

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ
ДУГОСТАТОРНОГО ІНДУКТОРНОГО ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОГО
ГЕНЕРАТОРА З КІЛЬЦЕВИМ РОТОРОМ**

В. В. КОЗИРСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

E-mail: epafort1@ukr.net

М. І. ТРЕГУБ, кандидат технічних наук, доцент
Білоцерківський національний аграрний університет

E-mail: tregyb.m.i@gmail.com

А. В. ПЕТРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент
*Національний університет біоресурсів і природокористування
України*

E-mail: petrenko@nubip.edu.ua

О. С. ВАСИЛЕНКО, асистент
Білоцерківський національний аграрний університет

E-mail: oleksandrvasulenko@gmail.com

Анотація. Обґрунтовано методи визначення геометричних параметрів магнітної системи дугостаторного індукторного вітроелектричного генератора з кільцевим ротором за допомогою аналітичних розрахунків, програмного моделювання та експериментальних досліджень фізичних моделей. Методи розрахунку традиційних типів індукторних електричних машин адаптовані до розрахунку нових дугостаторних індукторних генераторів з кільцевим ротором. Методика теоретичних досліджень полягала у побудові ескізної моделі елементарної функціональної ланки електромагнітної системи і теоретичного аналізу магнітних провідностей у статичних положеннях максимумів і мінімумів значень магнітної провідності.

Побудовано ескізу схему елементарного магнітного кола електромеханічної системи та просторову розрахункову модель для програмного моделювання процесів зміни магнітної провідності магнітної системи в процесі руху феромагнітних елементів кільцевого ротора. Максимальне відносне відхилення, отримане в результаті моделювання та експерименту, не перевищує 5 %, що підтверджує достовірність та адекватність розробленої математичної і комп'ютерної моделі фізичному діючому зразку. Таким чином, розроблена математична і комп'ютерна модель може використовуватися в інженерній практиці для проектування конструкцій дугостаторних індукторних генераторів з кільцевим ротором, які знаходять застосування на безтрансмійних вітроелектричних установках та інших електромеханічних системах.

Ключові слова: індукторний дугостаторний вітроелектричний генератор, кільцевий ротор, оптимальні геометричні параметри, магнітна провідність

Актуальність. Для вітроелектричних генераторів індукторні електричні машини (ІЕМ) вважаються [1] одними з найбільш простих та надійних типів за рахунок відсутності на роторі будь-яких функціональних деталей окрім зубчастого магнітопроводу. Однак досі мало уваги приділено методам розрахунку магнітних систем [2] дугостаторних індукторних генераторів з кільцевим ротором, у яких роторна ланка магнітного кола не має спинки, але значно відрізняється просторовою конфігурацією від традиційних. Саме тому, обґрунтування методів визначення оптимальних геометричних параметрів таких магнітних систем є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням дослідження впливу геометричних розмірів зубців та пазів типових індукторних генераторів на зміну магнітної індукції раніше приділяли значну увагу, наприклад, [1]. Також останнім часом проводяться дослідження магнітних систем індукторних генераторів аксіального типу [3]. До цього слід додати сучасні публікації про коло-польові методи досліджень магнітних систем подібних реактивних машин [4]. Однак відомі методи досліджень необхідно адаптувати для суттєво відмінних магнітних систем дугостаторних генераторів з кільцевим ротором.

Мета дослідження – обґрунтування методів визначення оптимальних геометричних параметрів магнітних систем безконтактних дугостаторних ІЕМ з кільцевим ротором, які знаходять широке застосування у різних сферах, зокрема у безтрансмійних вітроустановках.

Об'єктом досліджень були електромагнітні процеси в електромеханічній системі дугостаторної ІЕМ з кільцевим ротором.

