

**Трегуб М.І.**

д.т.н., професор

**Білоцерківський  
національний аграрний  
університет****Червінський Л. С.**

д.т.н., професор

**Національний  
університет біоресурсів  
і природокористування  
України****Тарасюк О.І.**

Начальник відділу

**ДТЕК Київські регіональні  
електромережі****Демченко В.М.**

К.т.н., доцент

**Білоцерківський  
національний аграрний  
університет****Trehub M.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**Bila Tserkva National  
Agrarian University****Chervinskyi L.**Doctor of Technical Sciences,  
Professor**National University of Life  
and Environmental  
Sciences of Ukraine****Tarasiuk O.**

Head of Department

**DTEK Kyiv Regional  
Electric Networks****Demchenko V.**Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor**Bila Tserkva National  
Agrarian University****УДК 621.548:621.313****DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-12****ОБҐРУНТУВАННЯ  
КОНСТРУКТИВНИХ ТА  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА БЕЗ  
ТРАНСМІСІЙНОЇ ВЕРТИКАЛЬНО-  
ОСЬОВОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ**

Розроблено конструктивно-технологічні підходи до проектування та інженерного розрахунку безтрансмісійного електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки з дисковим ротором та постійними неодимовими магнітами аксіального типу. Основну увагу приділено удосконаленню конструкції генератора, вибору конструкційних і магнітних матеріалів, а також підвищенню надійності, технологічності та довговічності електромеханічної системи. Проведено аналіз конструктивних схем розташування полюсів ротора та визначено вплив геометричних параметрів магнітної системи на робочі характеристики генератора. Розрахунок параметрів виконувався графоаналітичним методом із використанням характеристик висококоерцитивних магнітів Nd-Fe-B та електротехнічної сталі.

Обґрунтовано доцільність використання дискового ротора аксіального типу, що забезпечує можливість розташування значної кількості полюсів при невеликих габаритах конструкції. Така схема відповідає сучасним напрямкам розвитку галузевого машинобудування, де важливими є компактність, енергоефективність та високий ресурс роботи електромеханічних систем. Дискова компоновка ротора сприяє підвищенню колової швидкості руху магнітних полюсів і покращує ефективність перетворення енергії. Проведено аналіз конструктивних навантажень та визначено вимоги до жорсткості і точності виготовлення основних вузлів генератора.

Особливу увагу приділено питанням конструктивної міцності та технологічності виготовлення вузлів генератора. Досліджено особливості механічної обробки дискового ротора, забезпечення концентричності, балансування та точності складання конструкції. Встановлено, що точність встановлення постійних магнітів безпосередньо впливає на рівномірність магнітного потоку, стабільність роботи генератора та зменшення вібраційних навантажень. Розглянуто конструктивні особливості модульного статора, що забезпечує спрощення складання та підвищення ремонтпридатності системи. Проаналізовано роботу вальницьких вузлів, умови виникнення механічних втрат та способи підвищення довговічності обертових елементів.

Значну увагу приділено матеріалознавчим аспектам проектування магнітної системи генератора. Обґрунтовано застосування висококоерцитивних неодимових магнітів марки



*Nd-Fe-B*, які характеризуються високими значеннями залишкової магнітної індукції, коерцитивної сили та питомої магнітної енергії. Встановлено, що використання таких магнітів дозволяє зменшити масогабаритні параметри генератора при одночасному підвищенні його енергетичної ефективності. Досліджено вплив температурних режимів на стабільність магнітних властивостей магнітів та визначено допустимі умови їх експлуатації. Також проаналізовано властивості електротехнічної сталі для виготовлення магнітопроводів з урахуванням магнітної проникності, втрат на вихрові струми та стійкості до циклічного перемагнічування.

Окремо досліджено механічні властивості конструкційних матеріалів ротора та корпусних елементів генератора. Проаналізовано вплив циклічних навантажень, вібрацій та динамічних режимів роботи на довговічність конструкції. Встановлено вимоги до жорсткості матеріалів ротора та статорних елементів для забезпечення стабільності геометричних параметрів у процесі експлуатації. Особливу увагу приділено забезпеченню технологічності виготовлення деталей генератора та підвищенню ремонтпридатності конструкції.

Запропоновано конструктивний варіант вертикального магнітного підвісу, використання якого дозволяє зменшити осьові навантаження на опори ротора, знизити втрати на тертя та підвищити довговічність генератора. Встановлено, що застосування магнітного підвісу сприяє підвищенню ресурсу вузлів тертя та покращенню експлуатаційних характеристик електромеханічної системи.

Для характерних режимів роботи вертикально-осьової вітроустановки отримано розрахункові енергетичні показники генератора, які підтверджено результатами експериментальних досліджень лабораторного зразка. Проведені стендові випробування дозволили оцінити ефективність роботи конструкції в реальних умовах експлуатації. Встановлено добру збіжність теоретичних і експериментальних результатів, що підтверджує ефективність запропонованих конструктивних, технологічних і матеріалознавчих рішень. Результати досліджень свідчать про перспективність використання безтрансмійсійних генераторів дискового типу з аксіальним магнітним потоком у сучасних енергетичних системах малої потужності.

**Ключові слова:** вертикально-осьова вітроустановка, безтрансмійсійний електрогенератор, дисковий ротор, аксіальний магнітний потік, неодимові магніти *Nd-Fe-B*, магнітопровід, електротехнічна сталь, магнітний підвіс, конструкційні матеріали, технологічність конструкції, модульний статор, енергоефективність, електромеханічна система, галузеве машинобудування, матеріалознавство.

ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРИВ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА БЕЗ ТРАНСМІСІЙНОЇ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОЇ ПРОУСТАНОВКИ © 2026 by Трегуб М.І., Червінський Л. С., Тарасюк О.І., Демченко В.М. ліцензовано згідно з СС BY 4.0

**Постановка проблеми** Сучасний розвиток енергетичного машинобудування та відновлюваних джерел енергії супроводжується зростанням потреби у створенні компактних, енергоефективних та технологічних електромеханічних систем із підвищеним ресурсом роботи [1, 2]. Особливої актуальності

набуває розроблення безтрансмійсійних генераторів для вертикально-осьових вітроустановок, які характеризуються простотою конструкції, стабільністю роботи за змінного напрямку вітру та можливістю експлуатації в умовах обмеженого простору [3]. Незважаючи на дещо нижчий аеромеханічний коефіцієнт



корисної дії порівняно з горизонтально-осьовими установками, вертикально-осьові вітроустановки мають значні переваги з позицій галузевого машинобудування, оскільки відзначаються спрощеною конструкцією, меншою кількістю рухомих вузлів, зниженими вимогами до систем орієнтації та підвищеною технологічністю виготовлення [4].

