УДК 621.548

ПОРІВНЯННЯ ТРАДИЦІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ З ТОРЦЕВИМ ГЕНЕРАТОРОМ ІЗ ДВОСТОРОННЬОЮ АКТИВНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК

В.М. Головко[1], професор, доктор технічних наук, **Е.А. Монахов**[2], асистент,
О.І. Пономарьов[2], інженер, **І.Я. Коваленко**[2], інженер.

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України
02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича, 20А.

[2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»
03056 м. Київ, пр-т Перемоги 37.

Проведено порівняння параметрів та характеристик традиційного генератора циліндричної конструкції із постійними магнітами з генератором торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею, що використовуються у вітроустановках, на основі польових математичних моделей. Бібл. 8, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: вітроустановка, електрогенератор, перетворення енергії, постійні магніти, математична модель.

COMPARISON OF TRADITIONAL PERMANENT MAGNET GENERATOR AND AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH DOUBLE-SIDED ACTIVE SURFACE FOR WIND TURBINE

V. Golovko[1], doctor of technical sciences, **E. Monakhov**[2], assistant, **A. Ponomarev**[2], engineer, **I. Kovalenko**[2], engineer.

[1]Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha Street, Kyiv, Ukraine.

[2]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
03056, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine.

Comparison of parameters and characteristics of a traditional cylindrical generator with permanent magnets with an end-type generator with a two-sided active surface used in wind turbines based on field mathematical models. References 8, tables 2, figures 6.

Keywords: wind turbine, electric generator, energy conversion, permanent magnets, mathematical model.



В.М. Головко
V. Holovko

Відомості про автора: провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.
Освіта: закінчив 1977 р. Українську сільськогосподарську академію за спеціальністю «Електрифікація сільського господарства».
Наукова діяльність: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.
Публікації: 145.
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Контакти: тел. /факс +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

Information about the author: research fellow at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.
Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with a degree on electrification of agriculture.
Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.
Publications: 145.
ORCID: 0000-0003-0195-9654
Contacts: phone /fax +38-044-206-28-09
e-mail: renewable@ukr.net

© В.М.Головко, Е.А.Монахов, О.І.Пономарьов, І.Я.Коваленко, 2018



Є.А. Монахов
E. Monakhov

Відомості про автора: асистент кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».
Освіта: закінчив 2012 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» за спеціальністю «Електричні машина та апарати».
Наукова діяльність: магнітоелектричні машини, системи керування, постійні магніти, машини з аксіальним потоком.
Публікації: 23.
ORCID: 0000-0001-8408-8051
Контакти: тел. /факс +38-095-317-61-15
e-mail: emonachov@gmail.com

Information about the author: assistant at the Department of Electromechanics at the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Education: graduated from the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in 2012 with a degree on electrical machines and appliances.
Research area: permanent magnet machines, system of control, permanent magnets, axial field machines.
Publications: 23.
ORCID: 0000-0001-8408-8051
Contacts: phone /fax +38-095-317-61-15
e-mail: emonachov@gmail.com



О.І. Пономарьов
A. Ponomarev

Відомості про автора: інженер кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».
Освіта: закінчив 1988 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» за спеціальністю «Електричні машина та апарати».
Наукова діяльність: магнітоелектричні машини, системи керування, постійні магніти, машини з аксіальним потоком.
Публікації: 30.
ORCID: 0000-0003-1322-927X
Контакти: тел. /факс +38-067-536-50-62
e-mail: aiponom@ukr.net

Information about the author: an engineer at the Department of Electromechanics at the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Education: graduated from the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in 1988 with a degree on electrical machines and appliances.
Research area: permanent magnet machines, system of control, permanent magnets, axial field machines.
Publications: 30.
ORCID: 0000-0003-1322-927X
Contacts: phone /fax +38-067-536-50-62
e-mail: aiponom@ukr.net



І.Я. Коваленко
I. Kovalenko

Відомості про автора: інженер Інституту прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського».
Освіта: закінчила у 2010 р. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» за спеціальністю «Нетрадиційні джерела енергії».
Наукова діяльність: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, електрогенератор.
ORCID: 0000-0003-1097-2041
Контакти: тел. /факс +38-097-939-96-73
e-mail: 2048141@ukr.net

