

В.Д. КОСЕНКОВ

Хмельницький національний університет

Д.А. ІВЛЄВ

Одеський національний політехнічний університет

## КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З БЕЗОБМОТКОВИМ РОТОРОМ ДЛЯ ВИСОКИХ І НИЗЬКИХ ШВИДКОСТЕЙ ОБЕРТАННЯ

Для будь-якої електричної машини основними є два показники: мінімум маси й максимум ККД. Для високообертових і низькообертових машин постійного струму з безобмотковим ротором ці два показники досягаються різними засобами. У першому випадку цільний статор із загальним ярмом і сегментований ротор. У другому випадку – сегментований статор і цільний ротор. Завдяки такому підходу досягається значне поліпшення ряду питомих показників і зниження витрат електричної енергії в статичних і динамічних режимах роботи електропривода.

**Ключові слова:** ротор, статор, обмотка, магнітна система, втрати в сталі.

V.D. KOSENKOV

Khmelnitskyi National University

D.A. IVLEV

Odesa National Polytechnic University

### DC ELECTRIC MACHINES CONSTRUCTIONS WITH A WINDLESS ROTOR FOR HIGH AND LOW ROTATION SPEEDS

For any electric machine, the main two indicators are minimum mass and maximum efficiency. For high-speed and low-speed DC machines with the windless rotor, these two values are achieved in different ways. In the first case, a one-piece stator with a common yoke and a segmented winding-free rotor. In the second case, a segmented stator and a one-piece rotor. Thanks to this approach, a significant improvement in a number of specific indicators and a decrease in the consumption of electrical energy in static and dynamic modes of operation of the electric drive are achieved.

**Keywords:** rotor, stator, armature winding, magnetic system, iron losses.

#### Постановка проблеми

Поява на електротехнічному ринку високоенергетичних постійних магнітів NdFeB, запатентованих в 1983 р. Sumitomo Special Metals [1], призвело до значних змін в електротехнічній галузі. Сьогодні застосування магнітоелектричного збудження у двигунах регульованого приводу де-факто стало стандартом.

Однак в останні роки інтерес до електричних машин з електромагнітним збудження знову став відроджуватися. Синхронні реактивні двигуни, вентильно-індукторні двигуни, в конструкціях яких не використовуються постійні магніти, активно розбудовують такі гіганти як Siemens і ABB [2, 3].

Багато в чому така зацікавленість пояснюється високою вартістю постійних магнітів, яка за оцінками експертів, становить від 30 до 60% усієї вартості активних матеріалів електродвигуна [4, 5]. За рядом прогнозів [6, 7] очікується, що в найближчі роки вартість постійних магнітів буде тільки зростати.

На жаль, у якості електричних машин з електромагнітним збудженням сьогодні розглядаються лише різновиди синхронних машин, класичні машини постійного струму в цей список не входять. Класична машина постійного струму має декілька переваг: забезпечення постійного моменту в широкому діапазоні швидкостей; висока переважувальна здатність; просте реостатне регулювання; широкі можливості по регулюванню збудження (паралельне, послідовне); можливість живлення від мережі змінного струму з дешевою схемою регулювання на базі тиристорного випрямляча. На жаль, вона має і ряд недоліків: наявність ненадійного колекторного вузла, висока вартість, велика маса активних матеріалів не дозволяють їй зайняти гідне місце серед сучасних високотехнологічних електричних машин. Нова конструкція машини постійного струму дозволяє розв'язати цю проблему.

#### Основні результати

Електрична машина постійного струму з безобмотковим ротором (ЕМПСБР) вдало сполучає в собі гідності, як синхронних машин, так і машин постійного струму.

Магнітна система одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим сегментованим ротором (рис. 1) [8] складеться з корпусу 1, пакета статора 2, обмотки якоря 3, обмотки збудження 4, сегментованих полюсів 5, немагнітної втулки ротора 6 та валу 7.

