

ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ЗА РАХУНОК ЗМЕНШЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ МІЖ СТАТОРОМ І РОТОРОМ

В.М. Головка¹, докт. техн. наук, проф., **Є.М. Дубчак**², ст. викл., **О.Ю. Заморока**², магістрант

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

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна.

Збільшення потужності вітроустановки при мінімальних конструкційних змінах завжди було пріоритетним напрямком досліджень у вітроенергетиці. Жорстка залежність потужності на валу ротора вітроустановки від аеродинамічних характеристик лопаті відомі і втілені в інженерні рішення. Електромашинна частина вітроустановки комплектується загальнопромисловим виконанням синхронних або асинхронних генераторами, переваги та недоліки застосування яких всебічно відомі. Також встановлено, що відношення потужності в генераторному режимі до потужності машини в двигунному режимі, стає більше одиниці в залежності від числа пар полюсів та потужності машини.

Робота присвячена визначенню підвищення потужності асинхронної машини в генераторному режимі за рахунок впливу на магнітний потік гранично припустимим зменшенням повітряного проміжку між статором і ротором. В даній роботі використана вдосконалена методика розрахунку параметрів і характеристик асинхронних машин с короткозамкненим ротором на базі уточнених Т-подібних заступних схем. В таких заступних схемах в контурі намагнічування паралельно приєднані один змінний індуктивний опір, що пов'язаний з результируючим полем взаємоіндукції, та декілька змінних активних опорів, значення яких пов'язані із змінами основних та додаткових (поверхневих та пульсаційних) втрат в магнітопроводах статора і ротора. При розрахунках, що були проведені за даною методикою, повітряний проміжок був зменшений в межах 0,05мм, але, не досягав гранично допустимого значення 0,25мм. Потужність машини приймалась від 1,1 до 4,0 кВт, як найбільш доцільною для малих вітроустановок для умов нашої країни, з числом пар полюсів 1,2 та 3. Порівняння результатів з відомими даними, для діапазону потужності 1,1...4 кВт показує збільшення коефіцієнта використання для: $2p=2$ до 7%, $2p=4$ до 18%, а для $2p=6$ до 23%. Бібл. 6, табл.1, рис. 2.

Ключові слова: вітроустановка, асинхронний генератор, енергетичні характеристики вітроустановки.

INCREASING THE POWER OF THE WINDOW GENERATOR FOR THE DECREASE OF AIR LENGTH BETWEEN THE STATOR AND THE ROTOR

V. Golovko¹, doctor of technical science, professor, **E. Dubchak**², senior lecturer, **O. Zamoroka**², undergraduate

¹Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

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

Increasing wind power with minimal structural changes has always been a priority in wind power research. The rigid dependence of the power on the rotor shaft of the wind turbine on the aerodynamic characteristics of the blade is known and embodied in engineering solutions. The electrical part of the wind farm is equipped with a common industrial design of synchronous or asynchronous generators, the advantages and disadvantages of which are well known. It is also found that the ratio of power in the generator mode to the power of the machine in the motor mode, becomes greater than one depending on the number of pairs of poles and the power of the machine.

The work is devoted to determining the increase in power of an asynchronous machine in the generator mode due to the influence on the magnetic flux of the maximum allowable reduction of the air gap between the stator and the rotor. In this work we have used advanced methods of calculation of parameters and characteristics of asynchronous machines with short-circuited rotor based on refined T-shaped alternating circuits. In such alternate circuits, one alternating inductive resistance associated with the resultant field of induction and several alternating active resistors, whose values are related to changes in the main and additional (surface and ripple) losses in the stator magnetic circuits, are connected in parallel to the magnetization circuit. In the calculations performed by this method, the air gap was reduced within 0.05 mm, but did not reach the maximum permissible value of 0.25 mm. The power of the machine was taken from 1.1 to 4.0 kW as the most suitable for small wind turbines for the conditions of our country, with the number of pairs of poles 1.2 and 3. Comparison of the results with known data for the power range of 1.1... 4 kW shows an increase in the utilization rate for: $2p = 2$ to 7%, $2p = 4$ to 18%, and for $2p = 6$ to 23%. Ref. 6, tab. 1, fig. 2.

