

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РОЗМІРІВ МАГНІТОПРОВОДУ КІЛЬЦЕВОГО РОТОРА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

В.В. Козирський^{1*}, докт.техн.наук, **О.Д. Подольцев^{2**}**, докт.техн.наук, **М.І. Трегуб³**, канд.техн.наук

¹- Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв оборони, 12, Київ 03041, Україна,

e-mail: epafort1@ukr.net

²- Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: podol@ied.org.ua

³- Білоцерківський національний аграрний університет,
вул. Курсова, 37, Біла Церква, 09117, Україна,

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

За результатами чисельного моделювання методом скінчених елементів та експериментального дослідження дослідного зразка визначено вплив габаритних розмірів феромагнітних елементів кільцевого ротора вентильного реактивного генератора на кратність змінення магнітної провідності його магнітної системи внаслідок руху цього ротора. Встановлені числові співвідношення геометричних розмірів цих елементів у разі їх квадратного перетину, за яких досягається максимальне змінення провідності магнітної системи в процесі руху ротора та покрайнуються електромагнітні характеристики генератора. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: вітроелектричний вентильний реактивний генератор, кільцевий ротор, магнітна провідність, раціональні геометричні розміри, електромагнітна система.

Вступ. Конструктивні типи електричних машин фактично визначаються конфігурацією ділянки магнітного кола ротора як дискової, так і кільцево-циліндричної форми [4, 6]. Такі форми перспективні для вентильних реактивних електричних машин (ВРЕМ), у яких на роторі відсутні будь-які обмотки або постійні магніти [1]. З огляду на нетрадиційність конфігурації їхньої магнітної системи методи обґрунтування оптимальних геометричних розмірів магнітопровідної ділянки ротора потребують нових рішень, порівняно із методами оптимізації зубцево-пазових ділянок роторів традиційних електричних машин, зокрема [2] конструктивно подібних до ВРЕМ індукторних генераторів (ІГ).

Мета роботи полягала в обґрунтуванні за результатами математичного та фізичного моделювання раціональних розмірів магнітопроводів кільцевих роторів вентильних реактивних генераторів (ВРГ), які перспективні у різних сферах, зокрема у безтрансмійних вітроустановках та низьконапірних гідроелектростанціях.

Постановка задачі та методи її вирішення. Дослідження проводили теоретичним і експериментальним методами. Методика теоретичних досліджень полягала у побудові ескізної моделі елементарної функціональної ланки електромагнітної системи і теоретичного аналізу магнітних провідностей за статичних положень максимумів і мінімумів їхніх значень. Конструктивну схему елементарної ланки електромеханічної системи із кільцевим ротором дугостаторного ВРГ, запропоновану в [3], зображено на рис. 1. Кільцевий ротор із внутрішнім радіусом r із однаковими за розміром немагнітопровідними 2 і феромагнітними 3 його ділянками та полюсним поділом τ обертається з кутовою швидкістю Ω і проходить через проріз монопакежного магнітопроводу 1 статора із повітряним проміжком δ з кожного боку. На магнітопроводі статора намотано обмотку 4. Габаритні розміри ділянок ротора: l – аксіальна довжина, h – радіальна висота, b – дуговий сегмент. На рис. 1 також показана середня лінія магнітного потоку Φ та орієнтовний напрям вітру зі швидкістю V_0 .

На дуговому статорі може встановлюватися різне число таких однопакежних, магнітно не зв'язаних між собою статорних модулів, які є окремими електромеханічними системами, що спрощує їхнє функціонування за принципом вентильних електричних машин. Величина потужності генератора обумовлює однозначні габаритні вимоги до конструктивних розмірів кільцевого ротора, серед яких найбільший вплив має радіальна висота h , яка за умов забезпечення необхідної механічної жорсткості та функціональних параметрів електромеханічної системи повинна мати оптимальні значення. Оскільки у безтрансмійних низькооберткових електромеханічних системах радіус кільцевого ротора може становити кілька метрів, то можна проаналізувати лінійну розгортку магнітного кола, що має дуже незначні відмінності від реальної форми ділянки. В основі принципу функціонування даної електромеханічної системи є періодична зміна магнітної провідності координатною зміною положення ділянок кільцевого ротора відносно осі магнітопроводу статора, тому найбільш важливо розглянути два крайніх положення, за яких відповідно матимемо максимальне і мінімаль-

