



ГРЕБЕНІКОВ

Віктор Володимирович — доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України

ІННОВАЦІЙНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

**За матеріалами доповіді на засіданні
Президії НАН України 10 червня 2026 року**

У доповіді узагальнено результати робіт з розроблення комплексу інноваційних електромеханічних систем на основі високошвидкісних електричних машин із постійними магнітами та магнітних редукторів. Запропоновано методологію створення параметричних дво- і тривимірних скінченноелементних моделей, що описують спільний (мультифізичний) перебіг електромагнітних, теплових та механічних процесів в електричній машині. Роботи спрямовано на істотне підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів енергії та розширення сфери їх застосування в таких важливих галузях, як транспорт, відновлювана енергетика, авіація тощо.

Постановка проблеми. Підвищення питомих масогабаритних та енергетичних показників електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) є однією з ключових науково-технічних проблем сучасного електромашинобудування, актуальність якої зумовлена інтенсивним розвитком електротранспорту, відновлюваної енергетики, робототехніки та безпілотної авіації. Фізичною основою проблеми є те, що електромагнітний момент машини пропорційний добутку її активного об'єму, магнітного навантаження (індукції в повітряному проміжку) та електричного навантаження (лінійної густини струму). Перший множник обмежений магнітним насиченням сталі, другий — допустимим нагріванням ізоляції, внаслідок чого щільність моменту на одиницю об'єму має принципову верхню межу. Отже, підвищити питому потужність на одиницю маси можливо насамперед завдяки зменшенню маси за заданої потужності.

Оскільки потужність дорівнює добутку моменту на кутову швидкість, за фіксованої щільності моменту нарощування частоти обертання збільшує потужність без збільшення активного об'єму машини; відповідно, маса, що припадає на одиницю по-

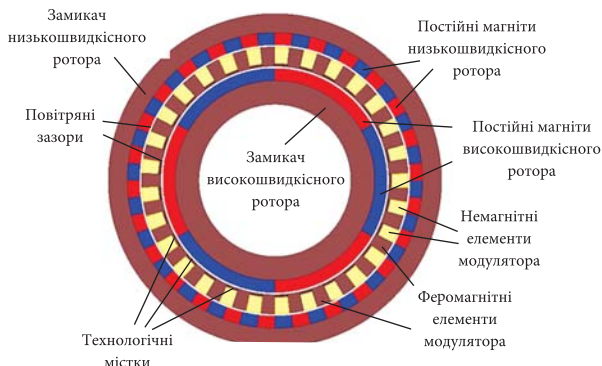


Рис. 1. Конструкція циліндричного магнітного редуктора

тужності, зменшується обернено пропорційно до частоти обертання. Саме це визначає доцільність переходу до високошвидкісних машин. Застосування високоенергетичних постійних магнітів (ПМ) додатково усуває втрати на збудження та підвищує індукцію в проміжку, тому питома потужність машин із ПМ у 10—15 разів перевищує відповідний показник асинхронних двигунів, синхронна частота обертання яких за частоти живлення 50 Гц обмежена значенням 3000 об/хв. Так, серійний асинхронний двигун АІР250М2 (90 кВт, 530 кг, 0,17 кВт/кг) поступається сучасному двигуну з ПМ EVO Electric AF140 (94 кВт, 42,5 кг, 2,2 кВт/кг) за питомою потужністю у 13 разів.

Принциповим обмеженням є те, що більшість робочих механізмів є тихохідними: частота обертання колеса електромобіля дорівнює приблизно 1000 об/хв (за швидкості 100 км/год), а вітроротора — 50—250 об/хв. Наприклад, у вітроустановці безпосереднє з'єднання тихохідного вітроротора з генератором потребує або багатополюсного виконання останнього, що зводить нанівець виграв у масі, або застосування редуктора, який підвищує частоту обертання. Перспективною альтернативою механічним передачам є магнітні редуктори з постійними магнітами, які забезпечують безконтактну передачу моменту за щільності моменту, близької до механічних передач, проте позбавлені притаманних їм недоліків, таких як шум та потреба в обслуговуванні.

