

УДК 534.83:519.6

DOI: <https://doi.org/10.17721/1812-5409.2025/2.13>

Андрій ДРЕУС¹, д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-1234-5678
e-mail: dreus_a@365.dnu.edu.ua

Віталій ДЕРБАБА², канд. техн. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-3918-2177
e-mail: derbaba.v.a@nmu.one

Дмитро ГАРКАВЕНКО², асп.
ORCID ID: 0009-0004-5011-9015
e-mail: harkavenko.d.v@nmu.one

Сергій АЛЕКСЄЄНКО², д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-0320-989X
e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

²Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

АНАЛІЗ АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО СЕГМЕНТА ЛОПАТИ ВІТРОВОЇ ТУРБИНИ З ПРОФІЛЕМ НАСА 0012

Актуальність дослідження зумовлена потребою зменшення шумового забруднення, що виникає під час експлуатації вітроенергетичних установок, зокрема в умовах густонаселених або екологічно чутливих регіонів. Одним із перспективних підходів до зниження акустичного випромінювання лопатей вітрових турбін є модифікація їхньої геометрії для контролю турбулентних структур потоку. У пропонуваній роботі представлено методологію та результати експериментального дослідження аеродинамічного шуму, що генерується профілем лопаті типу НАСА0012. Досліджено вплив періодичних зазубрин на задній крайці на акустичні характеристики профілю. Метою роботи є оцінка ефективності зазубреної задньої крайки у зниженні рівня аеродинамічного шуму. Дослідження проведено в безлунній камері з використанням фізичних моделей профілю, виготовлених методом 3D-друку, а акустичні вимірювання виконано за допомогою шумоміра з подальшим обробленням даних методом швидкого перетворення Фур'є (FFT). Експерименти охоплювали різні швидкості набігаючого потоку (від 10 до 20 м/с) і кути атаки (0° та 5°), а результати подано у вигляді спектрів звукового тиску. Встановлено, що модифікований профіль забезпечує зниження рівня звукового тиску до 7 дБ порівняно зі стандартним профілем. Ефект особливо виражений у частотному діапазоні до 8 кГц, характерному для вихрових джерел шуму за відносно низьких швидкостей потоку. Запропонований підхід демонструє високу ефективність і може бути застосований для оптимізації конструкції вітрових турбін, а також інших обертових елементів, таких як пропелери БПЛА або вентилятори.

Ключові слова: аеродинамічний шум, вітрова турбіна, профіль НАСА0012, зазубрена крайка, експериментальне дослідження, акустичні вимірювання, FFT, акустичне випромінювання.

Класифікація відповідно до AMS 2020: 76Q05.

Вступ

Аеродинамічний шум, що виникає під час роботи вітрових турбін, є негативним фактором, який обмежує можливість розвитку наземної вітрової енергетики, зокрема в районах із великою щільністю населення, або в районах, вразливих з погляду біорізноманіття. Детальний огляд соціальних й екологічних проблем, пов'язаних з акустичним випромінюванням, подано в роботах (Omodaro et al., 2023; Sander, Jung, & Schindler, 2024). Природа виникнення аеродинамічного шуму полягає у взаємодії задньої та передньої крайок профіля лопаті з турбулентними структурами під час обтікання потоком повітря. Основні фізичні механізми генерації шумового випромінювання аеродинамічним профілем розглянуто, наприклад, у роботі (Bertagnolio, & Fischer, 2022). Варто зауважити, що проблема аеродинамічного шуму лопатей є актуальною не тільки для вітрових турбін, а також і для промислових та побутових вентиляторів, лопатей пропелерів БПЛА та інших літальних апаратів.