Keywords: wind turbine, asynchronous generator, wind turbine power characteristics.



*В.М. Головка
V. Holovko*

Відомості про автора: провідний науковий співробітник Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: закінчив 1977 р. Українську сільсько-господарську академію за спеціальністю «Електрифікація сільського господарства».

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.

Публікації: 162.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Контакти: тел./факс: +38-044-206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

Author information: chief researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: graduated from the Ukrainian Agricultural Academy in 1977 with the degree of "Electrification of Agriculture".

Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.

Publications: 162.

ORCID: 0000-0003-0195-9654

Contacts: tel./fax: +38-044-206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net



*С.М. Дубчак
E. Dubchak*

Відомості про автора: старший викладач кафедри електромеханіки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Освіта: закінчив 1979 р. Київський політехнічний інститут за спеціальністю «Електричні машини і апарати».

Наукова сфера: електромашинно-напівпровідникові перетворювачі, системи збудження, машини подвійного живлення.

Публікації: 26.

ORCID: 0000-0001-7654-7908

Контакти: тел./факс: +38-044-285-23-68

e-mail: edubchak@ukr.net

Author information: senior lecturer in the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Education: graduated in 1979 from the Kiev Polytechnic Institute, majoring in Electrical Machines and Apparatus.

Research area: electromachine-semiconductor converters, excitation systems, dual-power machines.

Publications: 26.

ORCID: 0000-0001-7654-7908

Contacts: Phone / Fax + 38-044-285-23-68

E-mail: edubchak@ukr.net



*О.Ю. Заморока
O. Zamoroka*

Відомості про автора: магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Освіта: отримав 2018 р. у Київському політехнічному інституті освітню ступінь бакалавр за спеціальністю «Електричні машини і апарати».

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітроустановки малої потужності, автономні системи енергозабезпечення.

Публікації: 0.

ORCID: 0000-0001-7349-6666

Контакти: тел./факс: +38-050-011-83-37

e-mail: zamoroka777333@gmail.com

Author information: undergraduate of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Education: obtained bachelor's degree in 2018 in Kiev Polytechnic Institute, majoring in Electrical Machines and Apparatus.

Research area: renewable sources of energy, wind power systems, small capacity wind units, autonomous power systems.

Publications: 0.

ORCID: 0000-0001-7349-6666

Contacts: тел./факс: +38-050-011-83-37

e-mail: zamoroka777333@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

x_m – індуктивний опір взаємодукції;

k_μ – коефіцієнт насичення магнітопроводу;

k_m – коефіцієнт насичення;

$I_{\text{шт}}$ – струм контура намагнічування.

Вступ. Задача збільшення кількості утилізації енергії вітру завжди є актуальною. Традиційно вона вирішується за рахунок зміни аеродинамічних параметрів ротора вітроустановки. Так для збільшення величини потужності на валу ротора збільшують його діаметр. Але підвищення потужності в два рази призводить до збільшення діаметра ротора в чотири рази. Такий результат викликає подальше зростання розмірів, а значить і маси інших складових вітроагрегата, тобто питома матеріалоемність конструкції зростає і знижується економічна доцільність використання

даної установки. Іншим шляхом є застосування більш досконалих профілів лопатей. В [1] наведений аналіз рішень при виборі типу профілю в залежності від коефіцієнта використання енергії вітру (коефіцієнт потужності) та модуля швидкості. Встановлено, що перевагу необхідно надавати профілям, що мають високі вимоги до шорсткості поверхні та точності виготовлення (ламінізовані профілі). Застосування таких профілів дозволяє отримати значення коефіцієнта використання енергії вітру більше 0,5.

