

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.72.092>

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ КОМЕРЦІЙНИХ БПЛА

О.В. Бібік*, докт. техн. наукІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: 12olenbivs@gmail.com

У статті зроблено огляд конструктивних особливостей, переваг і недоліків двигунів, що використовуються для комерційних безпілотних літальних апаратів. Представлено аналіз конфігурації багатофазних вентильно-індукторних двигунів із реактивним ротором та порівняльний аналіз технічних показників двигунів із зовнішнім ротором: синхронного двигуна з постійними магнітами і вентильно-індукторного двигуна. На підставі огляду підходів до проектування і ефективних способів регулювання частоти обертання вентильно-індукторних двигунів електромеханічних систем зі змінним навантаженням визначено основні тенденції розвитку і шляхи подальших досліджень ВІД для комерційних безпілотних літальних апаратів. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: вентильно-індукторні двигуни, конфігурації, технічні характеристики, проектування, комерційні безпілотні літальні апарати.

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стрімко розвиваються, збільшується чисельність їхнього застосування у галузях комунального, сільськогосподарського і промислового призначення. Вимогами до електропривода комерційних БПЛА є високі значення ККД, забезпечення заданого значення електромагнітного моменту із незначними його пульсаціями, ефективна і надійна робота електродвигунів у заданому діапазоні зміни частоти обертання за зміни навантаження та умов експлуатації. Для комерційних БПЛА використовують високоефективні електродвигуни з постійними магнітами: безконтактні двигуни постійного струму БДПС (Brushless Direct Current Motors – BLDC) і синхронні двигуни з постійними магнітами СДПМ (Permanent Magnet Synchronous Motors – PMSM) із зовнішнім ротором, що дає можливість створювати великі електромагнітні моменти електродвигунів і використовувати їх для безпосереднього привода пропелерів БПЛА.

Альтернативою цим двигунам є вентильно-індукторні двигуни ВІД (Switched Reluctance Motors – SRM), які складаються з індукторної машини (ІМ) із реактивним (без обмотки) ротором та напівпровідниковим перетворювачем із мікропроцесорним керуванням. Перевагами ВІД є відсутність рідкоземельних матеріалів і обмотки ротора, проста та міцна конструкція, зменшена вартість. Крім того, ВІД забезпечують стійку роботу в умовах високих температур, навантаження тощо, високу енергоефективність під час їхньої експлуатації в широкому діапазоні зміни частоти обертання [1, 2]. Основні недоліки ВІД, через явнополісну структуру – великі пульсації електромагнітного моменту і акустичний шум.

Останнім часом підвищується зацікавленість науковців у дослідженні ВІД оберненої конструкції – із зовнішнім ротором задля можливості ефективного їхнього використання у БПЛА [3, 4]. Актуальним напрямком підвищення ефективності літальних апаратів є застосування швидкісних двигунів [5].

У роботі розглядаються вентильно-індукторні двигуни класичної конструкції (зовнішній статор, внутрішній ротор). Особливу увагу приділено ВІД із зовнішнім ротором. Акцентується увага на порівнянні технічних характеристик двигунів із зовнішнім ротором

ВІД і СДПМ, визначенні тенденцій розвитку та формуванні подальших досліджень ВІД комерційних БПЛА.

Метою статті є огляд і аналіз конфігурацій, технічних характеристик, підходів до проектування і ефективного регулювання частоти обертання вентиляльно-індукторних двигунів та визначення тенденцій їхнього розвитку для комерційних БПЛА.

Структура, конфігурації та конструктивні виконання ВІД.

Структурна схема вентиляльно-індукторного привода складається з електричної мережі ЕМ, вентиляльно-індукторної машини ВІМ (вентильний перетворювач ВП та індукторна машина ІМ), системи керування СК та навантаження Н та наведена на рис. 1, де U_d – напруга кола постійного струму, U_ϕ – фазна напруга, G – керуючий сигнал, θ – кут повороту ротора, ω – частота обертання ротора, i_ϕ – фазний струм, M_n – момент навантаження.

