

І. А. Вікович, І. С. Афтаназів, О. І. Строган, І. І. Балабанська  
Національний університет “Львівська політехніка”

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕНЕГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ІЗ ОБЕРТОВИМ РОТОРОМ

© Вікович І. А., Афтаназів І. С., Строган О. І., Балабанська І. І., 2019

Проведено порівняльний аналіз вітроустановок із обертовим ротором горизонтального і вертикального типів та обґрунтовано підвищення ефективності запропонованої нової конструкції вітроустановки із обертовим ротором, одержано аналітичну залежність для визначення потужності запропонованої повітродувної частини цієї установки. Побудовано графічні залежності пливу збільшення швидкості потоку у повітровідвідній частині вітроустановки на зростання її теоретичної потужності за різних співвідношень діаметрів впускного і випускного отворів. Наведено орієнтовні запаси поновлюваних і не поновлюваних джерел енергії на земній кулі та описано переваги поновлюваних джерел енергії порівняно із традиційними.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, конструкція, ротор, джерела енергії, потужність, повітряний потік, швидкість.

A comparative analysis of wind turbines with rotating rotor horizontal and vertical types and proved efficiency of the proposed new design of wind turbine rotor oberyrvym, an analytical dependence has been obtained for determining the power of the proposed blower unit of this installation. The graphic dependences of the flow increase in the flow velocity in the air inlet of the wind turbine on the growth of its theoretical power at different ratios of the diameters of the inlet and outlet are constructed. Indicative stocks of renewable and non renewable energy sources on the globe and describes the advantages of renewable energy sources in comparison with traditional.

**Key words:** wind power installation, structure, rotor, energy sources, power, air flow, speed.

### Вступ

Відомо, що енергію вітру у судноплавстві для вітрил використовували приблизно 5 тисяч років до н.е. У Китаї понад 2200 років тому вітряки застосовували для охолодження повітря. На Середньому Сході, зокрема у Персії, близько 200 року до н.е. почали використовувати вітряки із вертикальною віссю обертання для перемелювання зерна. Також доволі ефективно вітряки використовували в Європі у XVIII столітті, у млинах, для вентиляції і охолодження приміщень.

Дерев'яні лопаті старих вітряків могли використовувати лише близько 7 % енергії вітру. Значно пізніше дерев'яні лопаті поступово замінювали на металеві необхідної конфігурації, що збільшило ефективність ВЕУ приблизно удвічі – до 15 %.

Необхідно зазначити, що в Україні у 1917 році було близько 30 тисяч вітряків, потужність яких становила понад 200 тис. кВт.

В Україні можна і потрібно ефективно використовувати енергію вітру в окремих зонах, у яких середньорічна швидкість вітру сягає понад 4–5 м/с, і цього достатньо та економічно доцільно, щоби будувати ефективні ВЕУ. Такі швидкості вітру мають такі регіони, як Карпати, Хмельницька і Волинська області, Азово-Чорноморське узбережжя (Донецька і Херсонська), зони на Кіровоградщині та Дніпропетровщині, вітрові зони у Харківській області та в Криму.

У світі Україна займає 14 місце за встановленою потужністю ВЕУ.

Загалом середньорічна швидкість вітру у приземному шарі на території України дещо низька – 4,3 м/с. Проте, вітровий енергетичний потенціал на території України становить величезну вітрову потужність – 330 млрд. кВт, перевищуючи сьгоднішню потужність усіх електростанцій України в 6 тисяч разів.

Держави, які сьогодні активно розвивають і продукують ВЕУ, мають потужності окремих вітрогенераторів від 1000 до 3 000 кВт із коефіцієнтом корисної дії понад 30 %. У світі сьогодні встановлено близько 25000 ВЕУ, загальна потужність яких понад 20 млн. кВт [1].

Найбільше використовують вітрову енергію у США, де виробляють понад 1,5 млн. кВт вітрової енергії. Найпотужніші ВЕУ в Європі, зокрема в Швеції, Нідерландах, Великобританії та Німеччині.

Сьогодні інтенсивно збільшуються сумарні потужності вітроелектростанцій, зокрема в країнах Північно-Західної Європи, в Китаї, Індії, США, Канаді тощо.

Потужність встановлених щорічних ВЕУ у країнах Європи становить 400 МВт. Сьогодні частка вітрової енергії у світі становить 15 % від загальної виробленої енергії на Землі.

Орієнтовні запаси традиційних і нетрадиційних джерел енергії на Землі представлено у табл. 1.