Другою складовою вітроелектроустановки є електромашинна частка. Переваги та недоліки застосування синхронних та асинхронних машин в генераторному режимі всебічно висвітлені в роботах [2,3,4,5]. Останнім часом детально розглядається можливість застосування асинхронної машини для автономних вітроелектроустановок. В роботі [5] встановлено, що відношення потужності в генераторному режимі до потужності машини в двигунному режимі, стає більше одиниці в залежності від числа пар по-

люсів та потужності машини (рис.1). Слід відмітити, що з ростом кількості пар полюсів початок перевищення одиниці зсувається вправо, що практично виключає застосування відносно тихохідних машин (1000 об./хв.) малої потужності (до 7,5 кВт) як генераторів для вітроустановок. Одним із шляхів вирішення такої задачі є вплив на величину $\cos\phi$ шляхом зменшення зазору між статором і ротором в допустимих технологічних межах.

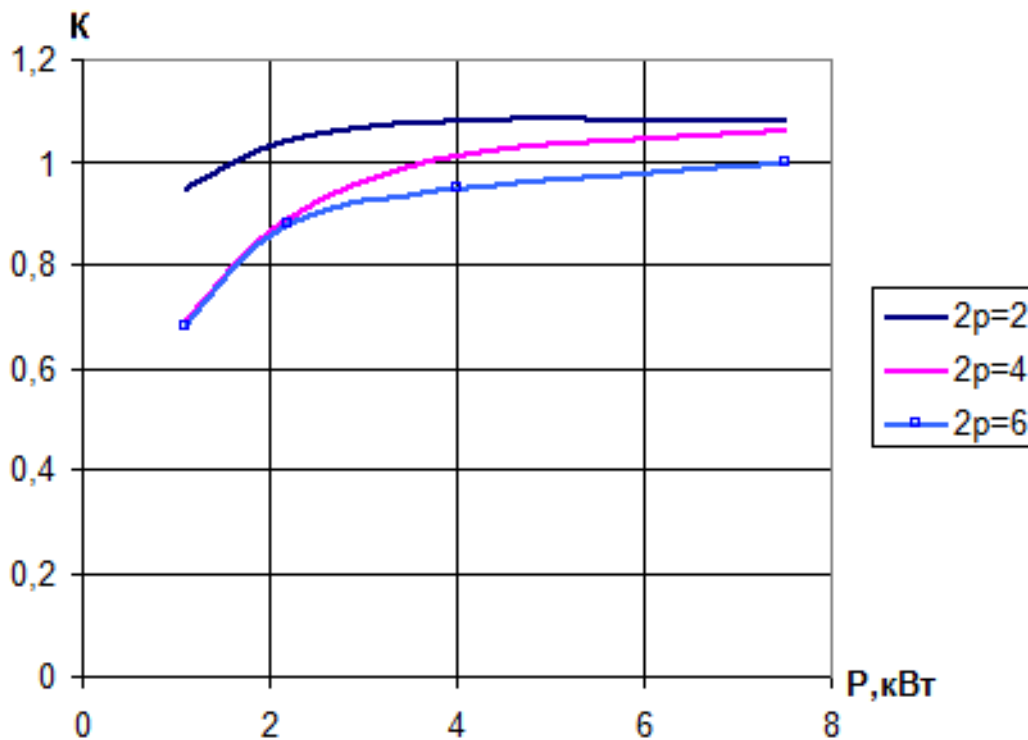


Рис. 1. Залежність коефіцієнта співвідношення потужності асинхронної машини в генераторному та двигунному режимах від її потужності.

Fig. 1. Dependence of the ratio of the power ratio of the asynchronous machine in the generator and motor modes on its power.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення потужності асинхронної машини в генераторному режимі за рахунок впливу на магнітний потік гранично припустимим зменшенням повітряного проміжку.