Предметом досліджень були закономірності впливу геометричних параметрів феромагнітного полюсного елемента кільцевого ротора на періодичну зміну магнітної провідності (відтак пропорційну зміну потокозчеплення) електромагнітної системи при обертовому русі з урахуванням конструктивних обмежень.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження проводили теоретичним і експериментальним методами. Методика теоретичних досліджень полягала у побудові ескізної моделі елементарної функціональної ланки електромагнітної системи і теоретичного аналізу магнітних провідностей у статичних положеннях максимумів і мінімумів значень магнітної провідності. Конструктивна схема запропонованої [2] елементарної ланки електромеханічної системи із кільцевим ротором дугостаторного індукторного генератора вітроустановки зображена на рис.1.

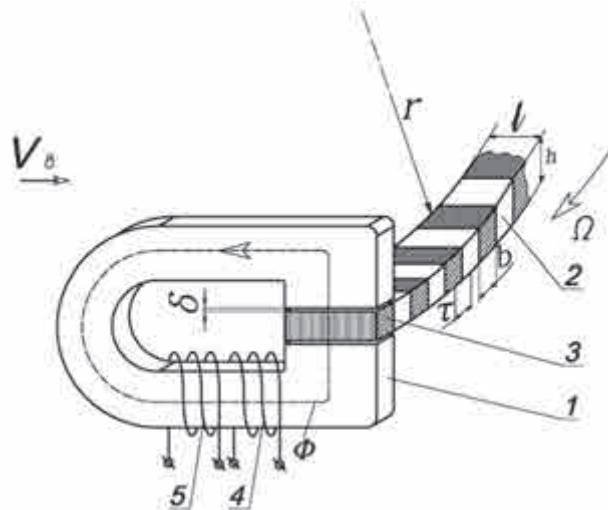


Рис. 1. Ескізна схема електромагнітної системи дугостаторної ІЕМ з кільцевим ротором:

1 – магнітопровід секції статора, 2 – немагнітна корпусна ділянка полюсного поділу ротора, 3 – феромагнітний полюсний елемент ротора, 4 – якірна обмотка, 5 – обмотка збудження, Φ – осьова лінія діючого магнітного потоку, r – радіус доцентрової поверхні кільцевого ротора, l – аксіальна довжина феромагнітного елемента ротора, h – радіальна висота кільцевого ротора, b – середня ширина феромагнітного елемента ротора, Ω – напрям кутової швидкості обертання ротора, τ – полюсний поділ, δ – середня відстань робочого повітряного проміжку, V_b – орієнтовний напрям вітру

Принцип дії зображеної електромеханічної системи в режимі генератора полягає у зміні потокозчеплення з частотою f за рахунок гармонійної зміни магнітної провідності при обертанні ротора. Частота визначається залежністю, характерною для індукторних генераторів:(1)

$$f = z_{\phi} n, \quad \Gamma\zeta, \quad (1)$$

де z_{ϕ} – кількість феромагнітних полюсних елементів кільцевого ротора, яку можна визначити за його радіусом та розміром полюсного поділу:

$$z_{\phi} = \pi r / \tau, \quad (2)$$

де n – частота обертів кільцевого ротора, c^{-1} ,

Тоді вираз для діючого значення ЕРС за певної частоти обертів матиме характерний для індукторних генераторів вигляд:

$$E_d = 0,5k_{\phi} \cdot E_{cp} = 0,5\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot z_{\phi} n \omega \cdot F_M \cdot \Lambda, \quad (3)$$

де k_{ϕ} – коефіцієнт форми;

E_{cp} – середнє значення наведеної ЕРС.

Наведена форма запису залежності відобразує особливості індукування ЕРС дугостаторним індукторним генератором із нерухомою системою збудження за рахунок періодичної зміни величини магнітної

провідності Λ рухом феромагнітного елемента ротора через робочий повітряний проміжок.

Вплив геометричних параметрів рухомої ланки магнітного кола електромеханічної системи на зміну магнітної провідності можна проаналізувати за допомогою розгляду схеми розгортки функціональної ділянки відомими методами магнітостатики. Для двох граничних положень ділянок полюсного поділу розгортки кільцевого ротора побудована графічна картина силових ліній плоскопаралельного магнітного поля (рис. 2).