Особливості конструкції ВІД: багатополосність, багатofазність, незалежність фаз обмотки ІМ; безконтактність (відсутність колектора), можливість бездатчикового керування зі спостерігачами стану та оптимального керування машиною в робочих режимах за зміни навантаження та частоти обертання, що дає змогу підвищити надійність та енергоефективність вентиляльно-індукторного електропривода.

Розвиток вентиляльно-індукторних двигунів рухається в напрямку використання багатofазних ВІД (Multi-phase Switched Reluctance Motors – MSRM) із метою зниження пульсацій електромагнітного моменту, що актуально для електромеханічних систем (ЕМС) зі змінним навантаженням БПЛА.

Найпростіші багатofазні (із числом фаз $m=3$) ВІД, полюси статора і ротора яких симетричні та рівномірно розподілені по колу, мають шість полюсів статора та чотири полюси ротора (конфігурація 6/4), кількість фаз яких визначається

$$m = z_S / (z_S - z_R), \quad (1)$$

де z_S та z_R – кількість полюсів статора та ротора відповідно.

У статті [2] розглядаються звичайні багатofазні ВІД (Conventional Switched Reluctance Motors – CSRМ), подібні до трифазних (1), із кількістю полюсів, що розраховуються за формулами

$$\begin{cases} z_S = 2km \\ z_R = k(2m \pm 2) \end{cases}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт кратності багатofазних ($k=2, 3, 4, 5.. K$) ВІД до базових ($k=1$).

Досліджено базові багатofазні ВІД (рис. 2) із кількістю фаз $m=4$ – конфігурації 8/6 (рис. 2 а) і 8/10 (рис. 2 б); $m=5$ – 10/8 (рис. 2 в); $m=6$ – 12/10 (рис. 2 з). Номінальні моменти двигунів M_n – на рівні 7,7 Нм.

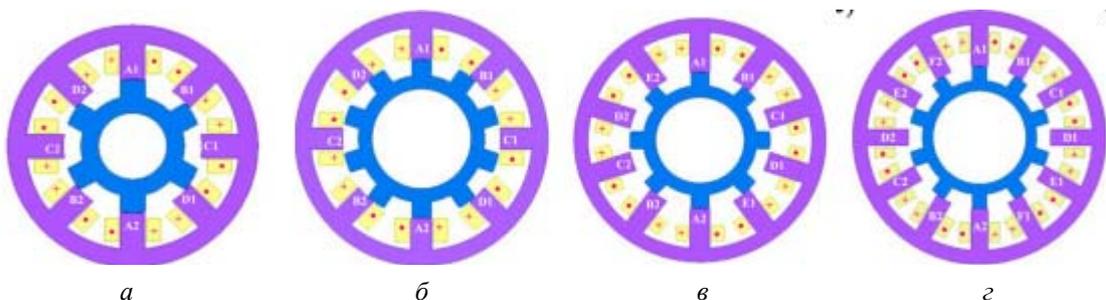


Рис. 2. Конфігурації багатополосних вентиляльно-індукторних двигунів: а – 8/6; б – 8/10; в – 10/8; з – 12/10

У результаті аналізу [2] пульсацій електромагнітного моменту ΔM , магнітних втрат p_m та ККД двигунів визначено найбільш ефективний ВІД ($m=5$, ККД = 87,4%, $\Delta M = 12\%$).

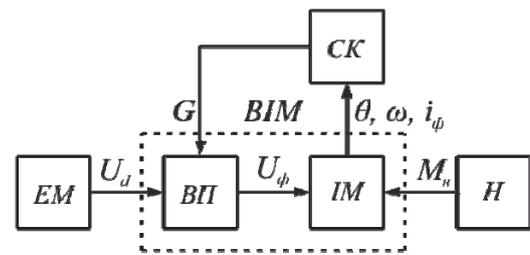


Рис. 1. Структурна схема вентиляльно-індукторного привода

Однак, за однакового числа фаз у разі збільшення числа полюсів статора і ротора ВІД зростають магнітні втрати (завдяки збільшенню частоти перемагнічування).