Принцип дії сучасних магнітних редукторів ґрунтується на просторовій модуляції магнітного поля феромагнітними сегментами, що обґрунтовано в роботах [1, 2], де показано можливість досягнення щільності моменту, зіставної з механічними передачами. Подальші дослідження присвячено підвищенню питомих показників і технологічності таких пристроїв [3], а також інтеграції магнітної редукції безпосередньо в електричну машину, зокрема для систем генерування енергії вітроустановок [4—9]. Попри наявний значний доробок, ефективне проектування складних ЕМПЕ стримується відсутністю узагальнених інженерних методик, які враховували б взаємопов'язаний характер електромагнітних, теплових та механічних процесів у динамічних режимах роботи, що зумовлює потребу в адекватних параметричних моделях на основі методу скінченних елементів.

У доповіді узагальнено результати дослідження комплексу інноваційних електромеханічних систем подвійного призначення на основі високошвидкісних електричних машин з ПМ і магнітних редукторів, а також наведено фізичне обґрунтування ефективності їх застосування у вітроенергетиці, міському електротранспорті, приводах свердловинних насосів, гібридних авіаційних силових установках та безпілотних літальних апаратах.

Принцип дії та конструкція магнітного редуктора. Магнітний редуктор являє собою пристрій безконтактної передачі та перетворення обертового моменту між валами, дія якого ґрунтується на магнітній взаємодії постійних магнітів двох співвісно розташованих роторів через проміжний модулятор (рис. 1).

Фізичний механізм передавання моменту полягає в просторовій модуляції магнітного поля. Феромагнітні сегменти модулятора спотворюють поле магнітів швидкісного ротора так, що в його просторовому гармонічному спектрі з'являється складова з числом пар полюсів, яке дорівнює числу пар полюсів другого ротора; саме ця гармоніка забезпечує стале електромагнітне зчеплення роторів та передавання моменту. Унаслідок цього коефіцієнт

редукції визначається відношенням чисел пар полюсів роторів ($G_{\text{мр}} = p_{\text{нш}}/p_{\text{вш}}$), кутові швидкості роторів пов'язані оберненою залежністю ($\omega_{\text{вш}} = -G_{\text{мр}} \cdot \omega_{\text{нш}}$), а потрібне число феромагнітних елементів модулятора дорівнює сумі чисел пар полюсів роторів ($n_s = p_{\text{нш}} + p_{\text{вш}}$).

Значення величин переданого та зубцевого моментів істотно залежать від співвідношення чисел пар полюсів роторів: за цілого відношення зубцевий момент є максимальним унаслідок збігу просторових гармонік полів, тому раціональним є вибір взаємно простих чисел. Наявність містків між сегментами модулятора підвищує його механічну міцність, проте створює паразитні шляхи замикання магнітного потоку, через що максимум статичного моменту виявляється чутливим до розташування містків і потребує оптимізації геометрії.

Модулятор є найскладнішим у конструктивному й технологічному плані елементом редуктора. Оскільки його сегменти проводять змінний у часі магнітний потік, для зменшення вихрових струмів їх виготовляють із шихтованої ізотропної електротехнічної сталі. Тіло модулятора, що сприймає відцентрові навантаження, має бути механічно міцним і водночас електрично та магнітно непровідним (капролон, карбон та ін.), аби унеможливити паразитне замикання потоку та вихрові втрати.

Переваги магнітної редукції безпосередньо випливають з її безконтактної природи: відсутність механічного зношування і, відповідно, висока надійність та довговічність, безшумність роботи й відсутність потреби в мащенні. Принципово важливим є вбудований захист від перевантажень — магнітне зчеплення характеризується скінченням максимальним моментом, у разі перевищення якого ротори проковзують, виходячи із синхронізму, без механічних пошкоджень. Обмеженнями є чутливість магнітів до підвищених температур (ризик розмагнічування), вища вартість через застосування рідкісноземельних елементів та конструктивна складність модулятора.