Information about the author: an engineer at Institute for applied system analysis of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
Education: graduated from the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» in 2010 with a degree on renewable sources of energy.
Research area: renewable sources of energy, wind power systems, electric generator.
ORCID: 0000-0003-1097-2041
Contacts: phone /fax +38-097-939-96-73
e-mail: 2048141@ukr.net

Перелік використаних позначень та скорочень:

μ, γ	–	магнітна проникність та електропровідність;	L	–	осьова довжина генератора;
$\vec{V}, \vec{J}_{стор}$	–	вектори швидкості руху середовища та сторонньої густини струму;	$U_П$	–	кількість витків в пазу;
			$S_П$	–	площа в пазу під провідники;
J_e	–	густина струмів в обмотці статора, що характеризує режим роботи генератора;	E_{zA}, E_{zX}	–	напруженість електричного поля в місці розташування котушок фазних зон «А» і «х»;

σ – електропровідність матеріалів області;
μ_r – відносна магнітна проникність матеріалів.
B_r – залишкова індукція постійних магнітів;
J_m – амплітудне значення густини струму в фазі обмотки якоря, яке визначається струмовим навантаженням паза генератора (величиною струму якоря, кількістю витків і площею перетину паза);
Sq – площа, яку займають провідники однієї фазної зони;
a – число паралельних гілок обмотки якоря;
B_n, B_τ – нормальна та тангенціальна складові магнітної індукції щодо поверхні ротора;
R_2, L_2 – радіус та довжина ротора;
p – кількість пар полюсів;
τ – величина полюсної поділки ротора.

Вступ. Актуальним напрямком розвитку відновлювальних джерел енергії є використання енергії вітру. Одним із основних складових елементів вітроустановок є електричний генератор. Досвід та розробки зарубіжних та вітчизняних вчених показав, що на даний момент найбільшу ефективність мають генератори вітроустановок, що виконані на базі постійних магнітів із рідкоземельних елементів (SmCo, NdFeB) [1, 2, 8]. Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок вдосконалення конструкції наявних типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів [1, 2, 7].

Ця стаття присвячена аналізу параметрів та характеристик традиційного генератора циліндричної конструкції із постійними магнітами з генератором торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею. Використання саме торцевого генератора модульної конструкції дозволяє підвищити питому потужність установки та покращити використання активних матеріалів генератора (електротехнічної сталі, постійних магнітів, обмотувального проводу).

Торцеві електричні машини можна виконати з великим числом пар полюсів, що найбільш вигідно виділяє цей клас для застосування в низько швидкісних або в високочастотних приводах. На рис. 1 наведено порівняння серії електричних машин з аксіальним та радіальним магнітним потоком, тобто циліндричної машини для діапазону потужностей від 0,25 до 10 кВт [4, 7].

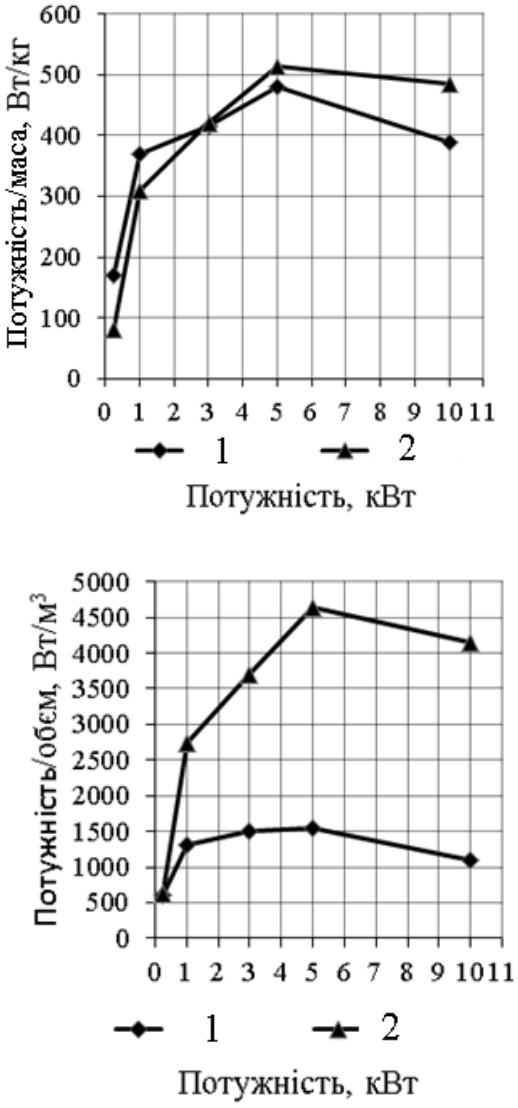


Рис. 1. Порівняння характеристик циліндричної (1) машини та торцевої з двосторонньою активною поверхнею (2).

