

С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак

# **АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ. ЕНЕРГІЯ ВІТРУ**

**Навчальний посібник**

*Львів 2017*

*Видавництво «Магнолія 2006»*



620.92:551(0758)  
С40

С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак

**АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ.  
ЕНЕРГІЯ ВІТРУ**

Навчальний посібник



620.92:551](07 С40 2018

Сиротюк С.В. Альтернативні джерела енергії. Е-

---

Видавництво «Магнолія 2006»  
Львів 2018

ББК 31.63я73  
УДК 321/311/245  
С 40

Автори:

С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак

Рецензенти:

В. М. Головка, д. т. н., професор  
(Інститут відновлюваної енергетики НАН України);

І. З. Шур, д. т. н., професор  
(Національний університет "Львівська політехніка");

С. В. Мягкота, д. ф.-м. н., професор  
(Львівський національний аграрний університет).

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Львівського національного аграрного університету  
(протокол № 8 від 30 червня 2016 р.)*

**Сиротюк С. В.**

С 40 Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру : Навч. посіб. /  
С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак. – Львів : "Магнолія 2006",  
2018. – 182 с.

У навчальному посібнику викладено основні питання, що стосуються природи і потенціалу вітрової енергії. Висвітлено питання взаємодії вітрового потоку з вітроприймальними засобами, перетворення кінетичної енергії вітру на електричну. Подано матеріал щодо розрахунку параметрів вітроелектричних установок, описано пристрої та схеми практичного використання вітрової енергії.

Для студентів інженерних факультетів вищих навчальних закладів III – IV рівнів акредитації, магістрів, аспірантів, наукових співробітників, інженерів та експлуатаційників обладнання вітроенергетики.

Н82186

ББК 31.63я73

ISBN 978-617-574-114-6

© С.В. Сиротюк, В.М. Боярчук,  
В.П. Гальчак, 2018

© Магнолія 2006,2018

**НТБ ВНТУ**  
**м. Вінниця**

## ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА	5
1. ПРИРОДА І ЕНЕРГЕТИКА ВІТРУ	7
1.1. Природа і класифікація вітрів	7
1.2. Кінетична енергія вітру	10
1.3. Оцінка швидкості вітру за його дією	11
1.4. Вітроенергетичні ресурси	15
1.5. Розвиток вітроенергетики в Україні	19
2. ПАРАМЕТРИ ШВИДКОСТІ ВІТРУ	23
2.1. Структура вітрового потоку	23
2.2. Вертикальний профіль вітрового потоку	28
2.3. Розподіл вітру за швидкостями	35
2.4. Розподіл вітрів за напрямками	45
3. ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ	50
3.1. Вимірювання швидкості вітру	50
3.2. Побудова функції розподілу за результатами вимірювань	62
3.3. Оцінка розрахункової швидкості вітру	65
3.4. Використання довідкової бази даних	69
3.5. Репрезентативність результатів вимірювань швидкості вітру	72
4. ВІТРОПРИЙМАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ	77
4.1. Сила лобового тиску вітру	77
4.2. Взаємодія вітру з похилою поверхнею	81
4.3. Вирази для сил і моментів, що діють на лопать	85

4.4. Умови обтікання лопаті під час її обертання	89
4.5. Ротор горизонтально-осьової вітроенергетичної установки	93
4.6. Швидкохідність ротора	96
<b>5. ТЕОРІЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВОГО РОТОРА</b>	<b>100</b>
5.1. Класична модель ідеального ротора	100
5.2. Імпульсний варіант класичної моделі ідеального ротора	106
5.3. Рівняння зв'язку для елемента реального ротора	109
5.4. Момент і потужність реального ротора	112
5.5. Потужність горизонтально-осьової вітроустановки	119
5.6. Режим роботи ротора вітроустановки	121
<b>6. КЛАСИФІКАЦІЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК</b>	<b>127</b>
6.1. Класифікація вітроенергетичних установок	127
6.2. Структурні схеми вітроенергетичних установок	138
6.3. Схеми вітроенергетичних систем	142
6.4. Способи регулювання вихідної потужності вітроелектричних установок	152
6.5. Параметричні ряди вітроенергетичних установок	154
<b>7. ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ ТА РОЗРАХУНКИ</b>	<b>162</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК</b>	<b>174</b>

## ПЕРЕДМОВА

Відновлювана енергетика і надалі залишається пріоритетним напрямом розвитку енергетики України. Свідченням цього є зростаюча динаміка спорудження об'єктів відновлюваної енергетики як промислового, так і домашнього використання. Амбітні плани її перспективного розвитку в Україні спонукають навчальні заклади запроваджувати низку навчальних дисциплін, які покликані надати знання та прищепити навички в цій галузі.

