

Габовда О.В.

Мукачівський державний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ, ЩО ЛЕЖИТЬ В ОСНОВІ РОБОТИ БЕЗЛОПАТЕВИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

В останні роки спостерігається стрімкий перехід на відновлювальні джерела енергії, серед яких лідером є енергія вітру. Традиційними вітрогенераторами є лопатеві вітрові турбіни з горизонтальною віссю, які розвивалися протягом кількох десятиліть. Незважаючи на те, що вітрові турбіни є джерелом чистої енергії, вони мають ряд недоліків: вони шкідливі для птахів, складні в монтажі та обслуговуванні, займають великі площі, погано вписуються в міський ландшафт та мають інші недоліки. Відносно недавно з'явилася нова концепція побудови вітрогенераторів, в яких відсутні лопаті. В основі їхньої будови лежить явище резонансу, що виникає, коли частота власних коливань щогли співпадає з частотою відриву вихорів «доріжки Кармана», яка утворюється потоком вітру при обтіканні тіла щогли. Ці вітрогенератори прості за конструкцією і значно дешевше у порівнянні з традиційними. Вони безпечні, безшумні, легкі, не мають поверхонь тертя, механічних передач, роторів, гальм, тому не потребують змащування та ін. Актуальність теми статті зумовлено тим, що ця альтернативна технологія може стати майбутнім вітроенергетики, тому у світі до неї прикута значна увага багатьох дослідників. Проте в Україні вона мало відома, незважаючи на важливість питання децентралізації енергопостачання для мінімізації руйнування великих енергетичних об'єктів під час ракетних атак. Тому її впровадження було б особливо корисним для нашої країни. Мета роботи – дослідити новий метод генерації енергії вітру. У статті розглянуто переваги безлопатевого вихорового вітрогенератора у порівнянні з традиційними, досліджені основні умови індукції вихорових вібрацій, розглянуто різні режими використання вібраційної енергії, способи розширення робочого діапазону для підвищення продуктивності вітроустановок, зокрема, вбудовану магнітну систему налаштування, завдяки якій збільшується частота власних коливань щогли.

Ключові слова: безлопатево-вихоровий вітрогенератор, «доріжка Кармана», резонанс, вихрово-індукована вібрація, число Струхала, число Рейнольдса.

Постановка проблеми. Перехід на відновлювальні джерела енергії – це вимога часу задля досягнення певних глобальних цілей сталого розвитку у світі, зокрема в Україні. Серед відновлювальних джерел енергії найбільш динамічно розвивається вітроенергетика, основу якої на даний час складають лопатеві роторні вітрогенератори, які представлені великим різноманіттям видів, що відрізняються як за конструкціями, так й за потужностями.

Світовим лідером у використанні енергії вітру є Данія, вітроенергетика якої дозволяє не лише повністю забезпечити свої потреби в електриці, а й експортувати її до сусідніх Норвегії, Швеції та Німеччини. У 2023 році у Данії запрацював найбільший і найпотужніший у світі вітрогенератор висотою 280 м з довжиною лопатей 115,5 м, потужність якого на піку досягає 15 МВт. [1-2].

За останні десятиліття вітряні турбіни з горизонтальною віссю зазнали значного розвитку та оптимізації своїх компонентів, тобто на даний час це дуже зріла та консолідована технологія, але вона, не зважаючи на використання чистого

джерела енергії, потребує вдосконалення, навіть з точки зору екології. Тільки в США лопаті традиційних вітряних турбін щорічно вбивають більше півмільйона птахів, вже не кажучи про кажанів. SEO /BirdLife – організація, що працює над збереженням птахів та довкілля їхнього існування, підкреслює важливість інвестування в дослідження для розробки нових технологій, які дозволять суттєво знизити смертність птахів на ВЕС [3-4].

Ще однією з проблем є утилізація лопатей вітрових турбін. Сьогодні утилізувати можна до 90% всього, що є в вітротурбинах, крім лопатей, зроблених з композитних матеріалів і призначених для тривалого використання, а не для вторинної переробки. Середня довжина однієї лопаті близько 40 м, вага 7 т. Сьогодні ті лопаті, які не використовуються повторно, опиняються на смітнику (рис. 1).

У Європі зараз лише кілька підприємств можуть переробляти лопаті. Данський вітроенергетичний гігант Vestas наполегливо працює над переробкою лопатей турбін. «Сьогодні наші лопаті придатні для вторинної переробки приблизно на 42–43%.

