

КОСЕНКОВ В. Д.Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-7463-3028>
e-mail: vladimirkosenkov@ukr.net**ІВЛЕВ Д. А.**Національний університет «Одеська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-9938-9321>
e-mail: ivlevd@op.edu.ua**ВИНАКОВ О. Ф.**Національний університет «Одеська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-6630-8986>
e-mail: afvinakov@gmail.com**САВЬОЛОВА Е. В.**Національний університет «Одеська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0001-9266-9323>
e-mail: savolova.ev@opu.ua**ЯРМОЛОВИЧ В. Я.**Національний університет «Одеська політехніка»
<http://orcid.org/0000-0002-0708-2972>
e-mail: yarmolovych@opu.ua

ВИКОРИСТАННЯ Т-ПОДІБНИХ ЗУБЦІВ У ЕЛЕКТРИЧНІЙ МАШИНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ

Електрична машина постійного струму з безобмотковим ротором (МПСБР) значно відрізняється від класичної машини постійного струму, її магнітна система не має спільного ярма і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців та пазів, відкритих з обох боків. Наявність пазів, у яких відсутнє дно, створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, а це, у свою чергу, призводить до послаблення поля реакції якоря Ф_я і відмови від додаткових полюсів та компенсаційної обмотки. Отже, величину робочого повітряного проміжку можна зменшити до мінімально можливої величини з технологічної точки зору.

З огляду конструктивних схем МПСБР належить до типу індукторних машин з двома нерухомими обмотками на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора, у яких магнітна індукція в робочому повітряному проміжку змінюється тільки за величиною без зміни знака. Тому ротор у МПСБР не перемагнічується і виготовляється зі звичайної конструкційної сталі. Індукторний тип магнітної системи дозволяє мати в МПСБР тільки одну, загальну для всіх полюсів, обмотку збудження та ротор, дуже схожий на ротор багатополюсних синхронних машин з постійними інкорпорованими магнітами. При цьому у МПСБР відсутні постійні магніти, що дозволяє значно знизити вартість електричної машини.

Заміна прямих зубців на Т-подібні дозволяє суттєво підвищити ефективність конструкції МПСБР за рахунок поліпшення її тепловідведення. Представлені у статті результати розрахунків і моделювання стаціонарного теплового поля показують, що застосування Т-подібних зубців дозволяє істотно підвищити переважувальну здатність МПСБР або збільшити її потужність.

Ключові слова: теплове поле, машина постійного струму, маса, коефіцієнт корисної дії

Volodymyr KOSENKOV

Khmelnytskyi National University

Dmytro IVLIEV, Oleksandr VYNAKOV, Elvira SAVOLOVA, Viktoriya YARMOLOVYCH

Odesa Polytechnic National University

USE OF T-SHAPED TOOTH IN A DIRECT CURRENT MACHINE WITH A WINDLESS ROTOR

The electric direct current machine with a windingless rotor (DCWR) is significantly different from the classic direct current machine; its magnetic system does not have a common yoke and consists of a number of magnetically loose teeth and grooves open on both sides. The presence of grooves in which there is no bottom creates a number of air gaps, which leads to a decrease in the magnetic conductivity of the magnetic conductor in the transverse direction, which, again, leads to a weakening of the reaction field of the Φ_a armature and the rejection of additional poles and compensation winding. Therefore, the size of the working air gap can be reduced to the minimum possible value from a technological point of view.

According to the structural schemes, the DCWR belongs to the type of induction machines with two stationary windings on the stator and a toothed magnetic conductor of the rotor, in which the magnetic induction in the working air gap changes only in magnitude without changing the sign. Therefore, the rotor in the DCWR is not remagnetized and is made of ordinary structural steel. The inductor type of the magnetic system allows having only one, common for all poles, excitation winding in the DCWR, and the rotor is very similar to the rotor of multi-pole synchronous machines with permanent incorporated magnets. At the same time, DCWR does not have permanent magnets, which allows to significantly reduce the cost of an electric machine. Replacing straight teeth with T-shaped ones allows you to significantly increase the efficiency of the DCWR design by improving its heat dissipation. The results of calculations and modeling of the stationary thermal field presented in the article show that the use of T-shaped teeth allows you to significantly increase the overload capacity of the DCWR or increase its power.