У Львівському національному аграрному університеті для студентів факультету механіки та енергетики читають декілька навчальних дисциплін, які стосуються галузі відновлюваної енергетики, зокрема "Відновлювані джерела енергії", "Проектування систем відновлюваної енергетики", "Монтаж та експлуатація обладнання відновлюваної енергетики". Метою вивчення цих дисциплін є набуття майбутніми фахівцями знань про наявні в Україні відновлювані джерела енергії, їх природний потенціал, технічні можливості, засоби та умови використання в народному господарстві, будівництві й побутовій сфері. Одним із розділів зазначених навчальних курсів є енергія вітру.

Навчальний посібник "Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру" є другим виданням із серії навчальних посібників, започаткованих на кафедрі енергетики Львівського національного аграрного університету.

Виходячи з мети навчального курсу, теоретичні викладки обмежено матеріалами, необхідними для розуміння й елементарного аналізу закономірностей природних потоків вітрової енергії та механізмів їх перетворення під час взаємодії з вітроприймальними засобами. Їх обсяг дає змогу виконувати розрахунки, необхідні для проектування, впровадження та експлуатації вітроелектричних установок (ВЕУ) малої потужності. Розробка посібника загалом була орієнтована на використання малої вітроенергетики,

зокрема для автономного енергозабезпечення сільськогосподарських та житлових об'єктів.

Прийнята у посібнику послідовність викладу покликана, на думку авторів, сформуванню у читача цілісну картину проблеми використання вітрової енергії на практиці. Для поглибленого вивчення окремих питань варто звертатися до доступних першоджерел.

Автори цілком свідомі того, що в посібнику можливі окремі недоліки, упущення або неточності, які неминучі під час спроб власної інтерпретації окремих загальних положень. Тому наперед висловлюємо вдячність за можливі критичні зауваження й пропозиції, які буде враховано під час наступного доопрацювання посібника.

*Автори*

## 1. ПРИРОДА І ЕНЕРГЕТИКА ВІТРУ

### 1.1. Природа і класифікація вітрів

Вітер є одним із найпотужніших джерел енергії, що з давніх часів використовуються людиною, і за сприятливих умов може бути використаний у господарській діяльності в значно більших масштабах, ніж це є на сьогодні. Він виникає в приземному шарі внаслідок нерівномірного нагрівання неоднорідної земної поверхні Сонцем. Таким чином первинна сонячна енергія перетворюється на кінетичну енергію руху повітряних мас, потоки яких називаються вітром.

Протягом дня над морями й океанами повітря залишається порівняно холодним, оскільки значна частина енергії сонячного випромінювання витрачається на випаровування води або поглинається нею. Над сушею повітря прогрівається швидше і з розширенням піднімається у вищі шари атмосфери. Біля поверхні його заміщають розташовані над водними просторами холодніші і щільніші повітряні маси, що й призводить до виникнення вітру, як направленого переміщення великих мас повітря. Співвідношення площ водних басейнів і суходолу, його рельєф та структура поверхні формують вітри з певними параметрами, за якими здійснюється їх класифікація.

**Місцеві вітри.** Особливі місцеві умови рельєфу земної поверхні (море, рівнина, гори тощо) зумовлюють місцеві вітри. До них належать бризи, мусони тощо.

**Бризи.** Внаслідок зміни температур удень і вночі виникають берегові морські вітри, які називають бризами.

Удень при сонячній погоді суша нагрівається сильніше, ніж поверхня моря, тому нагріте повітря стає менш щільним і піднімається вгору. Водночас холодніше морське повітря спрямовується на сушу, утворюючи морський береговий вітер – бриз. Повітря, що піднімається над сушею,



рухається у верхньому шарі в бік моря і на деякій відстані від берега опускається вниз. Таким чином виникає циркуляція повітря: внизу – з моря на сушу, вгорі – від суші на море.