Таблиця 1

### Найважливіші орієнтовні запаси різних джерел енергії на Землі

Види енергії	Запаси енергії енергії
Непоновлювані ( кВт · год )	
1. Термоядерна енергія	1 00000000 · 10 <sup>12</sup>
2. Ядерна енергія	574000·10 <sup>12</sup>
3. Енергія паливних копалин	55364·10 <sup>12</sup>
Поновлювані (кВт · год/рік )	
1. Енергія сонячних променів	667800·10 <sup>12</sup>
2. Енергія морів і океанів	70000·10 <sup>12</sup>
3. Енергія вітру	17369·10 <sup>12</sup>
4. Енергія внутрішнього тепла Землі	134·10 <sup>12</sup>
5. Енергія річок	18·10 <sup>12</sup>

Головними перевагами нетрадиційних джерел енергії порівняно із традиційними є те, що вони:

1. Невичерпні.
2. Не забруднюють довкілля.
3. Не потребують добування, перероблення і постачання палива.
4. Не потребують будь-якого охолодження, є безвідходними.
5. Мають змогу працювати без відповідного технічного обслуговування, ремонту тощо.

Сьогодні в усьому світі для збільшення вироблення електричної енергії значно розширюється сфера застосування різних типів вітроенергетичних установок, зокрема горизонтального, вертикального та комбінованого типів. Вітроенергетичні установки (ВЕУ) є повністю екологічно

чистими, не потребують сировини і позбавлені будь-яких відходів, причому енергія вітру та Сонця є невичерпним джерелом енергії. Сьогодні усі типи ВЕУ постійно удосконалюються. Нові наукові дослідження спрямовані на підвищення ефективності функціонування ВЕУ [1–8, 11, 20, 21, 23].

Сьогодні у Німеччині встановлено понад 10 тисяч ВЕУ, Данія виробляє 42 % вітрової електричної енергії, Іспанія – понад 20%, Англія – понад 11%, Китай і США – близько 15 % [1, 4, 11, 13, 14].

Сьогодні відомі горизонтально-осьові швидкохідні лопатеві екологічно чисті ВЕУ, які трансформують енергію повітряних потоків в електричну енергію. Головними елементами цих ВЕУ є: встановлений на горизонтальній осі у вертикальній опорі ротор обертання із прикріпленими до нього трьома лопатями; передавальні та стабілізуючі обертовий рух механізми; перетворювач механічної енергії обертового руху ротора на електричну – її генератор.

Для накопичення електричної енергії встановлюють акумулятори [11, 12]. Кількість акумульованої електроенергії у цих вітроустановках залежить від частоти обертання та крутного моменту ротора, які, своєю чергою, залежать від швидкості спрямованого на лопаті повітряного потоку, тривалості його дії, радіуса, площі та профілю лопатей. Отже, що більша площа та радіус лопатей, то більшому силовому тиску з боку повітряного потоку піддаються лопаті, більшими є їх швидкість обертання ротора та крутний момент, а відтак і кількість акумульованої енергії.

**Постановка проблеми.** Обмеженням щодо використання ВЕУ вертикального типу є необхідність для їх роботи доволі великих, понад 4,5–5,0 м/с швидкостей повітряних потоків, а також значні габарити, зумовлені істотними, до 5 м, довжинами обертових лопатей та швидкостями обертання лопатей від 15 до 100 об/хв. Дисбаланси та інерційні сили, які виникають при обертанні таких довгомірних лопатей, призводять до руйнівних коливань їхніх опор. Це змушує підвищувати матеріаломісткість конструкцій опор, підвищує їх вартість, затрати на експлуатацію тощо.

Найбільшого поширення у світі набула конструкція вітрогенератора із трьома лопатями і горизонтальною віссю обертання. Площу контакту лопатей із повітряним потоком збільшують завдяки нарощуванню кількості лопатей. Це дає змогу зменшити довжину обертових лопатей, але внаслідок цього виникають додаткові динамічні навантаження на опору та ускладнюється динамічне балансування механізмів багатолопатевого ВЕУ, які зменшують їх надійність і терміни експлуатації і підвищують вартість ремонтів та обслуговування загалом.

Вертикальні малошумні ВЕУ, а також горизонтальні ВЕУ застосовують у місцях, де є перебої у забезпеченні електроенергією або відсутнє централізоване електропостачання і разом із тим є достатній вітровий потенціал, де середньорічна швидкість вітру сягає понад 4–5 м/с. ВЕУ вертикально-осьові відрізняються меншим порівняно із горизонтальними рівнем шуму і починають працювати за менших початкових швидкостей вітру [2–5]. Загальна середньорічна продуктивність вертикально-осьових вітряків орієнтовно така сама, як і горизонтальних вітроустановок такої самої потужності. Найефективніше застосовують вертикальні вітроустановки у морських і прибережних районах та гірській місцевості. Зокрема переваги вертикальних вітроустановок такі:

1. Функціонують під час порівняно тихого вітру незалежно від його напрямку і досягають номінальної потужності за малих обертів і є майже безшумними.
2. Мають доволі високий ККД завдяки лопатям спеціального профілю.
3. Не потребують обслуговування у процесі роботи (конструкція генератора не передбачає щіток, редукторів і підшипників).
4. У процесі експлуатації безпосередньо дають змогу поступово нарощувати номінальну вихідну потужність додаванням простих і легких модулів, які спроектовано для полегшення транспортування та встановлення.
5. Шум у доволі малих межах – до 20 ДБ.
6. Немає обмежень щодо відстані при встановленні поблизу житла, відсутні магнітне випромінювання і вібрація.
7. Мінімум місця для розміщення (не потрібно високої щогли).