Keywords: thermal field, direct-current motor, mass, efficiency

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Конструкція низькообертової машини постійного струму з безобмотковим ротором і прямими зубцями (МПСБР), маючи ряд переваг, має один істотний недолік, а саме низький рівень тепловідведення. Тому значення електромагнітних навантажень у цій конструкції відносно невеликі, що призводить до збільшення її маси та габаритів.

Поліпшення тепловідведення дозволяє або зменшити витрати активних матеріалів та габарити МПСБР при збереженні заданої потужності, або збільшити потужність при збереженні первинних габаритів.

Вирішення цієї проблеми є актуальним завданням для безредукторних низькообертових електричних машин, що значно поступаються за масою та габаритами високообертовим електричним машинам.

Основні результати

Конструкція МПСБР (рис. 1а, б) не має спільного ярма і складається з ряду магнітно-незв'язаних зубців Ш-подібної форми 1, між якими укладено секції обмотки якоря 2, обмоток збудження 3, безобмоткових полюсів 4 і немагнітних дисків 5 [1, 2].

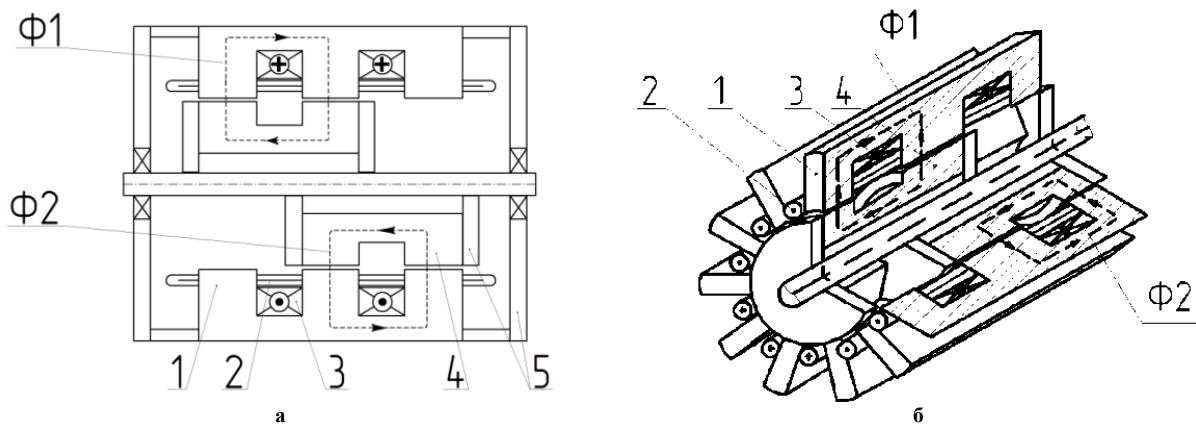


Рис. 1. МПСБР: а – поздовжній розріз; б – аксонометрія

Залежно від ширини зубцевих стрижнів, що зв'язують зубці в поздовжньому напрямку, у МПСБР можливі два варіанти відводу тепла.

1. Магнітна система з вузькими стрижнями 1 (рис. 2,а) і більшими повітряними проміжками 2 між ними, де тепловідвід з поверхні обмоток здійснюється переважно шляхом конвекції [3].

2. Магнітна система із широкими стрижнями 1 (рис. 2,б) і малими повітряними проміжками 2 між ними, де тепловідвід з поверхні обмоток здійснюється переважно шляхом теплопровідності [4–6].

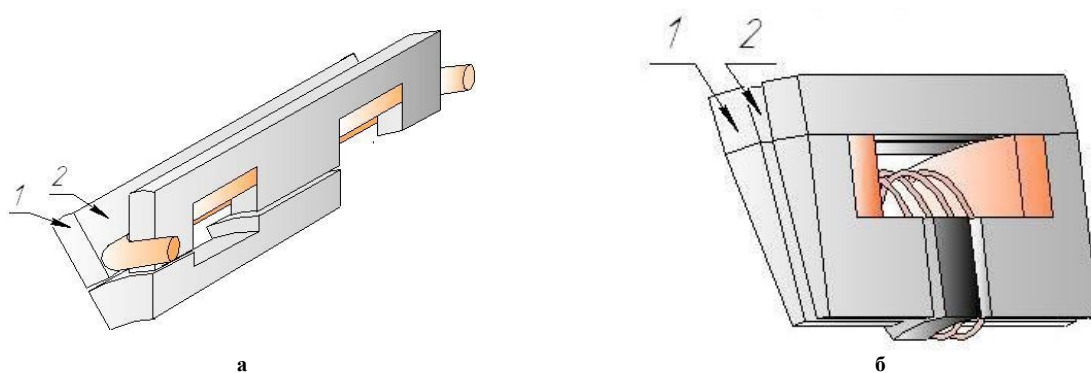


Рис. 2. Поздовжні стрижні в зубцях МПСБР: а – циліндричний; б – торцевий

Обидва варіанти відводу тепла реалізовані в експериментальних конструкціях:

1. МПСБР циліндричного типу з вузькими стрижнями, де 68% зовнішньої поверхні обмотки збудження має безпосередній контакт із навколишнім середовищем.