Магнітні редуктори у вітроенергетичних установках. Застосування магнітної редукції у вітроенергетичних установках фізично вмоти-

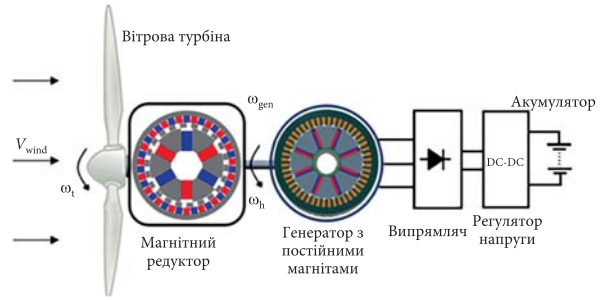


Рис. 2. Структура вітроенергетичної установки з магнітним редуктором

воване низькою частотою обертання вітроротора (50—250 об/хв), зумовленою обмеженням колової швидкості кінців лопатей та потребою підтримувати оптимальне швидкохідне число. Оскільки потужність вітротурбіни пропорційна кубу швидкості вітру, для ефективної роботи установка має функціонувати зі змінною частотою обертання. Безпосереднє з'єднання тихохідного вітроротора з електрогенератором з ПМ потребує багатополюсного виконання останнього (частота наведеної електрорушійної сили пропорційна добутку числа пар полюсів на частоту обертання), що зумовлює велику масу та високу вартість. Застосування магнітних редукторів підвищує частоту обертання ротора генератора, дозволяючи зменшити число полюсів і приблизно вдвічі знизити сумарну масу системи «редуктор — генератор» порівняно з тихохідним багатополюсним електрогенератором. Структуру вітроенергетичної установки наведено на рис. 2.

Для дослідження установки в середовищі Simulink було розроблено імітаційну модель, що відтворює структуру «вітроротор — магнітний редуктор — генератор — навантаження», а також аналітичні моделі окремих компонентів. Параметричну математичну модель побудовано з урахуванням розмірів магнітної системи. За результатами порівняння чотирьох конфігурацій ротора оптимальною за критерієм максимуму потужності визнано конфігурацію електрогенератора з ПМ. Математичну модель магнітного редуктора побудовано з урахуван-

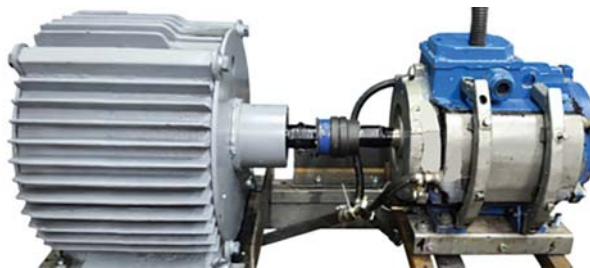


Рис. 3. Експериментальний стенд для випробувань магнітного редуктора потужністю 10 кВт: магнітний редуктор (зліва) з'єднано з електрогенератором на постійних магнітах (справа)

ням геометрії і тангенціального розташування ПМ на високошвидкісному роторі.

Чисельне моделювання пускового режиму за умови повільного зростання швидкості вітру від нуля до 12 м/с показало, що на початковому проміжку (2,3—3,0 с) характеристики на валу низькошвидкісного ротора містять осциляції, які відповідають процесу входження в синхронізм. В усталеному режимі механічна потужність на валу турбіни становить 10 кВт, а на валу генератора — 9,5 кВт, що відповідає розрахунковому значенню ККД редуктора 95 %. Здатність магнітного редуктора проковзувати під час стрибкоподібного зростання швидкості вітру (від 10 до 14 м/с) підтверджує його функцію захисту трансмісії від динамічних перевантажень.

Адекватність розроблених моделей підтверджено експериментально на створених стендах потужністю 5 і 10 кВт із виготовленими дослідними зразками магнітних редукторів та електрогенераторів (рис. 3). Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями не перевищує 8 %, а максимальне експериментальне значення ККД редуктора становить 95 %.