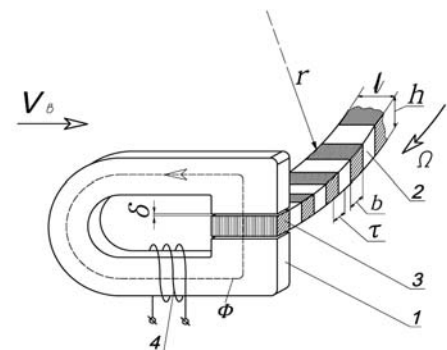


Рис. 1

не її значення.

Графічний аналіз дає підстави вважати, що за умови відсутності насичення магнітопроводу в положенні повного входження феромагнітного елемента ротора у проріз магнітопроводу статора і при цьому значно меншим розміром повітряного проміжку від полюсного поділу ($\delta \ll \tau$), явище випинання магнітного поля буде впливати лише на незначне збільшення площі перетину немагнітної ділянки, а потоки розсіювання будуть мінімальні. Оскільки $\mu_\delta \gg \mu_0$, то магнітна провідність Λ_{\max} залежатиме практично від розмірів повітряного проміжку δ , а розмір h феромагнітного елемента ротора на цей показник мало впливає. Це можна підтвердити відомим аналітичним розрахунковим виразом максимального значення магнітної провідності

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

де R_δ – магнітний опір повітряного проміжку, R_δ – магнітний опір магнітопровідної ділянки кола, μ_δ – магнітна проникність феромагнітного матеріалу магнітопроводу. Аналізуючи порядкові значення чисел магнітної проникності повітря μ_0 і електротехнічної сталі μ_δ можна показати, що складова магнітного опору магнітопроводу не перевищуватиме 0,01%. Складніше завдання визначення мінімальної величини провідності у положенні немагнітної ділянки у міжполюсному прорізі, оскільки аналітично складно розрахувати магнітний опір у режимі насичення через бічні поверхні сусідніх феромагнітних елементів ротора. Тому була необхідність дослідження тривимірної моделі розподілу магнітного поля в активній зоні чисельним методом скінчених елементів з використанням пакета програм COMSOL.

Для розрахунку магнітного поля та магнітної провідності магнітної системи в залежності від положення ділянки ротора використовувався фрагмент цієї системи, показаний на рис. 2 із зображенням скінчених елементів. Він містить полюси електромагніту та рухоми ділянку кільцевого ротора, яка має три феромагнітні елементи. Напруженість магнітного поля \mathbf{H} у активній зоні магнітної системи має лише одну функціональну складову, для якої можна ввести скалярний магнітний потенціал φ_m , так що $\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m$. Розподілення цього потенціалу, виходячи з виразу $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, задовольняє рівнянню Лапласа $\nabla \cdot (-\mu_0 \mu_\delta \varphi_m) = 0$ та граничним умовам: на нижній поверхні першого полюса $\varphi_m = \varphi_{m,1} = 0$, на верхній поверхні другого полюса – $\varphi_m = \varphi_{m,2}$, а на всіх інших поверхнях – умови магнітної ізоляції $\partial \varphi / \partial n = 0$.

Наведена польова задача розраховувалася з застосуванням пакета програм COMSOL. Після визначення розподілення скалярного магнітного потенціалу значення магнітної провідності даної магнітної системи розраховувалося за виразами

$$\Lambda(x) = \Phi / (\varphi_{m,1} - \varphi_{m,2}), \quad \Phi = \int_{S_1} B_n dS, \quad (2)$$

де S_1 – поверхня полюса, що межує з повітряним проміжком, а напрямком координати x співпадає з напрямком лінійної швидкості руху магнітопровідних елементів ротора.

Для підтвердження достовірності одержаних залежностей також проводили експериментальні дослідження з використанням фізичних лабораторних моделей. Методика експериментальних досліджень базувалася на визначенні індуктивного опору електромагнітної системи у разі зміни координатного положення феромагнітного елемента ротора відносно магнітопроводу статора за стабілізованої напруги та практично сталої частоти струму електромережі. Досліди виконували шляхом переміщення і фіксації феромагнітних елементів ротора відносно магнітопроводу статора з інтервалом 5 мм, що забезпечувало точність координатного положення за міліметровою шкалою в межах 5%.