2. МПСБР торцевого типу з широкими стрижнями, де тільки 28% зовнішньої поверхні обмотки збудження має безпосередній контакт із навколишнім середовищем.

Обидві конструкції пройшли теплові випробування, що дозволило порівняти експериментальні й розрахункові дані, отримані методом кінцевих елементів у програмі ELCUT [7].

Порівняльний розрахунок двох конструкцій МПСБР показав кращий результат для конструкції із широкими стрижнями. Так, розрахункова температура обмотки якоря в циліндричному МПСБР з вузькими стрижнями $T_{оя}=102,8^{\circ}\text{C}$, а у МПСБР з широкими стрижнями $T_{оя}=86^{\circ}\text{C}$ (різниця 17%) при однакових

значеннях об'ємної щільності тепловиділення. Тому більш доцільно робити магнітну систему із широкими поздовжніми стрижнями.

Однак з технологічної точки зору магнітна система з широкими стрижнями поступається системі з вузькими. У магнітній системі з вузькими стрижнями зубцевий пакет прямокутний (рис. 2а) а у системі з широкими стрижнями трапецієподібний (рис. 2б).

Для того, щоб зібрати прямокутний пакет, потрібні листи електротехнічної сталі однієї висоти, а в трапецієподібному пакеті висота листів буде різною. У першому випадку можна повністю автоматизувати процес збирання з мінімальними відходами сталі, у другому це викличе ускладнення технологічного процесу та збільшення відходів різання металу.

Тому був запропонований третій варіант, що поєднує в собі позитивні сторони обох варіантів. Пропонується робити зубець Т-подібним із двох прямокутних зубцевих пакетів різної ширини (рис. 3). У такій магнітній системі буде покращено тепловідведення та технологічність конструкції.

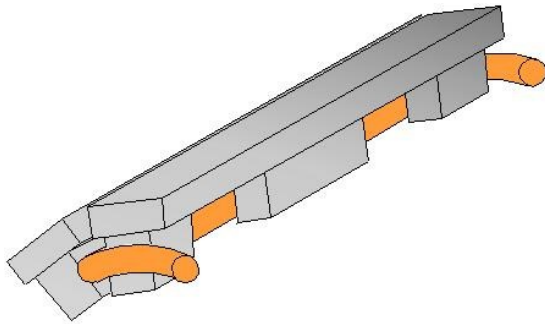


Рис. 3. Т-подібні зубці

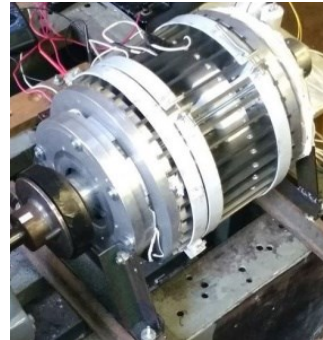


Рис. 4. Експериментальний генератор

Для оцінки впливу Т-подібних зубців на тепловідведення в МПСБР було проведено такі варіанти розрахунків:

- **Базовий варіант.** Експериментальний генератор постійного струму з безобмотковим ротором циліндричного типу з вузькими стрижнями $P=1\text{кВт}$, $n=600\text{об/хв}$ (рис. 1а, б), (рис. 4), (рис. 5);
- **Варіант 1.** Проведено розрахунок стаціонарного теплового поля базового варіанту з Т-подібними зубцями, при цьому збережені незмінними геометрія та величини електромагнітних навантажень (рис. 6);
- **Варіант 2.** При збереженні незмінної геометрії базового варіанту збільшено величини електромагнітних навантажень і проведено розрахунок стаціонарного теплового поля (рис. 7);
- **Варіант 3.** Змінено геометрію базового варіанту та його електромагнітні навантаження та проведено розрахунок стаціонарного теплового поля.