Результати досліджень. Методика розрахунку характеристики асинхронної машини у режимі двигуна та генератора має доволі громіздкий формат, але дає можливість отримати повний набір реальних параметрів заступної схеми для номінального режиму роботи двигуна та задаючись діапазоном зміни ковзання, отримати реальні значення робочих характеристик: потужностей, струмів, усіх складових суми втрат, енергетичних параметрів двигуна, у тому числі у

номінальному режимі. Після цього, змінюючи знак та значення ковзання отримують робочі характеристики машини в генераторному режимі роботи. Обмеженням є номінальне значення струму обмотки статора. При цьому відбувається зміна значення та фази результуючої електроорушійної сили (ЕРС) від результуючого поля в повітряному проміжку та зміна параметрів контуру намагнічування.

На кафедрі електромеханіки НТУУ КПІ було проведено вдосконалення методики розрахунку параметрів і характеристик асинхронних машин с короткозамкненим ротором (АМ), що подане в [6], на базі уточнених Т-подібних заступних схем. В таких заступних схемах в контурі намаг-

нічування паралельно приєднані один змінний індуктивний опір, що пов'язаний з результируючим полем взаємоіндукції, та декілька змінних активних опорів, значення яких пов'язані із змінами основних та додаткових (поверхневих та пульсаційних) втрат в магнітопроводах статора і ротора.

Значення змінного індуктивного опору взаємоіндукції x_m залежить від насичення магнітопроводу, що змінюється при зміні режиму роботи асинхронної машини.

Алгоритм розрахунку індуктивного опору взаємоіндукції x_m реалізовано в середовищі MATHCAD з урахуванням змін індукції та напруженості магнітного поля у відповідності до таблиць намагнічування зубців та ярем магнітопроводів статора і ротора. При задаванні змін ЕРС E_d в діапазоні від 0 до $1,5 U_n$ розраховується значення магнітного потоку Φ_d , індукції в зубцях та ярмах статора і ротора, знаходиться відповідне значення напруженості магнітного поля та магніторушійної сили (МРС) на усіх ділянках магнітопроводу, сумарну МРС та коефіцієнт насичення магнітопроводу k_m , реактивну складову струму контуру намагнічування. За відношенням ЕРС E_d від результируючого поля у повітряному проміжку до реактивної складової струму намагнічування визначають значення змінного індуктивного опору взаємоіндукції x_m та коефіцієнт насичення k_m для будь-якого значення ЕРС E_d .

Значення активних опорів контуру намагнічування розраховують за алгоритмом, в якому також вхідною величиною є ЕРС E_d при частоті напруги живлення 50 Гц, а також масі заліза зубців та ярем статора і ротора. Для даного значення ЕРС E_d розраховують основні та додаткові (поверхневі та пульсаційні) втрати в магнітопроводах статора і ротора. За відношенням квадрату ЕРС до втрат в залізі магнітопроводу $\pi 50 =$

$m \cdot E_d^2 / \pi i 50$, визначають значення змінних активних опорів контуру намагнічування, що паралельно з'єднані між собою. Таким чином отримується активна складова струму контуру намагнічування для частоти напруги живлення 50 Гц.

Робочі характеристики машини в режимі двигуна і генератора розраховують при задаванні значення ковзання в діапазоні від -0,1 до +0,1 з кроком, що забезпечує достатню точність. При цьому задають перше - максимальне можливе значення ЕРС E_d для генераторного режиму. Для кожного значення ЕРС визначають величину опору x_m , коефіцієнт насичення k_m та реактивну складову струму контуру намагнічування I_{mr} , що дає можливість визначити частоту ковзання та частоту перемагнічування ротора та складові змінних активних опорів контуру намагнічування. Таким чином отримують значення активної складової струму в контурі намагнічування I_{ma} . За коефіцієнтом насичення k_m вираховують зміну індуктивного опору розсіювання обмотки ротора, що дозволяє визначити струми ротора та статора та значення напруги на обмотці статора. Мінімізація різниці цієї величини з напругою мережі, отримують значення робочої характеристики (суму втрат, ККД, фазний струм статора та коефіцієнт потужності) для будь-якого режиму роботи асинхронної машини.