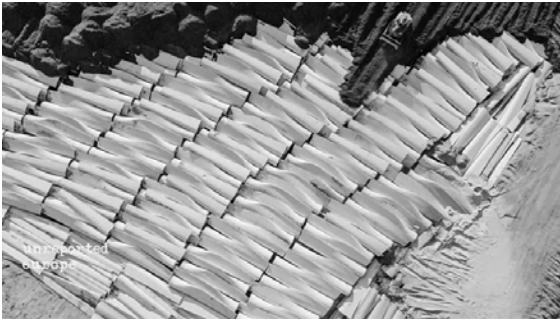


Рис. 1. Вид з висоти на кладовище турбінних лопатей у США [5]

Але якщо ви запитуєте, коли ми досягнемо цих 100%, я думаю, що це займе деякий час», – каже Ліза Екстранд, керівник відділу сталого розвитку Vestas. Іспанський стартап Reciclaia займається збиранням лопатей на переробку у Франції, Португалії та Північній Африці. Продуктивність переробки складає десь 1500 лез на рік [5].

Технологічний виклик традиційним вітрогенераторам, кинутий безлопатевиими вихровими резонансними вітрогенераторами Vortex. Він пов'язаний із високими технічними та екологічними перевагами. Основними перевагами є наступні:

1. Безшумність роботи (до 20 Дб).

2. Простота конструкції та зручність у виготовленні, монтажі та обслуговуванні, викликана відсутністю рухомих обертових частин (редукторів, передач, роторів, з'єднань тертя та ін.). Відповідно, нема потреби у змашуванні чи заміні частин через знос або втому.

3. Як наслідок, витрати на технічне обслуговування є низькими. Стандартизована вартість виробництва електроенергії (LCOE) для типової установки становитиме 0,035 доларів США за 1кВт, включаючи капітальні витрати, експлуатацію та технічне обслуговування, пропускну здатність, оренду землі, страхування та інші адміністративні витрати (рис. 2) [6].

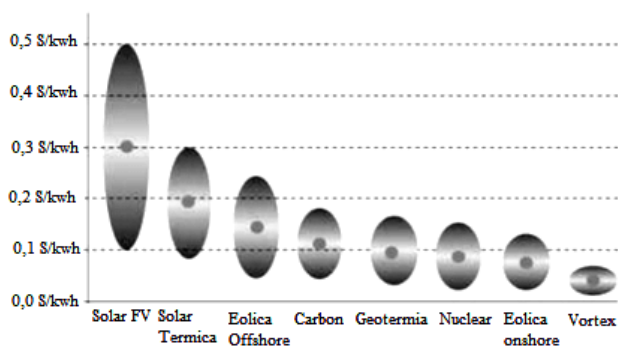


Рис. 2. Індекс LCOE (Levelised Cost of Energy) [6]

4. Можливість встановлення більшої кількості вітрогенераторів на одиницю площі. Крім того, експерименти показали, що вихори позаду установки можуть збільшити, за певних умов, ефективність найближчого заднього вітрогенератора.

5. Зменшення корозії, що виникає при встановленні VORTEX у агресивному морському середовищі (офшорні технології, що реалізуються в океані), у зв'язку з майже повною відсутністю шестерень, підшипників, гальм та інших деталей і вузлів з металів.

6. Гармонійно вписуються у міський ландшафт, добре поєднуються із сонячними панелями у випадку малопотужного гібридного обладнання та ін.

7. В умовах роботи у середовищі з низькими температурами відсутнє обледеніння в зв'язку з відсутністю обертових деталей.

Попри значні переваги безлопатевих вітрогенераторів, вони поки що виробляють менше енергії у порівнянні з традиційними вітровими турбінами, які вже десятиріччями використовуються й майже досягли піку у своєму розвитку.

В Україні цій інноваційній технології приділено мало уваги, тому є потреба дослідити концепцію цього способу вітрогенерації, фізичні принципи, на яких вона будується, та особливості проектування конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Технологію використання явища резонансу для виклику коливань в системі збору енергії вітру розробили іспанські інженери компанії VORTEX BLADELESS. Робота над безлопатевим вітрогенератором почалася ще у 2012 році. Цей проект отримав фінансування від програми Європейського Союзу з досліджень та інновацій Horizon 2020. Багато науковців та інженерів у світі продовжують експериментальну та дослідницьку діяльність з покращення параметрів вихрових резонансних вітрогенераторів для підвищення їх енергоефективності.

