

УДК 621.313.2

ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА З КІЛЬЦЕВИМ РОТОРОМ

В. В. Козирський¹, О. Д. Подольцев², М. І. Трегуб³

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

²Інститут електродинаміки, Україна.

³Білоцерківський національний аграрний університет, Україна.

Кореспонденція авторів: epafort1@ukr.net, podol@ied.org.ua, tregyb.m.i@gmail.com.

Історія статті: отримано – березень 2018, акцентовано – травень 2018.

Бібл. 7, рис. 6, табл. 0.

Анотація. За допомогою методів чисельного моделювання та експериментальних досліджень визначено вплив габаритних розмірів феромагнітних елементів кільцевого ротора вентильного реактивного генератора на кратність зміни магнітної провідності його електромагнітної системи в процесі руху. Визначені числові співвідношення геометричних розмірів цих елементів, за яких досягається максимальна зміна провідності. Отримані числові залежності щодо обмеження радіальної висоти феромагнітного елемента за різних розмірів сторони його квадратного перетину.

Ключові слова: вітроелектричний вентильний реактивний генератор, кільцево-циліндричний ротор, магнітна провідність, оптимальні геометричні розміри, електромагнітна система.

Постановка проблеми

Найдосконалішим способом приєднання електричної машини до робочого пристрою вважається взаємне інтегрування їх конструкцій без будь-яких трансмісійних вузлів і механізмів та одночасно без погіршення функціональних і технічних показників.

Аналіз останніх досліджень

Зокрема, для безтрансмісійних вітроелектричних установок кільцевий ротор не повинен суттєво впливати на аеродинамічні показники. Всі конструктивні типи електричних машин фактично визначаються конфігурацією ділянки магнітного кола ротора, яка найкоротша із прямолінійним напрямом магнітного потоку в роторах дискової та кільцево-циліндричної форми [5, 6]. Такі форми перспективні для вентильних реактивних електричних машин (ВРЕМ), у яких на роторі відсутні будь-які обмотки або постійні магніти [1]. Електричні машини з кільцево-циліндричним ротором крім того мають майже удвічі більшу площу активної поверхні в робочому немагнітному проміжку та подвійне число

полюсів порівняно з традиційними електричними машинами із суцільним циліндричним ротором. Можна назвати ще ряд принципових переваг, які підтверджують перспективність кільцево-циліндричного типу електричних машин [7], однак з огляду на нетрадиційність конфігурації їх 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).

Тому можна стверджувати, що розвиток методів визначення оптимальних геометричних параметрів магнітних систем вентильних реактивних генераторів (ВРГ) з кільцево-циліндричним ротором є актуальним завданням.

Мета досліджень

Метою даної роботи є обґрунтування за результатами математичного та фізичного моделювання оптимальних значень геометричних параметрів магнітної системи ВРГ з кільцевим ротором, які перспективні у різних сферах, зокрема у безтрансмісійних вітроустановках та низьконапірних гідроелектростанціях.

Результати досліджень

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 їх значень. Конструктивна схема, запропонованої [3] елементарної ланки електромеханічної системи із кільцевим ротором дугостаторного ВРГ, зображена на рис. 1.

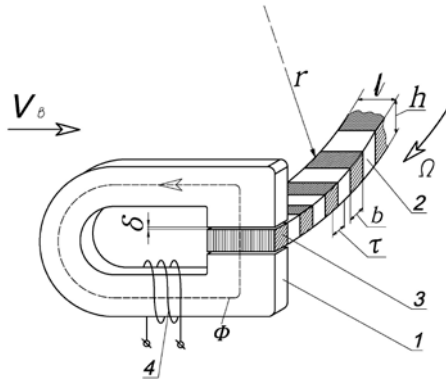


Рис. 1.