Методи боротьби з аеродинамічним шумом поділяються на активні і пасивні (Ahmed et al., 2025). Активні методи використовують зовнішні впливи на структуру примежового шару задля керування станом примежового шару і турбулентністю. До таких методів належать методи вдування повітря або відсмоктування примежового шару з поверхні (Yang et al., 2023), керування формою лопаті за допомогою закріпків (Hu et al., 2022), використання електроплазмових методів (Patel et al., 2021) тощо. Незважаючи на те, що активні методи дають змогу досягти кращих результатів зі зниження рівня шуму, проте вони є досить складними, вартісними, потребують додаткового споживання енергії і менш надійні. Натепер такі методи використовуються переважно лише в експериментальних вітрових турбінах. На практиці набули поширення пасивні методи зниження шуму. Такі методи передбачають використання шумопоглинальних або текстурних матеріалів (Yang et al., 2024a) для лопатей турбін, пористих (Shige et al., 2024) або демпфірувальних вставок у конструкції лопаті (Arif et al., 2024), а також різні модифікації задньої крайки лопаті, що дає змогу руйнувати турбулентні структури, які виникають (Liu et al., 2022). Саме останній підхід є одним з найперспективніших, оскільки допомагає зменшити рівень шуму без втрати аеродинамічних характеристик профіля лопаті (Zhou et al., 2022).

Упровадження таких модифікацій потребує здійснення відповідних акустичних досліджень. Експериментальні акустичні дослідження вимагають проведення дослідів у спеціальних безлунних кімнатах або аеродинамічних трубах з організацією складної інформаційно-вимірювальної системи (Firoozi et al., 2024). Основною проблемою в таких дослідженнях є складність відокремлення фонового шуму або шуму від зовнішніх джерел (механічного шуму експериментальної установки). Основним інструментом дослідження акустичних процесів й оптимізації профілю турбін є математичне

© Дреус Андрій, Дербоба Віталій, Гаркавенко Дмитро, Алексєєнко Сергій, 2025

моделювання. Нині запропоновано велику кількість моделей і методів розрахунку аеродинаміки профілів від простих, що використовують теорію ідеального вітроколеса (Goman et al., 2022), до складних числових методів обчислювальної аеродинаміки (Alekseyenko et al., 2022) і методів машинного навчання (Yang et al., 2024b). Хоча сучасні числові підходи, зокрема методи обчислювальної аероакустики (CAA), демонструють значний прогрес у передбаченні шумових характеристик, вони залишаються залежними від моделювальних припущень, як-от: турбулентність, граничні умови, точність чисельної сітки. Експериментальні вимірювання, зокрема мікрофонні масиви, забезпечують незалежне джерело даних, що дає змогу не лише перевірити точність числових моделей, але й виявити фізичні явища, які важко піддаються моделюванню). Експериментальні методи посідають ключове місце в аероакустичних дослідженнях, доповнюючи числове моделювання шляхом верифікації й уточнення розрахункових результатів. Отже, інтеграція експериментальних і числових методів є критично важливою для достовірного аналізу аероакустичних процесів та розроблення ефективних засобів шумозниження. У пропонуваній роботі використано експериментальний метод й алгоритм обробки експериментальних даних на основі швидкого перетворення Фур'є (FFT) для дослідження акустичних процесів, що перебігають під час обтікання стандартного і модифікованого профілів лопаті турбіни.

Об'єкт дослідження – аеродинамічний профіль NASA0012, який найчастіше використовують у тестових задачах з дослідження аеродинаміки лопатей турбін.

Мета роботи – визначення впливу модифікації задньої крайки профіля на рівень аеродинамічного шуму шляхом математичного й комп'ютерного моделювання. Для досягнення мети сформульовано такі завдання: визначити методологію дослідження, виконати розрахунки акустичних полів навколо профілів різної геометрії, оцінка впливу модифікації задньої крайки на рівень аеродинамічного шуму профіля.

1. Постановка задачі і методологія дослідження

Розглянуто два варіанти виконання лопаті вітрової турбіни, що мають аеродинамічним профіль NASA0012: стандартний і модифікований. Експериментальні моделі, що були виготовлені методом 3D-друку представлені на рис. 1.

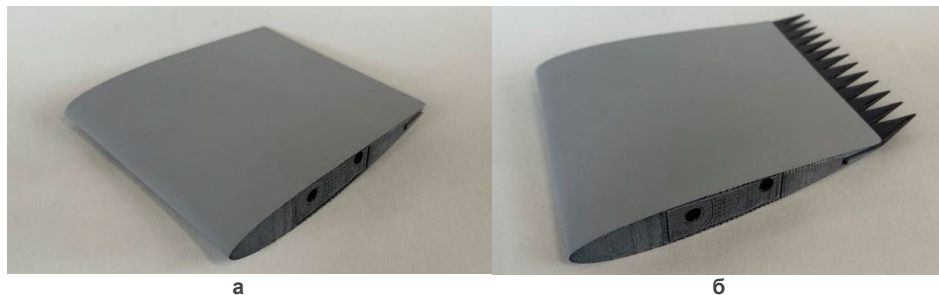


Рис. 1. Схеми виконання аеродинамічного профілю:
а – стандартна; б – модифікована