Уночі над сушею повітря охолоджується сильніше, ніж над морем, тому напрям циркуляції змінюється: внизу повітря рухається на море, а вгорі – з моря на сушу. Зона поширення бризу – близько 40 км обабіч берегової лінії і у висоту досягає від 200 до 300 м у середніх широтах. У тропічних широтах бризи спостерігаються майже протягом усього року, а в помірному поясі тільки влітку за спекотної погоди. В Україні бризи можна спостерігати влітку біля берегів Чорного й Азовського морів.

**Мусони.** Річні зміни температури материкової частини суші та прилеглих до материків великих морів і океанів також викликають циркуляції, аналогічні бризам, але завдяки великим розмірам – з річним циклом повторення. Ці вітри мають назву морських мусонів. Влітку з моря на сушу дмуть морські мусони, а взимку, навпаки – із суші на море материкові. Сильні мусони типові для південного узбережжя Азії, що прилягає до басейну Індійського океану: влітку вони мають південно-західний напрям, а взимку – північно-східний. На східному узбережжі Азії взимку дмуть суворі північно-західні материкові вітри, а влітку – південно-східні і південні морські вологі вітри.

**Пасати.** Земна куля прогривається Сонцем нерівномірно: тепле повітря екваторіальної зони постійно віднімається вгору до висоти 4 км і розповсюджується в напрямі полюсів. У протилежних напрямках, але поблизу земної поверхні, до екваторіальної зони приходять два потоки холоднішого повітря помірних широт, відомі як пасати. Внаслідок обертання Землі із заходу на схід обидва потоки під дією сили Коріоліса відхиляються в західному напрямі. Таким чином, у Північній півкулі пасати дують з північного сходу, у Південній – із південного сходу, як це показано на

рис. 1.1. Поблизу екватора обидва потоки слабшають з переходом у зону спокою зі слабкими змінними вітрами.

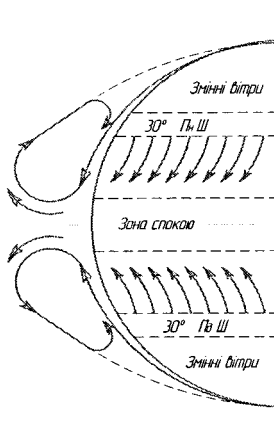


Рис. 1.1. Схема загальної циркуляції земної атмосфери

Зона пасатів поширюється майже до  $30^\circ$  північної і південної широт. Відрізняються вони рівномірністю повітряних течій як за напрямом, так і за швидкістю. Середня швидкість південно-східних пасатів Північної півкулі на поверхні землі сягає 6–8 м/с. Ці вітри поблизу великих континентів порушуються сильними річними коливаннями температури та тиску над материками. Висота шару пасатів становить від 1 до 4 км.

Вище над пасатами розташований шар змінних вітрів, а над цим шаром знаходиться зона антипасатів, що рухаються в протилежному напрямі до полярних зон. Висота шару антипасатів змінюється від 4 до 8 км залежно від пори та місяця року.

У субтропічних широтах у поясах високого тиску зони пасатів змінюються штильовими областями. На північ і південь від цих областей приблизно до  $70^\circ$  на всіх висотах діють вітри між західним та південно-західним напрямками в Північній півкулі і між західним та північно-західним

– у Південній півкулі. Крім того, у цих широтах в атмосфері безперервно виникають і згасають вихрові рухи повітря, що ускладнюють просту схему загальної циркуляції атмосфери, показану на рис. 1.1.

## 1.2. Кінетична енергія вітру

Як відомо, повітря складається з частинок (атомів і молекул), які в мікроскопічних замкнених об'ємах завжди рухаються хаотично одна відносно одної, але з різними швидкостями. Натомість у великих відкритих об'ємах з різними температурними зонами виникають додаткові напрямлені потоки частинок, які називають вітром. Якщо в однорідному потоці виділити елемент течії масою  $m$ , то його кінетичну енергію можна розрахувати через швидкість переміщення  $v_0$  за відомою формулою:

$$E_k = \frac{m \cdot v_0^2}{2}. \quad (1.1)$$

Масу можна виразити через густину потоку  $\rho$ , який проходить через переріз  $S$  зі швидкістю  $v_0$  протягом часу  $t$ :

$$m = \rho S v_0^2 t. \quad (1.2)$$

З урахуванням цього співвідношення кінетична енергія потоку запишеться таким виразом:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho S v_0^3 t. \quad (1.3)$$

