаз статора за схемою «трикутник» приєднуються електричні конденсатори. При цьому на початки фаз трифазної обмотки  $A, B, C$  подається трифазна напруга живлення, кінці трифазної обмотки  $x', y', z'$  з'єднуються у єдиний вузол, а до місць приєднання основних та додаткових напівобмоток фаз статора ( $x + A', y + B', z + C'$ ) приєднуються електричні конденсатори [4].

Підключення електричних конденсаторів призводить до виникнення зсуву фаз у часі між струмами основних та додаткових напівобмоток фаз статора на кут  $\alpha$ , який залежить від величини ємності електричних конденсаторів. У такому випадку обидві напівобмотки, як і у звичайному двигуні, споживають реактивну потужність, але одна з них одержує її як і раніше з мережі живлення, а інша – від конденсатора, внаслідок чого знижується струм, який споживається із мережі живлення та підвищується коефіцієнт потужності двигуна [5].

Оскільки фази основної та додаткової обмоток зміщені на  $120^\circ$ , а осі основної та додаткової обмоток зміщені на кут  $\delta = 30^\circ$ , то сумарні магніторушійні сили (МРС) основної  $\dot{F}_1$  та додаткової  $\dot{F}_2$  трифазних обмоток будуть дорівнювати:

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_A + \dot{F}_B e^{j120^\circ} + \dot{F}_C e^{-j120^\circ} = \frac{3}{2} F_m e^{j\alpha t}$$

$$\dot{F}_2 = \dot{F}_{A'} e^{j\delta} + \dot{F}_{B'} e^{j(120^\circ + \delta)} + \dot{F}_{C'} e^{j(\delta - 120^\circ)} = \frac{3}{2} F_m e^{j(\alpha t + \alpha + \delta)}$$

де  $\dot{F}_A, \dot{F}_B, \dot{F}_C$  – МРС відповідно фази  $A$ , фази  $B$  та фази  $C$  основної трифазної обмотки;  $\dot{F}_{A'}, \dot{F}_{B'}, \dot{F}_{C'}$  – МРС відповідно фази  $A$ , фази  $B$  та фази  $C$  додаткової трифазної обмотки;  $F_m$  – амплітуда МРС на осі фази, яка змінюється в часі з частотою струму.

Поворотні множники  $e^{j\omega t}$  та  $e^{j(\omega t + \alpha + \delta)}$  вказують на обертовий характер постійних за величиною векторів МРС  $\frac{3}{2} F_m$ , просторово зміщених між собою на кут  $\alpha + \delta$ . Загальна магніторушійна сила двох обертових хвиль дорівнює  $\dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$ . За умови  $\alpha + \delta = 0$  обидві обертові хвилі просторово співпадають і утворюють максимальну загальну МРС  $3F_m$ , яка дорівнює подвійному значенню МРС окремої трифазної

системи. При цьому заданий магнітний потік машини створюватиметься мінімальним струмом намагнічування.

Для забезпечення виконання умови  $\alpha + \delta = 0$  необхідно обрати величину ємності конденсаторів, яка забезпечуватиме часовий зсув між струмами основних та додаткових напівобмоток фаз статора на  $30^\circ$  та змістити основні та додаткові напівобмотки фаз статора у пазах осердя статора за напрямом обертання магнітного поля статора на  $30^\circ$  (на два паза).