Стаття [7] президента, засновника компанії VORTEX BLADELES, інженера – науковця Девіда Дж. Янез Вільярреал присвячена найбільш загальним аспектам альтернативної технології, заснованої на взаємодії вітру та конструкції VIV (Вібрація, Індукована Вихором). На рисунку 3 представлено дві конструкції VORTEX. У статті «Оптимізація безлопатевих вітрових турбін: морфологічний аналіз і варіації діапазону блокування» [8], датованої квітнем 2024 року, представлені результати всебічного дослідження, проведеного ним разом з дослідниками кафедри картографії та землеустрою Саламанкського університету в Іспанії (один з най-

старіших і найпрестижніших університетів світу, заснований у 1218 році), яке охоплює теоретичні основи для розробки прототипу VIV, методологію розробки, використовуване обладнання (аеродинамічна труба, осцилограф, п'єзоелектричний датчик та ін.) й тестування шести прототипів з різними кутами розбіжності (від $-0,8^\circ$ до $3,2^\circ$) в геометрії обтічних тіл круглого перерізу та різною шорсткістю їх поверхонь (рис. 4).



Рис. 3. Vortex Nano висотою 0,85м (а), Vortex Atlantis висотою 9м (б) [8]



Рис. 4. Прототипи щогли зліва направо: циліндр, розбіжний конус (оригінальна модель) і збіжний конус. Світлий колір – прототипи з гладкою поверхнею, темний – з шорсткою (висота нерівностей 0,3 мм, відстань між ними – 0,8 мм) [8]

Стверджується, що вибір тестового діапазону швидкостей, заснований на теоретичних розрахунках і, починаючи від розрахованої мінімальної резонансної швидкості вітру 1,50 м/с до максимальної експериментально визначеної швидкості 10м/с, гарантує, що діапазон частот (5,5–10 Гц) ідеально узгоджується з робочими швидкостями вітрогенератора. Підтверджено, що форма прототипу має значний вплив на діапазон блокування (діапазон швидкості вітру, в якому досягається

вихідна потужність), тоді як шорсткість поверхні має мінімальний вплив.

Дослідженню обладнання для генерації енергії вітру, в основу якого покладене явище резонансу, присвячена стаття науковців Мігеля Анхеля Санчеса Ідальго та Рікардо Атьєнца Паскуаля [6]. Експериментальні та числові оцінки вихрових безлопатевих вітрових турбін надані у статті групи дослідників факультету машинобудування та промислової інженерії університету Абу-Дабі та департаменту навколишнього середовища та громадського здоров'я (Об'єднані Арабські Емірати) [9]. Вчені декількох китайських університетів провели чисельні дослідження енергоефективності VIV установок в залежності від поперечного перерізу обтічних тіл (прототипів щогл) в їх тандемному розташуванні [10]. Вони на практиці дослідили поведінку в повітряному потоці декількох тіл з різними перерізами (призми: тригранна, квадратна, п'ятикутна, круглий циліндр та призма Cir-Tria) та встановили, що призма Cir-Tria має кращі показники збору енергії, а круговий циліндр набагато легше піддається впливу сліду («Доріжка Кармана»). До того ж оцінили сумісний вплив на енергоефективність двох установок при різних відстанях між ними. Сучасний огляд безлопатевих вітрогенераторів представлений у [11]. Стаття містить теоретичні основи утворення вихрових вібрацій з посиланням на науковців, які у свій час їх досліджували. Розглянуто різні режими використання вібраційної енергії, включаючи різні орієнтації та розширення поверхні обтічного тіла для збільшення робочого діапазону та підвищення продуктивності. В статті [12] приділено увагу перевагам VORTEX. Багато оглядового матеріалу публікується на сайті самої компанії VORTEX BLADELES [13].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження концепції, що лежить в основі роботи безлопатевих вітрогенераторів, яке складається з аналізу технології VIV, залежностей між швидкістю вітру, геометричними параметрами обтічного тіла (щогли) та іншими параметрами, способу збільшення робочого діапазону швидкості вітру за рахунок збільшення частоти коливання щогли.

Зважаючи на зростаючий інтерес у світі до безлопатевих вітрогенераторів, які мають значні переваги перед вітровими турбінами, а також потреба у децентралізації постачання енергії, переході до розподіленої генерації енергії в Україні, щоб максимально уникнути руйнувань великих об'єктів виробітку енергії під час

ракетних атак, доцільно дослідити принципи роботи та конструкції установок на основі VIV. Як відмічено авторами статі [14], «Досвід трансформації енергосистеми для інтеграції значних обсягів енергії ВДЕ з негарантованою потужністю в таких країнах як Данія та Німеччина, а також ініціативи Чехії з децентралізації енергопостачання може бути корисним для України, з поправкою, звичайно, на поточну ситуацію».