Магнітна система бііндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором (рис. 2) [9] 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.

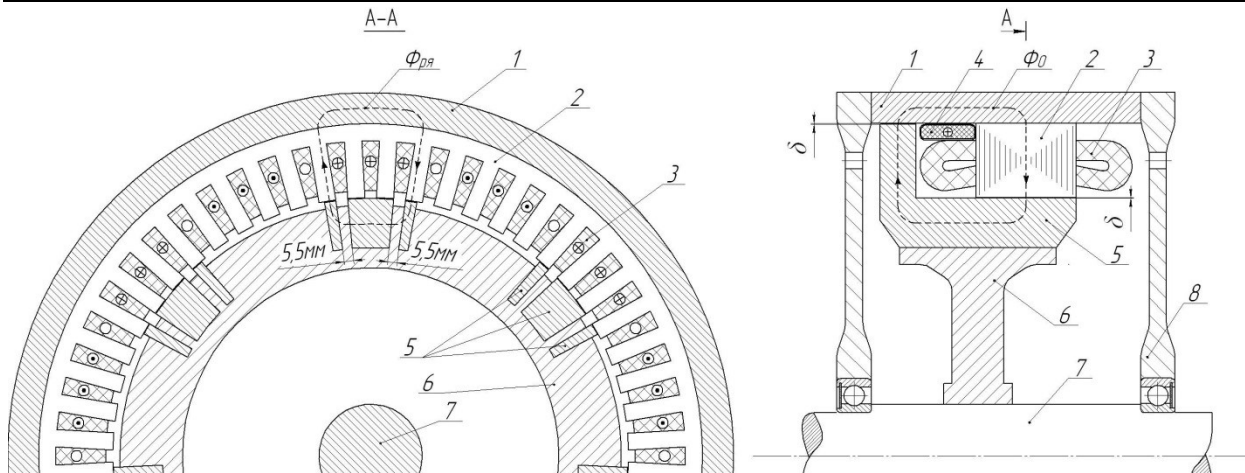


Рис. 1. Конструкція одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим ротором

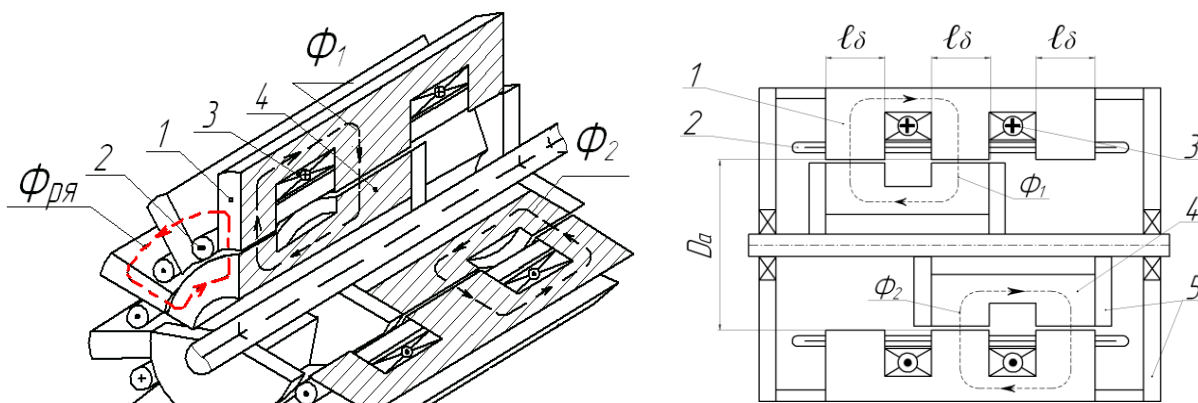


Рис. 2. Конструкція бііндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором

Наявність відкритих з обох боків пазів між зубцями статора (рис. 2) або сегментованого ротора (рис. 1) створює ряд повітряних проміжків, що призводить до зниження магнітної провідності магнітопроводу в поперечному напрямку, що, у свою чергу, призводить до послаблення поля реакції якоря  $\Phi_{\text{ря}}$  і відмови від додаткових полюсів та компенсаційної обмотки.