Вітроенергетичні розрахунки проводять виходячи з потужності незбуреного потоку:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S v_0^3. \quad (1.4)$$

Якщо густину виразити у  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ , переріз – у  $[\text{м}^2]$ , а швидкість – у  $[\text{м}/\text{с}]$ , то потужність виражається в джоулях за секунду (Дж/с) або ватах (Вт).

Розрахуємо для прикладу потужність вітрового потоку швидкістю 8 м/с, що проникає через поверхню площею  $1 \text{ м}^2$  за нормальних атмосферних

умов: тиск – 101,3 кПа, або 760 мм рт. ст., температура – 15 °С, густина  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ . Отже,  $P_0 = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 1 \cdot 8^3 = 330 \text{ Вт/м}^2$ .

Зважаючи на кубічну залежність від швидкості, уже при 11,57 м/с, питома потужність потоку (віднесена до одиниці площі поверхні) за своїм енергетичним потенціалом дорівнює потужності стандартного потоку сонячної енергії інтенсивністю 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Таким чином, обидва потоки альтернативної енергії мають співмірну просторову концентрацію.







Рівняння (1.4) отримане за припущення сталого в часі та рівномірного просторового розподілу вітрового потоку. Але воно містить дві змінні величини – густина повітря і його швидкість. Перша є повільнозмінною величиною в невеликому інтервалі значень – від 1,29 кг/м<sup>3</sup> на рівні моря до 1,11 кг/м<sup>3</sup> на висоті 1 км. Тому мінливість цього параметра враховують переважно лише в проектних розрахунках. Натомість інтервал швидкості вітру дуже широкий – від нуля, при повному штилі, до штормового – 25-30 м/с, який до того ж відзначається значною просторово-часовою нерівномірністю з випадковим законом відхилення від середніх значень. Причому просторова нерівномірність потоку часто співмірна з розмірами приймача вітрової енергії, а часова нестабільність – динамічними параметрами вітроенергетичного механізму.

### 1.3. Оцінка швидкості вітру за його дією








До широкого впровадження вимірювальних приладів вітер характеризували за його впливом на оточення, використовуючи бальну систему оцінювання. 1805 року британський адмірал і гідрограф Френсіс Бофорт розробив 12-бальну шкалу для оцінювання сили (швидкості) вітру. У табл. 1.1 наведено шкалу Бофорта (для діапазону 0–12 балів), прийняту за міжнародною угодою 1946 року (швидкість вітру дається для висоти 10 м над поверхнею суші).