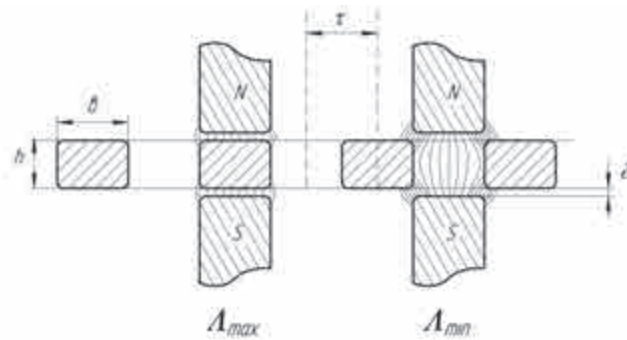


Рис. 2. Схематична картина графічного зображення силових ліній магнітного поля через феромагнітні елементи ротора

Графічний аналіз (рис. 2) дозволяє вважати, що за умови відсутності насичення магнітопроводу в положенні повного розташування феромагнітного елемента ротора у повітряному проміжку магнітопроводу статора і значно меншим розміром робочого проміжку від полюсного поділу ($\delta \ll \tau$) явище випинання магнітного поля буде впливати лише на незначне збільшення площі перетину немагнітної ділянки, а потоки розсіювання практично будуть відсутні. Оскільки $\mu_0 \ll \mu_\phi$, то Λ_{max} залежатиме лише від розмірів робочого повітряного проміжку δ , а розмір h феромагнітного елемента ротора на цей показник практично не впливає. Це можна показати аналітичним розрахунковим виразом максимального значення магнітної провідності:

$$\Lambda_{max} = (R_\delta + R_\phi)^{-1} = (2\delta / \mu_0 b l + h / \mu_\phi b l)^{-1}, \quad (4)$$

де R_δ – магнітний опір робочого повітряного проміжку,

R_ϕ – магнітний опір магнітопровідної ділянки кола;

μ_ϕ – магнітна проникність феромагнітного матеріалу магнітопроводу.

Аналізуючи порядкові значення чисел магнітної проникності повітря μ_0 та електротехнічної сталі μ_ϕ можна показати, що складова магнітного опору магнітопроводу не перевищуватиме 0,01%. Складніше завдання визначення мінімальної величини провідності у положенні (рис. 2а), оскільки неможливо розрахувати опір потокам через бічні поверхні сусідніх феромагнітних елементів ротора. Тому була необхідність дослідження просторової моделі розподілу магнітного поля у програмі COMSOL.

Для підтвердження теоретичних залежностей проводили експериментальні дослідження за допомогою фізичних лабораторних моделей. Методика експериментальних досліджень базувалася на визначенні індуктивного опору електромагнітної системи при зміні координатного положення феромагнітного елемента ротора відносно магнітопроводу статора. Принципова схема лабораторної моделі зображена на рис. 3.

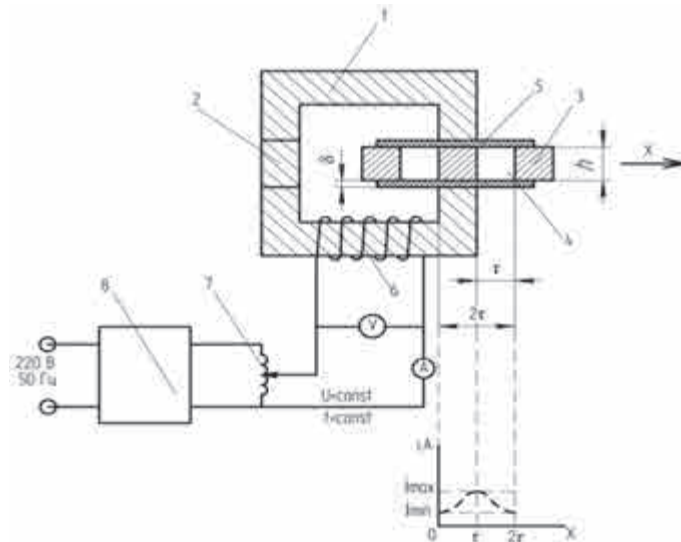


Рис. 3. Схема лабораторного стану експериментальних досліджень магнітного кола кільцевого ротора