8. Не потрібно додаткових пристроїв запуску під час малих вітрів і гальмівних систем у разі сильних вітрів.

9. Безпечні для птахів, бджіл і загалом для довкілля.

10. Дають змогу експлуатувати в агресивних середовищах, зокрема на територіях морського акваторію та у районах із різкими перепадами температур завдяки алюмінієвому корпусу генератора;

11. Стійкі до сильних вітрів ( витримують ураганний вітер).

12. Мають простий захист від блискавок.

14. Мають невелику підйомну силу, а крутний момент незмінний впродовж одного оберту.

15. Усі відпрацьовані деталі ВЕУ можна давати на вторинну переробку.

16. Можна встановлювати без шкоди і псування ландшафту та його вигляду.

17. Можливість встановлення у вертикальних ВЕУ підшипників японського виробництва із 500-разовим запасом міцності та з терміном служби понад 20 років.

18. Можливість масового виробництва і ефективного застосування завдяки надійності, простоті конструкції й експлуатації та дешевизні.

До недоліків ВЕУ належать:

1. Відсутність вітрових потоків на доволі великих окремих ділянках Землі.

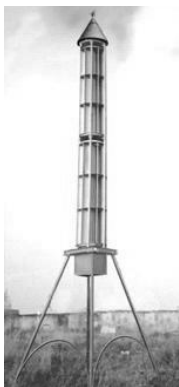
2. Неefективність вітрових турбін у період пікових навантажень.

3. Небезпека для деяких видів живих організмів тощо.

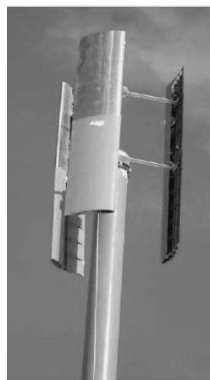
4. Значно менша поки що потужність ВЕУ порівняно із тепловими, гідро- та атомними електростанціями.

Вертикальні ВЕУ зокрема бувають швидкохідні і тихохідні.

Класичні вертикальні тихохідні вітряки – це ВЕУ карусельного типу, які зображено на рис. 1.



а



б



в



г



д

Рис. 1. Вертикальні вітроенергетичні установки:  
а–в – ротори карусельного типу; г – ротор Дар'є; д – ротор Оніпка

Перше вітроколесо фінського інженера Савоніуса (SI Savonius, 1922 р.) взагалі нагадувало розрізану на дві частини бочку, насаджену на вертикальну вісь (рис. 2, а).

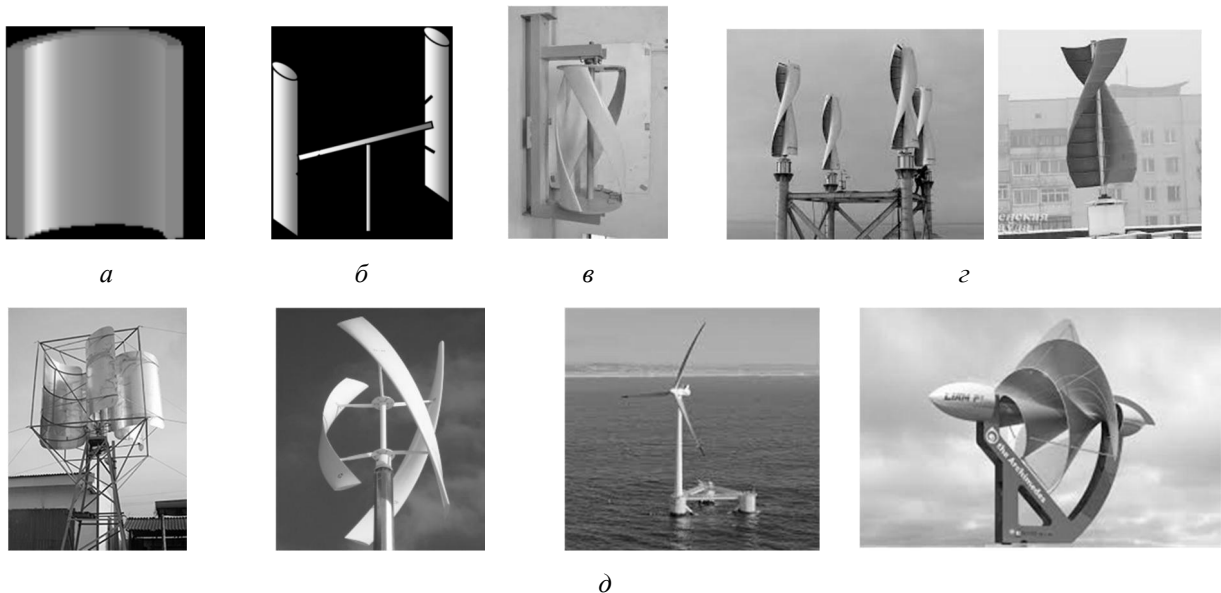


Рис. 2. Ротори: а – Савоніуса, б – Еванса, в – Оніпко (Україна) і ротори США з г – вертикальною та д – горизонтальною віссю обертання

Обертовий момент створюється за рахунок різниці моментів опору, що надаються повітряному потоку увігнутою і опуклою щодо нього лопатями вітру. Його лопаті відрізняються особливою простотою і дешевизною.