Fig. 1. Comparison characteristics of a cylindrical (1) machine and active surface machine (2).

З порівняння машин близької потужності виходить, що машини з аксіальним потоком мають менший об’єм і масу активних матеріалів, ніж машини традиційної циліндричної конструкції. Особливо це стосується співвідношення потужності і об’єму машин у діапазоні потужностей від 0,25 до 10 кВт. Діапазон потужностей електричних генераторів з аксіальним магнітним потоком збудження лежить в межах від часток ват до мегават. У випадку збільшення вихідної потужності генератора, контактна поверхня з'єднання вала і ротора зменшується непропорційно до загального об’єму машини, що обмежує вихідну потужність машини з точки зору механічної цілісності і міцності вала машини. Рішенням для збільшення механічної цілісності з'єднання ротор–вал є модульна конструкція машини [5, 8]. Топологія цих машин є найбільш придатна для модульного компонування, в якому число однакових модулів обирається для забезпечення необхідної потужності або моменту [4].

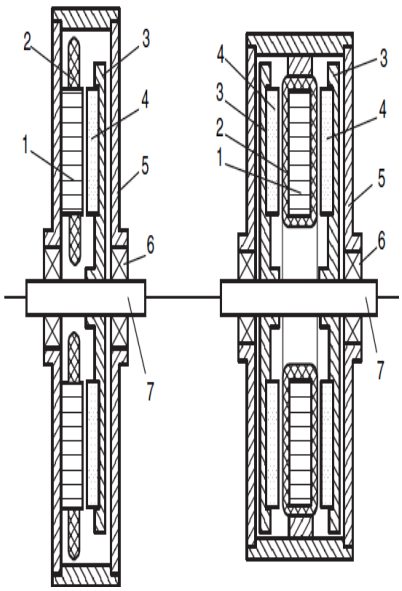


Рис. 2. Загальний вигляд торцевого генератора із двосторонньою активною поверхнею: 1 – магнітне осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – постійні магніти; 5 – корпус; 6 – підшипники; 7 – вал.

Fig. 2. Common view of the front generator with a two-sided active surface: 1 – the magnetic core of the stator; 2 – stator winding; 3 – rotor; 4 – permanent magnets; 5 – housing; 6 – bearings; 7 – shaft.

На рис. 2 показано конструкцію генератора торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею [3, 5].

На рис. 3 наведено вид генератора із постійними магнітами традиційної (циліндричної) конструкції [3, 6].