Перспективність використання вертикально-осьових вітроустановок зумовлена також можливістю їх застосування для енергозабезпечення об'єктів транспортної та дорожньої інфраструктури, де вітрові потоки формуються не лише природними повітряними масами, а й рухом транспортних засобів [5]. Для таких умов конструкції вертикально-осьового типу є найбільш придатними через здатність ефективно працювати за багатонапрямлених потоків повітря. Крім того, конструктивна сумісність вертикально-осьових турбін із фотоелектричними панелями дозволяє створювати комбіновані енергетичні комплекси, що відповідає сучасним тенденціям розвитку автономних енергетичних систем [1].

Для сучасного матеріалознавства особливий інтерес становить вибір конструкційних та магнітних матеріалів для електромеханічних систем аксіального типу [2, 6]. Використання висококоерцитивних неодимових магнітів Nd-Fe-B забезпечує підвищення щільності магнітного потоку та дозволяє зменшити масогабаритні параметри генератора [3]. Одночасно виникають важливі матеріалознавчі завдання, пов'язані зі стабільністю магнітних властивостей, температурною стійкістю магнітів, довговічністю магнітопроводів, зменшенням втрат на вихрові струми та забезпеченням механічної міцності ротора і статорних елементів [4, 7]. Важливим напрямом також є дослідження впливу циклічних механічних навантажень і вібрацій на довговічність конструкційних матеріалів генератора [6].

Одним із перспективних напрямів розвитку галузевого машинобудування є створення безтрансмійних генераторів з дисковим ротором та аксіальним магнітним потоком, які характеризуються зменшеними механічними втратами, підвищеною технологічністю та можливістю модульного виконання статора [2, 3]. Особливого значення набуває забезпечення жорсткості конструкції, точності встановлення магнітів, балансування ротора та підвищення ресурсу вальницьових вузлів [4]. У цьому аспекті перспективним є використання магнітного підвісу, який дозволяє частково компенсувати осьові навантаження на опори ротора, знизити механічне тертя та підвищити експлуатаційну надійність системи [5].

Таким чином, обґрунтування конструктивних, технологічних та матеріалознавчих параметрів безтрансмійного електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки є актуальним науково-технічним завданням, що поєднує питання галузевого машинобудування, матеріалознавства та сучасного енергетичного машинобудування [1–7].

**Аналіз останніх досліджень** Сучасні дослідження у сфері аксіальних електричних машин із постійними магнітами підтверджують зростання інтересу до безтрансмійних низькооборотних генераторів, які можуть застосовуватися у вітроенергетичних установках малої потужності. У працях останніх років основну увагу приділено підвищенню питомої потужності, зменшенню масогабаритних показників, удосконаленню конструкції ротора і статора, а також оптимізації магнітної системи. Зокрема, систематичний огляд 2024 року показує активне зростання кількості досліджень аксіальних машин із постійними магнітами у 2019–2024 роках, особливо щодо безосердечникових і модульних конструкцій. ([ScienceDirect][1])

У напрямі галузевого машинобудування аксіальні електричні машини розглядаються як перспективні через компактність, високу крутну здатність, можливість модульного компонування та зручність інтеграції у безтрансмійні приводи. Останні публікації підкреслюють, що ефективність таких систем значною мірою залежить не лише від електромагнітного розрахунку, а й від технологічності виготовлення, точності складання, балансування ротора, стабільності повітряного проміжку та жорсткості конструкції. У дослідженнях 2025 року для аксіальних генераторів малої швидкості активно застосовують FEM-моделювання, зокрема в ANSYS Maxwell, що дозволяє оцінити втрати, розподіл магнітного поля та оптимізувати геометрію машини ще на етапі проектування. ([Nature][2])

З позицій матеріалознавства найбільша увага приділяється властивостям неодимових магнітів Nd-Fe-B та електротехнічної сталі. Сучасні роботи наголошують, що стабільність магнітних властивостей Nd-Fe-B залежить від температурного режиму, якості покриття, корозійної стійкості та умов експлуатації. Дослідження 2024 року показують, що термічний вплив може змінювати магнітні характеристики та стабільність антикорозійних покриттів, тому для генераторів відкритого або напіввідкритого виконання важливо враховувати захист магнітів від вологи й нагрівання. ([MDPI][3])

Окремий напрям становлять роботи, присвячені корозійній стійкості спечених Nd-Fe-B магнітів. У публікаціях 2025 року зазначається, що без належного захисного покриття корозійні процеси можуть погіршувати магнітні властивості

та знижувати ресурс роботи магнітної системи. Це особливо важливо для вітроустановок, які працюють за змінної вологості, температури та вібраційних навантажень. ([ResearchGate][4])

Отже, аналіз сучасних публікацій свідчить, що подальший розвиток безтрансмійних аксіальних генераторів пов'язаний із поєднанням електромагнітної оптимізації, машинобудівної технологічності та матеріалознавчого обґрунтування вибору магнітних і конструкційних матеріалів. Саме тому дослідження конструкції дискового ротора, модульного статора, магнітного підвісу, властивостей Nd-Fe-B магнітів та електротехнічної сталі є актуальним для галузевого машинобудування й матеріалознавства.

#### **Мета роботи та методи досліджень**

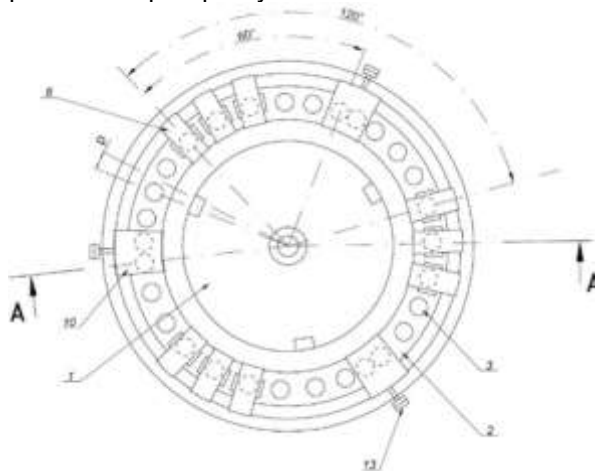
Мета роботи полягала у розробленні конструктивно-технологічних методів побудови та інженерного розрахунку безтрансмійного електрогенератора для вертикально-осьової вітроустановки з урахуванням вимог до технологічності, енергоефективності, конструктивної надійності та довговічності матеріалів.

Методи досліджень. У роботі використано методи графоаналітичного моделювання та інженерного розрахунку магнітоелектричного генератора з урахуванням технічних характеристик неодимових магнітів, магнітопровідних властивостей електротехнічної сталі та конструктивних параметрів електромеханічної системи. Дослідження виконували з використанням підходів Матеріалознавство для оцінювання властивостей магнітних і конструкційних матеріалів та методів Галузеве машинобудування для аналізу конструкції, технологічності виготовлення та механічної надійності вузлів генератора.