Лабораторний стенд (рис. 3) складався зі шихтованого магнітопроводу 1, у якому встановлена змінна калібрувальна вставка 2 для дослідження впливу різних розмірів h феромагнітного елемента ротора на зміну індуктивності за певних розмірів полюсного поділу. Феромагнітні елементи ротора 3 виконані шихтованим пакетом із пластинок електротехнічної сталі, встановлених монолітно у немагнітному корпусі 4, виконаному зі склотекстоліту, магнітна провідність якого близька до магнітної провідності повітря. Із такого самого матеріалу виконані склотекстолітові пластинки для моделювання незмінного розміру робочого повітряного проміжку з обох боків. Паралельно до площини корпуса феромагнітних елементів ротора закріплювалася лінійка з ціною поділки 0,5 мм, виготовлена з немагнітного матеріалу, за допомогою якої вимірювали зміни положення феромагнітних елементів відносно магнітопроводу.

Досліди виконували шляхом переміщення й фіксації феромагнітних елементів ротора відносно магнітопроводу статора через 5 мм, що забезпечувало точність координатного положення за міліметровою шкалою в межах $\pm 5\%$.

Результати досліджень та їх обговорення. За результатами програмного моделювання просторової моделі отримана картина розподілу магнітної індукції в положенні мінімальної провідності (рис. 4)

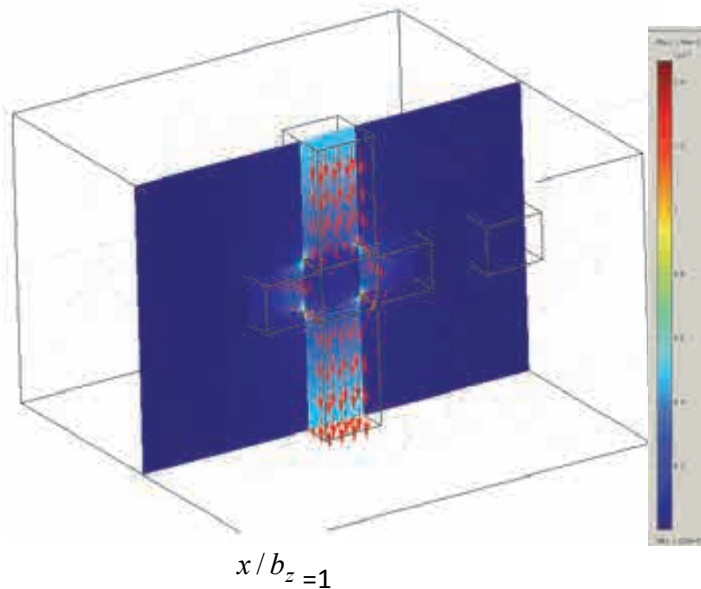


Рис. 4. Просторова модель розподілу магнітної індукції в положенні мінімальної магнітної провідності

Моделювання підтверджує характер проходження магнітного потоку через немагнітопровідну ділянку та з обох сторін розташовані феромагнітні елементи кільцевого ротора, як це графічно зображено на рис. 2а.