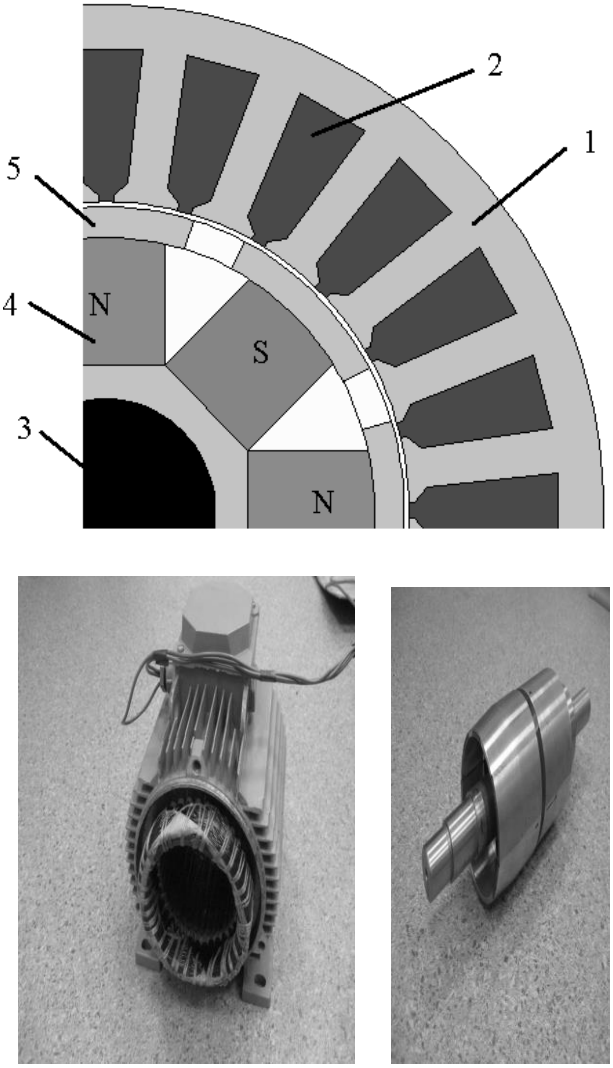


Рис. 3. Генератор класичної конструкції: 1 – магнітне осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – вал; 4 – постійні магніти; 5 – полюсні наконечники.

Fig. 3. Classical construction generator: 1 – magnetic stator core; 2 – stator winding; 3 – shaft; 4 – permanent magnets; 5 – pole tips.

Вихідні дані для математичного моделювання досліджуваних електричних генераторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для математичної моделі

Table 1 - Output data for a mathematical model

Параметр	Значення	
	Торцевий генератор	Циліндричний генератор
Постійні магніти	NdFeB N38: Br=1,21Тл, Hc=939 кА/м	NdFeB N38: Br=1,21Тл, Hc=939 кА/м
Матеріал ротора	Сталь 3	Сталь 3
Матеріал статора	Сталь 1211	Сталь 1211
Обмотувальний провід	ПЭТ 155 ∅ 0,47	ПЭТ 155 ∅ 0,47
Кількість витків в котушці	118	94
Кількість котушок	3×8	3×6
Швидкість обертання	300 об /хв	300 об /хв
Кількість полюсів	8	8
Зовнішній діаметр магнітного осердя статора, мм	170	130
Внутрішній діаметр магнітного осердя статора, мм	100	76
Довжина статора	35	127
Діаметр ротора, мм	175	75
Довжина ротора, мм	16	127
Величина повітряного проміжку, мм	0,5	0,5

Математична модель. Для розрахунку характеру розподілу електромагнітного поля торцевого електрогенератора доцільно використовувати тривимірну польову математичну модель. Це обумовлено наявністю в розрахунковій зоні такого генератора радіально-аксіального магнітного потоку. Застосування тривимірної математичної моделі дозволяє [1]:

- враховувати вплив магнітних полів розсіювання лобових частин;
- враховувати наявність міжлистової ізоляції між окремими листами магнітопроводу;
- в повній мірі враховувати повздовжні та поперечні кінцеві ефекти;
- в повній мірі враховувати конструктивні особливості генератора.

Чисельна реалізація моделі виконується методом скінченних елементів із застосуванням програмного пакету COMSOL Multiphysics.

Для розрахунку магнітного поля використовувалося нестаціонарне нелінійне диференціальне рівняння для векторного магнітного потенціалу (А) в рухомому електропровідному середовищі [3, 4]:

$$\vec{\nabla}\times\frac{1}{\mu}\left(\vec{\nabla}\times\vec{A}\right)-\gamma\frac{\partial A}{\partial t}+\gamma\vec{V}\times\left(\vec{\nabla}\times\vec{A}\right)=-\vec{J}_{стор},$$

де: μ, γ – магнітна проникність та електропровідність; $\vec{V}, \vec{J}_{стор}$ – вектори швидкості руху середовища та сторонньої густини струму.