**Виклад основного матеріалу.** Основні положення технічної ідеї побудови безтрансмійного вертикально-осьового електрогенератора з дисковим ротором і дуговим статором базувалися на необхідності створення конструкції з мінімальними механічними втратами та достатньою коловою швидкістю руху полюсних елементів ротора. Встановлено, що дискова форма ротора забезпечує можливість розташування значної кількості пар полюсів в аксіальному напрямі, що дозволяє отримати високі енергетичні показники за низьких частот обертання. Для галузевого машинобудування важливим є те, що така конструкція сприяє зменшенню масогабаритних характеристик, спрощує технологію виготовлення та дозволяє реалізувати модульний принцип побудови статора.

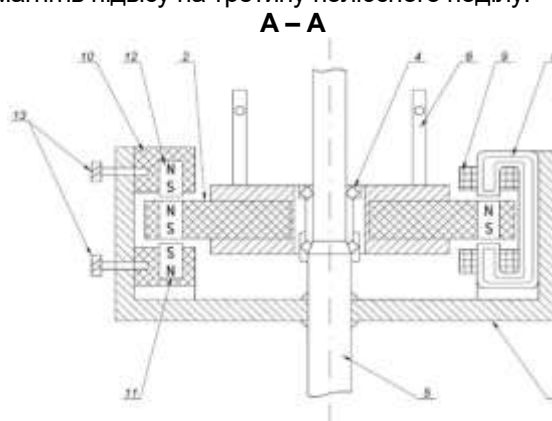
У процесі дослідження особливу увагу приділено питанням конструктивної міцності, жорсткості ротора та підвищення ресурсу вальницьких вузлів. Встановлено, що використання вертикального магнітного підвісу дозволяє частково або повністю компенсувати

осьові навантаження, створювані обертовою масою ротора і вітрової турбіни. Це забезпечує зменшення механічного тертя, підвищення довговічності опорних вузлів та покращення експлуатаційних характеристик системи. З позицій Матеріалознавство досліджено вплив магнітних властивостей неодимових магнітів і електротехнічної сталі на формування магнітного потоку, рівень магнітного насичення та стабільність роботи генератора в умовах змінних навантажень.



**Рис.1** Горизонтальні контури електрогенератора на постійних магнітах: 1 - корпус дискового ротора; 2 - периферійна частина; 3 - постійні магніти; 8 - магнітопроводи; 10 - корпуси магнітних підвісів; 13 - гвинти кріплення.

На ескізному зображенні (рис.1) показано розташування окремих статорних модулів трифазовими групами і взаємну симетрію відносно дискового ротора з постійними магнітами. Відсутність магнітних сил утримання ротора досягнута за рахунок геометричних зміщень центрів магнітів і магнітопроводів та магнітних підвісів на третину полюсного поділу.



**Рис. 2.** Вертикальний розріз електрогенератора на постійних магнітах з магнітним підвісом: 4 - вальницький вузол; 5 - вертикальна вісь; 6 - вертикальні стрижні; 7 - корпус статора; 9 - обмотки статора; 11 - нижні та 12 - верхні магніти вертикального підвісу.

Схема встановлення дискового ротора з постійними магнітами та статорних секцій з обмотками і корпусів магнітного підвісу показані на рис. 4. Методика розрахунку розробленого типу генератора має загальну послідовність, яка передбачає початковими умовами визначену розрахункову потужність генератора залежно від розрахункової швидкості вітру та геометричних розмірів вітрової турбіни. Механічна характеристика вітрової турбіни дозволяє визначити такі розрахункові параметри генератора, як діаметр ротора, число пар полюсів, тип та розміри магнітів ротора. Технічні характеристики магнітів ротора регламентують і технічні характеристики

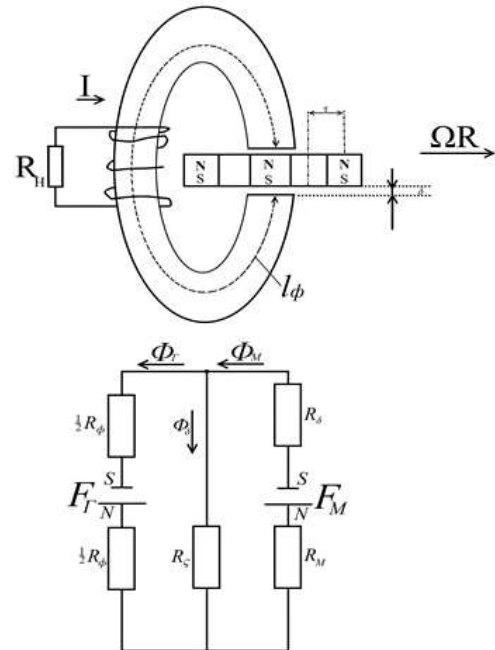
Обґрунтовано тип електрогенератора з висококоерцитивними магнітами Nd-Fe-B. Форма ротора дискова. Виготовлений дисковий ротор експериментальної моделі генератора зображений на фото (рис. 3).



**Рис. 3** Загальний вигляд дискового ротора вертикально-осьового вітроелектрогенератора з циліндричними магнітами Nd-Fe-B.

Вибрано неодимові магніти циліндричного типу з полюсами на основах виходячи з умов технології виготовлення ротора і методів закріплення з кращою геометричною точністю на полюсних поділах. Маючи визначені геометричні розміри вітрової турбіни та її частотні характеристики за різних швидкостей вітру розраховуємо потужність безтрансмісійного магнітоелектричного генератора з дисковим ротором і дуговим статором. Дуговий статор виконується окремими незалежними модулями, кожен з яких є окремим однофазовим синхронним генератором змінного струму. За допомогою таких однофазових модулів можна виконувати багатофазовий синхронний генератор відповідно геометрично зміщуючи на статорі відносно центрів полюсів ротора. В даному прикладі діаметр кола обертання центрів полюсів магнітів ротора становить 0,4 м. Число магнітів ротора 24. Діаметр циліндричного магніту 0,02 м, а висота 0,01м.

Кожен статорний модуль має один стрічковий безстиківий магнітопровід 8 з котушковими обмотками 9 (рис.4). Тому весь розрахунок магнітної системи правомірно робимо для одного модуля. Електромагнітну систему статорного модуля показано графічною моделлю та заступною схемою магнітного кола (рис. 4).



**Рис. 4** Конфігурація електромагнітної системи та суміщена заступна схема магнітного кола статорного модуля генератора.