У роторі (рис. 2, б) Еванса (Н-роторі) обертовий момент створюється також підйомною силою двох вертикально розташованих лопатей із аеродинамічним профілем. Для його запуску також потрібна розкрутка, а для зупинки використовують поворот лопатей на  $90^0$  довкола вертикальної осі.

У роторі Масгрува обертовий момент створює також підйомна сила.

Вертикальні вітроустановки переважно мають такі характеристики:

1. Номінальна потужність понад 1 Квт.
2. Два вітромодуля.
3. Конструкція безвантова.
4. Висота установки переважно до 12 метрів.
5. Рівень шуму – 0 дБ на відстані 15 метрів.
6. Початкове вироблення електроенергії за швидкості вітру понад 3 м/сек.

Такі вітроустановки здебільшого побудовані у США, Канаді, Англії, Японії та Німеччині, є прості в експлуатації і доволі стійкі до нерівномірних вітрових потоків, які часто змінюють напрям. У разі збільшення швидкості вітру система відразу нарощує силу тяги, після чого автоматично стабілізує швидкість обертання вітрил. У таких ВЕУ встановлюють різні телекомунікаційні системи контролю за напрямом і швидкістю вітру. Оскільки швидкість вітру є мінливою не тільки впродовж сезону, але і впродовж доби, то сьогодні для стабілізації електричної енергії поєднують роботу ВКУ і сонячних батарей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливістю механізмів вертикальних ВЕУ є те, що карусельні вітродвигуни тихохідні, а це дає змогу використовувати прості електричні схеми, без ризику ушкодження агрегату у разі випадкового пориву вітру. Слід зазначити, що ортогональний тип вертикальних ВЕУ перспективний для великої енергетики. Однак ці розробки мають один істотний недолік: для функціонування конструкції їй потрібний “розгін”. Для переходу апарату з режиму двигуна в режим генератора до нього необхідно підвести енергію, розкрутивши його до певних аеродинамічних параметрів. Тому сьогодні все ширше застосовують комбіновані ВЕУ [9, 10] – поєднання різних модифікацій горизонтальних і вертикальних ВЕУ.

У роботі [12] проаналізовано дешеві у виготовленні, прості в експлуатації й обслуговуванні та довговічні у роботі вітроустановки, які можуть працювати в автономному режимі. Розглянуто

мінімальний, номінальний, надлишковий і критичний режими роботи вітроустановки. Створено математичні моделі та розроблено пакет прикладних програм VEUEDG.

До системи вітроустановки введено електродинамічне і пружинне гальма.

У [11] розроблено математичну модель для оптимізації кута профілю лінійчатої лопаті тихохідного вітроколеса і швидкості його обертання за критеріями можливого відбору потужності зі слабких потоків вітру.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована нами принципово нова ВЕУ належить до типу тихохідних вертикально-осьових ВЕУ, яку можна застосувати для забезпечення дешевою екологічно чистою енергією автономних, порівняно невеликих і малих, споживачів, зокрема у регіонах із доволі слабкими вітровими потоками.

ВЕУ містить вертикальну вісь, на якій встановлено ротор. Зверху та знизу ротор обмежений горизонтальними дисками, між якими розташовано розгорнуті на  $180^{\circ}$  одна стосовно іншої дві поверхні циліндричної форми. Диски разом із циліндричними поверхнями формують два розгорнуті на  $180^{\circ}$  один відносно іншого повітровловлювачі. Під час набігання повітряного потоку на вгнутий до нього повітровловлювач на його поверхні створюється надлишковий тиск, який перевищує тиск повітря всередині повернутого до потоку повітря опуклого повітровловлювача. За рахунок різниці тисків на поверхнях повітровловлювачів ротор обертається у напрямі від опуклої до вгнутої циліндричної поверхонь. Через механічну передачу та розташований всередині пустотілої осі вал обертовий рух ротора передається на вал генератора, де на його обмотках індукуються електричний струм, який надалі накопичується в акумуляторі. Крутний момент та швидкість обертання ротора пропорційні до швидкості повітряного потоку та площі циліндричної вгнутої поверхні повітровловлювачів.

Проте у процесі обертання ротора за неробочою опуклою до повітряного потоку поверхнею його повітровловлювача формуються турбулентні повітряні струмені. Ці турбулентні струмені нарощують тиск повітря на неробочій поверхні повітровловлювача, який протистоїть тиску повітря на робочу поверхню повітровловлювача. Наслідком протистояння тисків на робочій та неробочій поверхнях повітровловлювачів є пригальмовування обертання ротора, зменшення швидкості його обертання і забезпечуваного необхідного крутного моменту.