Стандартне виконання профілю передбачає гостру лінійну у плані задню крайку, як показано на рис. 1 а. У другому варіанті задню крайку виконано у вигляді зазубрин, як показано на рис. 1 б. Передбачається, що така модифікація сприятиме руйнуванню сильних когерентних турбулентних вихорів у зоні відриву потоку, що має приводити до зменшення інтенсивності аеродинамічного шуму. Розглянуто сегмент профіля довжиною 200 мм і хордою 215 мм, на якому розташовано 13 однакових загострених зазубрин розміром 43,3 мм.

Для дослідження аеродинамічного шуму сегмента лопаті вітрової турбіни розроблено оригінальний експериментальний підхід, реалізований у безлунній камері розміром 3,8×3,8×3,2 м, де стіни вкрито звукопоглинальними матеріалами. Експериментальна установка складалась з обертової штанги із закріпленою моделлю сегмента лопаті профілю NASA0012, що рухалась зі сталою лінійною швидкістю (до 24 м/с) за нульового кута атаки. Для уникнення впливу кінцевих вихорів модель розміщували між торцевими пластинами.

Акустичні вимірювання проводили шумоміром SV 971A1 з мікрофоном ACO SV 7152, розташованим на фіксованій відстані від траєкторії моделі. Для зменшення впливу шуму від приводу встановлено звукоізоляційний екран. Обробка сигналів виконували із застосуванням алгоритму швидкого перетворення Фур'є із частотною роздільною здатністю 12 Гц. Для виділення корисного сигналу застосовували спектральне віднімання фонового шуму, що фіксували окремо до запуску моделі. Збіжність результатів вимірювань забезпечено шляхом контролю повторності й усереднення результатів за множиною інтервалів спостереження (до 20), відповідно до вимог стандарту ДСТУ ГОСТ ISO 5725-1:2005. Отримані результати дали змогу ідентифікувати тональні компоненти шуму, а також встановити залежність рівня звукового тиску.

Аналіз акустичних сигналів проводили з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є, що надає можливість перейти від часової області до частотної з роздільною здатністю 12 Гц. Основною метою було виділення спектра аеродинамічного шуму, зумовленого рухом моделі лопаті, із сумарного сигналу, що містив також фонові компоненти.

Акустичний сигнал $x(t)$ надходить із шумоміру у вигляді дискретної послідовності значень $x[n]$, де n – індекс відліку часу, а частота дискретизації f визначає часовий крок $t = 1/f$. Швидке перетворення Фур'є дає можливість обчислити оцінку спектра сигналу $X[k]$ у частотній області:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N - 1, \tag{1}$$

де N – довжина аналізованого вікна (кількість точок FFT), k – індекс частоти, що відповідає $f_k = \frac{kf}{N}$.

З (1) визначаємо амплітуду $|X[k]|$ та $arg X[k]$. Нехай у часовій області сумарний сигнал, що отримуємо в результаті вимірювань,

$$x(t) = s(t) + n(t), \tag{2}$$

де $s(t)$ – корисний сигнал (шум моделі), який потрібно відокремити, $n(t)$ – фоновий шум, виміряний окремо в аналогічних умовах, але без моделі. У частотній області запишемо

$$X[f] = S(f) + N(f). \tag{3}$$

Оцінку спектра корисного сигналу $S(f)$ отримаємо через спектральне віднімання

$$|S(f)|^2 = \max(|X(f)|^2 - \alpha|N(f)|^2, 0), \tag{4}$$

де α – коефіцієнт компенсації шуму ($1 \leq \alpha \leq 2$), від'ємні значення усуваємо через обмеження на ≥ 0 . Реконструкція спектра з урахуванням фази

$$S(f) = \sqrt{|S(f)|^2} \cdot e^{i \arg X(f)}. \tag{5}$$

Після очищення спектра застосовуємо обернене перетворення Фур'є для повернення в часову область