Обертний рух дискового ротора з постійними магнітами з кутовою швидкістю  $\Omega$  та коловою лінійною швидкістю  $\Omega R$  викликає періодичну зміну магнітного потоку  $\Phi$  в магнітопроводі статорного модуля від максимального значення  $\Phi_{max}$ , коли магніт площею полюсів розташовується в проміжку магнітопроводу до мінімального  $\Phi_{min}$ , коли магніт повністю виходить з проміжку магнітопроводу. Таким чином аналітичний вираз для змінного магнітного потоку без впливу реакції якоря матиме вигляд:

$$\Phi = 0,5(\Phi_{max} - \Phi_{min})\sin(\pi x/\tau), \quad (1)$$

де  $x$  – рухова координата відносного положення осі симетрії магніту ротора і магнітопроводу статора,

$\tau$  – полюсний поділ ротора

Розрахункове діюче значення електрорушійної сили холостого ходу одного модуля визначатиметься виразом:

$$E_o = 4,44\Phi f_n w k_o, \quad (2)$$

де  $f_n$  – частота періодів, Гц,  $f_n = pn/60$ ,

де  $p$  - число пар полюсів ротора,

$n$  – частота обертів ротора, об/хв,

$w$  – число витків обмотки статорного

модуля,



$k_0$  – обмотковий коефіцієнт, (для котушкового типу  $k_0=1$ )

Розрахунок магнітної системи з постійними магнітами можна виконувати коловим методом відповідно до наведеної заступної схеми, проводячи розрахунки за законом повного струму. Для цього необхідно брати геометричні розміри магнітопроводу з довжиною середньої лінії  $l_\phi$  із магнітною проникністю  $\mu_\phi$  та повітряного проміжку з магнітною проникністю  $\mu_0$  ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). В магнітній системі взаємодіють дві МРС:  $F_m$  постійного магніту та  $F_a$  - реакції якоря генератора. Таким чином магнітна система має три ділянки: 1 -ділянку постійного магніту довжиною, рівною висоті циліндричного магніту, 2 -ділянку двох повітряних проміжків відстанню  $2\delta$  та 3 -ділянку феромагнітного осердя з довжиною середньої лінії  $l_\phi$ . Оскільки в магнітному колі в режимі холостого ходу діє лише намагнічувальна сила постійного магніту, то сума магнітних напруг трьох ділянок магнітного кола дорівнює нулю:

$$H_m l_m + H_\delta 2\delta + H_\phi l_\phi = 0, \quad (3)$$

де  $H_m$ , - коерцитивна сила магніту, кА/м,  
 $H_\delta$ ,  $H_\phi$  – відповідно напруженість магнітного поля в повітряному проміжку та в осерді магнітопроводу

$$H_\delta = B_\delta / \mu_0, \quad H_\phi = B_\phi / \mu_\phi \quad (4)$$

$l_m$  - висота циліндричного магніту, м,

Найпростіше мету розрахунку магнітного кола статорного модуля з висококоерцитивними магнітами, зображеного на рис. 2 можна пояснити знаходженням [4] оптимальних розмірів магнітів і повітряного проміжку, за яких магнітопровід, виконаний з певної марки електротехнічної сталі не набуватиме стану магнітного насичення, але повністю використовуватиме намагнічувальні властивості. При цьому важливим габаритним параметром є площа перетину магнітопроводу, а довжина його середньої лінії має незначний вплив, хоча існує [3] оптимальне співвідношення мінімальної довжини та необхідного об'єму. Одночасно важливим показником оптимального використання магнітного матеріалу слід вважати максимальне значення магнітної енергії на графіку станів постійного магніту. Наприклад, для циліндричного магніту типу Nd – Fe – В марки N35 з полюсами на основах залишкова індукція становить близько 1,2 Тл, і коерцитивна сила близько 950 кА/м, а максимальна магнітна енергія близько 270 кДж/м<sup>3</sup>. Тоді циліндричний магніт висотою 0,01м створює магнітну напругу на полюсах  $950 \text{ кА/м} \cdot 0,01\text{м} = 9,5 \text{ кА}$ . Повітряний проміжок чинить розмагнічувальну дію і на ньому відбувається майже весь спад цієї магнітної напруги. При цьому значення магнітної індукції в повітряному проміжку менше ніж залишкова індукція магніту залежно від відстані проміжку. Для взаємодії магнітопроводу статора з

циліндричними магнітами необхідно виконати його з круглою або квадратною формою перетину. Причому площа перетину [4] магнітопроводу повинна становити на 10 % більше площі полюсу магніту. Для квадрату це відповідає площі навколо вписаного у нього круглого полюсу. Легко знайти співвідношення площі перетину квадратного магнітопроводу до площі круглого полюсу циліндричного магніту, що вписується у квадрат. Так сторона квадрату дорівнює діаметру вписаного у квадрат кола. Тобто співвідношення площі квадрату до площі вписаного у квадрат кола буде  $4d^2/\pi d^2 = 4/\pi$ . Вважаючи, що коефіцієнт заповнення площі перетину в магнітопроводі зі стрічкової електротехнічної сталі становить 0,92, тоді уточнене співвідношення площ буде 3,68/ $\pi$ .

*Розрахунок магнітної системи статорного модуля.* Неодимові магніти Nd-Fe-B марки N35 за технічними характеристиками мають середнє значення залишкової магнітної індукції 1,2 Тл, коерцитивної сили 950 кА/м, максимальної магнітної енергії 270 кДж/м<sup>3</sup>, максимальну робочу температуру 80 °С. За цими показниками будемо робочу діаграму магнітної системи. В сучасних методиках розрахунку зазвичай робочу діаграму будують з координатами у відносних одиницях. Діаграма відображає взаємозалежні значення залишкової магнітної індукції та коерцитивної сили магніту, розташованих у другому квадранті. Важливою перевагою діаграми у відносних одиницях є те, що для неодимових магнітів залежність прямолінійна. Прямолінійний відрізок сполучає взаємозалежні відносні значення залишкової індукції  $B_r^*$  та коерцитивної сили  $H_c^*$ , а за відомих значень розмірів та магнітних провідностей ділянок магнітного кола відносних значень магнітного потоку  $\Phi^*$  і магнітної напруженості та МРС  $F^*$  (рис.9). При побудові залежності магнітного потоку від магнітної напруженості виконуємо розрахунок спадів магнітних напруг на ділянках магнітного кола. Розрахунок виконуємо покроково через 0,1 в.о. на осях діаграми (рис.9). Відносні значення магнітної індукції та коерцитивної сили знаходимо за співвідношенням між розрахунковим значенням і базисним значенням, яким є вказані відповідні максимальні значення за технічною характеристикою. Наприклад відносне значення магнітної індукції 1,0 в.о. відповідає значення індукції магніту 1,2 Тл., тобто значення максимальної залишкової індукції  $B_r$  для даної марки магніту. Аналогічно визначаються і відносні значення коерцитивної сили. За певних значень магнітної індукції розраховуємо відповідні значення магнітного потоку на ділянці магнітного кола з відомою площею нормального перетину. Правомірним припущенням тут є те, що випинання силових ліній магнітного потоку буде зовсім несуттєвим, враховуючи однобічне розташування однойменних полюсів сусідніх магнітів. Отже на

ділянці постійного магніту циліндричної форми з діаметром основ 0,02м і висотою 0,01м магнітний потік буде визначатися за формулою:  $\Phi = B S$ , де  $S = \pi (0,02\text{м})^2/4 = (0,0001\pi)\text{м}^2$ ,

Тоді для відносного значення індукції 1,0, що відповідає абсолютному значенню 1,2 Тл значення магнітного потоку з високим наближенням буде:

$$\Phi = 1,2\text{Тл} * (0,0001\pi)\text{м}^2 = 3,77 * 10^{-4}\text{Вб}. \quad (5)$$

Це значення магнітного потоку на спільній осі магнітної індукції у відносних одиницях буде відповідати значенню 1,0.