У створеній нами ВЕУ із обертовим ротором завдяки конструктивному виконанню повітрозбірників збільшено крутний момент, швидкість обертання ротора та підвищено коефіцієнт корисної дії вітроустановки загалом.

Виконання у вітроенергетичній установці із обертовим ротором повітровловлювачів у вигляді пустотілих труб, якими рухаються струмені повітря, забезпечує нарощування площі контакту повітря із їхніми робочими поверхнями. Внаслідок збільшення площі контакту рухомого повітря із робочою поверхнею повітровловлювача збільшується сила тиску повітря на обертові елементи ротора. Додаткового пришвидшення і нарощування швидкості обертання ротора та крутного моменту йому надають реактивні струмені повітря, що із швидкістю, яка перевищує швидкість основного повітряного потоку, виходять в атмосферу через повітровідвідні частини повітровловлювачів.

На рис. 1 наведено конструктивну схему вітроенергетичної установи із обертовим ротором з елементами кінематичної схеми передавання обертового руху, а на рис. 2 зображено конструкцію повітровловлювачів ротора для відображення руху струменів повітря у ньому.

Вітроенергетична установка із обертовим ротором запропонованої конструкції (рис. 3) містить вертикально встановлену на нерухомій основі 9 пустотілу вісь 4, у якій на опорах кочення 3 розміщено вал 5. До верхньої частини валу 5 за допомогою хомутів 2 прикріплено два розгорнуті на  $180^{\circ}$  один відносно іншого повітровловлювачі 1, а до нижньої – зубчасте колесо конічної зубчастої передачі 6. Встановлений на підшипниках 8 вихідний вал 7 зубчастої передачі 6 через муфту 10 з'єднано із якорем генератора 11. Індукований на обмотках генератора 11 електричний струм накопичується в акумуляторі (на рис. 1 не показаний). Для стабілізації частоти обертання повітровловлювачів 1 на валу 7 облаштовано маховик 12, а для зупинки чи пригальмовування ротора встановлено гальмівний механізм 13.

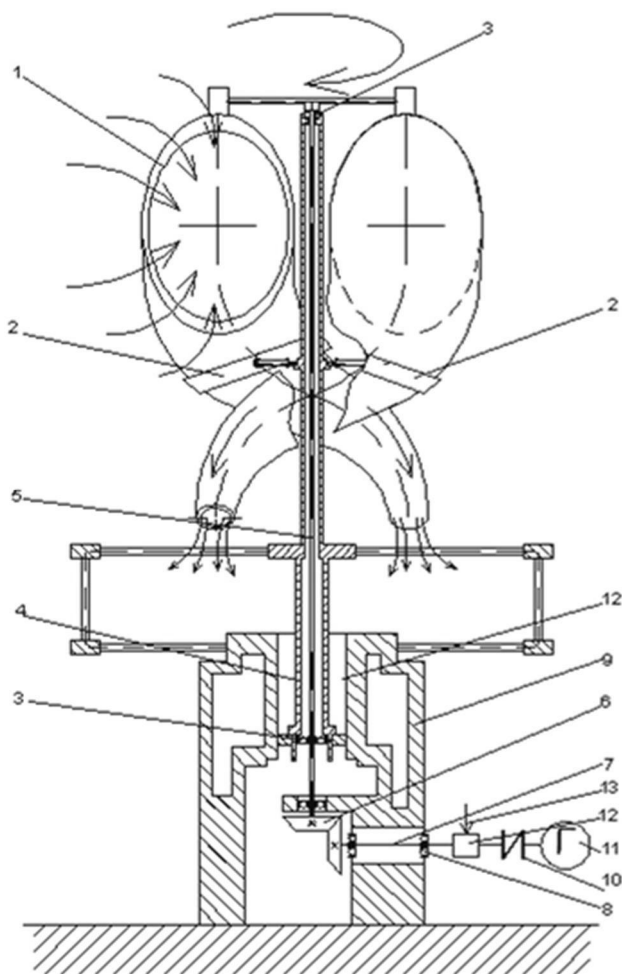
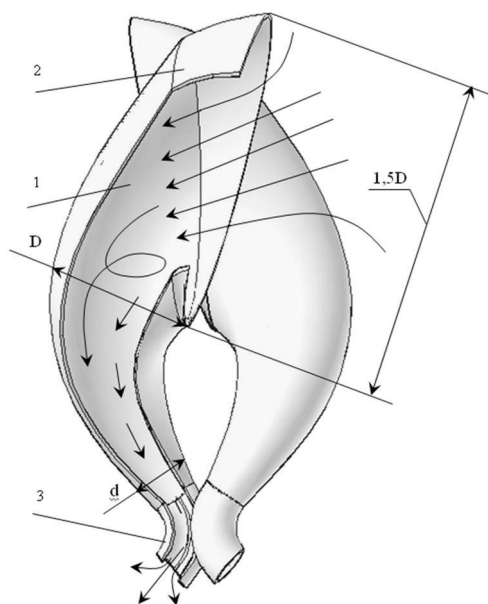


Рис. 3. Вітроенергетична установка із обертовим ротором

На рис.4 показано схематичне зображення відображення руху струменів повітря у ньому.