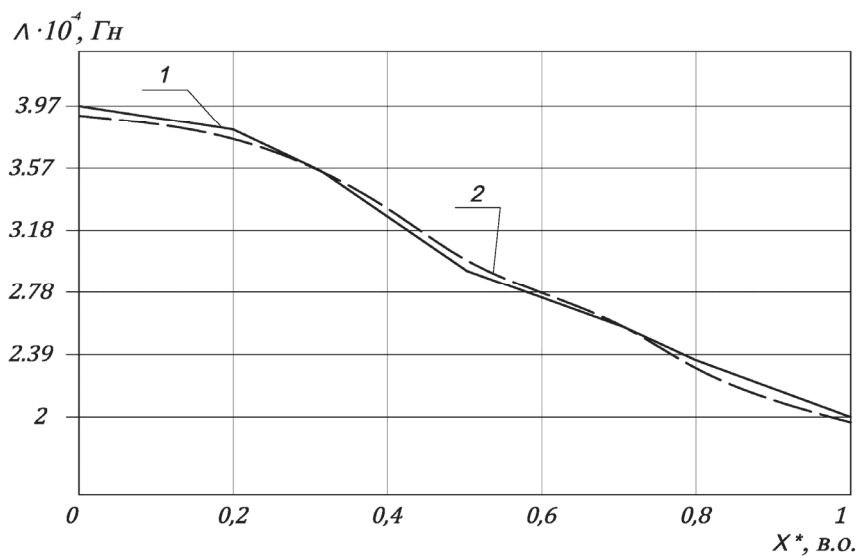


Рис. 5. Зміни магнітної провідності системи в координатах руху феромагнітного пакета ротора:

1 – розрахунок програмного моделювання, 2 – експеримент

Одночасно програмне моделювання просторової моделі дає змогу отримати залежність магнітної провідності за різних координатних положень феромагнітного елемента кільцевого ротора і порівняти її з

експериментальною залежністю, отриманою за описаною методикою на лабораторному стенді, що показано на рис. 5.

Висновки і перспективи. Для процесу проектування безтрансмійних дугостаторних індукторних вітроелектричних генераторів обґрунтовано методи визначення геометричних параметрів функціональних деталей кільцевого ротора на підставі розробки ескізної просторової моделі та дослідження її програмним моделюванням і порівнянням результатів із експериментальними значеннями.

Максимальне відносне відхилення отриманих значень максимальної магнітної провідності в результаті моделювання та експерименту не перевищує 5 %, що підтверджує їх достовірність та адекватність розробленої математичної і комп'ютерної моделі фізичному діючому зразку.

Список літератури

1. Альпер Н. Я. Индукторные генераторы / Н. Я. Альпер, А. А. Терзян. – М. : Энергия, 1970. – 192 с.
2. Козирський В. В. Методологія вибору типу і геометричної конфігурації кільцеворотного дугостаторного генератора безредукторної вітроелектричної установки / В. В. Козирський, М. І. Трегуб // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК», Київ, 5–6 листопада 2013 р., с. 57–58.
3. Пат. №101118 UA, МПК H02K19/20, H02K21/38 Індукторний аксіальний генератор / Трегуб М. І., Козирський В. В. – № а 2012 00837 ; заявл. 27.01.2012 ; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
4. Рисованый С. В. Проектирование вентильных реактивных двигателей : монография / С. В. Рисованый, В. Б. Финкельштейн ; Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ, 2014. – 245 с.

References

1. Al'per, N. YA. (1970). Induktornyye generator [Inductor generators]. Moscow, Russia: Energiya, 192.
2. Kozyrskiy, V. V., Trehub, M. I. (2013). Methodology of a vibor of type and geometrical configuration of arc-stator generator with rin rotor four wind turbine. International scientific practical conference «Problems and the prospects of development of power, electrotechnologies and automatic equipment in an agrarian industrial complex». Kiev, 57–58.
3. Trehub, M. I., Kozyrskiy, V. V. (2013). Inductor axial generator. H02K19/20, H02K21/38. №101118 UA; declared 27.01.2012; published 25.02.2013, № 4.
4. Risovanyy, S. V., Finkel'shteyn, V. B. (2014). Proyektirovaniye ventil'nykh reaktivnykh dvigateley [Design of valve jet engines]. Kharkiv: KNUME of O.M. Beketov, 245.