Магнітна напруга між полюсами магніту висотою 0,01м визначатиметься за формулою:

$$F = H * l = 950000\text{ А/м} * 0,01\text{м} = 9500\text{А}. \quad (6)$$

Це значення магнітної напруги на спільній осі коерцитивної сили у відносних одиницях буде відповідати значенню 1,0.

Виконуємо розрахунки для інших значень індукції та коерцитивної сили, а розрахункові результати записуємо в таблицю 1.

Таблиця 1

## Результати розрахунку системи постійного магніту

$B^*$ , в.о.	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$B$ , Тл	1,2	1,08	0,96	0,84	0,72	0,6	0,48	0,36	0,24	0,12	0
$\Phi$ , $10^{-4}$ Вб	3,77	3,39	3,01	2,63	2,26	1,88	1,5	1,13	0,75	0,38	0
$H^*$ , в.о.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$H$ , кА/м	0	95	190	285	380	475	570	665	760	855	950
$F$ , кА	0	0,95	1,9	2,85	3,8	4,75	5,7	6,65	7,6	8,55	9,5

Враховуючи квадратну форму нормального перетину магнітопроводу, де сторона квадрату рівна діаметру круглого полюсу магніту 0,02м, розраховуємо значення магнітної індукції та напруженості магнітного поля в робочому повітряному проміжку за відомими формулами:

$B_0 = \Phi_0/S_0$ ,  $H_0 = B_0/\mu_0$ ,  $F_0 = H_0 * \delta$ , (7)  
де  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}\text{Гн/м}$  - магнітна проникність повітря,

$\delta$  - відстань повітряних проміжків, 0,001м.  
Результати розрахунків наводимо в табличній формі (табл.2).

Таблиця 2

## Розрахункові значення індукції та магнітного потоку

$\Phi$ , $10^{-4}$ Вб	3,77	3,39	3,01	2,63	2,26	1,88	1,5	1,13	0,75	0,38	0
$B_0$ , Тл	0,943	0,848	0,753	0,658	0,565	0,47	0,375	0,283	0,188	0,095	0
$H^*$ , в.о.	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$H_0$ , кА/м	750	675	599	523	450	374	299	225	149	75,6	0
$F_0$ , кА	1,5	1,35	1,2	1,05	0,9	0,75	0,6	0,45	0,3	0,15	0

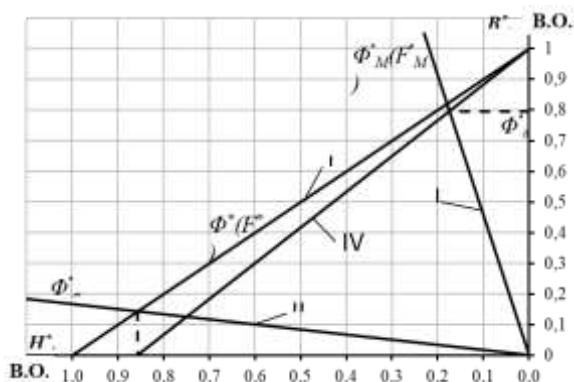


Рис. 5 Робоча діаграма магніту Nd-Fe-B марки N35

Відносні одиниці мають числові значення з відношення проміжних значень до базисних, якими обирають раніше вказані значення з технічної характеристики.

На перетині прямої залежності магнітного потоку магніту в системі  $\Phi_M(F_M)$  із прямою повернення з різницею потоку розсіювання ( $\Phi^* - \Phi_0$ )

знаходимо координату точки перетину, яка дає значення робочого магнітного потоку в повітряному проміжку та магнітопроводі. Це значення у відносних одиницях 0,78, а в абсолютних одиницях  $0,78 * 3,77 * 10^{-4} = 2,94 * 10^{-4}$  Веберів. Для обраної схеми встановлення магнітів це значення буде одночасно розрахунковим максимальним значенням магнітного потоку. Тоді теоретичне значення ЕРС холостого ходу за частоти 50 Гц на один виток обмотки буде.

$$E_{01} = 4,44 * 2,94 * 10^{-4} * 50 = 0,0653\text{ (Вольт/виток)} \quad (8)$$

Для отримання фазової напруги 6,53 В необхідно виконати котушкову обмотку на 100 витків, а для отримання 13,06 В необхідно 200 витків. Така напруга холостого ходу близька до стандартних значень систем «генератор – акумулятор». При цьому лінійна напруга холостого ходу буде 22,6 В. Виконуючи різне число трифазових модулів на дуговому статорі можна отримати різні варіанти кратних значень напруги за сполучень подвійної та потрійної «зірки». Теоретична частотна залежність холостого ходу буде мати вигляд за 200 витків обмотки:

$$E_0(f) = 4,44 * 2,94 * 10^{-4} * 200f = 0,261f = 0,261 \text{ pн}/60 \text{ В} \quad (9)$$

В даному виразі також незмінним є виконане значення числа пар полюсів ротора 24. Тоді вираз частотної залежності ЕРС генератора матиме вигляд:

$$E_0(n) = 0,1044 * n, \text{ В.} \quad (10)$$

Теоретичну частотну характеристику холостого ходу генератора з вибраним числом витків і відомим числом пар полюсів подано в табличній формі (табл.3).

Таблиця 3

Теоретична розрахована залежність холостого ходу генератора

n об/хв	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\omega$ рад/с	0	1,05	2,09	3,14	4,19	5,23	6,28	7,33	8,37	9,42	10,5
f, Гц	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
E, В	0	1,044	2,088	3,132	4,176	5,22	6,264	7,308	8,352	9,396	10,44

Враховуючи, що значення магнітної індукції не викликають магнітного насичення магнітопроводу на графіку дана залежність буде прямолінійна.