$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S[k] \cdot e^{i \frac{2\pi}{N} kn}. \tag{6}$$

Вираз (6) дає змогу отримати очищений сигнал. Спектральна щільність потужності конвертується в рівень звукового тиску SPL

$$SPL(f) = 10 \lg \left(\frac{p(f)^2}{p_0^2} \right) \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S[k] \cdot e^{i \frac{2\pi}{N} kn}, \tag{7}$$

де $p_0 = 20$ мкПа – референтне значення тиску для повітря. Для зменшення випадкових флуктуацій спектри усереднюються за кількома незалежними інтервалами спостереження

$$SPL = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M SPL_j(f), \tag{8}$$

де M – кількість незалежних інтервалів спостережень. Оцінка стабільності проводиться за відносним відхиленням

$$\Delta_{rel} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{|SPL_j(f) - SPL|}{SPL}. \tag{9}$$

Для інтегральної оцінки шуму використовуємо середньозважений рівень шуму

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \right), \tag{10}$$

де T – тривалість сигналу, $L(t)$ – миттєвий рівень шуму в децибелах.

3. Результати дослідження

Відповідно до запропонованого алгоритму було проведено низку досліджень акустичного випромінювання сегментів стандартної (без зазубрин) і модифікованої (із зазубринами) лопатей вітрової турбіни, що встановлені під різними кутами атаки і на різних швидкостях вітру. На рис. 2 представлено порівняльний аналіз рівнів аеродинамічного шуму SPL для тестового (стандартного профіля NASA0019 без зазубрин) сегмента лопаті і модифікованої лопаті (із зазубринами). Результати представлені у вигляді спектрів, що отримані внаслідок швидкого перетворення Фур'є. Розрахунки проводили для швидкостей набігаючого потоку від 10 м/с до 20 м/с, результати представлено для нульового кута атаки. Отримані спектральні характеристики дають змогу простежити частотну структуру акустичного випромінювання, що, зі свого боку, допомагає локалізувати джерела шуму, пов'язані з турбулентними збуреннями на задній крайці. Це забезпечує надійний критерій для порівняння ефективності різних геометричних конфігурацій профілю в контексті зниження аеродинамічного шуму.