Для розрахунку електромагнітного поля в квазістатичному режимі попереднє рівняння набуває такого вигляду:

$$\vec{\nabla}\times\frac{1}{\mu}\left(\vec{\nabla}\times\vec{A}\right)-\gamma j\omega+\gamma\vec{v}\times\left(\vec{\nabla}\times\vec{A}\right)=-\vec{J}_{стор}.$$

Для отримання однозначного розв'язку на межах розрахункової області задаються граничні умови першого роду:

$$A\big|_{г1}=A_{г1}(x,y,z,t).$$

Для отримання характеру розподілу вихідної напруги та магнітної індукції в часі на окремих ділянках магнітопроводу задаються початкові

умови – значення польових функцій в середині області в початковий момент часу.

$$a(x,y,z,t)\big|_{t=0} = a(x,y,z,0).$$

Оскільки розрахункова область машини має різні фізичні властивості, то в кожній з областей вирішується стаціонарне рівняння поля щодо векторного магнітного потенціалу. Для області, яка містить в собі повітряний проміжок, магнітопровід, вал, полюсні наконечники і обмотку якоря рівняння має такий вигляд [1–3]:

$$\sigma\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla\times\frac{\nabla\times A}{\mu_0\cdot\mu_r} = J_e,$$

де J_e – густина струмів в обмотці статора, що характеризує режим роботи генератора; σ – електропровідність матеріалів області; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалів.

Поле постійних магнітів розраховується за таким стаціонарним рівнянням:

$$\sigma\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla\times\frac{\nabla\times A - B_r}{\mu_0\cdot\mu_r} = J_e,$$

де B_r – залишкова індукція постійних магнітів.

Густина струмів в обмотці якоря задаються як функція часу t:

$$J_A = J_m\cdot\cos(\omega_1\cdot t),$$

$$J_B = J_m\cdot\cos(\omega_1\cdot t + 2\pi/3),$$

$$J_C = J_m\cdot\cos(\omega_1\cdot t + 4\pi/3),$$

де J_m – амплітудне значення густини струму в фазі обмотки якоря, яке визначається струмовим навантаженням паза генератора (величиною струму якоря, кількістю витків і площею перетину паза).

Для розрахунку індукованої ЕРС в фазі обмотки якоря генератора, в середовищі COMSOL Multiphysics використовується такий інтегральний вираз:

$$E_A = \frac{L\cdot U_n}{S_n\cdot a}\left(\oint_{S_q} E_{zA}\cdot ds - \oint_{S_q} E_{zX}\cdot ds\right),$$

де L – осьова довжина генератора; $U_П$ – кількість витків в пазу; $S_П$ – площа в пазу під провідники; E_{zA}, E_{zX} – напруженість електричного поля в місці розташування котушок фазних зон «А» і «х»; Sq – площа, яку займають провідники однієї фазної зони; а – число паралельних гілок обмотки якоря. Аналогічно визначаються ЕРС в фазах обмотки «В» і «С».

Для обчислення миттєвих значень сили і крутного моменту, наприклад, для визначення часової залежності електромагнітного моменту синхронного генератора з постійними магнітами використовується метод тензору магнітного натягу. В загальному вигляді вираз для обчислення має такий вигляд:

$$n_1 T_{av} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\cdot\left(-\frac{1}{2}n_1(E\cdot D) + (n_1\cdot E)\cdot D^T - \right.$$
$$\left. -\frac{1}{2}n_1(H\cdot B) + (n_1\cdot E)\cdot B^T\right).$$

Результати моделювання. На рис. 4 наведено розподіл магнітної індукції в розрахунковій області для генератора з постійними магнітами циліндричної конфігурації.

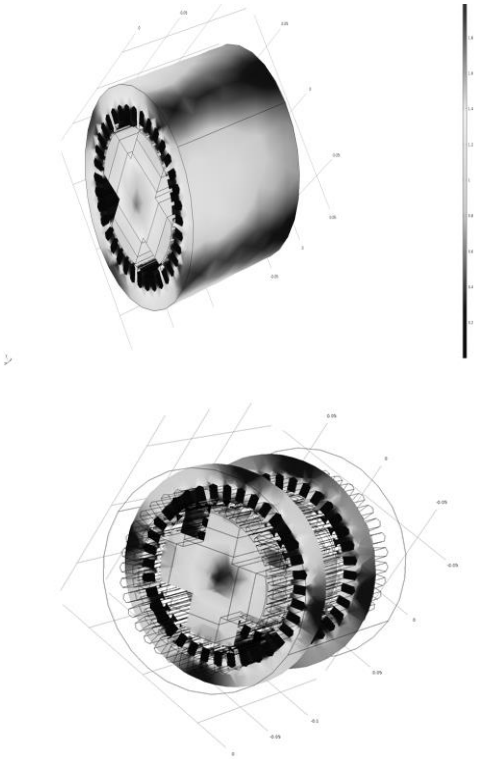


Рис. 4. Розподіл електромагнітного поля в розрахунковій області циліндричного електрогенератора.