Була розроблена методика лабораторних стендових досліджень, де передбачено можливість забезпечення регулювання частоти обертів електромеханічного приводу ротора електрогенератора в межах розрахункових значень обертів для вертикально-осьової вітроустановки. Електромеханічний привод складався із серійного трифазового асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та

клинопасової передачі до ротора генератора. Трифазові обмотки статора електромотора підключали до однофазової мережі напругою 220В, частотою 50 Гц через серійний частотний перетворювач типу CFM-210 номінальною потужністю до 3,3 кВт. Електровимірювальні прилади були приєднані за розробленою схемою. Частоту обертів вимірювали безпосередньо на роторі за допомогою безконтактного тахометра типу УТ-372. Загальна електрична схема підключення лабораторного стенду з вимірювальними приладами показана на рис.6.

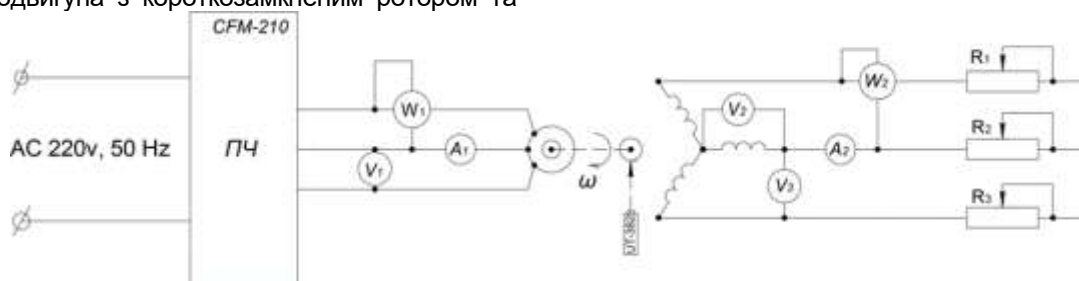


Рис. 6 Загальна електрична схема підключення стенду електрогенератора вертикально-осьової вітроустановки.

Схема дозволяє виконувати одночасні вимірювання струмів, напруг і активної потужності на електроприводі та генераторі.

Дисковий ротор і дуговий статор на стенді встановлені на одній вертикальній трубчастій ланці, яка без конструктивних змін встановлюється на вертикальній осі вітроустановки. Тобто лабораторні дослідження можна вважати повністю коректними, оскільки дотримані головні критерії подібності. Три секції статора з обмотками на магнітопроводах встановлені на дуговому статорі зі взаємним зміщенням на третину полюсного поділу, що відповідає 120 електричних градусів, або  $2\pi/3$ . Безконтактним тахометром вимірювали частоту обертання ротора безпосередньо за індикаторною міткою на ньому. Симетричне трифазове активне навантаження сполучали за схемою «зірка», що дозволяло вимірювати фазові та лінійні струми і

напруги. Для надійності показів вимірювальних приладів дублювали вимірювання приладами різних систем. Отримували виміряні діючі значення струмів та напруг. Вимірювання активної потужності виконували одночасно в обмотках генератора і на обмотках статора електромотора, що дозволяло визначати необхідні показники. Задану частоту обертання ротора встановлювали за допомогою частотного регулятора електроприводу, а фактичні значення визначали безконтактним тахометром. Колову швидкість обертального руху магнітів ротора визначали за формулою:

$$V_k = \omega R_m, \quad (11)$$

де  $R_m = 0,4/2 = 0,2\text{ м}$  – радіус кола обертання магнітів, встановлених на дисковому роторі. Результати вимірювань та розрахунків частотної залежності холостого ходу наведені в табл. 4.

Таблиця 4

## Результати вимірювань та розрахунків частотної залежності холостого ходу

n об/хв	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\omega$ рад/с	0	1,05	2,09	3,14	4,19	5,23	6,28	7,33	8,37	9,42	10,5
$V_k$ м/с	0	0,21	0,419	0,628	0,837	1,047	1,26	1,47	1,67	1,88	2,09
f, Гц	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$U_\phi$ В	0	1,0	1,96	3,0	4,0	4,98	6,0	7,1	8,0	9,1	10,1

Порівнюючи з теоретичними значеннями, розрахованими у розділі 2 можна бачити збіжність показників, отриманих на лабораторному стенді.

На лабораторному стенді за допомогою приладів, підключених за схемою (рис.6) вимірювали показники для побудови зовнішньої характеристики та потужності генератора.

**Висновки.** 1. У результаті проведених досліджень об'рунтовано конструктивну схему безтрансмійного магнітоелектричного генератора з дисковим ротором для вертикально-осьової вітроустановки, яка відповідає сучасним вимогам Галузеве машинобудування щодо компактності, технологічності та енергоефективності електромеханічних систем. Встановлено, що аксіальна конструкція ротора забезпечує можливість розташування значної кількості пар полюсів, що дозволяє отримати необхідні параметри електрорушійної сили та частоти струму за невисоких частот обертання, характерних для вертикально-осьових вітроустановок. Дискова компоновка ротора також сприяє зменшенню механічних втрат та покращенню масогабаритних характеристик генератора.

2. Встановлено, що застосування графоаналітичного методу розрахунку магнітної системи з використанням технічних характеристик неодимових магнітів Nd-Fe-B та магнітопровідних властивостей електротехнічної сталі забезпечує добру збіжність між теоретичними та експериментальними результатами. Для напрямку Матеріалознавство підтверджено ефективність використання висококоерцитивних неодимових магнітів, які забезпечують високі значення магнітної індукції та дозволяють зменшити масогабаритні параметри генератора. Визначено, що вибір матеріалу магнітопроводу суттєво впливає на рівень магнітного насичення, втрати на вихрові струми та стабільність роботи генератора в умовах змінних навантажень.

3. Доведено можливість технічної реалізації вертикального магнітного підвісу генератора за однобічного встановлення однойменних полюсів постійних магнітів.

Встановлено, що використання магнітного підвісу дозволяє частково компенсувати осьові навантаження на вальницькі вузли, зменшити механічне тертя та підвищити довговічність конструкції. Для Галузеве машинобудування важливим є те, що застосування магнітного підвісу сприяє підвищенню ресурсу вузлів обертання, зниженню рівня вібрацій та покращенню експлуатаційної надійності системи. Одночасно результати досліджень підтвердили, що реалізація магнітного підвісу практично не впливає на значення електрорушійної сили генератора.

4. У процесі дослідження визначено перспективність використання модульної конструкції статора та дискового ротора для створення сучасних безтрансмійних генераторів малої потужності. Встановлено, що модульний принцип побудови забезпечує підвищення технологічності виготовлення, спрощує процес складання та ремонтпридатність конструкції. З позицій Матеріалознавство підтверджено доцільність використання електротехнічної сталі з високою магнітною проникністю та стабільними механічними властивостями для виготовлення магнітопроводів генератора.