При розрахунках, що були проведені за даною методикою, повітряний проміжок був зменшений в межах 0,05 мм, але, не досягав гранично допустимого значення 0,25 мм. Потужність машини приймалась від 1,1 до 4,0 кВт, як найбільш доцільною для малих вітроустановок для умов нашої країни, з числом пар полюсів 1,2 та 3. Результати розрахунку залежності коефіцієнта використання асинхронної машини в генераторному режимі наведені в табл.1 та на рис. 2.

Таблиця 1. Порівнянні розрахункові показники асинхронних машин в двигунному та генераторному режимах.

Table 1. Comparative calculation of asynchronous machines in engine and generator modes.

Число пар полюсів, p	P_{2d} , кВт	δ_1 , мм	δ_2 , мм	η_d	$\cos\varphi_d$	η_g	$\cos\varphi_g$	$\frac{\cos\varphi_g}{\cos\varphi_d}$	K
1	1,1	0,35	0,3	0,787	0,918	0,79	0,737	0,803	1,020
	2,2	0,35	0,3	0,845	0,906	0,85	0,8	0,883	1,045
	4	0,45	0,4	0,867	0,897	0,87	0,794	0,885	1,021
2	1,1	0,25	0,25	0,787	0,833	0,75	0,549	0,659	0,837
	2,2	0,25	0,25	0,806	0,846	0,805	0,684	0,809	1,003
	4	0,3	0,25	0,853	0,868	0,86	0,8	0,922	1,080
3	1,1	0,25	0,25	0,748	0,746	0,72	0,507	0,680	0,909
	2,2	0,3	0,25	0,827	0,785	0,82	0,671	0,855	1,034
	4	0,3	0,25	0,798	0,869	0,8	0,713	0,820	1,028

Зменшення повітряного проміжку призвело до невеликого збільшення коефіцієнтів потужності генератора та двигуна $\cos\phi_g$ і $\cos\phi_d$ та їх відношення за рахунок зменшення струму намаг-

нічування, що незначно вплинуло на ККД двигуна, в основному за рахунок збільшення додаткових втрат від пульсацій магнітного поля в зубцях та на поверхні магнітопроводів.