Fig. 4 Electromagnetic field distribution in the area of a cylindrical generator.

На рис. 5 наведено розподіл магнітної індукції в рамках розрахункової області торцевого генератора із постійними магнати з двосторонньою активною поверхнею.

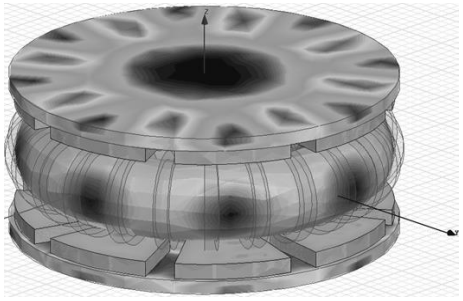


Рис. 5. Розподіл електромагнітного поля для двохсторонньої конструкції з радіально-аксіальним магнітним потоком.

Fig. 5 Electromagnetic field distribution for a two-sided design generator with radial axial magnetic flux.

Кінцевий вираз для визначення електромагнітного моменту генератора набуде такого вигляду:

$$M_{эм} = \frac{2 \cdot p \cdot R_2 \cdot L_2}{\mu_0} \int_0^{\tau} B_n B_\tau dl ,$$

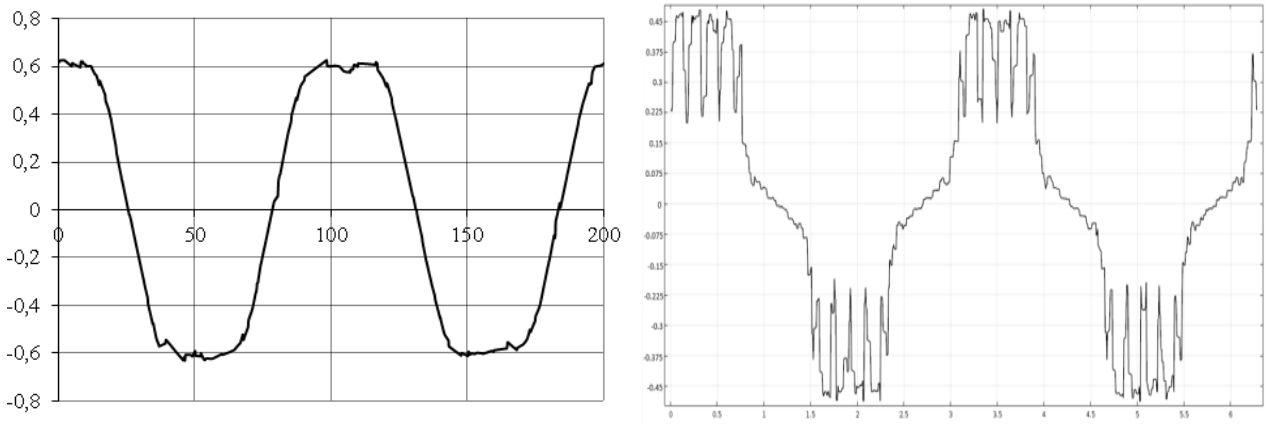
де B_n, B_τ – нормальна та тангенціальна складові магнітної індукції щодо поверхні ротора; R_2, L_2 – радіус та довжина ротора; p – кількість пар полюсів; τ – величина полюсної поділки ротора.

На рис. 6 наведено розподіл середнього значення магнітної індукції для двох конструктивних виконань: б) – традиційна (циліндрична) конструкція генератора; а) – торцева двостороння конструкція.

На рис. 6 наведено розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку для двох випадків:

З рис. 6 видно, що генератор торцевої конструкції забезпечує вище амплітудне значення магнітної індукції в проміжку за рахунок конструктивного виконання, ніж генератор класичної конструкції. Крім того, у генератора класичної конструкції величина вищих гармонік магнітного потоку проявляється сильніше за рахунок явно вираженої зубчастості внутрішньої розточки статора та явно полюсного виконання ротора.

Результати розрахунку та порівняння наведених конструкцій генераторів та їхньої ефективності наведено в табл. 2.