Таблиця 1.1

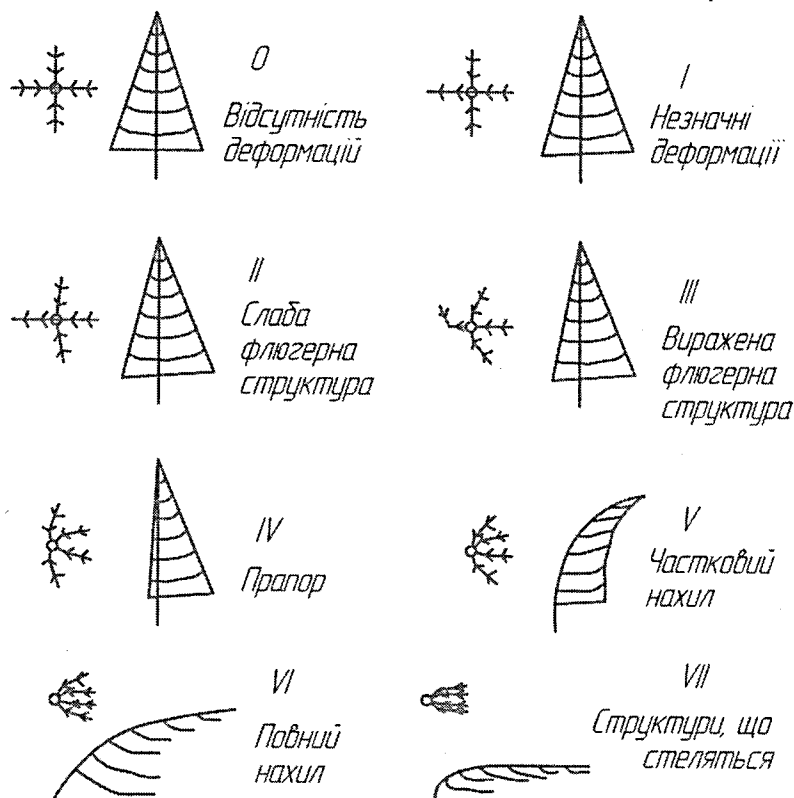
## Шкала вітру Бофорта

Бали вітру	Відповідна швидкість вітру, м/с	Назва, словесна характеристика вітру	Вплив вітру на вітроустановку	Умови для роботи вітрової установки в даному діапазоні вітру	Графічне зображення характеристики вітру
1	2	3	4	5	6
0	0–0,2	Штиль (дим піднімається вертикально, листя на деревах нерухоме)	Немає	Відсутні	
1	0,3–1,5	Тихий вітер (легкий рух повітря, дим трохи відхиляється)	Немає	Відсутні	
2	1,6–3,3	Легкий вітер (рух повітря відчувається обличчям, листя шелестить)	Починають обертатись тихохідні та деякі швидкохідні	Стартові умови, мінімальна потужність	
3	3,4–5,4	Слабкий вітер (листя і тонкі гілки на деревах гойдаються)	Стартують всі вітроустановки	Для тихохідних вітроустановок умови хороші, для швидкохідних – мінімальна потужність	
4	5,5–7,9	Помірний вітер (верхівки дерев гнуться, гойдаються невеликі гілки, піднімається пил)	Потужність тихохідних вітроустановок досягає номінальної, швидкохідних – до 30% Для тихохідних	Для тихохідних вітроустановок умови дуже хороші, для швидкохідних – задовільні	
5	8,0–10,7	Свіжий вітер (коливаються гілки і тонкі стовбури дерев)	вітроустановок номінальний та максимальний режим роботи, для швидкохідних – значна частина досягає номінальної потужності	Для всіх вітроустановок умови дуже хороші	

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6
6	10,8–13,8	Сильний вітер (гойдаються товсті гілки)	Обмеження потужності тихохідних вітроустановок, для всіх швидкохідних досягнення номінальної потужності	Для тихохідних вітроустановок умови допустимі, для швидкохідних дуже хороші	
7	13,9–17,1	Потужний вітер (розгойдуються стовбури дерев, гнуться великі гілки, йти проти вітру важко)	Зупинка тихохідних вітроустановок, обмеження потужності швидкохідних	Для тихохідних вітроустановок умови гранично допустимі, для швидкохідних допустимі	
8	17,2–20,7	Дуже потужний вітер (розгойдуються великі дерева, ламаються невеликі гілки, дуже важко ходити)	Відключення значної кількості швидкохідних вітроустановок	Допустимі для швидкохідних вітроустановок	
9	20,8–24,4	Шторм (невеликі пошкодження будівель, ламаються товсті гілки дерев)	Відключення всіх швидкохідних вітроустановок	Гранично допустимі для швидкохідних вітроустановок	
10	24,5–28,4	Сильний шторм (дерева ламаються або вириваються з корінням, сильні пошкодження будівель)	Критичні розрахункові навантаження	Неприпустимі	
11	28,5–32,6	Жорстокий шторм (великі руйнування)	Можливе руйнування вітроустановок	Неприпустимі	
12	понад 32,6	Ураган (спустошливі руйнування)	Руйнування вітроустановок	Неприпустимі	

Наближено швидкості вітру можна також оцінювати за індексами деформації Гріггса-Патмана (Griggs-Putman), зміст яких впливає з рис. 1.2.