Для накопичення електроенергії в акумуляторі за наявності у ВЕУ повітряного потоку із швидкістю понад 3,0–3,5 м/с розблоковується гальмівний механізм 13 і з'єднується генератор 11 із акумулятором. Набігаючи на повітрязабірну частину повітровловлювачів 1 повітря створює тиск на їх поверхні, проходить по центральних частинах труб повітровловлювачів та, пришвидшившись завдяки змінам діаметрів труб, реактивним струменем виринає в атмосферу. Тиск повітря на поверхні повітрязабірних частин повітровловлювачів 1 та тиск реактивних струменів повітря, що виходить в атмосферу із повітровідвідних частин, є однонаправленими. У сукупності ці тиски перевищують тиск повітря, що обдуває тильний бік сусіднього повітровловлювача, і тому ротор повертається на  $180^{\circ}$  відносно нерухомої осі 4. При цьому зростають сили інерції маховика та передавальних механізмів і сили тертя в опорах кочення. До повітряного потоку розвертається повітрязабірна частина другого повітровловлювача, на яку діють сили тисків, як у попередньому випадку. Почергове сприйняття тисків повітровловлювачами 1 з боку повітряного потоку трансформується в однонаправлений обертовий рух ротора, який через вали 5 та 7, зубчасту передачу 6 та муфту 10 передається якореві генератора 11, на обмотках якого індукуються електричний струм, який накопичується в акумуляторі.

конструкції повітровловлювачів ротора для

Рис. 4. Конструкція повітровловлювача ротора нової вітроустановки

Повітровловлювач обертового ротора – це пустотіла труба, яка складається із трьох частин: центральної труби 1 із гвинтовою віссю і змінним діаметром поперечного перерізу, яка розміщена на максимальному її діаметрі  $D$ , повітрязабірної частини 2 та приєднаної до мінімального діаметра  $d$  труби повітровідвідної частини 3, які розгорнуто одна відносно одної на  $180^{\circ}$ . Для покращення умов проникання повітря всередину повітровловлювача його розгорнуто до потоку повітря повітрязабірну частину виконано у формі еліпса із малою віссю, яка дорівнює  $D$ , та великою віссю –  $1,5 D$ , причому площину еліпса повітрязабірника нахилено під кутом  $10\text{--}15^{\circ}$  до осі центральної труби 1. Центральну трубу виконано у вигляді гвинтової лінії. Довжина осі центральної труби 1 дорівнює  $2 D$ , а співвідношення мінімального та максимального діаметрів труби –  $d = 1/4 \cdot D$ .

Для вітру характерні змінні впродовж року середньорічні швидкості, внутрішні структури повітряного потоку (“троянди вітрів”, поривчастість, щільність повітря, турбулентність, температура, різновекторність течії по висоті тощо).

Під час набігання повітряного потоку на повернуту до нього повітрязабірну частину повітровловлювача, струмені повітря входять у середину центральної труби 1, створюють тиск на її внутрішню поверхню. Впродовж проходження повітря від повітрязабірної частини вздовж центральної труби із плавно зменшуваним діаметром, від  $D$  до повітровідвідної частини із діаметром  $d = 1/4 \cdot D$ , за законом Бернуллі, швидкість потоку повітря зростає до

$$V_{i2} = V_{i1} \cdot (S_1 / S_2) = V_{i1} \cdot (D^2 / d^2), \quad (1)$$

де  $V_{i1}$  – швидкість потоку повітря у повітрязабірній частині;  $D$  і  $S_1$  – відповідно діаметр і площа повітрязабірної частини;  $V_{i2}$  – швидкість потоку повітря у повітровідвідній частині;  $S_2$  – відповідно діаметр і площа повітровідвідної частини.

Кінетична енергія повітровідвідної частини вітроенергетичної установки

$$T_a = \frac{1}{2} \eta m_n V_a^2, \quad (2)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії повітродувної частини вітроенергетичної установки;  $m_n$  – маса повітря, що проходить через площу поперечного перерізу вихідного отвору повітродувної частини вітроенергетичної установки, ( $\text{кгс}^2/\text{м}$ );  $V_a$  – швидкість вітру ( $\text{м/с}$ ).

Маса повітря, яка проходить через площу поперечного перерізу вихідного отвору повітровідвідної частини вітроенергетичної установки за деякий елементарний проміжок часу  $\Delta t$ :

$$m_n = r \cdot V_i, \quad (3)$$

де питома щільність повітря  $r = \frac{\rho}{g}$ ;  $\rho$  – питома вага повітря ( $\text{кг/м}^3$ );  $V_i = Sdl$  – об’єм повітря, який виходить із повітровідвідної частини вітроенергетичної установки через площу поперечного перерізу  $S$  її вихідного діаметра на елементарній довжині потоку  $dl$ .