Тягові електродвигуни для міського електротранспорту. Особливістю проектування тягових електродвигунів є необхідність урахування ізового циклу, оскільки тяговий привод працює в різко змінному режимі, а тепловий стан магнітів та обмоток визначається не номінальним навантаженням, а інтегральним тепловиділенням за цикл. Як приклад розгля-

нуто розроблення електродвигуна з ПМ для міського тролейбуса і здійснено його порівняння із серійним асинхронним двигуном ДТА-1У1. Досліджено низку конфігурацій магнітної системи без застосування редукції та із застосуванням магнітного редуктора.

З використанням розробленої теплової моделі встановлено, що в умовах рідинного охолодження для номінального струму 600 А температура магнітів сягає 110 °С. Контроль цієї температури є критичним, оскільки коерцитивна сила неодимових магнітів знижується з нагріванням, і в разі перевищення граничного значення (близько 150 °С для магнітів N42SH) виникає ризик незворотного розмагнічування. На етапі оптимізації системи «магнітний редуктор + високошвидкісний двигун» отримано передавальне відношення магнітного редуктора 6,33, за якого швидкості руху $V = 50$ км/год відповідає частота обертання електродвигуна $n = 15850$ об/хв.

Порівняльний аналіз свідчить, що завдяки уникненню втрат у роторі та вищому магнітному навантаженню електродвигун з ПМ забезпечує в 4,4 раза, а система «двигун з ПМ + магнітний редуктор» — у 6 разів вищу питому потужність порівняно з асинхронним приводом; при цьому загальна маса приводу знижується з 840 кг для асинхронних двигунів до 350 і 200 кг відповідно.

Електродвигуни з постійними магнітами для свердловинних насосів. Застосування електродвигунів з ПМ є ефективним і для приводів свердловинних насосів, у яких діаметр машини жорстко обмежений діаметром свердловини, що робить підвищення частоти обертання чи не єдиним способом нарощування потужності в заданому габариті. Розроблено параметричні моделі і досліджено шість конфігурацій магнітної системи двигуна потужністю 37 кВт; за критерієм мінімуму маси магнітів оптимальною визнано конфігурацію 18,7 кВт на кілограм ПМ. Тепловий розрахунок підтвердив, що максимальна температура магнітів не перевищує 75 °С.

Зіставлення із серійними асинхронними двигунами засвідчило значну перевагу розро-

бленого двигуна з ПМ: за частоти обертання 6000 об/хв він може замінити асинхронний двигун, маючи при цьому майже втричі меншу масу (50 проти 138 кг) і забезпечуючи у 3,6 раза вищу питому потужність. Його ККД сягає 97 % проти 81—85 % у серійних зразків, оскільки в машині з ПМ, на відміну від асинхронного двигуна, відсутні струм намагнічування та джоулеві втрати в короткозамкненому роторі.

Підвищення частоти обертання до 12000 об/хв створює додатковий резерв зниження маси: розрахункова маса двигуна зменшується приблизно у 4,6 раза порівняно із серійним асинхронним двигуном, що підтверджує обернену залежність маси від частоти обертання.

Аналіз розмагнічування постійних магнітів. Форма та матеріал постійних магнітів істотно впливають на характеристики електро-двигуна, тому окремий цикл досліджень було присвячено порівняльному аналізу машин з тангенціальною та радіальною намагніченістю, а також з неодимовими й феритовими магнітами. Феритові магніти мають значно нижчу залишкову індукцію, а отже, забезпечують менший момент за однакових розмірів, проте їхня вартість на порядок нижча (\$20—50 проти \$100—400 за кілограм), а температурна стабільність і питомий електричний опір — вищі. Менша залишкова індукція феритових магнітів зумовлює нижчий електромагнітний момент, проте, з огляду на пропорційність потужності добутку моменту на частоту обертання, цей дефіцит повністю компенсується підвищенням швидкості: феритова модель розвиває 7 кВт за 7500 об/хв, що дорівнює потужності неодимової моделі за 2800 об/хв. Отже, застосування феритових магнітів є доцільним саме у високошвидкісних приводах, зокрема для свердловинних насосів.