Виклад основного матеріалу. Резонансний вихровий вітрогенератор Vortex є досить простою конструкцією, що складається з таких основних частин: щогла, виконана з композитного матеріалу, який має бути легким та жорстким; карбоновий консольний стрижень, на який опирається щогла; система генерації; система налаштування та нерухома основа на фундаменті (рис. 5). Для генерації енергії з вітру використовується аеродинамічний ефект, пов'язаний з появою послідовності вихорів за щоглою. Цей ефект отримав назву «Доріжка Кармана» (рис. 6). Резонанс вважається шкідливим явищем, що може викликати руйнування технічних систем, але саме він лежить в основі роботи VORTEX.

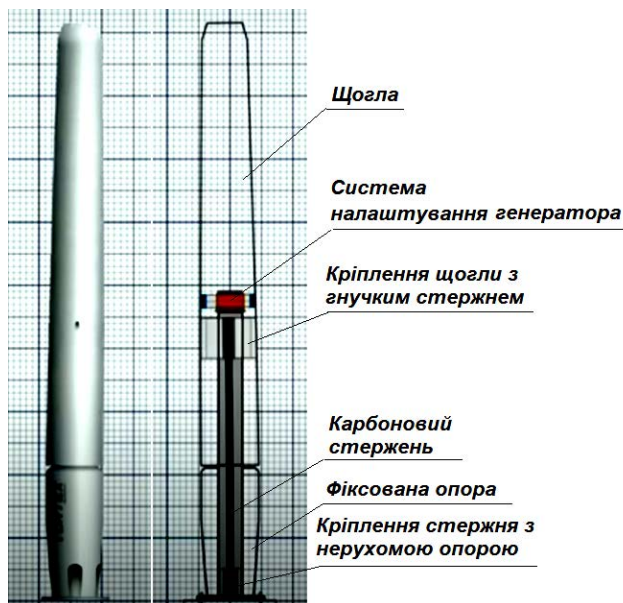


Рис. 5. Схема будови вітрогенератора VORTEX [15]

Поперечний переріз щогли має круглу форму, щоб установка працювала незалежно від напрямку вітру (коливання щогли кругові, а не лінійні), що дозволяє уникнути необхідності її переорієнтувати при його зміні.

Коли швидкість повітря наближається до тієї, при якій частота появи вихорів і коливань щогли збігаються, то виникає динамічне посилення руху, і щогла починає стабільно коливатися на резо-

нансній частоті, максимізуючи здатність поглинання енергії.

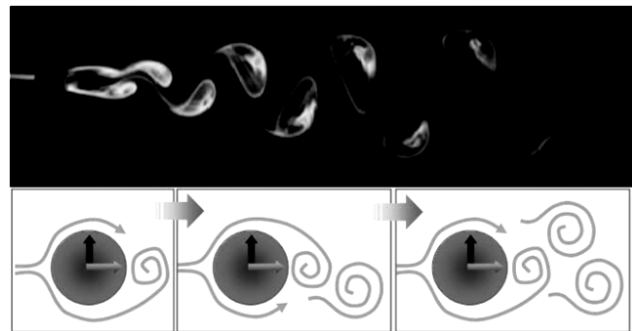


Рис. 6. Схема, що ілюструє утворення вихорів Кармана: підйомна сила (вертикальна стрілка); сила опору (горизонтальна стрілка) [6]

Механіка утворення вихору та вихрові області були описані Дж.Х. Джерардом, на роботу якого посилаються автори [9, 11]. В його моделі (рис. 7) взаємодія між шарами зсуву є критичним фактором у стимулюванні та формуванні вихрового сліду. Він постулював три умови, за яких частинки в протилежному шарі зсуву притягуються до області сліду: а) частинки можуть бути введені в область росту та зменшити їх міцність; б) вони можуть увійти в зсув шару та мають завихреність із позитивним та негативним знаком; в) вони можуть бути повторно введені в область ближнього сліду.

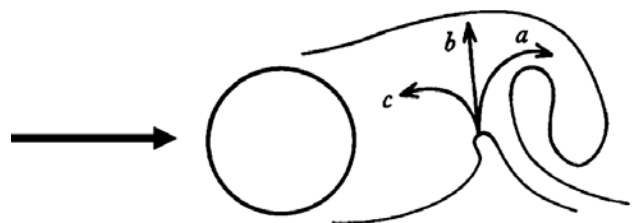


Рис. 7. Модель вихроутворення Джеррарда [9]

Діаметр щогли має збільшуватися з висотою, оскільки швидкість вітру також збільшується, щоб мати постійну частоту відриву вихорів по всій довжині щогли. Ілюстрація цієї вимоги надана на рисунку 8, де представлено два варіанти геометрії коливального тіла: циліндр і зворотний конус. У другому варіанті число вихорів по довжині розподіляється майже рівномірно.

Конструкцію верхньої частини щогли мусили звузити, щоб зменшити турбулентність («ефект голови»), яка утворювалася на верхівці щогли і порушувала ефективність обладнання (рис. 9).