Тобто маса повітря, яка проходить через повітровідвідну частину вітроенергетичної установки за деякий елементарний проміжок часу:

$$m_i = \frac{\rho}{g} Sdl. \quad (4)$$

Елементарна довжина потоку  $dl$ , в якому рухається повітря зі швидкістю вітру  $V_a$  впродовж елементарного проміжку часу  $\Delta t$ :

$$dl = V_a \Delta t. \quad (5)$$

Отже, вираз для визначення маси повітря  $m_n$ , яке проходить через вихідний отвір повітровідвідної частини вітроенергетичної установки за елементарний проміжок часу  $\Delta t$ , з урахуванням (4) і (5) матиме вигляд:

$$m_n = \frac{\rho}{g} S V_a \Delta t. \quad (6)$$

Кінетичну енергію повітродувної частини вітроенергетичної установки з урахуванням (2) і (6) можна записати у вигляді:



$$T_a = \frac{1}{2} h \frac{g}{g} S V_a^3 \Delta t, \quad (7)$$

Кінетична енергія повітродувної частини вітроенергетичної установки, показаної на рис. 4, з урахуванням (7) і того, що площа поперечного перерізу її повітровідвідної частини (вихідного отвору)  $S = \frac{\rho d^2}{4}$  та з урахуванням збільшення у повітровідвідній частині швидкості вітру  $V_6$  до величини  $Vn_2$ , за законом Бернуллі (1) матиме вигляд:

$$T_a \frac{1}{2} h \frac{g}{g} \frac{\rho d^2}{4} \left( V_a \frac{D^2}{d^2} \right)^3 \Delta t = \frac{\rho}{8} h \frac{g}{g} V_a^3 \frac{D^6}{d^4} \Delta t. \quad (8)$$

а з урахуванням того, що у цій повітродувній частині  $d = \frac{1}{4} D$  її кінетична енергія буде:

$$T_a = 512 p h \frac{g}{g} d^2 V_a \Delta t, \quad (9)$$

потужність запропонованої повітродувної частини цієї установки матиме вигляд:

$$N_a = \frac{\dot{Q}_a}{t} = 512 p h \frac{g}{g} d^2 V_a^3. \quad (10)$$

На рис. 5 і 6 відповідно показані графічні характеристики змін максимальних значень теоретичних потужностей  $N_6$  повітродувної частини вітроенергетичної установки залежно від збільшень швидкості вітру  $V_6$  і діаметра  $d$  її випускного отвору.

Графічні залежності на рис. 5 побудовано за рівнянням (8), а на рис.6 – за рівнянням (10) за умови щільності повітря  $\rho=1,298$  при температурі повітря  $20^\circ\text{C}$  та без урахування втрат у повітродувній частині вітроенергетичної установки ( $\eta=0$ ).

Швидкість повітряного струменя цієї ВЕУ приблизно на порядок перевищує швидкість повітряного потоку у повітрозабірній частині. І внаслідок цього на виході із повітровловлювача повітря утворює потужний реактивний струмінь. Енергія цього реактивного струменя, який виривається з високою швидкістю із труби повітровловлювача, надає обертовому ротору додаткового пришвидшення, збільшуючи таким чином швидкість його обертання, крутний момент, а відповідно, і коефіцієнт корисної дії ВЕУ.

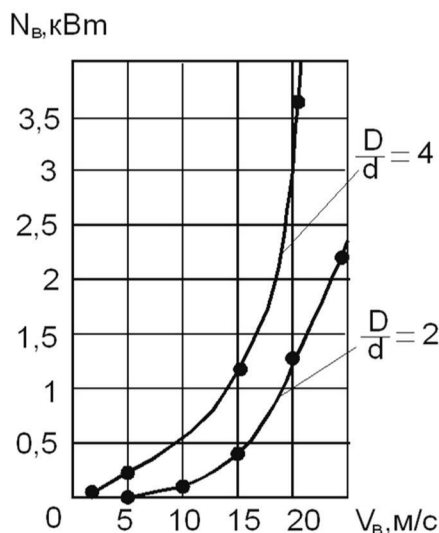


Рис. 5. Вплив збільшення швидкості потоку у повітровідвідній частині вітроустановки на зростання її теоретичної потужності за різних співвідношень діаметрів впускного і випускного отворів

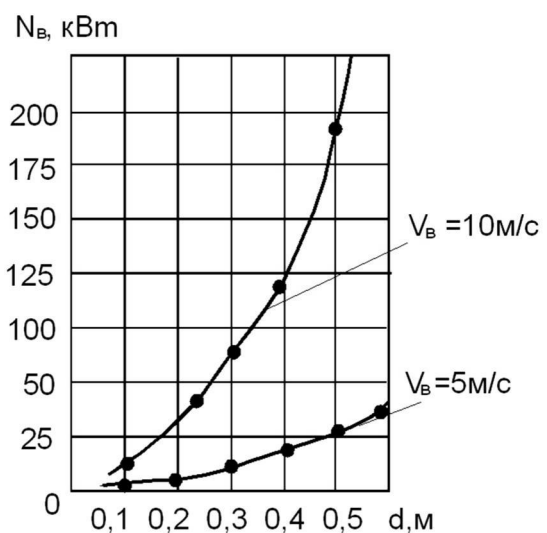


Рис. 6. Характер зміни теоретичної потужності вітроустановки залежно від збільшення діаметра її випускного отвору за різних значень швидкості вітру

При цьому понижувальним коефіцієнтом  $k_2 = (0,4 - 0,5)$  враховано, що тільки частина внутрішньої поверхні центральної труби у повному обсязі сприймає тиск повітряного потоку. Аналогічно, понижувальним коефіцієнтом  $k_3 = (0,45 - 0,55)$  враховано втрати енергії реактивного струменя повітря, який виходить до атмосфери через повітровідвідну частину.