Результати розрахунків представлені у таблиці 1, порівняльні дані щодо температур у таблиці 2.

Таблиця 1

Результати розрахунків машин постійного струму з безобмотковим ротором

Показник	Базовий варіант, Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Номінальна потужність P_n , Вт	1093	1781 (+39%)	940
Номінальні оберти n_n , об/мин	600	600	600
Внутрішній діаметр статора D_a , мм	140	140	120 (-14%)
Лінійне струмове навантаження A , А/см	28000	44000 (+36%)	44000
Густина струму обмотки якоря $J_{оя}$, А/мм ²	4,2	6,2 (+32%)	6,2
Густина струму обмотки збудження $J_{оз}$, А/мм ²	3	3	3
Індукція у робочому повітряному проміжку B_δ , Тл	0,49	0,56 (+12%)	0,56
Струм обмотки якоря $I_я$, А	3,72	5,84 (+36%)	3,03
Струм обмотки збудження $I_з$, А	0,6	0,69 (+13%)	0,5 (-17%)
Втрати обмотки якоря $P_{оя}$, Вт	417	968 (+57%)	830 (+50%)
Втрати обмотки збудження $P_{оз}$, Вт	104	138	72 (-31%)
Втрати в сталі $P_{ст}$, Вт	66	83 (+21%)	44 (-34%)
Поверхневі втрати $P_{пов}$, Вт	3,2	4,2	2
Механічні втрати P_m , Вт	115	115	115
Додаткові втрати $P_{одд}$, Вт	11	18	9
Загальні втрати $P_{заг}$, Вт	716	1326	1072
Підведена потужність P_1 , Вт	1809	3107	2012
Коефіцієнт корисної дії η , %	60	57 (-5%)	47% (22%)
Маса M , кг	55	55	41 (-26%)

Порівняльні дані температури

Показник	Базовий варіант	Варіант 1	Варіант 2
Об'ємна щільність тепловиділення			
обмотка збудження $Q_{оз}$, Вт/м ³	19806	19806	22380
обмотка якоря $Q_{оя}$, Вт/м ³	291294	291294	582588
Абсолютна температура			
обмотка збудження $T_{оз}$, °С	100,5	56,4 (-44%)	76,8 (-24%)
обмотка якоря $T_{оя}$, °С	102,8	67,3 (-35%)	108,7 (+6%)
Рисунок	Рис. 5	Рис. 6	Рис. 7

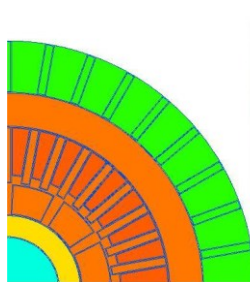


Рис. 5. Базовий варіант

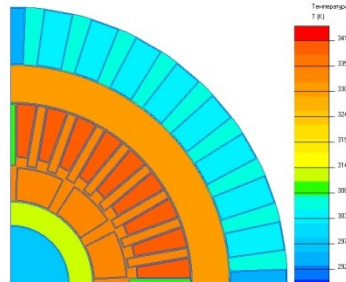


Рис. 6. Варіант 1

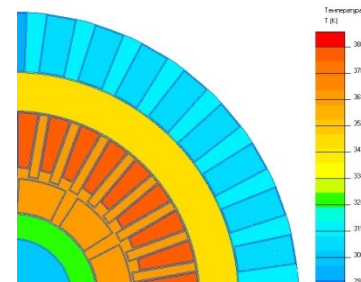


Рис. 7. Варіант 2

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Залежно від поставленого завдання можливі три варіанти проектування МПСБР:

Варіант 1. МПСБР із високим значенням ККД та високою перевантажувальною здатністю по струму. Аналіз отриманих результатів показує, що в цьому випадку МПСБР може тривалий час працювати з дворазовим навантаженням по струму, що є критично важливим для окремих типів електричних машин, наприклад, для генераторів вітроустановок, що працюють в умовах стрибкоподібної зміни вітрового потоку;

Варіант 2. МПСБР із високим значенням вихідної потужності. У цьому випадку зберігається висока перевантажувальна здатність, але в малому інтервалі часу, обумовленому галузевими стандартами, відносно невелике 5% зниження ККД компенсується 39% приросту потужності;

Варіант 3. Дешевий МПСБР. Поступаючись попереднім варіантам ефективності (-22% ККД), ця конструкція легше базової на 26%. Враховуючи той факт, що всі низькооборотні машини мають значні маси, такий варіант може бути цікавий у разі, коли головним критерієм є вартість обладнання.

