

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 високооберткових і низькооберткових 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. KOSENKOV

Khmelnitskyi National University

D. IVLEV

Odesa National Polytechnic University

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

The appearance on the electrical market of high-energy permanent magnets NdFeB, patented in 1983 by Sumitomo Special Metals, has led to significant changes in the electrical industry. Today, the use of magnetolectric excitation in adjustable drive motors has become the de facto standard.

However, in recent years, interest in electric machines with electromagnetic excitation has begun to revive. Synchronous jet engines, valve-induction motors, in the construction of which permanent magnets are not used, are actively developing such giants as Siemens and ABB.

This interest is largely due to the high cost of permanent magnets, which, according to experts, is from 30 to 60% of the total cost of active materials of the motor. According to a number of forecasts, it is expected that in the coming years the cost of permanent magnets will only increase.

Unfortunately, only types of synchronous machines are considered as electric machines with electromagnetic excitation today, classic DC machines are not included in this list. The classic DC machine has several advantages: providing a constant torque in a wide range of speeds; high overload capacity; simple rheostatic regulation; wide possibilities for excitation regulation (parallel, serial); possibility of power supply from an alternating current network with the cheap scheme of regulation on the basis of the thyristor rectifier. Unfortunately, it has a number of disadvantages: the presence of an unreliable collector unit, high cost, large mass of active materials do not allow it to take a worthy place among modern high-tech electric machines. The new design of the DC machine solves this problem.

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.

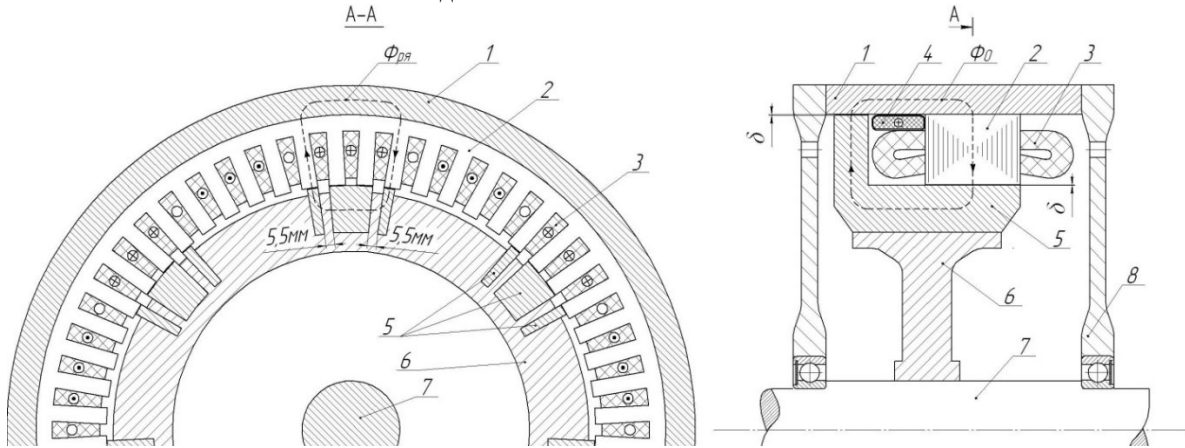
На жаль, у якості електричних машин з електромагнітним збудженням сьогодні розглядаються лише різновиди синхронних машин, класичні машини постійного струму в цей список не входять. Класична машина постійного струму має декілька переваг: забезпечення постійного моменту в широкому діапазоні швидкостей; 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**

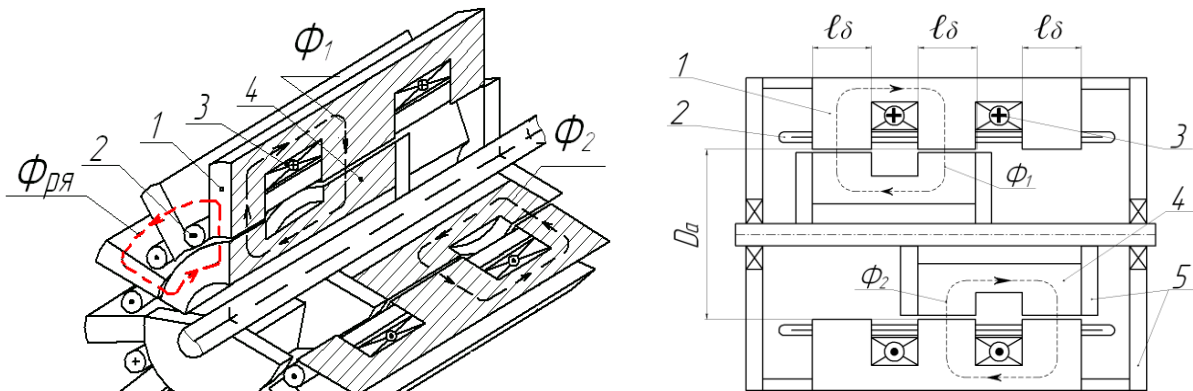
Електрична машина постійного струму з безобмотковим ротором (ЕМПСБР) вдало сполучає в собі гідності, як синхронних машин, так і машин постійного струму.

Магнітна система одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим сегментованим ротором (рис. 1) [8] складається 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.



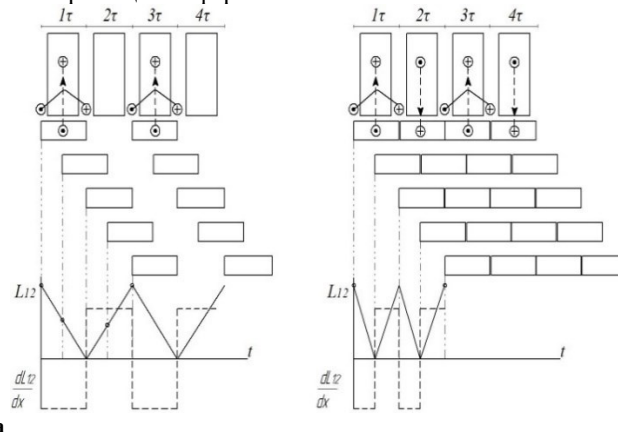
**Рис. 1.** Конструкція одноіндукторної електричної машини постійного струму з безобмотковим ротором та сегментованим ротором



**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  $\Phi_{ря}$  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 високооберткових 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 ККД СРДП = 96,2%, різниця 2%, але при цьому вартість активних матеріалів ЕМПСБР=109,7 євро, СРДП =195,5 євро, різниця 44%.

Конструкція бііндукторної 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 високооберткових, так і в низькооберткових 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-b10002-03simoticsreluktanzmotorens-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 бііндукторного 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. Андришченко, 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, MPK(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, 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.
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 postiinoho strumu z bezobmotkovym rоторom dlia vitroenerhetychnoi ustanovky : avtoref. dys. na zdobuttia stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.09.01 "Elektrychni mashyny i aparaty" / Ivliev Dmytro Anatoliiovych – Одеса, 2019. – 21 с.

Надійшла / Paper received : 13.10.2020

Надрукована/Printed :27.11.2020