

КОСЕНКОВ ВОЛОДИМИР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7463-3028>e-mail: [vladimirkosenkov@ukr.net](mailto:vladimirkosenkov@ukr.net)

ІВЛЕВ ДМИТРО

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-9938-9321>e-mail: [ivlevd@op.edu.ua](mailto:ivlevd@op.edu.ua)

ВИНАКОВ ОЛЕКСАНДР

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6630-8986>e-mail: [afvinakov@gmail.com](mailto:afvinakov@gmail.com)

САВЬОЛОВА ЕЛЬВИРА

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-9266-9323>e-mail: [savolova.ev@opu.ua](mailto:savolova.ev@opu.ua)

ЧЕПОВСЬКИЙ ІВАН

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-7468-236X>e-mail: [ivanchepovskiy24@gmail.com](mailto:ivanchepovskiy24@gmail.com)

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АКСІАЛЬНИХ ТА ЦИЛІНДРИЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗМОТКОВИМ РОТОРОМ ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

В даний час на малих вітроенергетичних установках для перетворення механічної енергії обертання валу вітроколеса в електричну енергію практично всюди використовуються безредукторні багатополюсні синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням. Вони мають високу надійність і коефіцієнт корисної дії, але високу ціну через постійно зростаючу вартість рідкісноземельних металів, які використовуються для виготовлення постійних магнітів.

В якості альтернативи таким генераторам доцільно розглянути генератор постійного струму з безмотковим ротором та електромагнітним збудженням. У його складі відсутні постійні магніти, завдяки чому його ціна, порівняно з синхронним генератором аналогічного класу, є суттєво нижче. Коефіцієнт корисної дії (ККД) такого генератора незначно відрізняється від коефіцієнта корисної дії синхронного генератора аналогічного класу.

Генератор постійного струму з безмотковим ротором може бути як аксіального, так і циліндричного типу. У даній статті проводиться порівняльний аналіз цих конструкцій за масою та коефіцієнтом корисної дії.

Як відомо, існують два засоби одержання високого ККД - це зменшення густини струму обмотки якоря або збільшення діаметра статора. Зменшення густини струму більш притаманно для використання у електричних машинах аксіального типу.

Для циліндричних електричних машин більш притаманно збільшувати діаметр статора. У свою чергу, зміну діаметра можна здійснювати двома шляхами:

- підтримуючи частоту перемагнічування сталі на рівні, відповідному високошвидкісному аналогу, фіксуючи цим рівень втрат у сталі;

- підтримуючи лінійну швидкість обертання ротора на рівні, відповідному високошвидкісному аналогу, фіксуючи цим рівень втрат у міді.

Результати порівняльного аналізу показують, що торцева конструкція є кращою для роботи у складі вітроенергетичної установки.

Ключові слова: аксіальний, циліндричний, втрати в сталі, втрати в міді, маса, коефіцієнт корисної дії.

KOSENKOV VOLODYMYR

Khmelnitskyi National University

IVLIEV DMYTRO, VYNAKOV OLEKSANDR, SAVOLOVA ELVIRA, CHEPOVSKYI IVAN

Odessa Polytechnic National University

## COMPARATIVE ANALYSIS OF AXIAL AND CYLINDRICAL DESIGNS OF DIRECT CURRENT GENERATORS WITH A WINDING-FREE ROTOR FOR WIND POWER PLANTS

Currently, gearless multipole synchronous generators with magnetolectric excitation are used almost everywhere on small wind power plants to convert the mechanical energy of the rotation of the windmill shaft into electrical energy. They have high reliability and efficiency, but a high price due to the ever-increasing cost of the rare earth metals used to make permanent magnets.

As an alternative to such generators, it is advisable to consider a direct current generator with an unwound rotor and electromagnetic excitation. There are no permanent magnets in its composition, due to which its price, compared to a synchronous generator of the same class, is significantly lower. The efficiency of such generator is slightly different from the efficiency of a synchronous generator of the same class.

A direct current generator with an unwound rotor can be of both axial and cylindrical type. In this article, a comparative analysis of these structures by mass and efficiency is carried out.

As you know, there are two means of obtaining high efficiency - a decrease in the current density of the armature winding or an increase in the diameter of the stator. Reduction of current density is more typical for use in axial-type electric machines.

For cylindrical electric machines, it is more common to increase the diameter of the stator. In turn, the diameter can be changed in two ways:

- maintaining the frequency of remagnetization of steel at the level corresponding to the high-speed analogue, thus fixing the level of losses in steel;
- maintaining the linear speed of rotation of the rotor at the level corresponding to the high-speed analogue, thus fixing the level of losses in copper.