Аналіз результатів чисельних розрахунків та експериментальних досліджень. За результатами чисельного моделювання просторової моделі були побудовані картини розподілу вектора магнітної індукції при різних координатних положеннях (рис. 2). Також із використанням виразу (2) була отримана залежність провідності магнітної системи Λ за різних координатних положень феромагнітного елемента кільцевого ротора x та порівняна із експериментальною залежністю, яка була побудована за описаною вище методикою на лабораторному стенді. Ці залежності – розрахункова 1 і експериментальна 2, за розмірів $b = l = 25$ мм показані на рис. 3.

Розрахункова крива, побудована за результатами моделювання, має помітні ділянки ламаної лінії, що спричинено розміром сітки розбивки моделі, однак збіжність із результатами експерименту досить висока (розбіжність не перевищує 3%), що дає змогу застосовувати результати чисельного моделювання на основі побудованої спрощеної моделі магнітної системи ВРГ для дослідження залежності магнітної провідності від координатного положення.

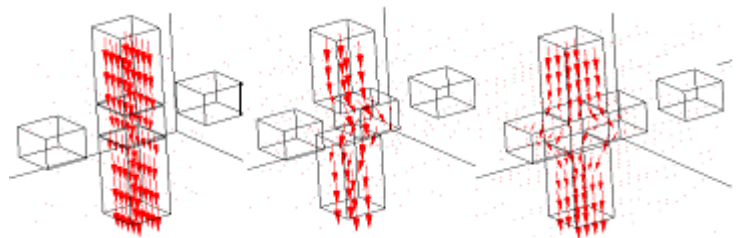


Рис. 2

натного положення за різної радіальної висоти h феромагнітних елементів кільцевого ротора; результати такого моделювання за різних значень висоти ротора h та кратності змінення магнітної провідності $\lambda = \Lambda_{\max} / \Lambda_{\min}$ показані на рис. 4.

Графічні результати для однакових за площею перетину пакетів кільцевого ротора показують, що збільшення їхньої радіальної висоти зменшення усіх поточних значень магнітної провідності, однак у різній мірі для максимумів і мінімумів. Зменшення максимальних значень магнітної провідності можна пояснити збільшенням довжини роторної магнітопровідної ділянки магнітного кола. Одночасно зменшення мінімальних значень провідності пояснюється збільшенням відстані між поверхнями магнітопроводу статора. Проте останню залежність важко описати аналітично, оскільки одночасно із збільшенням відстані збільшуються і вертикальні бічні поверхні сусідніх магнітопровідних пакетів кільцевого ротора, що компенсує зменшення мінімальної магнітної провідності. Тому було прогнозовано, що існує таке значення висоти магнітопровідного пакета ротора, після якого збільшення цього розміру не призводитиме до подальшого зростання різниці магнітних провідностей. У моделі була задана прямокутна геометрична форма перетину магнітопроводу статора, однакова з феромагнітними елементами ротора, яка єдина серед усіх можливих форм за обраного розміру l забезпечує максимальну площу суміщення нормальних проєкцій поверхонь та лінійний характер зміни цієї площі в процесі руху ротора.

Були виконані розрахунки значень магнітної провідності для різних за розміром перетинів магнітопроводів квадратної форми відповідно зі сторонами квадратів 15, 25 і 35 мм. Кратність зміни магнітної провідності залежно від висоти пакета ротора за вказаних перетинів показана на рис. 5. Збільшення кратності пропорційно до збільшення площі перетину магнітопроводів узгоджується з математичним виразом магнітної провідності. Одночасно прослідковується певна закономірність досягнення найбільшого значення кратності змін магнітної провідності для різних за перетином магнітопроводів. Так, для магнітопроводу квадратного перетину зі стороною 15 мм кратність зростає при збільшенні висоти пакета ротора приблизно до 25 мм, відповідно для перетину зі стороною 25 мм максимальна кратність провідностей була за висоти h близько 30 мм, а для сторони 35 мм – близько 37 мм. Тобто можна описати лінію тренда оптимальних співвідношень висоти і ширини квадратного перетину магнітопровідного пакета кільцевого ротора виразом

$$h = 10,409 \ln(b_z) - 3,907$$

із достовірністю апроксимації близько 0,9.