Індекси деформації Гріггса-Патмана (Griggs-Putman)

Індекс	I	II	III	IV	V	VI	VII
Швидкість вітру, м/с	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	9-10	10+

Рис. 1.2. Характеристика індексів деформації Гріггса-Патмана

#### 1.4. Вітроенергетичні ресурси

Завдяки вітрам відбувається перерозподіл теплових потоків між різними ділянками земної поверхні, тому їх параметри постійно відстежуються мережею метеостанцій. За прийнятою в метеорології методикою, вимірювання швидкості вітру відбувається що три години на висоті 10–20 метрів. За результатами вимірювань розраховують середньодобову, середньомісячну та середньорічну швидкість вітру окремого майданчика. Сукупність даних вітрового режиму за період не менше ніж 20 років, які дають змогу простежити закономірності зміни швидкості вітру протягом доби, місяця, року, визначати його енергетичні характеристики, а також продуктивність вітроустановок, вітроелектростанцій і їх вітрові навантаження, називають вітроенергетичним кадастром. Основними характеристиками вітроенергетичного кадастру є: миттєва, середня, середньодобова, середньомісячна та середньорічна швидкості вітру, параметри його поривів, максимальна швидкість і повторюваність.

Відповідно до зарубіжної і вітчизняної класифікації вітроенергетичний ресурс території оцінюють величиною потенціалу, який поділяють на загальний (теоретичний, природний), технічно досяжний та економічно доцільний. *Загальний* вітроенергетичний потенціал дорівнює сумарній кінетичній енергії повітряних мас над деякою територією за багаторічний період спостереження. За оцінками експертів, він може становити 1,5–2,5 % обсягу сонячної енергії. Цей показник переважно використовують для потреб перспективного планування розвитку регіонів. Натомість для потреб вітроенергетики зручніше користуватися поняттям питомого потенціалу – енергії, віднесеної до площі території. Її розраховують як середню питому енергію вітру і вимірюють у  $[МВт \cdot год/м^2]$  або у  $[МДж/м^2]$ .

*Технічно досяжний потенціал* – це частина природного загального потенціалу, яку можна реалізувати сучасними технічними засобами вітроенергетики на певній території. За даними Атласу енергетичного



потенціалу відновлюваних джерел енергії України 15-19% річного обсягу енергії вітру, що проходить крізь переріз поверхні вітроколеса, можна перетворити на корисну енергію. Річний технічний вітроенергетичний потенціал дорівнює 30 млрд кВт·год. Водночас у перспективних регіонах з 1 м<sup>2</sup> перерізу площі вітроколеса очікувані обсяги виробництва електроенергії складають 800–1000 кВт·год/м<sup>2</sup> за рік.

*Економічно доцільний вітроенергетичний потенціал* визначається як частина технічного потенціалу, який можна реалізувати з економічно виправданими затратами порівняно з традиційними енергоресурсами. Економічний потенціал визначають за результатами техніко-економічного обґрунтування конкретної проєктної пропозиції.

В Україні енергетичний потенціал вітру визначений доволі точно, оскільки розрахований за результатами систематичних 40-річних вимірювань швидкості вітру густою мережею метеорологічних станцій та пунктів. На їх основі було виконано районування території України за перспективністю використання енергії вітру (табл. 1.2, рис. 1.3).

Сумарна площа, на якій доцільним є промислове отримання електричної енергії від ВЕУ, становить близько 20 % території України. Можливі обсяги економії умовного палива (1 т у. п.  $\approx$  30 ГДж) в Україні наведені у табл. 1.3.

Енергетичні установки зазвичай використовують вітер у приземному шарі на висоті до 100 м від земної поверхні, тому найбільший інтерес становлять характеристики руху повітряних потоків саме в цьому шарі. Класифікація вітрового потоку на різних висотах залежно від швидкості та питомої потужності наведена у табл. 1.4.

Майже у всіх кліматичних зонах України вітровий потенціал зростає з висотою відносно показника на рівні 10-метрової відмітки (флюгерної висоти) таким чином: на висоті 30 м – в 1,5 раза; на висоті 60 м – у 2 рази; на висоті 100 м – у 2,5 раза.