У ЕМПСБР обох конструкцій всі обмотки нерухомі, а зміна магнітного потоку, що пронизує обмотку якоря, відбувається за рахунок переміщення феромагнітних полюсів безобмоткового ротора (рис. 3).

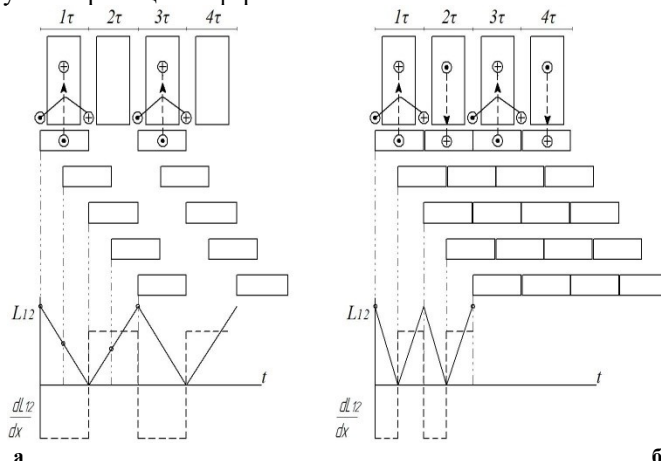


Рис. 3. Зміна потокозчеплення в часі в одноіндукторній та бііндукторній ЕМПСБР

У ЕМПСБР, як і в індукторній машині, величина магнітної індукції в робочому проміжку змінюється тільки за величиною, залишаючись незмінною за напрямком. Це дозволяє вважати ЕМПСБР обох конструкцій машинами постійного струму індукторного типу. Як і у індукторній електричній машині, у ЕМПСБР лише частка обмотки якоря приймає участь у перетворенні енергії.

У одноіндукторному варіанті ЕМПСБР у перетворенні енергії приймає участь 50% обмотки якоря при частоті перемагнічування  $f=V/(2 \cdot \tau)$  (рис. 3,а). У бііндукторному варіанті ЕМПСБР у перетворенні енергії приймає участь 66% обмотки якоря, але при цьому під центральним зубцем частота перемагнічування

подвоюється  $f=V/\tau$  (рис. 3,б).

Відмінність по частоті перемагнічування й визначає використання даних конструкцій для високих і низьких швидкостей обертання.

У теперішній час електричні машини розбудовують за двома напрямками:

- збільшення номінальної швидкості обертання двигуна, а, отже, зменшення габаритів електричної машини й збільшення її ККД;

- зменшення номінальної швидкості обертання двигуна при відмові від використання редуктора, тобто, створення високомоментних безредукторних електричних машин з ККД більше, ніж загальний ККД редуктора й двигуна.

Прикладом застосування високооборотних електричних машин може служити будівництво електромобілів, де вже сьогодні номінальна швидкість обертання двигуна дорівнює 4000-5000 об/хв, а максимальна швидкість обертання при розгоні по трасі 12000-14000 об/хв [10]. У найближчій перспективі досягнення максимальної швидкості обертання 30000 об/хв.

Як відомо, максимальна швидкість обертання електричної машини обмежено двома факторами: механічною міцністю ротора й зростаючими втратами в сталі. Статор високошвидкісної електричної машини повинен витримувати великі зусилля на скручування, тому він має бути цільним, мати відносно невелику масу й величину втрат у сталі.

Конструкція одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим ротором повністю відповідає цим критеріям (рис. 1). Оскільки ЕМПСБР є машиною індукторного типу, то величина й напрямок магнітного потоку в корпусі й полюсах ротора (рис. 1 поз.1, 5), залишається незмінною, тому вони можуть виготовлятися зі звичайної конструкційної сталі. У даній конструкції перемагнічується тільки пакет статора, який має відносно невелику масу й обсяг і збирається з листів електротехнічної сталі малої ширини 0,05 або 0,08 мм.