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДУГОСТАТОРНОГО ИНДУКТОРНОГО ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА С КОЛЬЦЕОБРАЗНЫМ РОТОРОМ

**В. В. Козырский,
Н. И. Трегуб,
А. В. Петренко,
А. С. Василенко**

Аннотация. Обоснованы методы определения геометрических параметров магнитной системы дугостаторного индукторного ветроэлектрического генератора с кольцевым ротором с помощью аналитических расчетов, программного моделирования и экспериментальных исследований физических моделей. Методы расчета традиционных типов индукторных электрических машин адаптированы для расчета новых дугостаторных индукторных генераторов с кольцевым ротором. Методика теоретических исследований заключалась в построении эскизной модели элементарного функционального звена электромагнитной системы и теоретического анализа магнитных проводимостей в статических положениях максимумов и минимумов значений магнитной проводимости.

Построена эскизная схема элементарной магнитной цепи электромеханической системы и пространственная расчетная модель для программного моделирования процессов изменения магнитной проводимости магнитной системы в процессе движения ферромагнитных элементов кольцевого ротора. Максимальное относительное отклонение полученных результатов моделирования и эксперимента не превышает 5%, что подтверждает достоверность и адекватность разработанной математической и компьютерной модели физическому действующему образцу. Таким образом, разработанная математическая и компьютерная модель может использоваться в инженерной практике для проектирования конструкций дугостаторных индукторных генераторов с кольцевым ротором, которые находят применение на бестрансмиссионных ветроэлектрических установках и других электромеханических системах.

Ключевые слова: индукторный дугостаторный ветроэлектрический генератор, кольцеобразный ротор, оптимальные геометрические параметры, магнитная проводимость

SUBSTANTIATION OF MAGNET SYSTEM PARAMETERS OF ARC-STATOR GENERATOR WITH RING ROTOR FOUR WIND TURBINE

**V. V. Kozirsky,
M. I. Tregub,
A. V. Petrenko,
O. S. Vasilenko**

Abstract. Methods of calculation of traditional types of induction electric machines are adapted for the calculation of new arc-stator inductor generators

with a circular rotor, which are used in trans-free-energy wind turbine generators. A sketch diagram of the elementary magnetic circuit of the electromechanical system and a spatial calculation model for software simulation of the processes of magnetic conductivity change in the process of motion of the ferromagnetic elements of the ring rotor are constructed. The method of analytical calculation with sufficient accuracy determines only the value of the maximum conductivity in the position of the complete arrangement of the ferromagnetic element of the annular rotor in the slot of the stator magnet, when there are practically no phenomena of protrusion and scattering in the absence of magnetic saturation.

In all other intermediate coordinate positions of the ferromagnetic elements of the rotor and in the position of the complete exit from the slot of the magnetic conduction, the change in magnetic conductivity must be determined by the field-by-field method with the help of software modeling of the spatial model of the magnetic system. Experimental investigations were carried out according to the well-known technique on the developed laboratory stand of the physical model of the magnetic circle. The results of software modeling and experimental results showed a high level of coincidence, which allows us to apply these methods in the design process of constructions arc-stator inductor generators with a circular rotor, which are found to be applied on transmittingless wind turbines and other electromechanical systems.

Keywords: arc-stator generator, wind turbine, ring rotor, geometric parameters, magnetic conductivity

УДК 621.313.8: 631.53.027

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ВОДОПОГЛИНАННЯ НАСІННЯ ЯЧМЕНЮ

В. В. САВЧЕНКО, кандидат технічних наук, доцент

О. Ю. СИНЯВСЬКИЙ, кандидат технічних наук, доцент

**Національний університет біоресурсів і природокористування
України**

E-mail: vit1986@ua.fm

Анотація. Визначено вплив магнітного поля на водопоглинання насіння ячменю. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що водопоглинання насіння за передпосівної обробки в магнітному полі залежить від квадрата магнітної індукції та швидкості руху насіння в магнітному полі.

При зміні магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл, водопоглинання насіння зростає, а при подальшому її збільшенні починає зменшуватися.