Кільцевий ротор 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 монопакетного магнітопроводу 1 статора із повітряним проміжком δ з кожного боку. Габаритні розміри ділянок ротора: l – аксіальна довжина, h – радіальна висота, b – дуговий сегмент. Середня лінія магнітного потоку Φ та орієнтовний напрям вітру зі швидкістю V_δ . На магнітопроводі статора виконана обмотка 4. На дуговому статорі може встановлюватися різне число таких однопакетних, магнітно не зв'язаних між собою статорних модулів, які є окремими електромеханічними системами, що гранично спрощує їх функціонування за принципом вентильних електричних машин. Напрямок вітру обумовлює однозначні габаритні вимоги до конструктивних розмірів кільцевого ротора, серед яких найбільший аеродинамічний вплив має радіальна висота h , яка за умов забезпечення необхідної механічної жорсткості та функціональних параметрів електромеханічної системи повинна мати мінімальні значення. Оскільки у безтрансмісійних низькооборотних 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 крайні положення, за яких відповідно матимемо максимальне і мінімальне її значення. Для двох граничних положень ділянок полюсного поділу розгортки кільцевого ротора побудована спрощена графоаналітична картина силових ліній плоскопаралельного магнітного поля за відомим методом Ріхтера, яка показана рис. 2(а, б).

Графічний аналіз дає підстави вважати, що за умови відсутності насичення магнітопроводу в положенні повного входження феромагнітного елемента ротора у проріз магнітопроводу статора (рис. 2, а) 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.

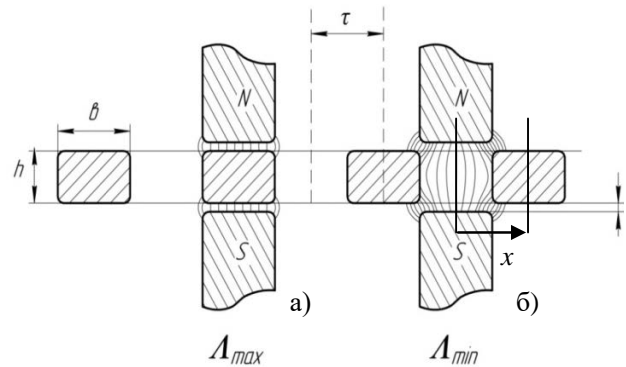


Рис. 2.

Оскільки $\mu_0 \ll \mu_\phi$, то Λ_{\max} залежатиме практично від розмірів повітряного проміжку δ , а розмір h феромагнітного елемента ротора на цей показник мало впливає. Це можна показати відомим аналітичним розрахунковим виразом максимального значення магнітної провідності:

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

де: R_δ – магнітний опір 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 і електротехнічної сталі μ_ϕ можна показати, що складова магнітного опору магнітопроводу не перевищуватиме 0,01%. Складніше завдання визначення мінімальної величини провідності у положенні (рис. 2, б), 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 за допомогою пакету програм COMSOL.

Для розрахунку магнітного поля та магнітної провідності магнітної системи в залежності від положення ротора використовувався фрагмент цієї системи, показаний на рис. 3 (а) із зображенням скінчених елементів. Він містить полюси електромагніту 1 та рухомий кільцевий ротор, який має три феромагнітні елементи 2. 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 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, описується рівнянням Лапласа $\nabla \cdot (-\mu_0 \mu_r \nabla \varphi_m) = 0$.

Дана залежність має граничні умови: на нижній поверхні першого полюсу задавалось $\varphi_m = \varphi_{m,1} = 0$, на верхній поверхні другого полюсу – $\varphi_m = \varphi_{m,2}$ (див. рис. 3, а), а на всіх інших поверхнях – умови магнітної ізоляції – $\partial \varphi / \partial n = 0$.