Слід зауважити, що наведене числове співвідношення матиме місце за умови виконання магнітопроводу із листової електротехнічної сталі близьких за показниками марок, однак за інших матеріалів загальний алгоритм оптимізації вірогідно буде подібним для електричних машин з радіально-кільцевим ротором. При цьому необхідно також враховувати фактичну різницю форми феромагнітного елемента кільцевого ротора і його лінійної розгортки, яка очевидно буде менш суттєвою за більшого його діаметра.

Висновки. Для низькообертової безтрансмійної вітроелектричної установки перспективним є дуго-статорний вентиляний реактивний генератор із радіально-кільцевим ротором. З застосуванням програмного пакета COMSOL та методу фізичного моделювання визначено вплив габаритних розмірів феромагнітного елемента кільцевого ротора на кратність зміни магнітної провідності магнітної системи такого типу генератора за різних положень ротора, що дає змогу встановлювати габаритні обмеження цієї системи. Встановлено числові співвідношення геометричних розмірів феромагнітного елемента кільцевого ротора квадратного перетину, за

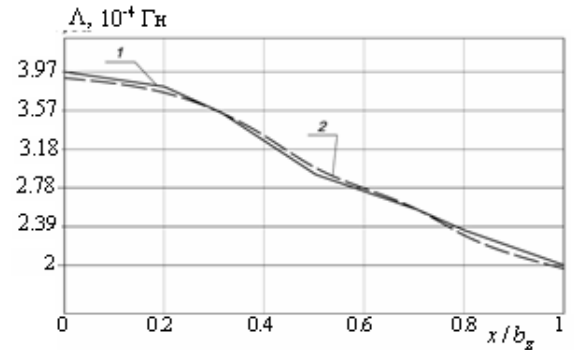


Рис. 3

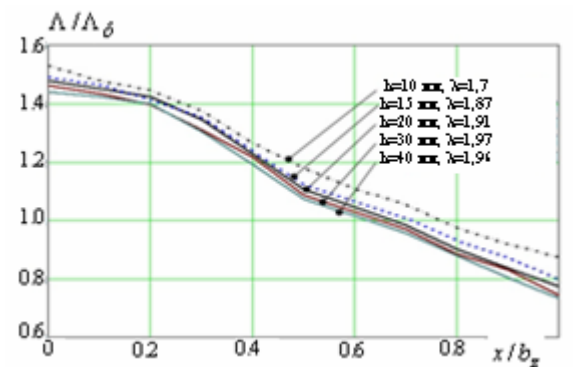


Рис. 4

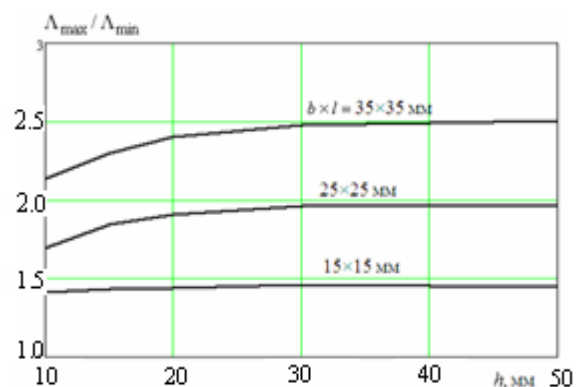


Рис. 5

яких досягається максимальне значення кратності зміни магнітної провідності магнітної системи генератора в процесі його руху.