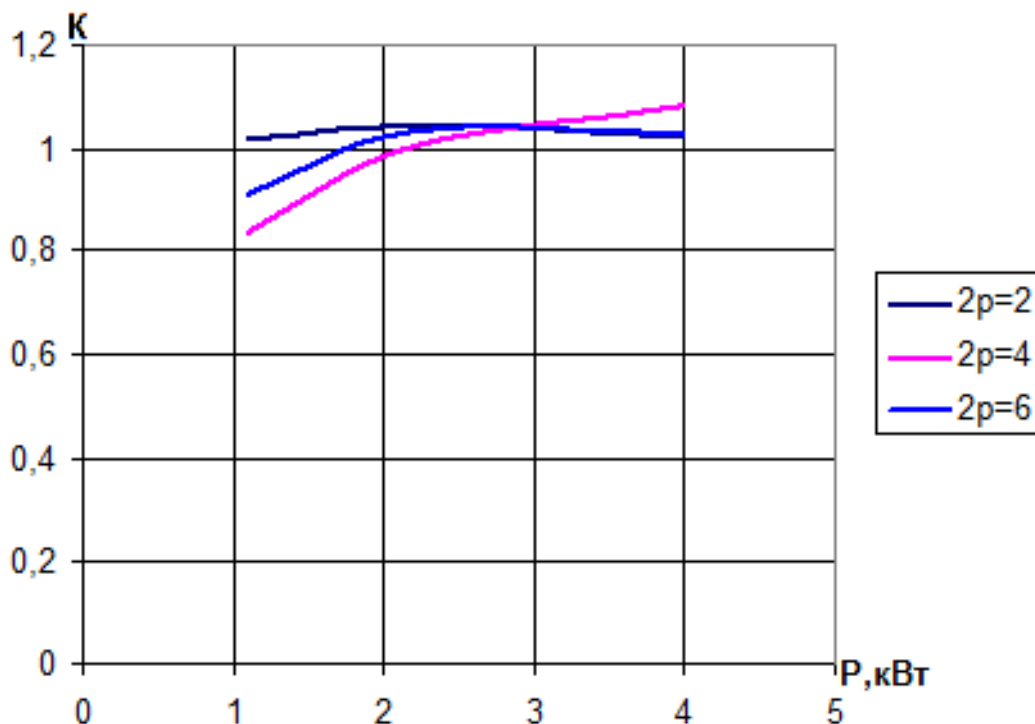


Рис. 2. Залежність коефіцієнта співвідношення потужності модернізованої асинхронної машини в генераторному та двигунному режимах від її потужності.

Fig. 2. Dependence of the power ratio of the modernized asynchronous machine in the generator and motor modes on its power.

Порівняння цих результатів з даними, що наведені на рис.1 для діапазону потужності 1,1...4 кВт, показує збільшення коефіцієнта використання для: $2p=2$ до 7%, $2p=4$ до 18%, а для $2p=6$ до 23%. Тобто при застосуванні більш тихохідних машин зберігається тенденція, що отримана в [5] із збільшенням відносних показників.

Висновки. При проведенні модернізації асинхронної машини за рахунок зменшення повітряного проміжку між статором та ротором розрахунково встановлено, що це дає збільшення потужності в генераторному режимі від 7 до 23% в залежності від кількості пар полюсів машини.

1. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О., Зінченко Т.В. Аналіз характеристик параметрів лопаті ротора автономної вітроенергетичної установки. Відновлювана енергетика. 2013. №3. С. 49-53.

2. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. Учебник. Харьков. Нац. Аэрокосм. ун-т Харьк. авиац. ин-т. Севаст. 2003. 400 с.

3. Брыль А.А., Васько П.Ф., Пекур П.П. Система гене-

рирования электрической энергии на основе асинхронных машин с короткозамкнутым ротором для автономных ветро-электрических установок. Регулируемые асинхронные двигатели. сб. науч. трудов. К. Ин-т электродинамики АН Украины. 1992. С. 39-44.

4. Мхитарян Н.М., Кудря С.А., Перминов Ю.Н., Буденный В.Ф. Анализ некоторых особенностей синхронных и асинхронных генераторов, используемых в качестве автономных источников энергии. Відновлювана енергетика. 2010. № 2. С. 7-9.

5. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. К. Наукова думка. 2011. 272 с.

6. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Моголюк С.О. Характеристики асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в режимах двигателя и генератора. К. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/130953/126684>.

REFERENCES

1. Golovko V.M., Kokhanovich V.P., Shikhaylov M.O., Zinchenko T.V. Analiz kharakteristik parametriv lopati rotora avtonomnoi vitroyenergetichnoi ustanovki. [Analysis of the characteristics of the rotor blades parameters of the autonomous wind power installation]. Vidnovluyvana energetika. 2013. No. 3. Pp. 49-53. [in Ukrainian].

2. Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Neisчерpemaya energiya. [Wind power generators]. Book 1. Vetroeyletrogeneratory. Textbook. Kharkov. Nats. Aerokosm. un-t. Khark. aviats. in-t. Sevast. 2003. 400 p. [in Russian].

3. Bryl A.A., Vasko P.F., Pekur P.P. Sistema generirovaniya elektricheskoy energii na osnove asinkhronnykh mashin s korotkozamknutym rotorom dlya avtonomnykh vetroelektricheskikh ustanovok. Reguliruyemye asinkhronnyye dvigateli. [A system for generating electrical energy based on asynchronous machines with short-circuited rotor for autonomous wind farms. Adjustable induction motors]. sat. scientific works. K. In-t. elektrodinamiki AN Ukrainy. 1992. Pp. 39-44. [in Russian].