Важливим чинником, який потрібно враховувати на етапі проектування, є розмагнічування магнітів у разі короткого замикання обмотки. Поле реакції якоря спрямоване зустрічно до поля магнітів, і за великих струмів робоча точка магніту може зміститися нижче коліна кривої розмагнічування, спричинивши незворотну втрату намагніченості; особливо

вразливими є «тонкі» магніти з низьким коефіцієнтом провідності магнітного кола, для яких незворотне розмагнічування настає вже за струму, що в 5—7,5 раза перевищує номінальний. Прогнозування розмагнічування було виконано засобами скінченноелементного моделювання; розбіжність розрахункових та експериментальних характеристик дослідних зразків не перевищує 5 %.

Надпотужні високошвидкісні машини для гібридних авіаційних силових установок. Високошвидкісні електричні машини є перспективними для гібридних авіаційних силових установок завдяки високим питомим показникам. У межах співпраці з АТ «Івченко-Прогрес» (європейський проект «Екологічно чиста авіація для всіх класів повітряних суден» (EFACA)) розроблено високошвидкісний електродвигун потужністю 110 кВт із частотою обертання 30000 об/хв.

За таких частот обертання визначальним стає механічний аспект: відцентрові напруження в роторі зростають пропорційно квадрату колової швидкості, тому проектування потребує спільного розв'язання електромагнітної та механічної задач. Серед розглянутих чотирьох конфігурацій магнітної системи частина не задовольняла умову міцності ротора, а прийнятна за міцністю конфігурація з «краплеподібною» формою магнітів виявилася технологічно складною у виготовленні. Тому як базову було взято конфігурацію № 4, для якої досліджено дво- і чотириполюсний варіанти.

Другим визначальним чинником є втрати на вихрові струми, які за високих частот перемагнічування зростають пропорційно квадрату частоти. Для їх мінімізації застосовано сегментацію магнітів (розрив контурів вихрових струмів) та літцендрат в обмотках (поділ провідника на ізольовані жили для послаблення поверхневого ефекту).

Високошвидкісний двигун з ПМ масою 34 кг може замінити серійний асинхронний двигун АІР280S2 масою 592 кг, що відповідає виграву за питомою потужністю у 16,8 раза. Слід підкреслити, що стандартний асинхронний двигун має у 10 разів нижчу частоту обертання —

3000 об/хв, і саме ця різниця у швидкості є визначальною для досягнутого зниження маси.

Тепловий стан машини досліджено за різних систем охолодження; для аксіальних каналів (36 каналів, об'єднаних у 4 групи) температура магнітів та обмоток не перевищує 120 °С, причому в разі продуктивності циркуляційного насоса понад 14 л/хв подальше зниження температури є несуттєвим, що відповідає виходу на конвективну межу тепловіддачі. Слід підкреслити, що застосовані магніти марки N45SH зберігають температурну стабільність до 150 °С, тому отримане значення 120 °С перебуває в безпечних межах із достатнім запасом.

Високошвидкісний стартер-генератор.

Граничним за частотою обертання об'єктом є стартер-генератор потужністю 3 кВт із частотою обертання 58000 об/хв. Застосовано конфігурацію із зовнішнім ротором: за такої схеми відцентрові сили притискають магніти до зовнішнього ярма, яке сприймає колові (обручні) напруження, тоді як у машині з внутрішнім ротором ті самі сили прагнули б відірвати магніти від поверхні. Це робить зовнішньороторну конфігурацію придатною для надвисоких частот обертання. Спільний скінченноелементний розрахунок електромагнітних характеристик і механічної міцності показав, що застосування сталі 45 забезпечує мінімальні переміщення та достатню міцність ротора.