Тенденція використання багатофазних ВІД спостерігається для БПЛА [3, 4]. Так, у роботі [3] представлено порівняльний аналіз технічних і масогабаритних показників двигунів потужністю 500 Вт із зовнішнім ротором трифазного ВІД ($m=3$, $k=2$) конфігурацією 12/8 та СДПМ (із 30 пазами статора та 36 пазами ротора), розроблених для $M_n = 0,8$ Нм і номінальної частоти обертання $n_n = 6000$ об/хв. Схематичні зображення поперечних перерізів СДПМ і ВІД із зовнішнім ротором наведено на рис. 3 а і б відповідно.

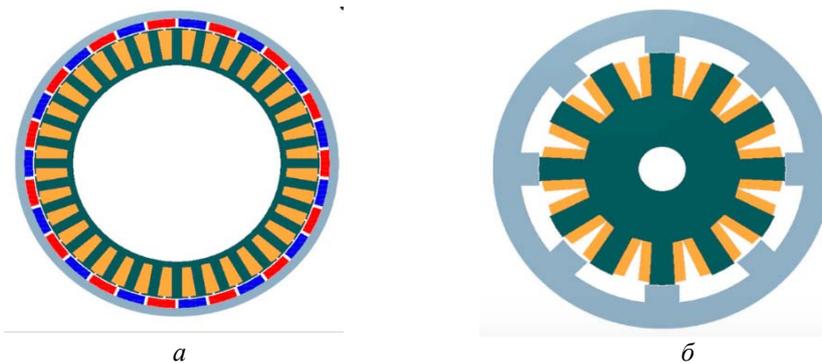


Рис. 3. Поперечні перерізи двигунів: а – СДПМ; б – ВІД

Результати розрахунків показали [3], що СДПМ має кращі технічні показники: вищий ККД (85,7 %), нижчі магнітні втрати та менші пульсації електромагнітного моменту ($\Delta M = 0,2\%$) порівняно з ВІД конфігурації 12/8. У роботі [4], окрім попередньої конфігурації 12/8 ($m=3$, $k=2$), розглянуто два трифазних ВІД із зовнішнім ротором ($M_n = 0,8$ Н·м) конфігурацій 18/12 ($k=3$) та 24/16 ($k=4$) з метою оцінки їхньої придатності для БПЛА. Показано, що пропорційне збільшення числа полюсів статора і ротора дає змогу зменшити пульсації електромагнітного моменту ВІД із зовнішнім ротором. Однак, реалізація багатофазних ВІД вимагає також пропорційного збільшення числа елементів вентильного перетворювача, що збільшує вартість двигунів.

Підходи до проєктування ВІД БПЛА комерційного призначення. Сучасні підходи щодо проєктування вентильно-індукторних двигунів із зовнішнім ротором на першому етапі включають розроблення магнітних систем згідно з вимогами завдання (номінальні потужність, напруга і частота обертання, зовнішній діаметр, довжина магнітопроводів, крива намагнічування сталі і т.п.), вибір конфігурації; розрахунок діаметра розточення D_i , геометричних параметрів і кутових величин статора β_s і ротора β_r і т.п.), формування статичних характеристик – залежності потокозчеплення або індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму $\psi_\phi = f(i_\phi, \theta)$ або $L_\phi = f(i_\phi, \theta)$ шляхом комп'ютерного моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [6].

На другому етапі проводяться дослідження перехідних процесів вентильно-індукторних двигунів за допомогою математичних моделей, розроблених у середовищі Matlab-Simulink, що враховують взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, навантаження. Визначаються часові залежності струмів фаз, електромагнітного моменту, частоти обертання, розраховуються втрати (магнітні, електричні, механічні), ККД і електромеханічні характеристики ВІД у робочих режимах.