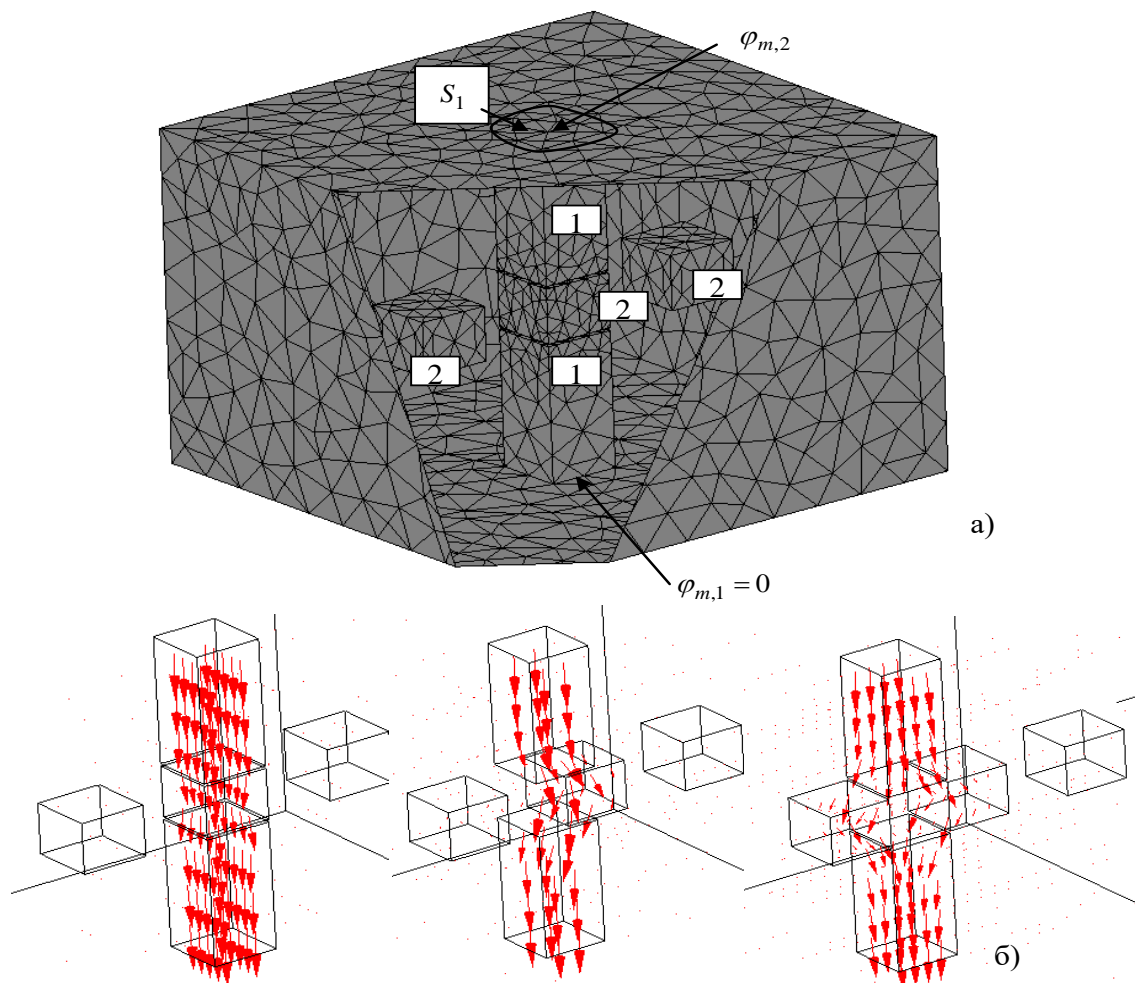


Рис. 3.

Наведена польова задача розраховувалася за допомогою пакету програм COMSOL. Після визначення розподілення скалярного магнітного потенціалу, значення магнітної провідності даної магнітної системи розраховувалось 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 верхнього полюса (див. рис. 3, а), а координата x показана на рис. 2 (б).

Для підтвердження достовірності одержаних залежностей також 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 за стабілізованої напруги та практично сталої частоти 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 $\pm 5\%$.

За результатами чисельного моделювання просторової моделі були отримані картини розподілу

вектора магнітної індукції при різних координатних положеннях (див. рис. 3, б). 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 – показані на рис. 4.

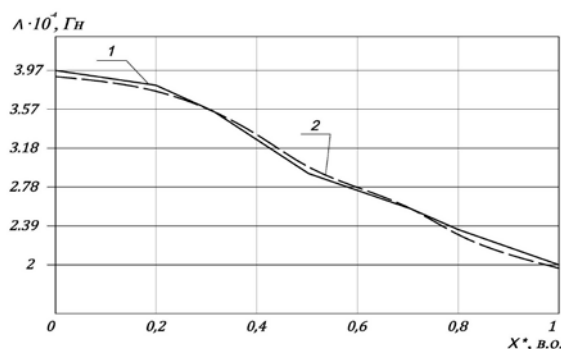


Рис. 4.