а) б)

Рис. 6. Розподіл середньоквадратичного значення магнітної індукції для двох випадків: а) торцевої конструкції електрогенератора із двосторонньою активною зоною; б) для циліндричної конструкції електрогенератора.

Fig. 6. Magnetic flux density distribution for two cases: a) the end structure of the generator with a two-way active zone; b) for a cylindrical generator.

Таблиця 2 – Результат порівняння параметрів та характеристик генераторів

Table 2 - Result of comparison of parameters and characteristics of generators

Параметри	Од. вим.	Торцевий генератор	Циліндричний генератор
Номінальний фазний струм	А	2,8	2,8
Індукція в повітряному проміжку	Тл	0,43	0,32
Фазна ЕРС	В	87	63
Електромагнітна потужність	Вт	320	314
Лінійне навантаження	$А/м\times10^3$	13,14	12,67
Маса постійних магнітів	кг	1,7	0,94
Маса генератора	кг	7,3	6,8
ККД	%	91,0	93,0
Умовний об'єм активної частини	$м^3$	0,014	0,011
Маса	кг	7,9	7,1
Питома потужність	$Вт/м^3$	3600	1500
Максимальний момент	Н·м	28,52	14,32
Номінальний момент	Н·м	16,7	10,2
Фазна ЕРС	В	87	63

Висновки. Результати порівняльного аналізу наведених типів електрогенераторів дозволяють зробити висновки, що торцевий тип у порівнянні з генераторами циліндричної конструкції мають:

- ефективніше використання активної частини, що проявляється підвищеним значенням індукованої ЕРС в обмотці якоря, покращеними питомими показниками, зокрема у випадку багатополюсного виконання;
- більш високе значення перевантажувальної здатності та номінального моменту;
- кращі умови для природнього охолодження;
- характерні топологічні властивості для реалізації модульного виконання;
- можливість надійного консольного закріплення за наявності невеликої осьової довжини.

1. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами / Ю.М. Васьковський, Ю.А. Гайденко, М.А. Коваленко – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 193 с.

2. Математическое моделирование генератора с комбинированным возбуждением автономной энергоустановки / В.В. Чумак, М.А. Коваленко, О.І. Пономарьов // ІЕС Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2015. – №3 (31). – С. 53–60.

3. Коваленко М.А. Цепеполевая математическая модель генератора с постоянными магнитами автономной энергоустановки / В.В. Чумак, М.А. Коваленко, А.И. Пономарев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2015. – №42 (1151). – С. 44–51.

4. Чумак В.В. Управление магнитоэлектрическим генератором с аксиальным потоком / В.В. Чумак, Е.А. Монахов // Технічна електродинаміка. – 2016. – №2. – С. 55–57.

5. Чумак В.В. Исследование вопросов выбора постоянных магнитов в торцевом магнитоэлектрическом генераторе / В.В. Чумак, Е.А. Монахов // Гідроенергетика України. – 2015. – №1–2. – С. 54–57.

6. Монахов Е.А. Методика расчета магнитной системы торцевых синхронных магнитоэлектрических генераторов / Е.А. Монахов, В.В. Чумак // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – №1 (90), ч.1. – С. 23–26.

7. Васько П.Ф., Брыль А.А., Пекур П.П. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине // Энергетика и электрификация. – 1995. – №2. – С. 48–51.

8. Коханевич В.П., Перминов Ю.Н., Шихайлов Н.А., Марченко Н.В. Разработка и испытание генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок на базе серийных асинхронных двигателей / Альтер. энергет. и экология. – 2012. – №7 – С. 48–55.

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ И ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА С ДВУХСТОРОННЕЙ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК

В.М. Головко[1], профессор, доктор технических наук, **Е.А. Монахов**[2], ассистент,

А.И. Пономарев[2], инженер **И.Я. Коваленко**[2].

[1]Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094, г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А.

[2]Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»
03056, г. Киев, пр-т Перемогы, 37.

Проведено сравнение параметров и характеристик традиционного генератора цилиндрической конструкции с постоянными магнитами с генератором торцевого типа с двухсторонней активной поверхностью, используемых в ветроустановках, на основании полевых математических моделей. Библ. 8, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: ветроустановка, электрогенератор, преобразования энергии, постоянные магниты, математическая модель.