Однак, ВІД із зовнішнім ротором потребують повнішого заповнення паза статора міддю і уточнення конфігурації катушок обмотки, що запропоновано авторами в методиці [7]. Особлива увага приділяється врахуванню теплових процесів, що протікають в елементах конструкції ВІД, які працюють в умовах підвищених температур та інтенсивних режимів навантаження. Синтез і аналіз ВІД із зовнішнім ротором вимагає надійних методів теплового розрахунку [8], що забезпечує працездатність та стабільність їхньої роботи.

Актуальним напрямком розвитку комерційних БПЛА є використання швидкісних електродвигунів. У роботі [5] представлено результати розрахунків аеродинамічних характеристик гвинта квадрокоптера та рівня акустичного тиску на відстані 1 метра від джерела акустичного випромінювання (гвинта) за зміни частоти обертання двигуна від 3000 об/хв. до 10000 об/хв. Показано, що ККД гвинта має максимум за частоти обертання 9000 об/хв. Водночас акустичний тиск прямо пропорційний швидкості обертання, а екстремум відсутній.

В Інституті електродинаміки НАН України з 2008 до 2019 рр. проводилась робота щодо розроблення і дослідження вентиляно-індукторних двигунів. За участю автора [9] був розроблений дослідний зразок ВІД конфігурації 6/4 на базі асинхронного двигуна (АД) із використанням комутатора зі С-скиданням і коливальним поверненням енергії, отримано два патенти та проведено теоретичні й експериментальні дослідження робочих режимів ВІД. Результати показали можливість збільшення ККД на 7 % порівняно із серійним АД потужністю 120 Вт, широкий діапазон регулювання частоти обертання (1:6), плавний пуск; зростання електромагнітного моменту за зниження частоти обертання двигуна.

Ще на етапі попереднього проектування можна зменшити пульсації електромагнітного моменту вентиляно-індукторного двигуна шляхом вибору раціональної структури й оптимізації геометричних розмірів індукторної машини. У роботі [9] запропоновано концепцію оптимального проектування геометрії статора і ротора ВІД із забезпеченням необхідного середнього значення електромагнітного моменту і мінімальних його пульсацій на основі використання аналітичних залежностей цих параметрів від геометричних розмірів ІМ: діаметра розточування D_i і кутових величин статора β_s і ротора β_r . Цей підхід дав змогу визначити на етапі попереднього проектування оптимальну геометрію ВІД (конфігурація 6/4, потужність 100 Вт) із кутовими величинами полюсів статора і ротора відповідно $\beta_r = 40,5^\circ \dots 41^\circ$, $\beta_s = 37,5^\circ$, яка забезпечує необхідне середнє значення електромагнітного моменту 0,4 Н·м та мінімальні його пульсації на рівні 27 %.

Ефективні способи керування ВІД у складі ЕМС зі змінним навантаженням. Для ВІД характерні універсальність та гнучкість у формуванні необхідних механічних характеристик привода та розширення зони регулювання частоти обертання шляхом зміни кутів комутації. На основі аналізу та узагальнення результатів досліджень способів регулювання частоти обертання ВІД електромеханічних систем зі змінним навантаженням завдяки широтно-імпульсному регулюванню (ШІР) фазної напруги та зміни рівня обмеження фазного струму розроблено рекомендації щодо вибору ефективних способів керування ВІД за критерієм максимального ККД у робочих режимах [10]:

1) для регулювання частоти обертання ВІД у діапазоні 1:4 за умови сталої корисної потужності варто застосовувати керування кутами комутації, коли при зростанні частоти обертання кут вмикання зменшується за незмінного кута вимикання. Цей спосіб буде більш ефективним, якщо зі зменшенням кута вмикання кут вимикання буде дещо збільшуватися, додатково розширюючи зону комутації;

2) для ефективного регулювання частоти обертання ВІД у діапазоні 1:6 за умови сталого моменту опору пропонується спосіб керування ВІД, що базується на зменшенні напруги і збільшенні кута вмикання за сталої зони комутації при зменшенні частоти обертання так, щоб ККД був максимальним у режимі роботи з урахуванням періодичного моменту опору;