Література

1. Патент України № 104943, Україна, МПК(2006.01) Н02К29/06. Електрична машина бііндукторного типу / О.А. Андришченко, В.В. Булгар, А.О. Бойко, А.Д. Івлєв, Д.А. Івлєв, О.В. Яковлєв, В.Д. Косєнков. – а201211580, заявл. 08.10.2012 ; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.
2. Винаков А.Ф. Низкооборотная машина постоянного тока бииндукторного типа / А.Ф. Винаков, В.Д. Косєнков, А.В. Яковлєв, Д.А. Івлєв // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2015. – Випуск 19(95). – С. 106–110.
3. Івлєв Д.А. Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.01 "Електричні машини і апарати" / Івлєв Дмитро Анатолійович. – Одеса, 2019. – 21 с.
4. Патент України № 89072, МПК (2009) Н02К 21/12. Торцевий електричний двигун постійного струму з комбінованим збудженням / В.В. Булгар, А.Д. Івлєв, Д.А. Івлєв, О.В. Яковлєв. – а200708842, заявл. 31.07.2007 ; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.
5. Косєнков В.Д. Аналіз стаціонарного теплового поля в машині постійного тока индукторного типа / В.Д. Косєнков, Д.А. Івлєв, А.В. Яковлєв, Т.А. Жєлиба // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2015. – Вип. 5(229). – С. 93–97.
6. Булгар В.В. К исследованию тепловых свойств двигателей постоянного тока с дисковым ротором / В.В. Булгар, Д.А. Івлєв, А.В. Яковлєв // Електротехнічні та комп'ютерні системи : науково-технічний журнал. – К. : Техніка, 2011. – Випуск 03(79). – С. 298–299.
7. Гандшу В.М. Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT [Електронний ресурс] / В.М. Гандшу. – Режим доступу : <http://elcut.ru/articles/gandshou/>.

References

1. Patent Ukraine № 104943, Ukraine, MПК(2006.01) N02K29/06. Elektrichna mashyna biinduktornogo typu / O.A. Andriushchenko, V.V. Bulhar, A.O. Boiko, A.D. Ivliev, D.A. Ivliev, O.V. Yakovlev, V.D. Kosenkov. – a201211580, zaivl. 08.10.2012 ; publ. 25.03.2014, Biul. № 6.

2. Vynakov A. F. Nyzkooborotnaia mashyna postoiannoho toka byynduktornho typu / A.F. Vynakov, V.D. Kosenkov, A.V. Yakovlev, D.A. Yvlev // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – K. : Tekhnika, 2015. – Vypusk 19(95). – S. 106–110.
3. Ivliev D.A. Nyzkoshvydkisnyi henerator postiinoho strumu z bezobmotkovym rotorom dlia vitroenerhetychnoi ustanovky : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.09.01 "Elektrychni mashyny i aparaty" / Ivliev Dmytro Anatoliiovych. – Odesa, 2019. – 21 s.
4. Patent Ukrainy № 89072, MPK (2009) NO2K 21/12. Tortsevyi elektrychnyi dvyhun postiinoho strumu z kombinovanyim zbudzhenniam / V.V. Bulhar, A.D. Ivliev, D.A. Ivliev, O.V. Yakovlev. – a200708842, zaiavl. 31.07.2007 ; opubl. 25.12.2009, Biul. № 24.
5. Kosenkov V. D. Analiz statsyonamoho teplovoho polia v mashyne postoiannoho toka ynduktornoho typu / V.D. Kosenkov, D.A. Yvlev, A.V. Yakovlev, T.A. Zhelyba // Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2015. – Issue 5(229). – S. 93–97.
6. Bulhar V. V. K issledovaniyu teplovyh svoystv dvigatelej postoiannoho toka s diskovym rotorom / V.V. Bulhar, D.A. Yvlev, A.V. Yakovlev // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy : naukovy-tekhnichni zhurnal. – K. : Tekhnika, 2011. – Vypusk 03(79). – S. 298–299.
7. Handshu V.M. Osobennosti rascheta nagrevaniya jelektromagnitnyh ustrojstv s pomoshh'ju paketa programm ELCUT [Elektronnyi resurs] / V.M. Handshu. – Rezhym dostupu : <http://elcut.ru/articles/gandshou/>.

Рецензія/Peer review : 27.06.2022 р.

Надрукована/Printed : 02.08.2022 р.