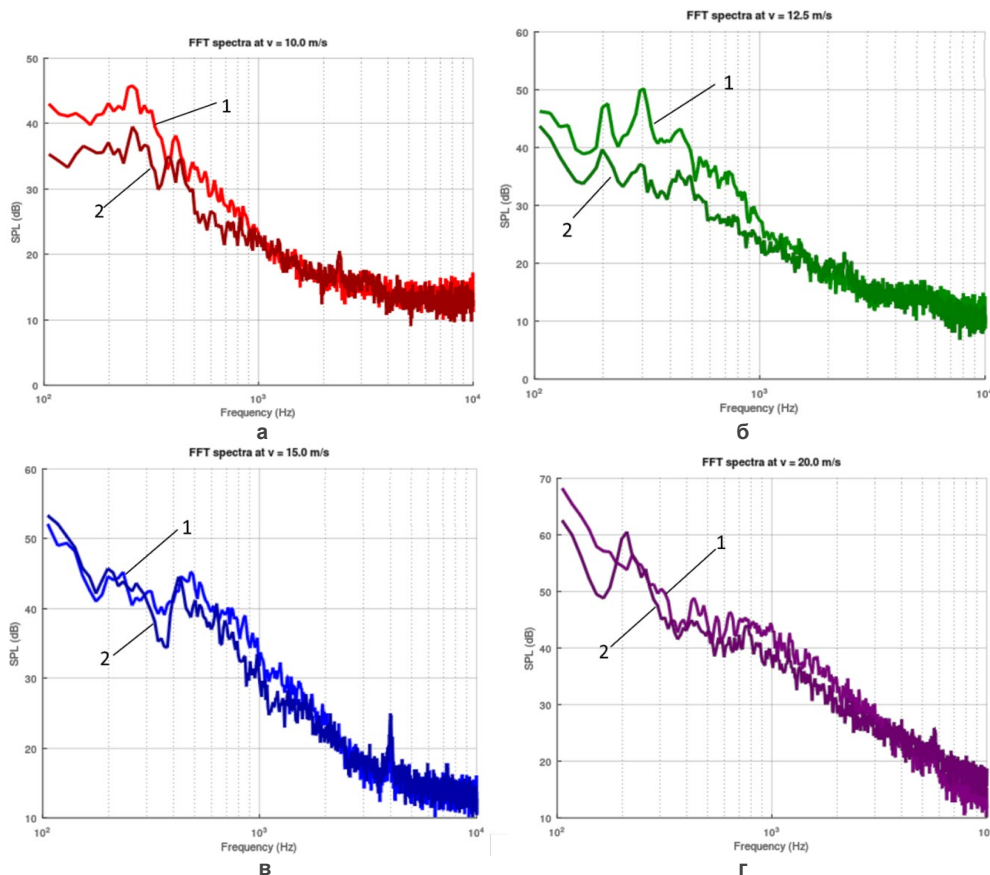


Рис. 2. FFT-спектри шуму від тестової (лінія 1) і модифікованої (лінія 2) лопатей за нульового кута атаки і швидкостей набігаючого потоку: а – 10 м/с; б – 12,5 м/с; в – 15 м/с; г – 20 м/с

Окрім швидкості, на акустичне випромінювання значно впливає кут атаки. На рис. 3 представлено вплив кута атаки на рівень шуму для модифікованого профілю.

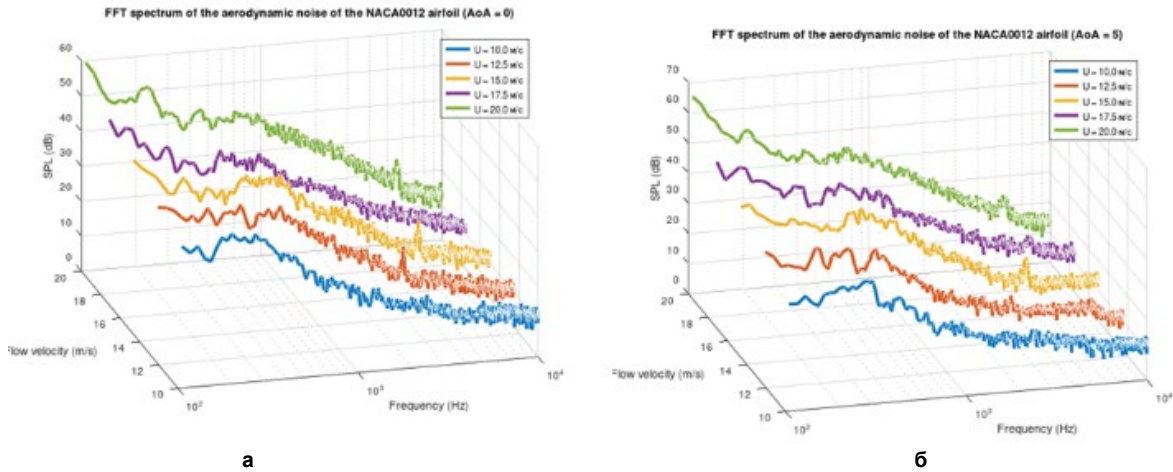


Рис. 4. FFT спектри шуму для модифікованого профіля на різних кутах атаки: а – 0°; б – 5°

На рис. 4 представлено результати моделювання акустичного випромінювання як для стандартного, так і модифікованого профіля для кута атаки 0°.

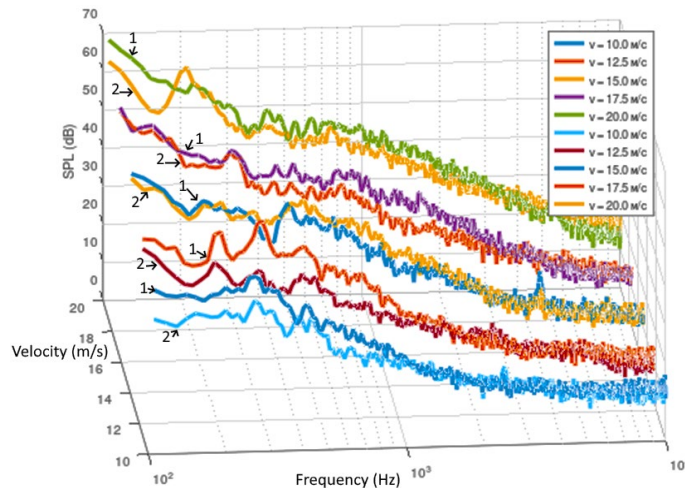


Рис. 4. FFT спектри шуму для кута атаки 5° і різних швидкостях набігаючого потоку : 1 – тестовий профіль; 2 – модифікований профіль

Отже, отримані спектри дають змогу наочно порівняти рівні аеродинамічного шуму між стандартним і модифікованим профілями за різних умов обтікання. Виявлені відмінності в частотному складі шуму створюють підґрунтя для подальшого аналізу ефективності запропонованої геометричної модифікації.