182186

Таблиця 1.2

Районування України за потенціалом енергії вітру

Район	Показники районування							оцінка потенціалу вітрової енергії	
	середня річна швидкість вітру, м/с	питома потужність вітрової енергії, Вт/м <sup>2</sup>		сумарні вітрові енергоресурси, МДж/м <sup>2</sup>	тривалість, год річної швидкості вітру, м/с				
		потенціальної зованої	утилі- цованої		загальна	безпе- ревна	> 3		
Убережжя Чорного і Азовського морів, Південний берег Криму, вершини Українських Карпат та Кримських гір	5,5-6,5	250-300	200-250	3000-9500	7000-8000	1250-6500	5500-6500	20-35	Дуже високий потенціал. Найбільш сприятливі умови вітровикористання
Донецька височина, Приазовська та Причорноморська низовини	5,0-6,0	200-250	200-250	6000-7500	4500-5000	2250-2750	4500-5000	17-25	Високий потенціал. Сприятливі умови вітровикористання
Подільська та Придніпровська височини	4,0-5,0	150-200	150-200	4500-5500	3500-4500	2250-4750	400-5500	15-20	Достатній потенціал. Досить сприятливі умови
Поліська та Придніпровська низовини, Волинська височина	3,0-4,5	50-120	30-100	1500-4500	1000-3500	4000-5000	3500-5000	12-17	Невисокий потенціал. Обмежено сприятливі умови
Передкарпаття, Закарпатська низовина, долини Українських Карпат та Кримських гір	1,5-2,5	10-40	5-10	200-500	10-300	5750-6250	2500-3000	10-15	Низький потенціал. Несприятливі умови вітровикористання

ІНТБ ВНТУ  
м. Вінниця

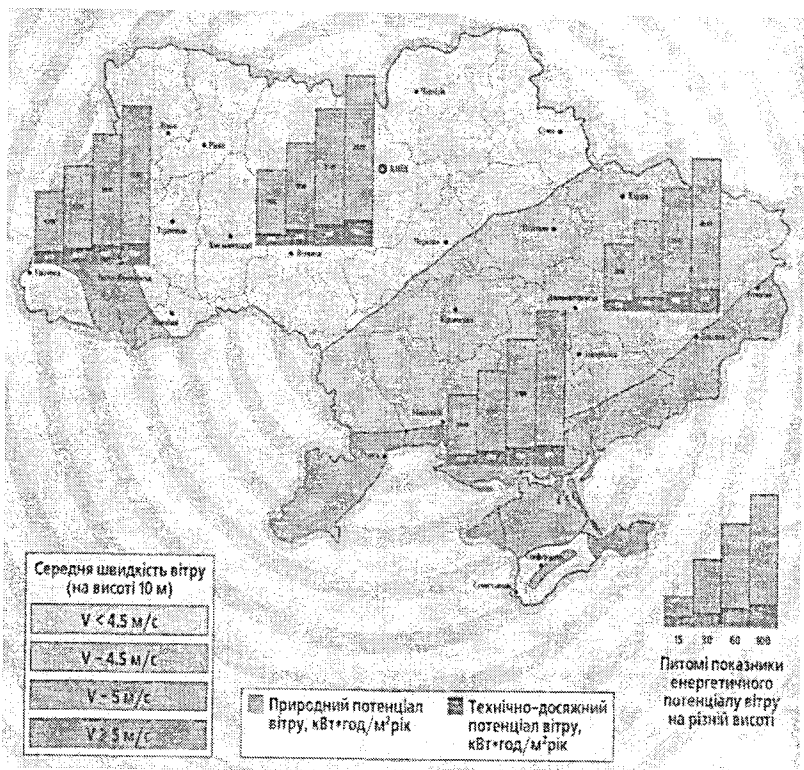


Рис. 1.3. Карта потенціалу енергії вітру в Україні

Таблиця 1.3

## Потенціал енергії вітру в Україні

Загальний потенціал		Технічний потенціал		Економічно доцільний потенціал	
кВт·год/рік	т у. п./рік	кВт·год/рік	т у. п./рік	кВт·год/рік	т у. п./рік
$270,0 \cdot 10^9$	$97,2 \cdot 10^6$	$30,0 \cdot 10^9$	$10,8 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^6$

Примітка. Можлива економія органічного палива за рахунок використання енергії вітру подана в одиницях умовного палива з розрахунку витрати палива на теплових електростанціях (360 г у. п. для виробництва 1 кВт·год електроенергії).

