

Золотаренко Сергій¹, Алексєєнко Сергій²

¹аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: zolotarengo.s.an@nmu.one

²професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: aleksieienko.s.v@nmu.one

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНИЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ШУМУ ЛОПАТЕЙ ВІТРОВИХ ТУРБІН

Анотація. Аеродинамічний шум, що його генерують лопаті вітрових турбін, є основним чинником, який обмежує їхнє використання поблизу житлових забудов. У роботі розглянуто відомі наявні методи зниження шуму, зокрема пасивні, такі як модифікація профілю та текстуровані покриття, та активні, зокрема контроль примежового шару та адаптивні профілі. Наведено результати чисельних та експериментальних досліджень ефективності цих технологій.

Ключові слова: аеродинамічний шум; вітрові турбіни; пасивні та активні методи шумозниження; турбулентність; аероакустичні характеристики.

Вступ. Аеродинамічний шум, що його генерують лопаті малих та середніх вітряних турбін, є суттєвою проблемою, яка обмежує більш широке впровадження вітрових технологій, зокрема використання вітряків поблизу житлових забудов. Основними джерелами аеродинамічного шуму є турбулентність примежового шару, нестабільності потоку навколо обтічної поверхні, а також вихороутворення із подальшою взаємодією із задньою крайкою лопаті. Дослідження цих механізмів є основою для розробки ефективних методів зменшення шуму та покращення аероакустичних характеристик вітрових турбін.

Аналіз відомих результатів досліджень демонструє, що наявні методи зниження аеродинамічного шуму можна поділити на дві основні категорії: пасивні та активні. Пасивні методи передбачають конструктивні зміни, які зменшують генерацію шуму без додаткових енергетичних витрат. Активні методи, навпаки, використовують динамічні технології, що змінюють характеристики потоку в реальному часі. У роботі розглянуто та проаналізовано ефективність наявних підходів для зниження аеродинамічного шуму на основі чисельних та експериментальних досліджень.



Матеріал і результати досліджень. Одними з найбільш популярних відомих пасивних методів зниження шуму є модифікація геометрії задньої крайки лопаті, такі як застосування зазубрених структур [1-3], пористих, сітчастих [4], гнучких [5, 6], щілинних [7] щіткоподібних з подовженням [8, 9], а також використання мікроструктурованих покриттів [10] та зміненої форми профілю [11].

Дослідження показують, що зазубрені задні крайки сприяють зменшенню інтенсивності вихороутворення, що дозволяє знизити рівень шуму на 3–6 дБ залежно від конфігурації. Оптимізація параметрів зазубрин, таких як довжина хвилі та кут нахилу, дозволяє отримати додаткові акустичні переваги, зменшуючи шум ще на 1–2 дБ. Дослідження біонічних текстурованих покриттів, натхненних шкірою акули [12], демонструють їхню ефективність у зниженні турбулентності примежового шару, що сприяє зменшенню шуму на 2–4 дБ.

Ще одним перспективним підходом є зміна форми профілю лопаті. Використання профілів зі змінною кривизною задньої крайки або впровадження пористих структур суттєво зменшує низькочастотний шум, що виникає через вихорові структури в зоні відриву потоку, що дає змогу досягти зниження шуму на 4–7 дБ залежно від геометрії профілю. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих рішень у широкому діапазоні робочих режимів [13].

Прикладами активних методів зниження є спроба контролю примежового шару за допомогою вдування повітря в область задньої крайки [7] та використання адаптивних профілів, що змінюють свою геометрію залежно від аеродинамічних умов [5, 6]. Вдування повітря у вихровий слід за задньою крайкою дозволяє знизити інтенсивність турбулентних флуктуацій, що призводить до зменшення шуму на 5–8 дБ. Адаптивні профілі, що змінюють свою геометрію в реальному часі, демонструють значний потенціал у підвищенні аеродинамічної ефективності лопатей вітрових турбін та зменшенні шумових характеристик на 6–10 дБ залежно від режиму роботи. Новітні конструкції, такі як SCAMORSA-1, показують зниження аеродинамічного опору та покращення співвідношення підйомної сили до опору, що сприяє як енергетичній ефективності, так і зменшенню акустичного впливу. Чисельні моделювання та експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих підходів за різних режимів обтікання [5].

Аналіз ефективності сучасних методів зниження аеродинамічного шуму вітрових турбін показує, що як пасивні, так і активні підходи мають свої переваги та обмеження. Пасивні методи дозволяють значною мірою зменшити шумове випромінювання без



додаткових енергетичних витрат, але їхня ефективність обмежена геометричними параметрами лопаті та умовами експлуатації. Водночас активні методи демонструють більш гнучкий підхід до зниження шуму, забезпечуючи динамічну зміну характеристик потоку, що може бути особливо ефективним у змінних аеродинамічних умовах.