3) для регулювання частоти обертання ВІД у невеликому діапазоні (наприклад, 1:1,3) за умови збільшення потужності при збільшенні частоти обертання доцільно використовувати широтно-імпульсне регулювання фазної напруги або регулювання рівня обмеження фазного струму. Цей спосіб буде більш ефективним, якщо зі зменшенням частоти обертання зона комутації буде зміщуватися в сторону збільшення кута вмикання;

4) для формування комплексної механічної характеристики (наприклад, тягової) із забезпеченням максимальних значень ККД на всьому діапазоні робочих частот, який включає ділянки регулювання частоти обертання ВІД із навантаженням різного характеру, необхідно комбінувати запропоновані методи п.1-3.

Отримані результати можуть бути корисні при створенні енергоефективних ВІД для комерційних БПЛА.

Висновки. Огляд літературних джерел показав, що останнім часом підвищується зацікавленість науковців у дослідженні вентильно-індукторних двигунів із зовнішнім ротором задля можливості ефективного їхнього використання для комерційних БПЛА. Основні вимоги до електроприводів комерційних БПЛА: високі енергетичні, пускові та масогабаритні показники електродвигунів. Ці вимоги задовольняють і широко використовуються у таких випадках високоефективні електродвигуни з постійними магнітами.

Ефективність використання вентильно-індукторних двигунів визначається забезпеченням заданих пускового і середнього електромагнітного моментів із незначними його пульсаціями, високого значення ККД, надійності та стійкості роботи в режимах експлуатації. Цього можна досягти вибором багатофазної конфігурації і оптимальним проектуванням геометрії ВІД, а також забезпеченням високих значень ККД у робочих діапазонах, що реалізується вибором ефективних способів керування ВІД літальних апаратів.

На основі огляду літературних джерел підходів до проектування і ефективного регулювання частоти обертання ВІД зі змінним навантаженням визначено напрямки подальших досліджень ВІД літальних апаратів, які будуть зосереджені на розробці геометрії ВІД із зовнішнім ротором у габаритах СДПМ та підвищенні ефективності режимів їхньої роботи.

Розробка ВІД комерційних безпілотних літальних апаратів вимагає подальшого більш глибокого вивчення процесів у таких машинах, їхнього аналізу, не тільки моделювання та оптимізації конструкцій, але й оптимізації режимів роботи відповідно до умов експлуатації.

Основні тенденції розвитку ВІД комерційних БПЛА: використання перспективних технологій; використання багатофазних ВІД; оптимальне проектування геометрії індукторної машини за критеріями ефективності; підвищення енергоефективності ВІД у робочих режимах; розробка та удосконалення математичних моделей, методик розрахунку, методів аналізу та оптимізації режимів ВІД з урахуванням навантаження БПЛА.

Робота виконувалась в рамках реалізації Проєкту Національного фонду досліджень України № 2025.06/0044. ПРОЄКТ "«Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для літальних апаратів»", № 2025.06/0044.

1. Patel S. R., Gandh N., Chaithanya N., Chaudhari B. N., Nirgude A. Design and development of Switched Reluctance Motor for electric vehicle application. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India, 2016. Pp. 1–6.
2. Shouyi Han, Kaikai Diao, Xiaodong Sun. Overview of multi-phase switched reluctance motor drives for electric vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. No 13(9). DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211045195>
3. Vigneshwar S.T., Balaji M., Prabhu S. Comparative Analysis of PMSMs and SRMs for Drone Applications. *Engineering Proceedings*. 2025. No 93(1). Pp. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2025093014>
4. Vigneshwar S.T., Balaji M., Kamaraj V., Prabhu S. Comparative Analysis of Switched Reluctance Motors with Different Slot Pole Combinations for Quadcopter Applications. *ICSES*. Chennai India. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSES63760.2024.10910667>
5. Балалаєва К.В., Балалаєв А.В., Голембієвський Г.Г., Ковтун А.А. Характеристики повітряного гвинта квадрокоптера. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 4 спецвипуск 1 (189). С. 23-28 DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4sup1.04>
6. Singh V. K., Sharma U. and Singh B. Design FEA and Dynamic Simulation Based Model of an Outer Rotor SRM for an Efficient Fan Application. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, 2020. Pp. 1–6.
7. Ткачук В.І., Біляковський І.С., Малиш О.В. Методика проектування вентильних реактивних двигунів оберненої конструкції. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2006. № 563. С. 136–140.
8. Ткачук В.І., Біляковський І.С., Продиус В.М., Вайда Б.Р. Особливості теплового розрахунку електромеханічного перетворювача з явнополюсним статором і зовнішнім пасивним ротором. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2007. № 587. С. 94–100
9. Бібік О.В. Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів із змінним навантаженням: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01 / Ін-т електродинаміки НАН України, Київ, 2020. 40 с.
10. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Effective Methods to Control the Switched Reluctance Drive of Pumping and Compressor Equipment and Electric Transport. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, 2023, Poster Session. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402474>

MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS FOR COMMERCIAL UAVS**O.V. Bibik**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: 12olenbivs@gmail.com

The article provides an overview of the design features, advantages, and disadvantages of motors used for commercial unmanned aerial vehicles. A review and analysis of multiphase classical SRMs is presented. A comparative analysis of the technical performance of an outer rotor SRM and PMSMs is presented. Based on a review of approaches to the design and effective methods of controlling the speed of switched reluctance motors of electromechanical systems with variable load, the main development trends and ways of further research into SRM for commercial unmanned aerial vehicles have been identified. Ref. 10, fig. 3.

Keywords: switched reluctance motors, configuration, technical characteristics, design, commercial unmanned aerial vehicle.

1. Patel S. R., Gandh N., Chaithanya N., Chaudhari B. N., Nirgude A. Design and development of Switched Reluctance Motor for electric vehicle application. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India, 2016. Pp. 1–6.
2. Shouyi Han, Kaikai Diao, Xiaodong Sun. Overview of multi-phase switched reluctance motor drives for electric vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. No 13(9). DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211045195>
3. Vigneshwar S.T., Balaji M., Prabhu S. Comparative Analysis of PMSMs and SRMs for Drone Applications. *Engineering Proceedings*. 2025. No 93(1). Pp. 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2025093014>
4. Vigneshwar S.T., Balaji M., Kamaraj V., Prabhu S. Comparative Analysis of Switched Reluctance Motors with Different Slot Pole Combinations for Quadcopter Applications. *ICSES*. Chennai India, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSES63760.2024.10910667>
5. Balalaieva K., Balalaiev A., Golembiyevskyy G., Kovtun A. Characteristics of a quadcopter propeller. *Aerospace Engineering and Technology*. 2023. No 4 Special Issue 1 (189). Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4supl.04> (Ukr)
6. Singh V.K., Sharma U. and Singh B. Design FEA and Dynamic Simulation Based Model of an Outer Rotor SRM for an Efficient Fan Application. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, 2020. Pp. 1–6.
7. Tkachuk V.I., Bilyakovskyy I.E., Malysh O.V. Methodology for designing of inverted switched reluctance motor. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika*. 2006. No 563. Pp. 136–140. (Ukr)
8. Tkachuk V. I., Bilyakovskyy I. E., Prodius V. M., Vaida B. R. Features of thermal calculation of an electromechanical converter with a salient pole stator and an external passive rotor. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika*. 2007. No 587. Pp. 94–100 (Ukr)
9. Bibik O.V. The development of theory and measures of improve the energy efficiency of switched reluctance and induction motors with variable load. The thesis for a doctor of technical sciences degree in specialty 05.09.01 Electrical machines and apparatuses. Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 2020. 40 p. (Ukr)
10. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Effective Methods to Control the Switched Reluctance Drive of Pumping and Compressor Equipment and Electric Transport. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, 2023. Poster Session. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402474>

Надійшла: 28.11.2025
Прийнята: 08.12.2025

Submitted: 28.11.2025
Accepted: 08.12.2025