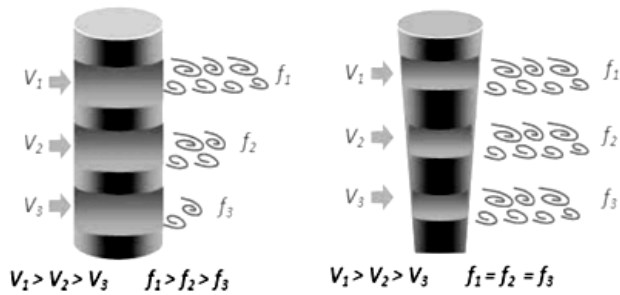


Рис. 8. Генерація вихорів у щоглі [6]

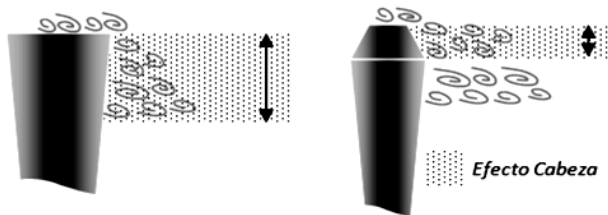


Рис. 9. Оптимізація турбулентності у верхній області [6]

Існує константа пропорційності St (число Струхалія), яка встановлює зв'язок між частотою відриву вихорів f , середньою швидкістю навігаючого потоку вітру V та шириною сліду, що залежить від діаметра поперечного перерізу D на певній висоті від землі. Зв'язок, виражений через частоту відриву вихорів, представлений формулою 1:

$$f = \frac{S_i \cdot V}{D} \quad (1)$$

Кореляція між числами Струхалія і Рейнольдса є такою, що число Струхалія постійно підтримує значення $St=0,2$ в широкому діапазоні Re ($250 < Re < 2 \times 10^5$). Зміна числа Рейнольдса має значний вплив на максимальну амплітуду жорсткого обтічного тіла. Число Рейнольдса для круглого перерізу дорівнює:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

де $\nu = 1,46 \times 10^{-5}$ – кінематична в'язкість повітря.

Формула 1 добре підходить до статичних конструкцій, але для коливальних конструкцій вона потребує підгонки, де діаметр поперечного перерізу замінюється характеристичною довжиною d' .

$$d' = D + a \cdot x \quad (3)$$

де x – амплітуда коливань, a – коригувальний коефіцієнт, який залежить від числа Рейнольдса. Правильне коригування цього коефіцієнта дозволяє впорядковано розкидати вихори. Подальші роз'яснення надано за допомогою рисунку 10.

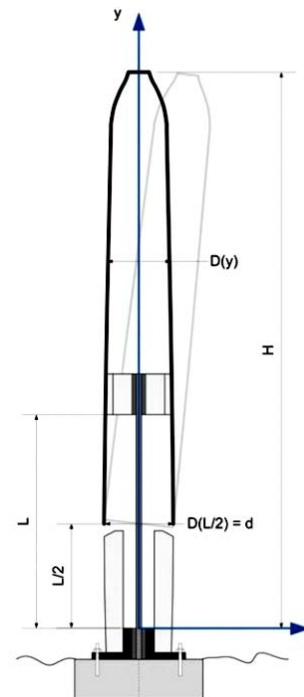


Рис. 10. Зміна діаметра щогли залежно від висоти [7]

Гнучкий стрижень довжиною L вмонтований у щоглу верхнім кінцем, нижній кінець закріплений нерухомо в основі установки. Приймається, що амплітуда коливань щогли x на висоті $y = L/2$ наближається до нуля. У цьому положенні характеристична довжина d' відповідно до (3) відповідає діаметру щогли $d' = D(L/2) = d$, а частота вихору f зі швидкістю вітру $V(L/2)$ становить:

$$f = \frac{S_i \cdot V(L/2)}{d} \quad (4)$$

У будь-якій іншій ділянці щогли, де величина коливань є достатньо значною, частота вихорів дорівнює:

$$f(y) = \frac{S_i \cdot V(y)}{D(y) + a \cdot x(y)} \quad (5)$$

де $V(y)$ і $x(y)$ – швидкість рідини та амплітуда коливань щогли на кожній висоті y , відповідно.