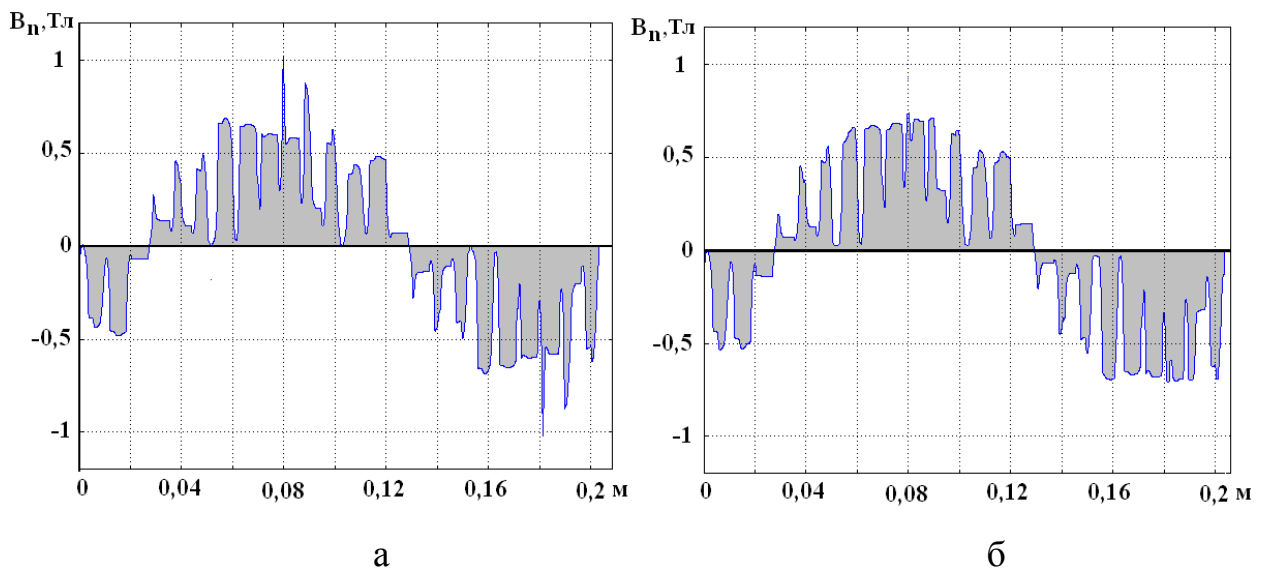
У випадку виконання умови  $\alpha + \delta = 0$  відбувається подвоєння кількості фаз обмотки статора асинхронного двигуна. При цьому в магнітному полі виключаються найбільш шкідливі 5-та і 7-ма гармоніки, залишаються лише відносно малі 11-та і 13-та ( $\nu = 2mk \pm 1 = 11, 13, \dots$ ; де  $\nu$  – порядок гармоніки,  $m$  – кількість фаз обмотки,  $k = 1, 2, \dots$  – ціле додатне число), що позитивно впливає як на якісну картину, так і на кількісну сторону магнітного поля машини у повітряному зазорі, виключає провали в механічній характеристиці і гальмівну дію 5-ї та 7-ї гармонік. З іншого боку за подвоєння кількості фаз обмотки статора удвічі зменшується кількість пазів на полюс і фазу  $q = \frac{Z}{2pm}$  (де  $Z$  – кількість пазів осердя статора,  $p$  – кількість пар полюсів обмотки статора,  $m$  – кількість фаз машини), що збільшує коефіцієнт розподілу  $k_{p1}$  та обмотковий коефіцієнт  $k_{o1}$ , наближаючи його до 1. Чим усувається необхідність вкорочення кроку обмотки і виконання її двошаровою, підвищує ступінь використання паза, спрощує технологію виконання обмотки.

Також наведемо окремі розрахункові результати на прикладі серійного асинхронного електродвигуна типу АИР71В2, в пази осердя статора, якого була закладена запропонована трифазна одношарова обмотка із повним кроком. Серійний двигун має такі вихідні дані: потужність  $P_2 = 1,1$  кВт; номінальний фазний струм обмотки статора  $I_{1N} = 2,6$  А; число пар полюсів  $p = 1$ ; кількість пазів статора і ротора  $Z_1 = 24$ ,  $Z_2 = 20$ ; внутрішній діаметр осердя статора  $D_1 = 65$  мм; зовнішній

діаметр осердя статора  $D_a = 116$  мм; висота повітряного проміжку  $\delta = 0,35$  мм. Відкриття пазів статора  $b_{m1} = 2$  мм, пази ротора закриті.