1. Сінчук О.М., Козакевич І.А., Юрченко М.М. Бездатчикове керування вентилями реактивними двигунами тягових електромеханічних систем. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 62–66.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.062>
2. Альпер Н.Я., Терзьян А.А. Индукторные генераторы. М.: Энергия, 1970. 192 с.
3. Козирський В.В., Трегуб М.І. Методологія вибору типу і геометричної конфігурації кільцеворотного дуго-статорного генератора безредукторної вітроелектричної установки. Міжн. наук.-практ. конф. *Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК*, Київ, 5–6 листопада 2013 р. С. 57–58.
4. Трегуб М.І., Козирський В.В. Индукторный аксиальный генератор. Патент України № 101118, 2012.
5. Darie E., Cepisca C., Darie I. The use of switched reluctance generator in wind energy applications. Proc. of EPE-PEMC, September 1–3, 2008, Poland. Pp. 1963-1966.
6. Liu X., Chen Z. A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2014. No 11. Vol. 50. Pp. 150-155.
7. Nassereddine M., Rizk J., Nagrial N. Switched reluctance generator for wind power applications. Proc. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. Vol. 31. Pp. 126-130.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ МАГНИТОПРОВОДА КОЛЬЦЕВОГО РОТОРА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА

В.В. Козырський¹, докт.техн.наук, А.Д. Подольцев², докт.техн.наук, Н.И. Трегуб³, канд.техн.наук

¹ - **Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,**

ул. Героев обороны, 12, Киев, 03041, Украина,

e-mail: epafort1@ukr.net

² - **Институт электродинамики НАН Украины,**

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: podol@ied.org.ua

³ - **Белоцерковский национальный аграрный университет,**

ул. Курсовая, 37, Белая Церковь, 09117, Украина,

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

На основании результатов численного моделирования методом конечных элементов и экспериментального исследования опытного образца рассмотрено влияние геометрических размеров ферромагнитных элементов кольцеобразного ротора вентильного реактивного генератора на кратность изменения проводимости магнитной цепи, вызванную движением этого ротора. Определены количественные соотношения геометрических размеров этих элементов, имеющих квадратное сечение, при которых достигается максимальное изменение проводимости магнитной системы при движении ротора и улучшаются электромагнитные характеристики генератора. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: ветроэлектрический вентильный реактивный генератор, кольцевой ротор, магнитная проводимость, рациональные геометрические размеры, электромагнитная система.

RATIONALIZATION OF DIMENSIONS FOR RING-SHAPED ROTOR OF WIND-ELECTRIC SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR

V.V. Kozirsky¹, O.D. Podoltsev², M.I. Tregub³

¹ - **National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,**

Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine,

e-mail: epafort1@ukr.net

² - **Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: podol@ied.org.ua

³ - **Bila Tserkva National Agrarian University,**

pl. 8/1 Soborna, Bila Tserkva, 09117, Ukraine,

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

The effect of geometric dimensions of the ferromagnetic elements of ring-shaped rotor of the switched reluctance generator on the multiplicity of the variation of magnetic circuit conductivity caused by rotor motion is studied by numerical simulation using finite-element method and experimental prototype. The quantitative relations of dimensions of the elements with square cross-section are determined to provide the maximum change in magnetic system conductivity at rotor motion and to improve the electromagnetic characteristics of the generator. References 7, figures 5.

Keywords: switched reluctance generator, ring-shaped rotor, magnetic conductivity, rational geometric parameters, electromagnetic system.

1. Sinchuk O.N., Kozakevich I.A., Yurchenko N.N. Sensorless control of switched reluctance motors of traction electromechanical systems. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 62–66. (Ukr)

2. Alper N.J., Terzjn A.A. Induction generators. Moskva: Energiia, 1970. 192 p. (Rus)

3. Kozirsky V.V., Tregub M.I. Determine methodology of the type and geometric parameters of ring-shaped rotor wind turbine. *Problemy ta perspektivy rozvytku enerhetyky, elektrotekhnolohii ta avtomatyky v APK*. Kyiv, 5–6 November, 2013. Pp. 57-58. (Ukr)

4. Kozirsky V.V., Tregub M.I. Axial induction generator. Patent UA 101118, 2012.

5. Darie E., Cepisca C., Darie I. The use of switched reluctance generator in wind energy applications. Proc. of EPE-PEMC, September 1–3, 2008, Poland. Pp. 1963-1966.

6. Liu X., Chen Z. A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2014. No 11. Vol. 50. Pp. 150-155.

7. Nassereddine M., Rizk J., Nagrial N. Switched reluctance generator for wind power applications. Proc. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. Vol. 31. Pp. 126-130.

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 09.07.2018