Дискусія і висновки

Результати дослідження дали змогу отримати надійні дані щодо розподілу акустичного тиску та спектральних характеристик шуму. Наведені результати числового аналізу спектральних характеристик аеродинамічного шуму підтверджують ефективність запропонованої модифікації задньої крайки профілю NACA0012. Модифікований профіль із зазубреними крайками продемонстрував зниження рівня звукового тиску в широкому частотному діапазоні порівняно з традиційним профілем, особливо в діапазоні низьких і середніх частот (до 8 кГц), що є типовими для аеродинамічного випромінювання від вихрових структур. У високочастотній області акустичні характеристики не демонструють значної розбіжності для обох випадків. Показано, що для нульового кута атаки максимальне зниження рівня SPL становить до 5–7 дБ за швидкостей набігаючого потоку 10–15 м/с. Цей ефект дещо зменшується за збільшення швидкостей набігаючого потоку і підвищення кута атаки. Це пояснюємо зміною структури відриву потоку та зсувом джерел шуму. Водночас для всіх розглянутих розрахункових варіантів модифікація профіля дає змогу зменшити акустичне випромінювання. Зауважимо, що збільшення кута атаки призводить до збільшення рівня аеродинамічного шуму від лопаті.

Проведене дослідження підтвердило, що модифікація задньої крайки профілю лопаті вітрової турбіни у вигляді періодичних зазубрин сприяє суттєвому зменшенню аеродинамічного шумового випромінювання без втрати геометричної цілісності або аеродинамічної ефективності. Найбільший ефект зниження рівня шуму спостерігаємо за нульового кута атаки та середніх швидкостей набігаючого потоку. Це означає, що запропонована модифікація є перспективною для використання у вітрових турбінах, а також оптимізації конструкцій інших типів лопатей (напр., пропелерів БПЛА або промислових вентиляторів). Розроблена методика аналізу може бути використана для подальших досліджень й оптимізації профіля лопаті вітрової турбіни з метою зменшення аеродинамічного шуму.

Внесок авторів: Андрій Дреус – концептуалізація, аналіз джерел, розробка методики обробки даних, аналіз результатів; Віталій Дербаба – проведення експериментів; Дмитро Гаркавенко – підготовка та проведення експериментів, обробка результатів досліджень; Сергій Алексєнко – розробка фізичних моделей тестових профілів, проведення акустичних вимірювань у безлунній камері, інтерпретація й аналіз отриманих даних.

Джерела фінансування. Роботу виконано за підтримки зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій "Горизонт 2020", договір РН/54-2024 з Міністерством освіти і науки України, № державної реєстрації: 0124U004405.

Список використаних джерел

Ahmed, M. M., Robin, H. M., Shahadat, M. Z., & Masud, M. H. (2025). Innovative approaches for reducing wind turbine noise: A review from mechanical and aerodynamic perspective. *Energy Reports*, 13, 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.049>

Alekseyenko, S., Dreus, A., Dron, M., & Brazaluk, O. (2022). Numerical Study of Aerodynamic Characteristics of a Pointed Plate of Variable Elongation in Subsonic and Supersonic Gas Flow. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 96(2), 2022, 88–97. <https://doi.org/10.37934/arfmts.96.2.889>

Arif, I., Lam, G., & Leung, R. (2022). Distributed surface compliance for airfoil tonal noise reduction at various loading conditions. *Physics of Fluid*, 34, 046113. <https://doi.org/10.1063/5.0087350>

Bertagnolio, F., & Fischer, A. (2022). Wind Turbine Aerodynamic Noise Sources. In *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31307-4_70