The results of the comparative analysis show that the end design is better for working as part of a wind power plant.

Key words: axial, cylindrical, losses in steel, losses in copper, mass, efficiency factor.

### Постановка проблеми

В даний час найбільш повно вимогам, що ставляться до генераторів вітроенергетичних установок (ВЕУ) малої потужності, відповідають багатополюсні безредукторні синхронні генератори з магнітоелектричним збудженням. Однак такі генератори мають високу ціну через постійно зростаючу вартість постійних магнітів. Розробка нових конструкцій генераторів без постійних магнітів, здатних ефективно працювати на низьких швидкостях вітру, є актуальним завданням. У рамках цієї задачі постає питання вибору найбільш ефективної конструкції генератора постійного струму з безобмотковим ротором. Порівняльний аналіз дозволяє зробити цей вибір та визначити найбільш ефективну конструкцію.

### Основні результати

Конструкція генератора постійного струму з безобмотковим ротором (ГПСБР) як циліндричного (рис.1), так і аксіального (рис.2) виконання не має спільного яра і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш або П – подібної форми 1, між якими укладено секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, безобмоткових полюсів 4 і немагнітних дисків 5[1,2,3,4].

Наявність відкритих з обох боків пазів між зубцями статора створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, призводить до послаблення поля реакції якоря Ф<sub>я</sub> (рис. 2) і відмови від додаткових полюсів та компенсаційної обмотки.

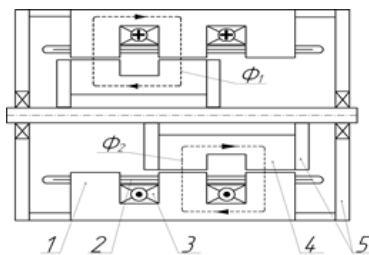


Рис. 1. ГПСБР циліндричного виконання

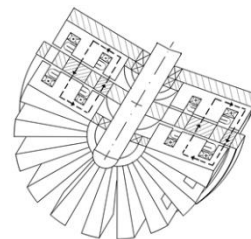


Рис. 2. ГПСБР аксіального виконання

Як відомо, існують два засоби одержання високого ККД у низькошвидкісній електричній машині: - зменшення густини струму обмотки якоря  $j_a$ ; - збільшення діаметра статора  $D_a$ .

На рисунках 3 і 4 показана динаміка зміни ККД та маси обмотки якоря ГПСБР аксіального типу потужністю 20кВт на швидкості 200, 500, 750 та 1000 об/хв для двох способів отримання високого ККД. Як видно з аналізу залежностей, зменшення густини струму у діапазоні від  $j_a = 6,5 \text{ А/мм}^2$  при  $n=1000$  об/хв до  $j_a = 2,8 \text{ А/мм}^2$  при  $n=200$  об/хв в обмотці якоря дає вищий ККД (рис. 3), але при цьому маса обмотки якоря істотно зростає (рис. 4). Тому такий підхід більш прийнятний для машин аксіального типу, що мають велике відношення діаметра до довжини. Збільшення маси обмотки якоря і, відповідно, висоти паза магнітопроводу призводить до незначного збільшення довжини аксіальної електричної машини, мало позначаючись на її діаметрі. Тому збільшення маси такої машини відносно невелике.

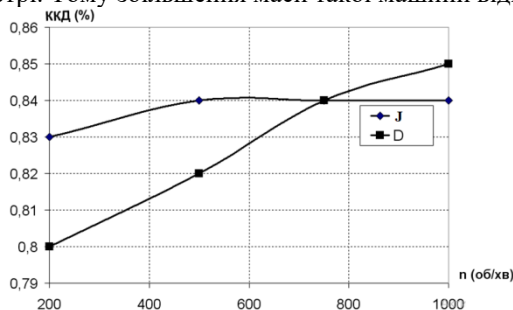


Рис. 3. Залежність ККД від швидкості обертання

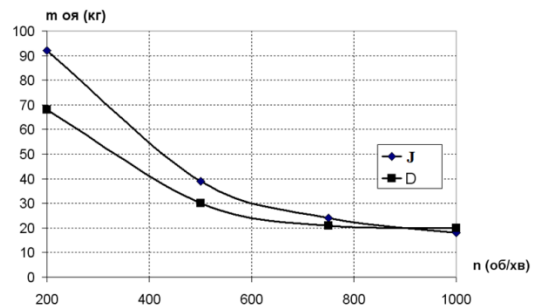


Рис. 4. Залежність маси обмотки від швидкості

Для циліндричного ГПСБР краще йти іншим шляхом, збільшуючи його діаметр. Виходячи з того, що існує великий обсяг інформації щодо проектування та оптимізації високошвидкісних електричних машин, при проектуванні низькошвидкісних електричних машин доцільно відштовхуватися від цієї інформації, прагнучи зберігати деякі параметри на рівні високошвидкісних аналогів. Насамперед це стосується величини втрат у міді та сталі.