**Висновок.** З рівняння (8) бачимо, що потужність цієї повітродувної частини вітроенергетичної установки значно зростає із збільшенням швидкості повітря і діаметра її вихідного отвору, а також залежно від співвідношення між вхідним і вихідним діаметрами їхніх отворів. Рівняння (10) відображає максимальну теоретичну потужність повітродувної частини такої ВЕУ. На практиці реальна потужність вітроенергетичної установки завжди буде меншою внаслідок тертя повітря об внутрішні стінки повітродувної її частини, збільшення температури і зменшення вологості повітря, втрат потоків повітря між вхідним і вихідним отворами, механічних і електромагнітних втрат тощо. Тому для встановлення реальної потужності запропонованої вітроенергетичної установки необхідно провести експериментальні дослідження для встановлення насамперед оптимальних співвідношень між діаметрами повітрозабірної і повітровідвідної її частинами.

Із врахуванням втрат на механічних передачах та опорах кочення валів, завдяки збільшенню на  $(20-25)\%$  швидкості та крутного моменту ротора, запропонованої нової конструкції ВЕУ, на  $(15-20)\%$  підвищується коефіцієнт корисної дії цієї ВЕУ.

Отже, збільшення сили тиску повітря на робочі поверхні ротора, запропонованої ВЕУ, призводить до збільшення частоти обертання та зростання крутного моменту ротора, а також дає змогу забезпечити стабільне його обертання за малих швидкостей руху повітря. Це не тільки розширить діапазон можливого використання ВЕУ на території із незначними швидкостями вітрів, а завдяки підвищенню швидкостей обертання ротора збільшить енерговіддачу ВЕУ такого типу.

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К.: ТОВ “ВіолаПрінт”, 2008. – 55 с. 2. Афтаназів І. С., Вікович І. А., Строган О. І., Муха О. В. Нова вітроустановка з обертовим ротором // Матеріали 9-ї міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 67 квітня 2017 р.). зб. наук. статей. – Львів: Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – с. 180–183. 3. Вікович І. А., Афтаназів І. С., Строган О. І., Бойко О. О. Підвищення ефективності вітроустановки з обертовим ротором // там само, с. 184–187. 4. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О. Ф. Онінко, Б. П. Коробко, В. М. Мханюк. – К.: УАН, Фенікс, 2008. – 168 с. 5. Дзензерский В. А. Ветроустановки малой мощности / В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков. – К.: Наукова думка, 2011. – 592 с. 6. Корендій В. М. Експериментальне дослідження аеродинамічних характеристик вітрової турбіни / В. М. Корендій // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 10–11 квітня 2013 р.). – Львів, 2013. – С. 71–74. 7. Корендій В. М. Математична модель аеромеханічної системи вітроустановки / В. М. Корендій, І. В. Кузьо // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2013. – № 2 (70). – С. 27–32. 8. Корендій В. М. Конструювання механізмів регулювання потужності тихохідних вітроустановок / В. М. Корендій // Промислова гідравліка і пневматика: Всеукраїнський науково-технічний журнал. – 2012. – № 3 (37). – С. 17–21. 9. Корендій В. М. Обґрунтування доцільності створення комбінованих вітроенергетичних установок на базі горизонтально-осьових роторів // Матеріали 9-ї міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 6–7 квітня 2017р.). зб. наук. статей. – Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – С. 188–191. 10. Невичерпна енергія: підруч. для студ. спец. “Нетрадиційні джерела енергії” вищ. навч. закл. / В. С. Кривцов, О. М. Олейников, О. І. Яковлев; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського “Харк. авіац. ін-т”, Севастоп. нац. техн. ун-т. – Х.: ХАІ, 2010. 11. Нетрадиційна енергетика: основи теорії і задачі: навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазена, Я. М. Гнатюшин. – Львів: Магнолія, 2008. – 188 с. 12. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії: підручник / С. О. Кудря. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 492 с. 13. Функціонування, стратегічний розвиток і регулювання відновлюваної енергетики / О. О. Трофименко, С. В. Войтко; Нац. техн. ун-т України “Київ. політехн. ін-т”. – К.: [Альфа Реклама], 2014. – 179 с. 14. Huth, Chr.: Dezentrale Automatisierung im Verteilungsnetz. Energy 2.0 – Kompendium 2011, publishindustry Verlag GmbH, ISSN 1866–1335.