Firoozi, A. A., Hejazi, F., & Firoozi, A. A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 17(12), 2919. <https://doi.org/10.3390/en17122919>

Goman, O., Dreus, A., Rozhkevych, A., Heti, K., & Karplyuk, V. (2022). Improving the efficiency of Darier rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*, 8, 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.162>

Hu Z., Xu G., Shi Y., & Xia R. (2022). Airfoil–Vortex Interaction Noise Control Mechanism Based on Active Flap Control. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001356)

Liu, X., Zang, B., & Azarpeyvand, M. (2022). Wake-aerofoil interaction noise control with trailing-edge serrations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110510>

Omodara, L., Saavalainen, P., Pitkäaho, S., Pongrácz, E., & Keiski, R. L. (2023). Sustainability assessment of products – Case study of wind turbine generator types. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106943>

Patel, T. K., Lilley, A. J., Shen, W. et al. (2021). Fundamental investigation using active plasma control to reduce blade–vortex interaction noise. *International Journal of Aeroacoustics*, 20(8), 870–900. <https://doi.org/10.1177/1475472X211052699>

Sander, L., Jung, C., & Schindler, D. (2024). Global Review on Environmental Impacts of Onshore Wind Energy in the Field of Tension between Human Societies and Natural Systems. *Energies*, 17(13), 3098. <https://doi.org/10.3390/en17133098>

Shige, K., Terashima, J., Inasawa, A., Komatsuzaki, T., Sakai, Y., & Kusano T. (2024). On the reduction of the flow-induced noise using porous material plates with high acoustic transmissibility. *Journal of Sound and Vibration*, 568, 117967. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117967>

Yang, C., Arcondoulis E. J. G., Yang Y., Guo H., Maryami, R., Bi C., & Liu, Y., (2023). Active control of airfoil turbulent boundary layer noise with trailing-edge blowing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 153, 2115. <https://doi.org/10.1121/10.001778>

Yang, Y., Han S.-H., Ahn, S., Kim, J., Lee, S., & Park, K. (2024a). Design and manufacturing of aeroacoustic metamaterial: Textured rotor blades with enhanced acoustic and aerodynamic performance. *Additive Manufacturing*, 84, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104109>

Yang, H., Yuan, W., Zhu, W., Sun, Z., Zhang, Y., Zhou, Y. (2024b). Wind turbine airfoil noise prediction using dedicated airfoil database and deep learning technology. *Applied Energy*, 364, 123165. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123165>

Zhou, T., Cao, H., Zhang, V., & Liao, C. (2022). Performance simulation of wind turbine with optimal designed trailing-edge serration. *Energy*, 243, 122998. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3914850>

References

Ahmed, M. M., Robin, H. M., Shahadat, M. Z., & Masud, M. H. (2025). Innovative approaches for reducing wind turbine noise: A review from mechanical and aerodynamic perspective. *Energy Reports*, 13, 728–746. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.12.049>

Alekseyenko, S., Dreus, A., Dron, M., & Brazaluk, O. (2022). Numerical Study of Aerodynamic Characteristics of a Pointed Plate of Variable Elongation in Subsonic and Supersonic Gas Flow. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 96(2), 2022, 88–97. <https://doi.org/10.37934/arfmts.96.2.889>

Arif, I., Lam, G., & Leung, R. (2022). Distributed surface compliance for airfoil tonal noise reduction at various loading conditions. *Physics of Fluid*, 34, 046113. <https://doi.org/10.1063/5.0087350>

Bertagnolio, F., & Fischer, A. (2022). Wind Turbine Aerodynamic Noise Sources. In *Handbook of Wind Energy Aerodynamics*. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31307-4_70

Firoozi, A. A., Hejazi, F., & Firoozi, A. A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 17(12), 2919. <https://doi.org/10.3390/en17122919>

Goman, O., Dreus, A., Rozhkevych, A., Heti, K., & Karplyuk, V. (2022). Improving the efficiency of Darier rotor by controlling the aerodynamic design of blades. *Energy Reports*, 8, 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.162>

Hu Z., Xu G., Shi Y., & Xia R. (2022). Airfoil–Vortex Interaction Noise Control Mechanism Based on Active Flap Control. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001356)

Liu, X., Zang, B., & Azarpeyvand, M. (2022). Wake-aerofoil interaction noise control with trailing-edge serrations. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, 110510. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110510>