Порівняльні розрахунки ЕМПСБР із електромагнітним збудженням  $P_n=84\text{кВт}$ ,  $n_n=4000\text{об/хв}$ ,  $U_n=500\text{В}$  з аналогічним синхронним реактивним двигуном з підмагнічуванням (СРДП) [11] показав менший ККД ЕМПСБР =94,1% проти КПД СРДП = 96,2%, різниця 2%, але при цьому вартість активних матеріалів ЕМПСБР=109,7 євро, СРДП =195,5 євро, різниця 44%.

Конструкція біндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим статором призначена для малих швидкостей обертання. Мала швидкість, малі втрати в сталі, малі тангенціальні навантаження на окремі зубці, що дозволяє застосувати сегментований статор, при цьому в перетворенні енергії приймає участь не 50, а 66 % обмотки якоря, що позитивно позначається на габаритах машини.

Порівняльні розрахунки ЕМПСБР із електромагнітним збудженням  $P_n=1\text{кВт}$ ,  $n_n=600\text{об/хв}$ ,  $U_n=300\text{В}$  з аналогічним синхронним генератором з постійними магнітами (СГПМ) [12] показав більшу ефективність ЕМПСБР - 1472кВт·г проти ефективності СГПМ 1213кВт·г, різниця 18%, але при цьому вартість ЕМПСБР=1150\$, СГПМ =2800\$, різниця 59%.

### Висновки

Розглянуті електричні машини можуть ефективно використовуватися як у високооборотних, так і в низькооборотних механізмах, дозволяючи повністю реалізувати всі позитивні переваги класичних машин постійного струму.

### Література

1. Matsuura Y., Sagawa M. et al., "Process for producing permanentmagnetmaterials," US Patent 4,597,938, 1986.
2. The innovative synchronous-reluctance drive system with SIMOTICS motors and SINAMICS converters. Siemens. 2019. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uid:464e5706-2c00-469a-bbc3-079caefb6530/pdld-b10002-03simoticsreluktanzmotorenu-72.pdf>.
3. IE4 SynRM motor-drive packages Super premium efficiency for industry. ABB. 2018. URL: [https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN\\_IE4\\_SynRM\\_brochure\\_3AUA0000132610\\_RevG.pdf](https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN_IE4_SynRM_brochure_3AUA0000132610_RevG.pdf).
4. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. IEEE. 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318>.
5. Widmer J. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. J. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi. Sustainable Materials and Technologies. 2015. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032>.
6. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). Adamas Intelligence. 2019. URL: <https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/>.
7. Dominique G. Rare earth elements and high-tech products. Guyonnet Dominique. CEC4Europe. 2018. URL: [https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter\\_3\\_3\\_Guyonnet\\_et\\_al\\_Rare\\_earth\\_elements\\_and\\_high\\_tech\\_products.pdf](https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf).
8. Патент України № 116924, Україна, МПК(2006.01) H02K 1/8, H02K 1/24, H02K 29/06, H02K 19/06. Електрична машина біндукторного типу (варіанти) / В. В. Булгар, А. О. Бойко, А. Д. Івлєв, Д. А. Івлєв, О. В.

Яковлев, В. Д. Косенков. – а201606821, заявл.22.06.2016 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10.

9. 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.

10. Bulent S., Casey M., Han Di, Silong Li Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. researchgate. 2015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/300415557\\_Benchmarking\\_of\\_electric\\_and\\_hybrid\\_vehicle\\_electric\\_machines\\_power\\_electronics\\_and\\_batteries](https://www.researchgate.net/publication/300415557_Benchmarking_of_electric_and_hybrid_vehicle_electric_machines_power_electronics_and_batteries).