5. Результати експериментальних досліджень лабораторного зразка підтвердили ефективність запропонованих конструктивно-технологічних і матеріалознавчих рішень. Отримані характеристики генератора свідчать про перспективність використання безтрансмійних аксіальних електрогенераторів у сучасних енергетичних системах малої потужності, орієнтованих на підвищення енергоефективності, довговічності та конструктивної надійності електромеханічного обладнання.

## Список використаних джерел

1. Трегуб М.І., Козирський В.В., Тарасюк О.І., Петренко А.В. Вітрофотоелектрична установка : пат. 153513 Україна : МПК F03D 3/00, H02S 10/12 / Опубл. 19.07.2023, Бюл. № 29.
2. Трегуб М.І., Козирський В.В., Тарасюк



O.I., Петренко А.В. Магнітоелектричний вертикально-осьовий генератор : пат. 153515 Україна : МПК H02K 21/00 /Опубл. 19.07.2023, Бюл. № 29.

3. Gieras J. F. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2010. 608 p.

4. Яропуд В., Колісник М., Штуць А. Аналітичні дослідження процесу тепломасообміну повітряного теплообмінника. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.* 2026. № 2 (363). С. 13–25. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-1.

5. Яропуд В., Колісник М., Штуць А. Аналітичні дослідження процесу тепломасообміну повітряного теплообмінника. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.* 2026. № 2 (363). С. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363>

6. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Kohut V. Information-controlled mechatronic systems of power supply and automation of technological processes in the agro-industrial complex. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2026. № 1 (132). С. 97-106. DOI: 10.37128/2520-6168-2026-1-10

7. Gieras J. F., Wang R. J., Kamper M. J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. 2nd ed. London : Springer, 2008. 613 p.

8. Козирський В. В., Волошин С. М., Петренко А. П., Тарасюк О. І., Трегуб М. І. Обґрунтування вітрофотоелектричної установки для електропостачання об'єктів автодорожньої інфраструктури. *Енергетика і автоматика.* 2022. № 5. DOI: 10.31548/energiya2022.04.034

9. Трегуб М.І., Козирський В.В., Гребеніков В.В., Приймак М.В. Аксиальний магнітоелектричний генератор : пат. 79084 Україна : МПК H02K 21/12, H02K 21/24 / Опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.

10. Wang R.-J., Kamper M. J., Van der Westhuizen K., Gieras J. F. Optimal design of a coreless stator axial field permanent magnet generator. *IEEE Transactions on Magnetics.* 2005. Vol. 41, No. 1. P. 55–64. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2004.840183>

11. Arnold D. P., Das S., Park J. W., Zana I., Lang J. H., Allen M. G. Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent magnet generators. Part II: Design, fabrication, and testing. *Journal of Microelectromechanical Systems.* 2006. Vol. 15, No. 5. P. 1351–1363. DOI: [10.1109/JMEMS.2006.880286](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2006.880286)

12. Magnetic Performance and Anticorrosion Coating Stability of NdFeB Magnets. *Materials.* 2024. Vol. 17, No. 23. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5927> (дата звернення: 15.05.2026).

13. Corrosion of Sintered NdFeB Permanent Magnets. *ResearchGate.* 2025. URL: [https://www.researchgate.net/publication/392757660\\_Corrosion\\_of\\_Sintered\\_NdFeB\\_Permanent\\_Magnets](https://www.researchgate.net/publication/392757660_Corrosion_of_Sintered_NdFeB_Permanent_Magnets) (дата звернення: 15.05.2026).

14. Стадник М., Штуць А., Колісник М., Григоренко Н. Дослідження мехатронних та робототехнічних систем інтелектуального керування електричними машинами в електротехнологіях. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2025. № 3 (118). С. 55–65. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-6

### References

1. Tregub M.I., Kozirsky V.V., Tarasyuk O.I., Petrenko A.V. Vitrophotoelectric installation: Pat. 153513 Ukraine: IPC F03D 3/00, H02S 10/12 / Publ. 07/19/2023, Bulletin. No. 29. [in Ukrainian].

2. Tregub M.I., Kozirsky V.V., Tarasyuk O.I., Petrenko A.V. Magnetolectric vertical-axis generator: Pat. 153515 Ukraine: IPC H02K 21/00 / Publ. 07/19/2023, Bulletin. No. 29. [in Ukrainian].

3. Gieras J. F. Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. 608 p. [in English].

4. Yaropud V., Kolisnik M., Shtut A. Analytical studies of the heat and mass transfer process of a wind heat exchanger. *Bulletin of Khmelniysky National University. Series: technical sciences.* 2026. No. 2 (363). pp. 13–25. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-1. [in Ukrainian].

5. Yaropud V., Kolisnik M., Shtut A. Analytical studies of the heat and mass transfer process of a wind heat exchanger. *Bulletin of Khmelniysky National University. Series: technical sciences.* 2026. No. 2 (363). pp. 13-25. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363> [in Ukrainian].

6. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Kohut V. Information-controlled mechatronic systems of power supply and automation of technological processes in the agro-industrial complex. *Technology, energy, transport agro-industrial complex.* 2026. No. 1 (132). pp. 97-106. DOI: 10.37128/2520-6168-2026-1-10 [in English].

7. Gieras J. F., Wang R. J., Kamper M. J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. 2nd ed. London: Springer, 2008. 613 p. [in English].

8. Kozirskiy V.V., Voloshin S.M., Petrenko A.P., Tarasyuk O.I., Tregub M.I. Installation of a wind photoelectric installation for electrical supply of road infrastructure facilities. *Energy and automation.* 2022. No. 5. DOI: 10.31548/energiya2022.04.034 [in Ukrainian].

9. Tregub M.I., Kozirsky V.V., Grebenikov V.V., Priymak M.V. Axial magnetolectric generator: Pat. 79084 Ukraine: IPC H02K 21/12, H02K 21/24 / Publ. 04/10/2013, Bulletin. No. 7. [in Ukrainian].

10. Wang R.-J., Kamper M. J., Van der Westhuizen K., Gieras J. F. Optimal design of a



coreless stator axial field permanent magnet generator. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005. Vol. 41, No. 1. P. 55–64. <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2004.840183> [in English].

11. Arnold D. P., Das S., Park J. W., Zana I., Lang J. H., Allen M. G. Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent magnet generators. Part II: Design, fabrication, and testing. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2006. Vol. 15, No. 5. P. 1351–1363. DOI:10.1109/JMEMS.2006.880286 [in English].

12. Magnetic Performance and Anticorrosion Coating Stability of NdFeB Magnets. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 23. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/23/5927> (дата звернення: 15.05.2026). [in English].