Omodara, L., Saavalainen, P., Pitkäaho, S., Pongrácz, E., & Keiski, R. L. (2023). Sustainability assessment of products – Case study of wind turbine generator types. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106943. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106943>

Patel, T. K., Lilley, A. J., Shen, W. et al. (2021). Fundamental investigation using active plasma control to reduce blade–vortex interaction noise. *International Journal of Aeroacoustics*, 20(8), 870–900. <https://doi.org/10.1177/1475472X211052699>

Sander, L., Jung, C., & Schindler, D. (2024). Global Review on Environmental Impacts of Onshore Wind Energy in the Field of Tension between Human Societies and Natural Systems. *Energies*, 17(13), 3098. <https://doi.org/10.3390/en17133098>

Shige, K., Terashima, J., Inasawa, A., Komatsuzaki, T., Sakai, Y., & Kusano T. (2024). On the reduction of the flow-induced noise using porous material plates with high acoustic transmissibility. *Journal of Sound and Vibration*, 568, 117967. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.117967>

Yang, C., Arcondoulis E. J. G., Yang Y., Guo H., Maryami, R., Bi C., & Liu, Y., (2023). Active control of airfoil turbulent boundary layer noise with trailing-edge blowing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 153, 2115. <https://doi.org/10.1121/10.001778>

Yang, Y., Han S.-H., Ahn, S., Kim, J., Lee, S., & Park, K. (2024a). Design and manufacturing of aeroacoustic metamaterial: Textured rotor blades with enhanced acoustic and aerodynamic performance. *Additive Manufacturing*, 84, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104109>

- Yang, H., Yuan, W., Zhu, W., Sun, Z., Zhang, Y., Zhou, Y. (2024b). Wind turbine airfoil noise prediction using dedicated airfoil database and deep learning technology. *Applied Energy*, 364, 123165. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123165>
- Zhou, T., Cao, H., Zhang, V., & Liao, C. (2022). Performance simulation of wind turbine with optimal designed trailing-edge serration. *Energy*, 243, 122998. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3914850>

Отримано редакцією журналу / Received: 04.07.25
Прорецензовано / Revised: 19.09.25
Схвалено до друку / Accepted: 10.10.25

Andrii DREUS¹, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0598-9287
e-mail: dreus_a@365.dnu.edu.ua

Vitalii DERBABA², PhD (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-3918-2177
e-mail: derbaba.v.a@nmu.one

Dmytro HARKAVENKO², PhD Student
ORCID ID: 0009-0004-5011-9015
e-mail: harkavenko.d.v@nmu.one

Serhii ALEKSIENKO², DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0320-989X
e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

¹Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF THE ACOUSTIC EMISSION OF A MODIFIED SEGMENT OF A WIND TURBINE BLADE WITH A NACA 0012 AIRFOIL

The relevance of the study is due to the need to reduce the noise pollution that occurs during the operation of wind power plants, in particular, in densely populated or environmentally sensitive regions. One of the promising approaches to reducing the acoustic radiation of wind turbine blades is the modification of their geometry to control turbulent flow structures. This paper presents the methodology and results of an experimental study of aerodynamic noise generated by a NACA0012 blade profile. The effect of periodic notches on the trailing edge on the acoustic characteristics of the profile is studied. The aim of the work is to assess the effectiveness of the notched trailing edge in reducing the level of aerodynamic noise. The study was conducted in an anechoic chamber using physical models of the profile manufactured by 3D printing, and acoustic measurements were performed using a sound level meter with subsequent data processing using the Fast Fourier Transform (FFT) method. The experiments covered different incident flow velocities (from 10 to 20 m/s) and angles of attack (0° and 5°), and the results are presented in the form of sound pressure spectra. It was found that the modified profile provides a reduction in the sound pressure level of up to 7 dB compared to the standard profile. The effect is especially pronounced in the frequency range up to 8 kHz, typical of vortex noise sources at relatively low flow velocities. The proposed approach demonstrates high efficiency and can be applied to optimize the designs of wind turbines, as well as other rotating elements, such as UAV propellers or fans.

Keywords: aerodynamic noise, wind turbine, NACA0012 airfoil, serrated edge, experimental investigation, acoustic measurements, FFT, acoustic emission.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.