11. Marco V. High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets. – 2018. URL: [http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018\\_WMM\\_Paper\\_UNIVAQ.pdf](http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018_WMM_Paper_UNIVAQ.pdf).

12. Івлєв Д.А. Низькошвидкісний генератор постійного струму з безобмотковим ротором для вітроенергетичної установки : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.01 "Електричні машини і апарати" / Івлєв Дмитро Анатолійович – Одеса, 2019. – 21 с.

#### References

1. Matsuura Y., Sagawa M. et al., "Process for producing permanentmagnetmaterials," US Patent 4,597,938, 1986.
2. The innovative synchronous-reluctance drive system with SIMOTICS motors and SINAMICS converters. Siemens. 2019. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:464e5706-2c00-469a-bbc3-079caefb6530/pdld-b10002-03simoticsreluktanzmotorenu-72.pdf>.
3. IE4 SynRM motor-drive packages Super premium efficiency for industry. ABB. 2018. URL: [https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN\\_IE4\\_SynRM\\_brochure\\_3AUA0000132610\\_RevG.pdf](https://library.e.abb.com/public/1deacbd313d443268fd50804b6abbe16/EN_IE4_SynRM_brochure_3AUA0000132610_RevG.pdf).
4. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. IEEE. 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5618318>.
5. Widmer J. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. J. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi. Sustainable Materials and Technologies. 2015. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000032>.
6. Rare Earth Elements: Market Issues and Outlook (Free Report). Adamas Intelligence. 2019. URL: <https://www.adamasintel.com/rare-earth-market-issues-and-outlook/>.
7. Dominique G. Rare earth elements and high-tech products. Guyonnet Dominique. CEC4Europe. 2018. URL: [https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter\\_3\\_3\\_Guyonnet\\_et\\_al\\_Rare\\_earth\\_elements\\_and\\_high\\_tech\\_products.pdf](https://www.cec4europe.eu/wpcontent/uploads/2018/09/Chapter_3_3_Guyonnet_et_al_Rare_earth_elements_and_high_tech_products.pdf).
8. Patent Ukrainy № 116924, Ukraina, МПК(2006.01) N02K 1/8, N02K 1/24, N02K 29/06, N02K 19/06. Elektrychna mashyna biinduktornoho typu (varianty) / V. V. Bulhar, A. O. Boiko, A. D. Ivliev, D. A. Ivliev, O. V. Yakovlev, V. D. Kosenkov. – а201606821, zaiavl.22.06.2016 ; opubl. 25.05.2018, Biul. № 10.
9. Patent Ukrainy № 104943, Ukraina, МПК(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.
10. Bulent S., Casey M., Han Di, Silong Li Benchmarking of electric and hybrid vehicle electric machines, power electronics, and batteries. researchgate. 2015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/300415557\\_Benchmarking\\_of\\_electric\\_and\\_hybrid\\_vehicle\\_electric\\_machines\\_power\\_electronics\\_and\\_batteries](https://www.researchgate.net/publication/300415557_Benchmarking_of_electric_and_hybrid_vehicle_electric_machines_power_electronics_and_batteries).
11. Marco V. High Performance Electrical Motors for Automotive Applications – Status and Future of Motors with Low Cost Permanent Magnets. – 2018. URL: [http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018\\_WMM\\_Paper\\_UNIVAQ.pdf](http://www.refreedrive.eu/wpcontent/downloads/2018_WMM_Paper_UNIVAQ.pdf).
12. Ivliev D.A. Nyzkoshvydkisnyi henerator postiiinoho strumu z bezobmotkovym rorotorom dlia vitroenerhetychnoi ustanovky : avtoref. dys. na zdobuttia stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.09.01 "Elektrychni mashyny i aparaty" / Ivliev Dmytro Anatoliiovych – Odessa, 2019. – 21 s.

Надійшла / Paper received : 13.10.2020 р. Надрукована/Printed :27.11.2020 р.