Зокрема, на рис. 2 наведені криві розподілу нормальної складової магнітної індукції в повітряному проміжку. Під нормальною складовою розуміється просторова складова вектору магнітної індукції, що направлена уздовж нормалі (перпендикуляра) до лінії повітряного проміжку. Саме ця складова індукції створює магнітний потік взаємоіндукції між статором і ротором.

Порівняльний аналіз наведених кривих дозволяє зробити такі висновки. У наведених кривих індукції суттєво виражені зубцеві гармоніки, які на окремих ділянках повітряного проміжку створюють перепад індукції більше ніж 0,5 Тл. Ці перепади виникають при таких взаємних положеннях статора і ротора, при яких зубці статора розташовуються навпроти зубців ротора. Це у цілому свідчить про характерні недоліки конструкції обраного для досліджень двигуна. Таким чином, використання запропонованої трифазної одношарової обмотки статора асинхронного двигуна покращує форму кривої розподілу магнітної індукції у повітряному проміжку, що у цілому сприяє зниженню додаткових втрат потужності та підвищенню енергетичних показників асинхронного двигуна [1].



**Рис. 3. Розподіл нормальної складової магнітної індукції уздовж повітряного проміжку: а – серійного двигуна; б – двигуна із запропонованою обмоткою**

**Висновки і перспективи.** Розроблена трифазна одношарова обмотка із повним кроком, використання якої дозволяє покращити енергетичні показники асинхронного двигуна.

Магнітне поле асинхронного двигуна із запропонованою обмоткою має кращі характеристики, ніж у серійному двигуні, обраному за прототип. Зокрема крива магніторушійної сили обмотки статора уздовж довжини повітряного проміжку в компенсованому асинхронному двигуні більш наближена до синусоїдальної, а значення обмотувальних коефіцієнтів для найбільш суттєвих 5-ї і 7-ї гармонік зменшені в 3,5... 4 рази у порівнянні з серійним двигуном-прототипом.

### **Список літератури**

1. Васьковський Ю. М. Математичне моделювання електромагнітного поля компенсованого асинхронного двигуна / Васьковський Ю. М., Чуєнко Р. М. // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – 26-30.
2. Гаврилюк Р.Б. Теоретичні основи симетричних двошарових схем обмоток електричних машин змінного струму: Автореф. дис. доктор. техн. наук: 05.09.01. – Л. НУ «Львівська політехніка», 2012. – 36 с.
3. Лущик В. Д. Перспективні напрямки удосконалення електричних машин: монографія / В. Д. Лущик. – К.: «Видавництво Компрінт», 2015. – 265 с.
4. Патент України на корисну модель 133466 Н02К 17/02 Трифазна двополюсна шаблонна одношарова обмотка / Заблодський М. М., Чуєнко Р. М. Заявл. 26.10.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7.
5. Чуєнко Р. М. Енергозбереження у підготовці кормів до згодовування при використанні асинхронних електродвигунів з внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.16. – К. НАУ, 2002. – 20 с.

### **References**

1. Vaskovsky, U. M., Chuienko, R. M. (2012). Matematichne modeluvannya elektromagnitnogo polya kompensovanogo asinhronnogo dviguna [Mathematical modelling of the electromagnetic field of a compensated induction motor]. Electrotehnika ta electromehaniка, 2, 26-30.
2. Gavrilyuk, R. B. (2012) Teoretichni osnovi simetrichnih dvosharovih shem obmotok elektrichnih mashin zminnogo strumu [Theoretical foundation two-layer charts of winding alternative current electrical machine]. Dissertation for the degree of Doctor of Engineering on speciality 05.09.01 – Electrical machines and apparatus. – National University «Lviv Polytechnic», Lviv, 2012.

3. Luschik, V. D. (2015) Perspektivns napryamki udoskonalennay elektrichnih mashin: monografiya [Perspective directions of improvement of electric machines: monography]. Kiyv: Komprint, 265 p.

4. Patent 133466 Ukraine Trifazna dvopolusna shablonna odosharova obmotka [Threephase bipolar pattern single-layer winding]. Zablodsky, M. M., Chuienko, R. M., the patent from 10.04.2019.