Попри досягнуті успіхи, залишається низка викликів, пов'язаних із впровадженням цих технологій у промислове використання. Зокрема, активні методи потребують додаткових енергетичних ресурсів і складних керувальних систем, що ускладнює їхнє масштабування до великих вітроустановок. Крім того, оптимізація пасивних методів потребує подальших досліджень для досягнення максимальної ефективності шумозниження без погіршення аеродинамічних характеристик лопатей.

До того ж перспективним напрямом можна вважати дослідження комбінованих підходів, які поєднують переваги пасивних і активних методів, забезпечуючи як структурну оптимізацію лопатей, так і динамічний контроль потоку. Впровадження таких технологій може сприяти значному зменшенню шумового впливу вітрових турбін, що є критично важливим для їхнього розміщення поблизу населених пунктів та подальшого розвитку вітроенергетики.

Висновки. Проблема аеродинамічного шуму малих та середніх вітрових турбін залишається актуальною, оскільки наявні технології все ще не дозволяють істотно знизити рівень шумового випромінювання, необхідного для умов експлуатації поблизу житлових забудов. Аналіз наявних підходів показує, що пасивні методи, такі як модифікація геометрії задньої крайки, застосування біонічних текстурованих покриттів та зміна форми профілю, можуть зменшувати рівень шуму на 3–7 дБ залежно від конфігурації. Активні методи, зокрема контроль примежового шару за допомогою вдування повітря та використання адаптивних профілів, дозволяють додатково знизити шум ще на 5–10 дБ, але вимагають енергетичних витрат і складних керуючих систем. Чисельні моделювання та експериментальні дослідження підтверджують ефективність цих технологій, проте їхнє застосування потребує подальшої оптимізації для застосування на реальних конструкціях вітрових турбін. Подальший розвиток цих підходів є необхідним для досягнення прийняттого рівня шуму, що сприятиме ширшому впровадженню вітроенергетики в умовах суворих екологічних та акустичних обмежень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cao, H., Zhang, M., Zhang, Y., & Zhou, T. (2021). A general model for trailing edge serrations simulation on wind turbine airfoils. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 11(4), 100284. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2021.100284>



2. Santamaria, J., Bierrenbach-Lima, A., Sanjosé, M., & Moreau, S. (2024). Shape considerations for the design of propellers with trailing edge serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 118771. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118771>
3. Juknevicius, A., & Chong, T. P. (2018). On the leading edge noise and aerodynamics of thin aerofoil subjected to the straight and curved serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 425, 324–343. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.02.038>
4. Jiang, C., Moreau, D., de Silva, C., & Doolan, C. (2023). Noise generation mechanisms of a micro-tube porous trailing edge. *Journal of Sound and Vibration*, 118085. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118085>
5. Bishay, P. L., McKinney, T., Kline, G., Manzo, M., Parian, A., Bakhshi, D., Langwald, A., Ortega, A., Gagnon, M., & Alfaro, G. F. (2024). SCAMORSA-1: a cambermorphing wind turbine blade with sliding composite skin. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.006>
6. Khani Aminjan, K., Ghodrat, M., Heidari, M., Rahmanivahid, P., Naghdi Khanachah, S., Chitt, M., & Escobedo-Diaz, J. P. (2023). Numerical and experimental investigation to design a novel morphing airfoil for performance optimization. *Propulsion and Power Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2023.02.004>
7. Jaffar, H. M., Al-Sadawi, L. A., Khudhair, A. A., & Biedermann, T. (2022). Aerodynamics Improvement of DU97-W-300 Wind Turbine Flat-Back Airfoil Using Slot-Induced Air Jet. *International Journal of Thermofluids*, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100267>
8. Finez A, Jondeau E, Roger M, Jacob M C (2010) Broadband noise reduction with trailing edge brushes. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Stockholm, Sweden, AIAA paper 2010-3980
9. Herr M (2007) Design criteria for low-noise trailing edges. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Rome, Italy, AIAA-paper 2007-3470
10. Wang, L., Wang, C., Wang, S., Qin, S., Sun, G., You, B., & Zhong, Y. (2021). A boundary surrogate model for micro/nano grooved surface structure applied in turbulence flow control over airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.026>
11. Mar Aye, C., Wansaseub, K., Kumar, S., G. Tejani, G., Bureerat, S., R. Yildiz, A., & Pholdee, N. (2023). Airfoil shape optimisation using a multi-fidelity surrogate-assisted metaheuristic with a new multi-objective infill sampling technique. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 1–18. <https://doi.org/10.32604/cmcs.2023.028632>



12. Fu, Y. F., Yuan, C. Q., & Bai, X. Q. (2017). Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 3(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>
13. Rubio Carpio, A., Avallone, F., Ragni, D., Snellen, M., & van der Zwaag, S. (2020). Quantitative criteria to design optimal permeable trailing edges for noise abatement. *Journal of Sound and Vibration*, 485, 115596. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115596>