4. Mkhitaryan N.M., Kudrya S.A., Perminov Yu.N., Budennyu V.F. Analiz nekotorykh osobennostey sinkhronnykh i asinkhronnykh generatorov, ispolzuyemykh v kachestve avtonomnykh istochnikov energii. [Analysis of some features of synchronous and asynchronous generators used as stand-alone energy sources]. Vidnovluvana energetika. 2010. No. 2. Pp. 7-9. [in Russian].

5. Mazurenko L.I., Lishchenko A.I. Asinkhronnyye generatory s ventilnym i ventilno-yemkostnym vzbuzhdeniyem dlya avtonomnykh energoustanovok. [Asynchronous generators with valve and valve-capacitive excitation for autonomous power plants]. K. Naukova dumka, 2011. 272 p. [in Russian].

6. Galinovskiy A.M., Dubchak Ye.M., Mogelyuk S.O. Charakteristiki asinkhronnykh mashin s korotkozamknutym rotorom v rezhimakh dvigatelya i generatora. [Characteristics of asynchronous machines with short-circuited rotor in engine and generator modes]. K. 2017. [Electronic resource]. URL: <http://jour.fea.kpi.ua/article/view/130953/126684>. [in Russian].

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОУСТАНОВКИ ЗА СЧЕТ УМЕНЬШЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ СТАТОРОМ И РОТОРОМ

В.М. Головко¹, докт. техн. наук, проф., Е.М. Дупчак², ст. препод., А.Ю. Заморока², магистрант

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

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», 03056, пр. Победы, 36, г. Киев, Украина.

Увеличение мощности ветроустановки при минимальных конструкционных изменениях всегда было приоритетным направлением исследований в ветроэнергетике. Жесткая зависимость мощности на валу ротора ветроустановки от аэродинамических характеристик лопасти известны и воплощены в инженерные решения. Электромашинная часть ветроустановки комплектуется общепромышленным исполнением синхронных или асинхронных генераторов, преимуществами и недостатками применения которых всесторонне известны. Также установлено, что отношение мощности в генераторном режиме к мощности машины в двигательном режиме становится больше единицы в зависимости от числа пар полюсов и мощности машины.

Работа посвящена определению повышения мощности асинхронной машины в генераторном режиме за счет влияния на магнитный поток предельно допустимого уменьшения воздушного зазора между статором и ротором. В данной работе использована усовершенствованная методика расчета параметров и характеристик асинхронных машин с короткозамкнутым ротором на базе уточненных Т-образных схем замещения. В таких схемах замещения в контуре намагничивания параллельно присоединены одно переменное индуктивное сопротивление, связанное с результирующим полем взаимной индукции и несколько переменных активных сопротивлений, значения которых связаны с изменениями основных и дополнительных (поверхностных и пульсационных) потерь в магнитопроводах статора и ротора. При расчетах, проведенных по данной методике, воздушный промежуток был уменьшен в пределах 0,05мм, но не достигал предельно допустимого значения 0,25мм. Мощность машины принималась от 1,1 до 4,0 кВт, как наиболее целесообразной для малых ветроустановок для условий нашей страны, с числом пар полюсов 1,2 и 3. Сравнение результатов с известными данными, для диапазона мощности 1, 1 ... 4 кВт показывает увеличение коэффициента использования для: 2р = 2 до 7%, 2р = 4 до 18%, а для 2р = 6 до 23%. Библ. 6, табл. 1, рис. 2

Ключевые слова: ветроустановка, асинхронный генератор, энергетические характеристики ветроустановки.

Стаття надійшла до редакції 26.11.19

Остаточна версія 17.03.20