5. Chuinko, R. M. (2002) Energozberezhennya u pidgotovci kormiv do zgodovuvannya pri vikoristanni asinhronnih dviguniv iz vnutrishnou yemnisnou kompensacieu reaktivnoi potuzhnosti [Energysaving in food preparing by application induction motors with internal capacitance compensation of reactive power]. Dissertation for the degree of candidate of Engineering on speciality 05.09.16 – Application of electrical technologies in rural manufacture. – National Agrarian University. Kyiv, 2002.

### **ТРЕХФАЗНАЯ ДВУХПОЛЮСНАЯ ШАБЛОННАЯ ОДНОСЛОЙНАЯ ОБМОТКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

***Н. Н. Заблодский, Р. Н. Чуенко***

**Аннотация.** *Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором являются основой электропривода рабочих машин в промышленности и сельском хозяйстве. Улучшение энергоэффективности асинхронных двигателей – это актуальная задача, одним из способов решения которой является использование модернизированной обмотки статора асинхронного двигателя с использованием внутренней емкостной компенсации реактивной мощности.*

*Целью исследования было усовершенствование трехфазной однослойной обмотки статора с полным шагом с обеспечением улучшения формы кривой магнитного поля в воздушном зазоре, повышением коэффициента полезного действия и коэффициента мощности машины.*

*Для использования предложена трехфазная двухполюсная шаблонная однослойная обмотка с полным шагом у которой каждая фазная обмотка статора изготавливается в виде двух полуобмоток, смещенных в пространстве на определенный угол в направлении вращения магнитного поля. К центральным точкам фазных обмоток статора по определенной схеме подключены электрические конденсаторы, что позволяет улучшить форму кривой магнитного поля в воздушном зазоре, повысить коэффициент полезного действия и коэффициент мощности машины.*

*Магнитное поле асинхронного двигателя с предложенной обмоткой статора имеет лучшие характеристики чем у базового двигателя, который был избран в качестве прототипа. В частности, кривая магнитодвижущей силы обмотки статора вдоль длины воздушного зазора более приближена к синусоиде, а значение обмоточных коэффициентов для наиболее существенных 5-й и 7-й гармоник уменьшены в 3,5-4 раза сравнительно с серийным двигателем-прототипом.*

**Ключевые слова:** *обмотка, асинхронный двигатель, шаг обмотки, коэффициент распределения, коэффициент укорочения шага, обмоточный коэффициент, конденсатор*



## **TREE-PHASE BIPOLAR PATTERN SINGLE-LAYER WINDING OF AN INDUCTION MOTOR**

*M. Zablodsky, R. Chuienko*

**Abstract.** *Squirrel-cage induction motors are the basis of the electric drive of working machines in industry and agriculture. Improving the energy efficiency of induction motors is an urgent task, one of the ways to solve which is to use an upgraded stator winding of an induction motor using internal capacitive reactive power compensation.*

*The aim of the study was to improve the three-phase single-layer stator winding with a full step, providing an improvement in the shape of the magnetic field curve in the air gap, increasing the efficiency and power factor of the machine.*

*For use, a three-phase bipolar single-layer template winding with a full pitch is proposed in which each stator phase winding is made in the form of two half-windings offset in space by a certain angle in the direction of rotation of the magnetic field. Electric capacitors are connected to the central points of the stator phase windings according to a certain scheme, which makes it possible to improve the shape of the magnetic field curve in the air gap, to increase the efficiency and power factor of the machine.*

*The magnetic field of an induction motor with the proposed stator winding has better characteristics than the base motor, which was chosen as a prototype. In particular, the curve of the magnetomotive force of the stator winding along the length of the air gap is closer to the sinusoid, and the value of the winding coefficients for the most significant 5th and 7th harmonics is reduced by 3.5-4 times compared to the prototype serial motor.*

**Key words:** *winding, induction motor, winding pitch, power factor, efficiency, reactive power, capacitance*