Розрахункова крива чисельного моделювання має помітні ділянки ламаної лінії, що викликано розміром сітки розбивки моделі, однак збіжність із

результатами експерименту досить висока (розбіжність не перевищує 3%), що дозволяє застосовувати результати чисельного моделювання на основі побудованої спрощеної моделі магнітної системи ВРГ для дослідження залежності магнітної провідності від координатного положення за різної радіальної висоти h феромагнітних елементів кільцевого ротора; результати такого моделювання показані на рис. 5.

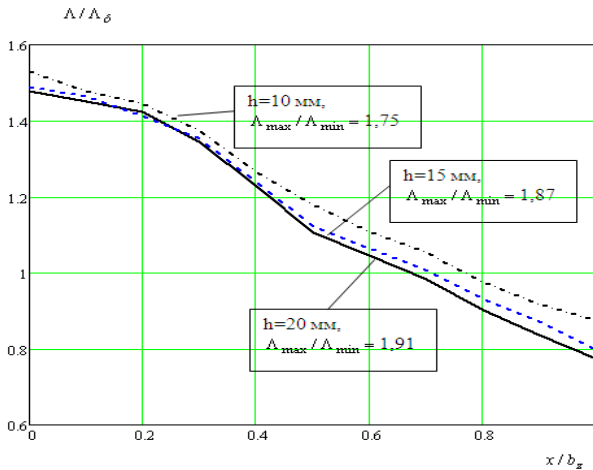


Рис. 5.

Графічні результати для однакових за площею перетину пакетів кільцевого ротора показують, що збільшення їх радіальної висоти викликає 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 пакету ротора, після якого збільшення цього розміру не викликати подальшого зростання різниці магнітних провідностей. В 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 проекцій 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. 6. Збільшення кратності пропорційно до збільшення площі перетину магнітопроводів узгоджується з математичним виразом магнітної провідності.

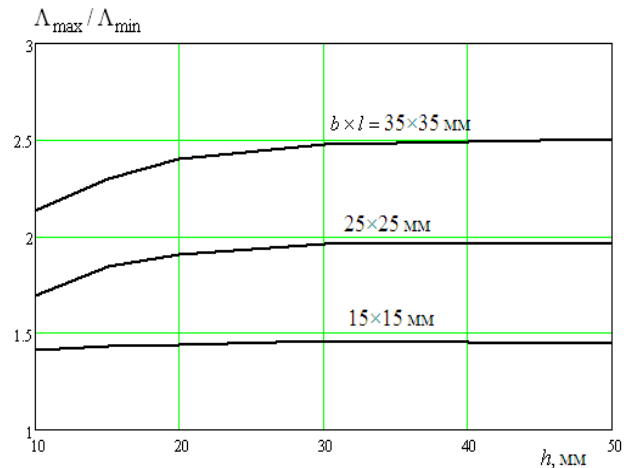


Рис. 6.

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 пакету ротора до близько 25 мм, відповідно для перетину зі стороною 25 мм максимальна кратність провідностей була за висоти h близько 30 мм, а для сторони 35 мм відповідно близько 37 мм. Тобто можна описати лінію тренду оптимальних співвідношень висоти і ширини квадратного перетину магнітопровідного пакету 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

1. Для низькообертової безтрансмійної вітроелектричної установки перспективним є дугостаторний вентильний реактивний генератор з радіально-кільцевим ротором.

2. За допомогою програмного пакету "COMSOL" та із використанням методу фізичного моделювання визначено вплив габаритних розмірів феромагнітного елемента кільцевого ротора на кратність зміни магнітної провідності електромагнітної системи такого типу генератора при різних положеннях ротора, що дозволяє встановлювати габаритні обмеження цієї системи.

3. Встановлені числові співвідношення геометричних розмірів феромагнітного елемента кільцевого ротора квадратного перетину, за яких

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

Список літератури

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.