H – це відстань між місцем кріплення гнучкого стрижня з основою та найвищою частиною пристрою (рис. 10). Співвідношення максимального діаметра щогли та діаметра в її найнижчій частині позначається γ . На підставі цього амплітуда на певній висоті щогли буде така:

$$x(y) = \frac{y - L/2}{H - L/2} \cdot \gamma \cdot d \quad (6)$$

Оскільки частота виходу вихрів однакова по всій висоті щогли (див. рис. 8), праві частини формул (4), (5) прирівнюються, в результаті

чого отримується формула обчислення діаметрів щогли в кожному з перерізів:

$$D(y) = d \cdot \frac{V(y)}{V(L/2)} - a \cdot x(y) \quad (7)$$

Загалом VIV можна апроксимувати як простий гармонійний рух тіла з масою m , з'єднаний з пружним елементом, що має коефіцієнт пружності k та демпфером з константою демпфування c . (рис. 11). По тій моделі можна зрозуміти поведінку VIV. Маса щогли підтримується стрижнем з певною жорсткістю, а система гаситься генератором змінного струму та іншими втратами потужності.

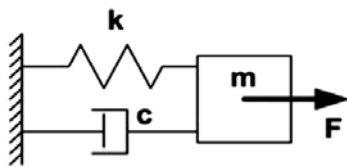


Рис. 11. Діаграма затухаючого гармонічного осцилятора [7]

Вся ця система резонує, коли частота виходу вихру, викликана вітром, наближається до наступної частоти:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (8)$$

Власна частота коливань всередині конструкції залишається постійною, обмежуючи діапазон корисних швидкостей вітру, де виникає резонанс (діапазон блокування). Щоб збільшити цей діапазон, потрібно розширити діапазон власних коливань щогли.

З цією метою Vortex розробив систему налаштування, засновану на системі магнітного керування з постійними магнітами, які збільшують видиму жорсткість системи відповідно до амплітуди її коливань.

При вбудованій системі налаштування до затухаючого гармонічного осцилятора додано дві пари постійних магнітів b . Однакові полюси стоять один проти одного. Ця пара магнітів має один прикріплений до коливальної маси (щогли), а інший – до нерухомого елемента конструкції основи (рис. 12).

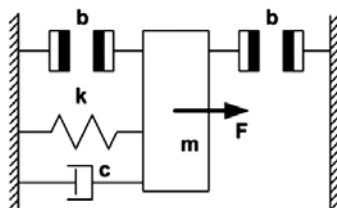


Рис. 12. Схема генератора з магнітною системою налаштування [7]

Магнітна сила, яка виникає між двома постійними магнітами, обернено пропорційна квадрату середньої відстані між їхніми полюсами, таким чином, що вони поведуться як пружина стиснення з непостійною пружністю, що залежить від зміщення. Коли вони наближаються, зростання сили відштовхування між ними зростає вище лінійного порядку. Отже, тепер частота і амплітуда коливань зростають згідно співвідношення:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(k + k(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (9)$$

де k' – коефіцієнт пружності, що відповідає магнітному відштовхуванню.

Незалежність коливань щогли від напрямку вітрового потоку, досягається за допомогою пари кілець постійних магнітів. Магнітне розташування кілець надано на рисунку 13. Поляризація може бути аксіальною (рис. 13а) або радіальною (рис. 13b).



Рис. 13. Можливе розташування кілець постійного магніту, які використовуються для налаштування системи. Зовнішнє кільце кріпиться до щогли (осцилятор), а внутрішнє кільце кріпиться до основи (статор) [7]

Чим більша швидкість вітру, тим більша підйомна сила (напрямок, перпендикулярний вітру) і тим більша сила опору (напрямок вітру). Це призводить до того, що відстань L (рис. 14) між двома магнітами зменшується.

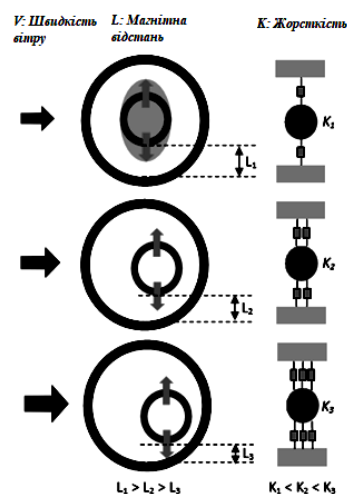


Рис. 14. Схема зміни жорсткості як функції переміщення [6]

Відповідно збільшується сила відштовхування, подібно до поведінки пружини, але зі змінною жорсткістю, яка залежить від зміщення, оскільки це магнітне відштовхування. Отже, чим вища швидкість, тим більша жорсткість щогли. Таким чином, завдяки цій системі розширюється корисний діапазон швидкостей вітру, при якому амплітуда обладнання є максимальною, тобто, максимізується період його роботи (рис. 15).