Тепловий розрахунок виконано з урахуванням кількох послідовних запусків у режимі стартера, для якого характерні значні пускові струми, а отримана залежність моменту від частоти обертання відповідає вимогам технічного завдання.

Порівняння зі стандартним асинхронним двигуном AIP90L2 (23,5 кг) засвідчило, що розроблений стартер-генератор масою лише 0,8 кг ($D = 57$ мм, $L = 45$ мм) забезпечує понад 30-разовий вигравш за питомою потужністю. Такий результат зумовлений насамперед майже 20-кратною різницею в частоті обертання (58000 проти 3000 об/хв): оскільки маса машини обернено пропорційна частоті обертання, перехід до надвисоких швидкостей є визначальним чинником зниження маси.

Електроприводи з постійними магнітами для безпілотних літальних апаратів. При розробленні електроприводів безпілотних літальних апаратів, зокрема мультикоптерів вантажопідйомністю до 150 кг, за прототип було взято серійний двигун A40 потужністю 3,5 кВт; розбіжність розробленої параметричної моделі з експериментальними даними не перевищує 5 %. Оскільки електромагнітний момент пропорційний квадрату діаметра розточки, збільшення зовнішнього діаметра лише на 15 % дало змогу майже втричі підвищити потужність — до 9,5 кВт.

Характерним недоліком електродвигунів з ПМ є зубцевий момент, який виникає внаслідок взаємодії магнітів із зубцево-пазовою структурою статора (періодичної зміни магнітної провідності повітряного проміжку) і спричиняє вібрації, акустичний шум та додаткові втрати, що є особливо критичним для точності керування БпЛА. Досліджено різні методи його зниження: скіс пазів (усереднює зубцевий момент уздовж осі машини), оптимізацію форми полюсного наконечника (згладжує розподіл магнітної провідності) та магнітну систему Хальбаха (формує квазісинусоїдальне поле зі зниженим гармонічним складом). Установлено, що скіс пазів на 2° забезпечує зниження зубцевого моменту приблизно на 97 % за практично незмінного середнього моменту, що є найкращим результатом серед розглянутих методів.

Практичне впровадження. Виконані фундаментальні дослідження ЕМПЕ та розроблені параметричні скінченноелементні моделі, що враховують спільний перебіг електромагнітних, теплових і механічних процесів, дали змогу створити дослідні зразки нової техніки, впроваджені на кількох підприємствах (10 актів упровадження за 2024—2025 рр.) за трьома стратегічними напрямками. В авіаційній галузі виконано проектування електродвигунів для гібридної турбоелектричної силової установки (АТ «Івченко-Прогрес», 110 кВт). У сфері енергетики виготовлено експериментальний зразок електрогенератора з магнітними редукторами для вітроустановки (ТОВ «Енергоавтоматиза-

ція»). У промисловості створено недефективні електродвигуни для свердловинних насосів та безпілотних апаратів (ТОВ «НТК Дайнемікс»). Таким чином, результати фундаментальних досліджень Інституту електродинаміки НАН України трансформовано в інноваційні розробки, що сприяють забезпеченню енергетичної та технологічної безпеки держави.

Висновки. Обґрунтовано фізичні засади кратного підвищення питомих показників ЕМПЕ: за принципово обмеженої щільності моменту на одиницю об'єму зростання питомої потужності досягається підвищенням частоти обертання та застосуванням високоенергетичних ПМ, а узгодження високошвидкісної машини з тихохідним навантаженням забезпечується за допомогою магнітного редуктора.

Розроблено комплекс параметричних дво- і тривимірних скінченноелементних моделей, які враховують взаємопов'язаний перебіг електромагнітних, теплових та механічних процесів, що уможливорює проектування складних електромеханічних систем з урахуванням динамічних режимів роботи.

Встановлено, що застосування магнітних редукторів забезпечує безконтактну передачу моменту та вбудований захист від перевантажень завдяки проковзуванню роторів і приблизно вдвічі знижує масу системи «редуктор — генератор» вітроустановки за експериментального ККД до 95 %.