13. Corrosion of Sintered NdFeB Permanent Magnets. *ResearchGate*. 2025. URL: [https://www.researchgate.net/publication/392757660\\_Corrosion\\_of\\_Sintered\\_NdFeB\\_Permanent\\_Magnets](https://www.researchgate.net/publication/392757660_Corrosion_of_Sintered_NdFeB_Permanent_Magnets) (дата звернення: 15.05.2026). [in English].

14. Stadnik M., Shtut A., Kolisnik M., Grigorenko N. Further research on mechatronic and robotic systems for intelligent heating of electrical machines in electrical technologies. *Vibrations in technology*. 2025. No. 3 (118). pp. 55–65. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-6 [in Ukrainian].

#### CONDITIONING OF STRUCTURAL AND ELECTROMECHANICAL PARAMETERS OF AN ELECTRIC GENERATOR WITHOUT A TRANSMISSION VERTICAL-AXIS WIND TURBINE

*Constructive and technological approaches to the design and engineering calculation of a gearless electric generator for a vertical-axis wind turbine with a disc rotor and permanent axial-type neodymium magnets have been developed. The study focuses on improving the generator design, selecting structural and magnetic materials, and increasing the reliability, manufacturability, and durability of the electromechanical system. An analysis of the rotor pole arrangement schemes was carried out, and the influence of the magnetic system geometry on the generator operating characteristics was determined. The generator parameters were calculated using a graphical-analytical method based on the characteristics of high-coercivity Nd-Fe-B magnets and electrical steel.*

*The feasibility of using an axial-type disc rotor capable of accommodating a large number of poles within relatively small dimensions has been substantiated. Such a design corresponds to modern trends in Industrial Mechanical Engineering, where compactness, energy efficiency, and long service life of electromechanical systems are of primary importance. The disc rotor configuration increases the peripheral velocity of magnetic poles and*

*improves the efficiency of energy conversion. Structural loads arising during rotor operation were analyzed, and requirements for stiffness and manufacturing accuracy of the main generator components were determined.*

*Particular attention was paid to the structural strength and manufacturability of generator components. The study investigated the machining features of the disc rotor, concentricity control, balancing, and assembly accuracy. It was established that the precision of permanent magnet installation directly affects magnetic flux uniformity, operational stability, and vibration reduction. The design features of the modular stator were considered, providing simplified assembly and improved maintainability of the system. The operation of bearing units, conditions of mechanical losses, and methods for increasing the durability of rotating elements were also analyzed.*

*Considerable attention was devoted to materials science aspects of the generator magnetic system design. The application of high-coercivity Nd-Fe-B permanent magnets was substantiated due to their high residual magnetic induction, coercive force, and magnetic energy density. It was established that the use of such magnets significantly reduces the weight and dimensions of the generator while simultaneously increasing its energy efficiency. The influence of temperature conditions on the stability of magnetic properties was investigated, and permissible operating conditions for the magnets were determined. The properties of electrical steel used for magnetic cores were also analyzed, considering magnetic permeability, eddy current losses, and resistance to cyclic remagnetization.*

*Mechanical properties of structural materials used for the rotor and housing elements were studied separately. The influence of cyclic loads, vibrations, and dynamic operating conditions on the durability of the structure was analyzed. Requirements for the stiffness of rotor and stator materials were established to ensure geometric stability during operation. Particular attention was paid to the manufacturability of generator components and the maintainability of the structure.*

*A structural design of a vertical magnetic suspension system was proposed, allowing axial loads on rotor supports to be reduced, friction losses minimized, and generator durability increased. It was established that the use of magnetic suspension improves the service life of friction units and enhances the operational characteristics of the electromechanical system.*

*For typical operating conditions of a vertical-axis wind turbine, calculated energy performance indicators of the generator were obtained and confirmed by experimental studies of a laboratory prototype. Bench tests made it possible to evaluate the efficiency of the proposed design under real*



operating conditions. Good agreement between theoretical and experimental results was established, confirming the effectiveness of the proposed structural, technological, and materials science solutions. The research results demonstrate the prospects of using gearless axial-flux disc generators in modern low-power energy systems.

**Keywords:** vertical-axis wind turbine, gearless electric generator, disc rotor, axial magnetic flux, Nd-Fe-B neodymium magnets, magnetic core, electrical steel, magnetic suspension, structural materials, manufacturability of the structure, modular stator, energy efficiency, electromechanical system, Industrial Mechanical Engineering, Materials Science.

#### **Відомості про авторів**

**Трегуб Микола Іларіонович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Білоцерківського національного аграрного університету (пл. Соборна, 8/1, м. Біла Церква, Київська обл., Україна, 09117, e-mail: tregyb.m.i@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0001-6558-0040> )

**Червінський Леонід Степанович** - доктор технічних наук, професор, професор кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнології Національного університету біоресурсів і природокористування України ( вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041, e-mail: [Ichervinsky@gmail.com](mailto:Ichervinsky@gmail.com) , <https://orcid.org/0000-0001-7215-2474> )

**Тарасюк Олег Ігорович** – Київська обл., с. Софіївська Борщагівка, вул. Боголюбова, буд.18, кВ. 172. Нач. відділу ДТЕК Київські регіональні електромережі, e-mail: [oleg535135@gmail.com](mailto:oleg535135@gmail.com) )

**Демченко Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук , доцент кафедри енергетики, електротехніки та електромеханіки Білоцерківського національного аграрного університету (пл. Соборна, 8/1, м. Біла Церква, Київська обл., Україна, 09117, e-mail: [bnauelectro@gmail.com](mailto:bnauelectro@gmail.com) . )

**Trehub Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Bila Tserkva National Agrarian University (8/1 Soborna Square, Bila Tserkva, Kyiv Region, Ukraine, 09117; e-mail: [tregyb.m.i@gmail.com](mailto:tregyb.m.i@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-0040>).

**Chervinsky Leonid** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering, Electromechanics and Electrotechnology, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (15 Heroiv Oborony St., Kyiv, Ukraine, 03041; e-mail: [Ichervinsky@gmail.com](mailto:Ichervinsky@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7215-2474>).

**Tarasiuk Oleh** – Head of Department, [DTEK Kyiv Regional Electric Networks](https://www.dtek.com.ua) (Apt. 172, 18 Boholiubova St., Sofiivska Borshchahivka Village, Kyiv Region, Ukraine; e-mail: [oleg535135@gmail.com](mailto:oleg535135@gmail.com)).

**Demchenko Viktor** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Energy, Electrical Engineering and Electromechanics, Bila Tserkva National Agrarian University (8/1 Soborna Square, Bila Tserkva, Kyiv Region, Ukraine, 09117; e-mail: [bnauelectro@gmail.com](mailto:bnauelectro@gmail.com)).

Стаття надійшла 02.05.2026

Стаття прийнята 14.05.2026

Опубліковано 28.05.2026