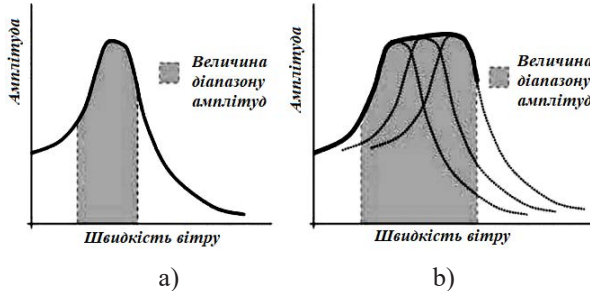


Рис. 15. Порівняння амплітудного діапазону: а) без системи налаштування; б) із системою налаштування [6]

В таблиці 1 наведені числа Рейнольдса, що відповідають максимальним значенням діапазону блокування (Max Lock-In) при різних кутах розбіжності прототипів щогл, отриманих у результаті випробувань [8].

При випробуваннях у аеродинамічній трубці, описаних у [7], було помічено, що коли сила вітру перевищує діапазон блокування, модель із вбудованою системою налаштування раптово припиняє працювати. З цього зроблено висновок, що гальмівні системи для боротьби з сильним вітром, які присутні у традиційних вітрових турбінах, в безлопатевих вітрогенераторах не потрібні.

Що стосується генерації електричної енергії у безлопатевих вітрогенераторах, вона отримується способом електромагнітної індукції за допомогою вертикального лінійного генератора змінного струму. Змінний характер руху щогли зумовлює конструкцію відповідного генератора для цієї технології. Одночасне використання мобільного кільця для вироблення електроенергії та вбудована система магнітного налаштування

в конструкції полегшує її та економить кошти. На рисунку 16 показано компоненти генератора. Кільця постійного магніту *b* закріплені на щоглі. Коли стрижень зі щоглою згинається, взаємодія з котушками та налаштованими магнітами, закріпленими на статорі *a*, збільшується. Частина статора генератора змінного струму підтримується конструкцією *c*, закріпленою на основі.

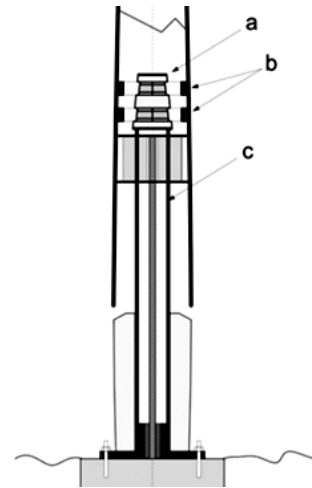


Рис. 16. Компонування генератора і системи налаштування

Вироблена електрична енергія перетворюється на змінний струм, який за допомогою випрямляча перетворюється на постійний струм.

Висновки. Розглянуто конструкції безлопатевих генераторів, які працюють в резонансному діапазоні від вібрацій, індукованих вихорами, що утворюються за щоглою при обтіканні її повітряним потоком. Аеродинамічна оптимізація установок зосереджувалася на покращенні геометрії та характеристик поверхні щогли. Форма щогли у перерізі має бути круглою, щоб робота установки не залежала від напрямку вітру, та збільшувалася у діаметрі по висоті, щоб частота відриву вихорів у кожному перерізі вздовж неї розподілялася рівномірно. Чим більше діаметр щогли, тим більша підйомна сила, тим більше амплітуда коливань. Шорсткість поверхні має незначний

Таблиця 1

Числа Рейнольдса (Re), що відповідають максимальним значенням діапазону блокування

Prototype	Angle	VRMS [mV]	Re (Max Lock-In)
Convergent -0.8°	-0.8°	1601	3800
Straight 0°	0.0°	1631	4050
Divergent 0.8°	0.8°	1708	4300
Divergent 1.6°	1.6°	1766	4600
Divergent 3.2°	3.2°	1829	5000

вплив на діапазон блокування (тільки при значних числах Рейнольдса).

Зазначено залежності між швидкістю вітру, числом Рейнольдса та частотою відриву вихорів. Розглянуто вбудовану систему магнітного налаштування за допомогою постійних магнітів для підтримки резонансу у більш широкому діапазоні швидкостей.

Найближча мета розробників Vortex побудувати 140-метровий безлопатевий генератор потужністю 1 мегават, а такого масштабу генератори можна об'єднувати у системи, тому подальші дослідження варто зосередити на процесах взаємного впливу установок у випадку їх просторового розташування та їхньої орієнтації, розгляді ефектів перешкод для цих установок, де залучаються ще такі параметри як кут атаки та співвідношення міжцентрової відстані і діаметра.