REFERENCES

1. Vaskovskyi Yu.M. Matematychne modeliuvannia elektrychnykh mashyn z postiinymy mahnitamy / Yu.M. Vaskovskyi, Yu.A. Haidenko, M.A. Kovalenko – K.: NTUU «KPI», 2017. – 193 s. [Ukr.]

2. Matematicheskoe modelirovanie generatora s kombinirovannym vozbuzhdeniem avtonomnoy energoustanovki / V.V. Chumak, M.A. Kovalenko, O.I. Ponomarev // IES Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. – 2015. – №3 (31). – S. 53–60. [Rus.]

3. Kovalenko M.A. Tsepepolevaya matematicheskaya model' generatora s postoyannymi magnitami avtonomnoy energoustanovki / V.V. Chumak, M.A. Kovalenko, A.I. Ponomarev // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». – 2015. – №42 (1151). – S. 44–51. [Rus.]

4. Chumak V.V. Upravlenie magnitoelektricheskim generatorom s aksial'nym potokom / V.V. Chumak, E.A. Monakhov // Tekhnichna elektrodynamika. – 2016. – №2. – S. 55–57.

5. Chumak V.V. Issledovanie voprosov vybora postoyannykh magnitov v tortsevom magnitoelektricheskom generatore / V.V. Chumak, E.A. Monakhov // Hidroenerhetyka Ukrainy. – 2015. – №1–2. – S. 54–57.

6. Monakhov E.A. Metodika rascheta magnitnoy sistemy tortsevykh sinkhronnykh magnitoelektricheskikh generatorov / E.A. Monakhov, V.V. Chumak // Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – 2015. – №1 (90), ch.1. – S. 23–26.

7. Vasko P.F., Bryl A.A., Pekur P.P. Opredelenie tekhnicheskikh pokazateley effektivnosti ispol'zovaniya vetroelektricheskikh agregatov v Ukraine // Energetika i elektrifikatsiya. – 1995. – №2. – S. 48–51.

8. Kokhanevich V.P., Perminov Yu.N., Shikhaylov N.A., Marchenko N.V. Razrabotka i ispytanie generatorov s postoyannymi magnitami dlya vetroustanovok na baze seriynykh asinkhronnykh dvigateley / Alter. energet. i ekologiya. – 2012. – №7 – S. 48–55.

SYNOPSES

The usage of the wind is actual branch in development of renewable energy. One of the main components in wind turbine is electric generator. Experience and development of foreign and domestic scientists showed that at present the most effective are generators in wind turbines, which are made excitation of permanent magnets from rare earth elements (SmCo, NdFeB). The way to increase the effectiveness of transformation the wind energy to electrical is possible with help of improvement the design of existing types of generators, using new technologies and materials or by design new technical solutions. This article deals with analysis of parameters and characteristics of traditional permanent magnet generator with cylindrical stator and axial flux permanent magnet generator with double sides active surface. The analysis is based on developed 3D field mathematical models. The usage of axial flux permanent magnet generator in case of modular usage allows to increase the power of wind turbine and to improve the usage of active materials of generator (electrotechnical steel, permanent magnets, copper). Axial flux permanent magnet machines has less volume and mass of active materials compare to traditional cylindrical machines the same power. This is especially true for the ratio of power and volume of machines in the range of power from 0.25 to 10 kW. The power of axial flux permanent magnet is in range from the parts of W to megawatts. By increasing the output power of the generator, the contact surface of the shaft and rotor connection decreases disproportionately to the total volume of the machine, which limits the output power of the machine in terms of the mechanical integrity and strength of the machine shaft.

РЕФЕРАТ

Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок удосконалення або розробки нових конструктивних рішень сучасних типів електрогенераторів як одного із основних складових елементів вітроустановки. У цій роботі наведено порівняння параметрів та характеристик генераторів із постійними магнітами традиційної циліндричної конструкції та торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею. Аналіз параметрів та характеристик зазначених генераторів здійснюється за допомогою розроблених тривимірних польових математичних моделей методом скінченних елементів. Реалізація моделей здійснена в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Результати досліджень показали, що генератор торцевого типу у порівнянні з генератором циліндричної конструкції має більш ефективне використання активної частини, вищу перевантажувальну здатність та кращі умови для охолодження, модульного виконання та консольного закріплення.

Стаття надійшла до редакції 07.05.18
Остаточна версія 07.06.18