У рамках підвищення ККД низькошвидкісної електричної машини шляхом збільшення діаметра статора  $D_a$  існує два підходи:

- підтримувати частоту перемагнічування сталі на рівні, відповідному високошвидкісному аналогу, фіксуючи цим рівень втрат у сталі;

- підтримувати лінійну швидкість обертання ротора на рівні, відповідному високошвидкісному аналогу, фіксуючи цим рівень втрат у міді.

Для перевірки цих висновків та порівняння основних показників торцевих та циліндричних ГПСБР при різних номінальних швидкостях обертання були обрані дві однотипні конструкції ГПСБР торцевого та циліндричного виконання (рис.1,2) [5].

Обидві конструкції об'єднує 100% використання активної поверхні статора (звісно, з урахуванням  $\alpha\delta$  – розрахункового коефіцієнта полюсного перекриття.

Для проведення порівняльного аналізу було проведено низку розрахунків циліндричного та аксіального ГПСБР  $P_n = 12$ кВт,  $U_n = 400$  В,  $n = 980, 600, 400, 200$  об/хв. Розрахунки проводилися за прийнятих середніх рекомендованих у літературі з проектування електричних машин значеннях коефіцієнта полюсного перекриття  $\alpha\delta = 0,75$ , індукції  $B_\delta = 0,8$  Тл, лінійного струмового навантаження  $A = 5 \cdot 10^4$  А/м, щільності струму в обмотці якоря  $j_a = 5$  А/мм<sup>2</sup>. Дані розрахунків представлені в Табл.1 та Табл.2. Як базова величина для порівняння прийнята швидкість обертання 980 об/хв.

Таблиця 1

Циліндричний ГПСБР		$f=const$				$V=const$		
Оберти $n_n$ (об/хв)	980	600	400	200	600	400	200	
Внутрішній діаметр статора $D_a$ (м)	0,19	0,26	0,35	0,56	0,31	0,46	0,92	
Частота перемагнічування $f$ (Гц)	33	30	33	33	50	73	153	
Маса міді обмотки якоря $M_{оя}$ (кг)	28	32	35	44	27	26	26	
Маса активної сталі $M_{a,cm}$ (кг)	58	66	63	69	46	38	30	
Маса неактивної сталі $M_{на,cm}$ (кг)	25	36	51	100	40	67	217	
Загальна маса двигуна $M_{де}$ (кг)	121	147	164	233	126	147	300	
Момент $M$ (Нм)	118	196	292	581	197	300	568	
Втрати в обмотці якоря $P_{оя}$ (кВт)	1,69	1,96	2,1	2,54	1,62	1,58	1,5	
Втрати сталі $P_{cm}$ (Вт)	71	70	76	80	92	185	810	
ККД $\eta$ (%)	84	82	81	77	84	83	77	

Таблиця 2

Аксіальний ГПСБР		$f=const$				$V=const$		
Оберти $n_n$ (об/хв)	980	600	400	200	600	400	200	
Внутрішній діаметр статора $D_a$ (м)	0,20	0,27	0,38	0,58	0,33	0,43	0,89	
Частота перемагнічування $f$ (Гц)	33	30	33	30	60	67	153	
Маса міді обмотки якоря $M_{оя}$ (кг)	24	30	35	49	23	24	22	
Маса активної сталі $M_{a,cm}$ (кг)	56	69	58	71	52	63	72	
Маса неактивної сталі $M_{на,cm}$ (кг)	18	27	42	85	32	51	172	
Загальна маса двигуна $M_{де}$ (кг)	109	138	150	226	119	154	299	
Момент $M$ (Нм)	115	202	266	562	200	308	548	
Втрати в обмотці якоря $P_{оя}$ (кВт)	1,46	1,84	2,1	2,77	1,39	1,46	1,33	
Втрати сталі $P_{cm}$ (Вт)	80	86	82	87	163	229	823	
ККД $\eta$ (%)	85	84	80	76	85	85	78	

Аналізуючи отримані дані, можна відзначити таке:

- маса аксіального ГПСБР у середньому на 15% менша за масу циліндричного;
- ККД аксіального та циліндричного ГПСБР приблизно рівні;
- маса міді обмотки якоря при підтримці постійною  $f$  порівняно з підтриманням постійною  $V$  в середньому збільшується на 32%;
- втрати в сталі при підтримці постійної  $V$  в порівнянні з підтримкою постійної  $f$  збільшуються на 62%;
- порівняння мас (з відрахуванням маси міді) показує, що з 980 об/хв на активну сталь як циліндричного, і аксіального ГПСБР доводиться 70% маси, а на неактивну сталь (вал, торцеві щити тощо.) - 30%. Зі зменшенням оборотів це співвідношення змінюється, маса активної сталі зменшується, а неактивної зростає, причому для двох способів підтримки високого ККД будуть різні співвідношення. При 200об/хв та постійній  $f$  співвідношення активної та неактивної сталі складе 40% та 60%, а при постійній  $V$  20% та 80% відповідно;
- при підтримці постійною  $V$  на низьких оборотах різко зростає частота перемагнічування сталі, що обмежує застосування даного підходу при частоті обертання нижче 200 об/хв;

- починаючи з 200 об/хв і нижче одного збільшення діаметра статора для отримання ККД вище 80% вже недостатньо, тому необхідно не тільки збільшувати діаметр статора, а й зменшувати щільність струму в обмотці якоря.

### Висновки

Для низьких оборотів кращими є аксіальні ГПСБР, у яких частота перемагнічування сталі підтримується на рівні відповідного високооборотного аналога і для яких зменшення щільності струму призводить до відносно невеликого збільшення маси.

### Література

1. Патент України № 104943, Україна, МПК(2006.01) H02K29/06. Електрична машина бііндукторного типу / О. А. Андрищенко, В. В. Булгар, А. О. Бойко, А. Д. Івлєв, Д. А. Івлєв, О. В. Яковлев, В. Д. Косенков // – а201211580, заявл.08.10.2012; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.
2. Патент України № 95429, Україна, МПК(2011.01) H02K19/06 (2006.01). Торцева електрична машина бііндукторного типу / В. В. Булгар, А. Д. Івлєв, Д. А. Івлєв, О. В. Яковлев, В. Д. Косенков// – а201014458, заявл.03.12.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14
3. 20. Патент України № 90574, МПК (2009), H02K 29/06. Електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням / В.В. Булгар, А.Д. Івлєв, О.В. Яковлев, Фам Суан Вионг// - а200809463, заявл.21.07.2008, опубл.11.05.2010, Бюл.№9.
4. Патент України № 89072, МПК (2009) H02K 21/12. Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням /В.В. Булгар, А.Д. Івлєв, Д.А. Івлєв, О.В. Яковлев// - а200708842, заявл.31.07.2007, опубл.25.12.2009, Бюл.№24.
5. Івлєв Д. А. Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.01 "Електричні машини і апарати" / Івлєв Дмитро Анатолійович – Одеса, 2019. – 21 с.

### References

1. Patent Ukrainy № 104943, Ukraina, MPK(2006.01) N02K29/06. Elektrychna mashyna biinduktornoho typu / O. A. Andriushchenko, V. V. Bulhar, A. O. Boiko, A. D. Ivliev, D. A. Ivliev, O. V. Yakovlev, V. D. Kosenkov // – а201211580, zaiavl.08.10.2012; opubl. 25.03.2014, Biul. № 6.
2. Patent Ukrainy № 95429, Ukraina, MPK(2011.01) N02K19/06 (2006.01). Tortseva elektrychna mashyna biinduktornoho typu / V. V. Bulhar, A. D. Ivliev, D. A. Ivliev, O. V. Yakovlev, V. D. Kosenkov// – а201014458, zaiavl.03.12.2010; opubl. 25.07.2011, Biul. № 14
3. 20. Patent Ukrainy № 90574, MPK (2009), NO2K 29/06. Elektrychnyi dvyhun postiinoho strumu z kombinovanim zbudzhenniam / V.V. Bulhar, A.D. Ivliev, O.V. Yakovlev, Fam Suan Vyonh// - а200809463, zaiavl.21.07.2008, opubl.11.05.2010, Biul.№9.
4. Patent Ukrainy № 89072, MPK (2009) NO2K 21/12. Tortsevyi elektrychnyi dvyhun postiinoho strumu z kombinovanim zbudzhenniam /V.V. Bulhar, A.D. Ivliev, D.A. Ivliev, O.V. Yakovlev// - а200708842, zaiavl.31.07.2007, opubl.25.12.2009, Biul.№24.
5. Ivliev D. A. Nyzkoshvydkisnyi henerator postiinoho strumu z bezobmotkovym rotorom dlia vitroenergetichnoi ustanovky [Tekst] : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.09.01 "Elektrychni mashyny i aparaty" / Ivliev Dmytro Anatoliiovych – Odesa, 2019. – 21 s.