Список літератури:

1. Wind power generates 140% of Denmark's electricity demand. 2015. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2015/jul/10/denmark-wind-windfarm-power-exceed-electricity-demand> (дата звернення: 08.07.2024).
2. У Данії запрацював найбільший і найпотужніший у світі вітрогенератор – його висота становить 280 метрів. URL: <https://sundries.ua/u-danii-zapratsiuvav-naibilshyi-i-naipotuzhnishi-yi-u-sviti-vitrohenerator-i-oho-vysota-stanovyut-280-metriv/> (дата звернення: 10.07.2024).
3. Joel Merriman. How Many Birds Are Killed by Wind Turbines? URL: <https://abcbirds.org/blog21/wind-turbine-mortality/> (дата звернення: 10.07.2024).
4. Іспанія. SEO/BirdLife. URL: <https://www.birdlife.org/partners/spain-seo-birdlife/> (дата звернення: 10.07.2024).
5. Monica Pinna. Recycling turbine blades: the Achilles heel of wind power. URL: <https://www.euronews.com/my-europe/2021/06/25/recycling-turbine-blades-the-achilles-heel-of-wind-power-and-the-controversy-engulfing-ren> (дата звернення: 12.07.2024).
6. Miguel Angel Sánchez Hidalgo, Ricardo Atienza Pascual. Nuevo concepto de generacion eolica. Aerogenerador sin palas por vorticidad // TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente/ Vol. XV. 2017. 18p. URL: <http://www.uaex.es/publicacion/nuevo-concepto-de-generacion-eolica-aerogenerador-sin-palas-por-vorticidad.pdf> (дата звернення: 08.07.2024).
7. David Jesús Yáñez Villarreal. VIV resonant wind generators. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/331345449_VIV_resonant_wind_generators (дата звернення 10.07.2024).
8. Enrique González-González, David J. Yáñez, Susana Del Pozo and Susana Lagüela. Optimizing Bladeless Wind Turbines: Morphological Analysis and Lock-In Range Variations. Appl. Sci. 2024, 14(7), 2815; URL: <https://doi.org/10.3390/app14072815>.
9. Hasan Hamdan, Sharul Sham Dol, Abdelrahman Hosny Goma et. al. Experimental and numerical study of novel vortex bladeless wind turbine with an economic feasibility analysis and investigation of environmental benefits // Journal Energies 2024, 17(1), 214. URL: <https://doi.org/10.3390/en17010214>.
10. Zhang, B.; Song, B.; Mao, Z. et. al. Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement/ Energy. 2017. Vol.133, P.723–736. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.051>.
11. Tandel, R.; Shah, S.; Tripathi, S. A state-of-art review on Bladeless Wind Turbine. Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1950, 012058. doi:10.1088/1742-6596/1950/1/012058. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1950/1/012058/pdf> (дата звернення: 10.07.2024).
12. Садовий Я. Вітряк майбутнього придумали іспанські інженери /Урядовий кур'єр. 2021. №58(6926). С. How it works? URL: <https://vortexbladeless.com/technology/> (дата звернення: 10.07.2024).
14. Домбровський О., Гелегуха Г., Крамар В. Як запустити розподілену генерацію в Україні. 2024. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2024/04/11/712293/> (дата звернення: 10.07.2024).
15. Vortex Bladeless How it Works, scheme. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=lirOhO4nKlc> (дата звернення: 10.07.2024).

Habovda O.V. STUDY OF THE CONCEPT UNDERLYING THE OPERATION OF BLADELESS WIND GENERATORS

In recent years, there has been a rapid shift towards renewable energy sources, with wind energy leading the way. Traditional wind generators are horizontal-axis wind turbines, which have been developed over several decades. Despite being a source of clean energy, wind turbines have several drawbacks: they are harmful to birds, complex to install and maintain, occupy large areas, and do not blend well into urban landscapes, and other disadvantages. A new concept for building wind turbines without blades has relatively recently emerged. The basis of their structure is the phenomenon of resonance, which occurs when the frequency of the mast's own oscillations coincides with the frequency of separation of the vortices of the "Karman street", which are formed by the flow of wind when flowing around the body of the mast. These wind generators esare simple in design and there foresignificantly cheaper compared to traditional ones. They are safe, silent, light weight, and do not have friction surfaces, mechanical transmissions, rotors, orbrakes, thuse liminating then eed forlubrication and other maintenance. The article examines the advantages of bladeless vortex wind turbines compared to traditional ones, investigates the main conditions for inducing vortex vibrations, considers various modes of utilizing vibrational energy, and discusses methods to expand the operational range to improve the productivity of wind installations, including an integrated magnetic tuning system that increases the natural frequency of mast oscillations.

Key words: bladeless wind generator, Karman street, resonance, Vortex Induced Vibration, Strouhal number, Reynolds number.