Підтверджено ефективність розроблених рішень для основних напрямів: виграш за питомою потужністю становить 4,4—6 разів для тягового приводу; 3,6 раза — для свердловинних насосів; 16,8 раза — для авіаційних машин та понад 31 раз — для високошвидкісного стартер-генератора. Для приводів БпЛА досягнуто зниження зубцевого моменту на 97 %.

Достовірність результатів підтверджено експериментально (розбіжність із дослідними даними становить 5—8 %) й засвідчено десятима актами впровадження. Перспективними напрямками є продовження співпраці з АТ «Івченко-Прогрес» (проект EFACA), розширення тематики на транспортні засоби спеціального призначення та комерціалізація електродвигунів з ПМ для безпілотних літальних апаратів.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Atallah K., Howe D. A novel high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2001. **37**(4): 2844—2846. <https://doi.org/10.1109/20.951324>
2. Atallah K., Calverley S.D., Howe D. Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear. *IEE Proceedings — Electric Power Applications*. 2004. **151**(2): 135—143. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20040224>
3. Rasmussen P.O., Andersen T.O., Jørgensen F.T., Nielsen O. Development of a high-performance magnetic gear. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005. **41**(3): 764—770. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.847319>
4. Jian L., Chau K.T., Jiang J.Z. A magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless machine for wind power generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009. **45**(3): 954—962. <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2018974>
5. Grebenikov V., Dobzhanskyi O., Gamaliia R., Gouws R. Improvement of transverse-flux machine characteristics by finding an optimal air-gap diameter and coil cross-section at the given magneto-motive force of the PMs. *Energies*. 2021. **14**(3): 755. <https://doi.org/10.3390/en14030755>
6. Grebenikov V.V., Gamaliia R.V., Dadychyn S.A. Comparative analysis of magnetic systems of permanent magnet motors for tram. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. (5): 27—32. <https://doi.org/10.15407/techned2021.05.027>
7. Dobzhanskyi O., Grebenikov V., Gouws R., Gamaliia R., Hossain E. Comparative thermal and demagnetization analysis of the PM machines with neodymium and ferrite magnets. *Energies*. 2022. **15**(12): 4484. <https://doi.org/10.3390/en15124484>
8. Grebenikov V.V., Pavlov V.B., Gamaliia R.V., Popkov V.S., Bondarenko S.G. Comparative analysis of the characteristics of permanent magnet motors for electric vehicles. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. (5): 42—47. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.042>
[Гребеніков В.В., Павлов В.Б., Гамалія Р.В., Попков В.С., Бондаренко С.Г. Порівняльний аналіз характеристик електродвигунів з постійними магнітами для електромобілів. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 42—47.]

9. Grebenikov V., Podoltsev O., Mazurenko L., Gamaliia R. Modeling of transient processes in a low-power wind turbine with a magnetic gearbox and a permanent magnet generator. *Vidnovluvana Energetika*. 2024. (3): 84—91. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).84-91](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).84-91)
[Гребеніков В.В., Подольцев О.Д., Мазуренко Л.І., Гамалія Р.В. Моделювання перехідних процесів у вітроустановці малої потужності з магнітним редуктором і електрогенератором на постійних магнітах. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3. С. 84—91.]

Viktor V. Grebenikov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>

INNOVATIVE ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BASED ON HIGH-SPEED ELECTRIC MACHINES

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 10, 2026

The report summarizes the results of work on the development of a complex of innovative electromechanical systems based on high-speed electric machines with permanent magnets and magnetic gearboxes. A methodology for creating parametric two- and three-dimensional finite element models that describe the joint (multiphysical) course of electromagnetic, thermal and mechanical processes in an electric machine is proposed. The work is aimed at significantly increasing the efficiency of electromechanical energy converters and expanding the scope of their application in such important industries as transport, renewable energy, aviation, etc.

Cite this article: Grebenikov V.V. Innovative electromechanical systems based on high-speed electric machines (according to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 10, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (8): 49—56. <https://doi.org/10.15407/visn2026.08.049>