2. Альпер Н. Я., Терзян А. А. Индукторные генераторы. Москва. 1970. 192 с.

3. Козирський В. В., Трегуб М. І. Методологія вибору типу і геометричної конфігурації кільцеворотного дугостаторного генератора безредукторної вітроелектричної установки. *Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»*. 5-6 листопада 2013 року. Київ. 2013. С. 57–58.

4. Трегуб М. І., Козирський В. В. Патент України №101118 UA, МПК H02K19/20, H02K21/38. Индукторний аксіальний генератор. №a201200837. Заявлено 27.01.2012. Опубліковано 25.02.2013. Бюл. №4.

5. Eleonora Darie, Costin Cepisca and Immanuel Darie. The use of switched reluctance generator in wind energy applications. *Proceedings of EPE-PEMC*. 2008. P. 1963–1966.

6. H. Li and Z. Chen. Overview of different wind generator systems and their comparisons. *Proceedings of IET Renewable Power Generation*. 2008. Vol. 2. No. 2. P. 123–138.

7. M. Nassereddine, J. Rizk, and M. Nagrial. Switched reluctance generator for wind power applications. *Proceedings of World academy of science, Engineering and Technology*. July 2008. 2008. Vol. 31. P. 126–130.

References

1. Sinchuk, E. M., Kozakevich, I. A., Yurchenko, M. M. (2017). Sensorless control of switched reluctance motors of traction electromechanical systems. *Technical electro-dynamics*. No. 5. 62–66.

2. Alper, N. Y. Terzian, A. A. (1970). Reluctance generators. Moscow. 192.

3. Kozirsky, V. V., Tregub, M. I. (2013). Determine methodology of the type and geometric parameters of ring rotor wind turbine. Abstracts of the International scientific-practical conference "Problems and prospects of development of energy, Electrotechnology and automation in agriculture". 5-6 November 2013. Kiev. 57–58.

4. Kozirsky, V. V., Tregub, M. I. (2013). Patent of Ukraine No. 101118 EN, IPC H02K19/20, H02K21/38. Inductory axial generator. No. a201200837. 27.01.2012 stated. Published on 25.02.2013. Bull. No 4.

5. Eleonora Darie, Costin Cepisca and Immanuel Darie. (2008). The use of switched reluctance generator

in wind energy applications. *Proceedings of EPE-PEMC*. 1963–1966.

6. H. Li and Z. Chen. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons. *Proceedings of IET Renewable Power Generation*. Vol. 2. No. 2. 123–138.

7. M. Nassereddine, J. Rizk, and M. Nagrial. (2008). Switched reluctance generator for wind power applications. *Proceedings of World academy of science, Engineering and Technology*. July 2008. Vol. 31. 126–130.

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ВЕТРОЕЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОЛЬЦЕОБРАЗНЫМ РОТОРОМ

V. V. Kozirsky, A. D. Podol'tsev, N. I. Tregub

Аннотация. С помощью методов численного моделирования и экспериментальных исследований определено влияние геометрических размеров ферромагнитных элементов кольцеобразного ротора вентильного реактивного генератора на кратность изменения магнитной проводимости электромагнитной системы при движении ротора. Определены числовые соотношения геометрических размеров этих элементов, при которых достигается максимальное изменение этой проводимости. Получены количественные зависимости ограничения радиальной высоты ферромагнитного элемента при различных размерах стороны его квадратного сечения.

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

SUBSTANTIATION OF MAGNETIC SYSTEM OF SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR WITH ANNULAR ROTOR FOR WIND TURBINE

Kozirsky V. V., Podol'tsev O. D., Tregub M. I.

Abstract. Using the methods of numerical simulation and experimental studies of the influence of the geometric dimensions of the ferromagnetic annular rotor elements of valve jet generator on the frequency of change of the magnetic permeability of the electromagnetic system when the rotor movement. Determined the numerical ratios of the geometric dimensions of these elements, in which achieved the maximum change in this conductivity. The obtained quantitative dependences limit the radial height of the ferromagnetic element at a side of the ego of square section.

Key words: switched reluctance generator, wind-electric turbine, ring rotor, magnetic conductivity, geometric parameters.