Таблиця 1.4

Класифікація вітроенергетичних ресурсів залежно від середньорічної швидкості вітру або середньорічної питомої потужності вітру на висоті 10 і 50 м від земної поверхні

Клас	Висота 10 м		Висота 50 м	
	швидкість вітру, м/с	питома потужність, Вт/м <sup>2</sup>	швидкість вітру, м/с	питома потужність, Вт/м <sup>2</sup>
1	0–4,4	0–55	0–5,6	0–113
2	4,4–5,1	55–86	5,6–6,4	113–169
3	5,1–5,6	86–113	6,4–7,0	169–221
4	5,6–6,0	113–139	7,0–7,5	221–272
5	6,0–6,4	139–169	7,5–8,0	272–330
6	6,4–7,0	169–221	8,0–8,8	330–440
7	7,0–9,4	221–536	8,8–11,9	440–1087

За наведеними даними, в Україні найперспективнішими для розвитку вітроенергетики територіями є Автономна Республіка Крим, гірські масиви та передгір'я Карпат, узбережжя Чорного та Азовського морів, а також Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька, Донецька і Луганська області.

### 1.5. Розвиток вітроенергетики в Україні

Енергія вітру, поряд зі спаленням деревини, була найчастіше використовуваною людиною відновлюваною енергією. На підставі історичних записів можна припустити, що вже у XVIII ст. до н. е. використовували енергію вітру.

Перша паливна криза 1957 року та друга у 1975 році зумовили інтенсивний розвиток вітроенергетики як джерела приведення в рух генераторів, унаслідок чого її було зараховано до професійної енергетики,

хоча це не стосується всіх країн, оскільки в Данії вітрові електростанції працювали ще до 1939 року.

У 2013 році українська вітроенергетика відзначала своє двадцятиріччя, якщо точкою відліку вважати дату запуску першої вітроелектричної станції (ВЕС) в країні – Актаської ВЕС. Хоча першим етапом розвитку вітроенергетики України можна вважати 30-ті роки минулого століття. Під керівництвом винахідника Юрія Кондратюка (А. Шаргей) був розроблений і встановлений експериментальний вітроагрегат потужністю 100 кВт у м. Балакліві. Надалі Ю. Кондратюком спроектовано вітряк на 1000 кВт. Наступним проектом геніального винахідника став двоповерховий вітроагрегат загальною потужністю 10 МВт (по 5 МВт на кожному рівні). Висота до першого рівня складала 65 м і до другого – 150 м. На жаль, ідеї Ю. Кондратюка так і залишилися проектами, хоча фундамент для 10-мегаватного вітряка все ж був споруджений у Криму на горі Ай-Петрі.

Другий етап розвитку вітроенергетики збігається з початком процесу конверсії в колишньому Радянському Союзі. У 1987 році постало питання про закриття проекту з повороту на південь північних річок – Єнісею, Лени. Величезна кількість грошей, відпущена Радянським Союзом на цей проект, залишилася в Міністерстві водного господарства СРСР. За ініціативою конструкторського бюро "Південне" (м. Дніпропетровськ), частину коштів від цього проекту було спрямовано на розвиток вітроенергетики.

Третій етап розвитку вітчизняної вітроенергетики розпочався з Указу Президента України № 159 від 2 березня 1996 року "Про будівництво вітрових електростанцій" і Постанови Кабінету Міністрів України від 2 лютого 1997 року "Комплексна програма будівництва вітрових електростанцій". Основною метою програми було створення національного виробництва вітрових турбін і введення в експлуатацію 1990 МВт вітрових потужностей до 2010 року. У рамках програми повністю освоєно виробництво ліцензійних ВЕУ USW 56-100 одиничною потужністю

107,5 кВт. Ліцензія американської компанії Kennetich Wind Power була передана в 1993 році СП "Уінденерго". Починаючи з 2003 року розпочато освоєння ліцензійних вітротурбін Т600–48 одиничною потужністю 600 кВт бельгійською компанією Turbowinds. На кінець 2010 року у рамках комплексної програми в Україні встановлено 701 вітротурбіну USW 56-100 (107,5 кВт) і 20 вітротурбін Т600–48 (600 кВт). За підсумками 2010 року сумарне виробництво електроенергії вітроелектростанціями України склало 40,2 млн кВт·год. На жаль, виконання програми не дало очікуваного ефекту і вона була закрита.

Динаміку встановленої потужності ВЕС в Україні можна простежити за даними рис. 1.4.

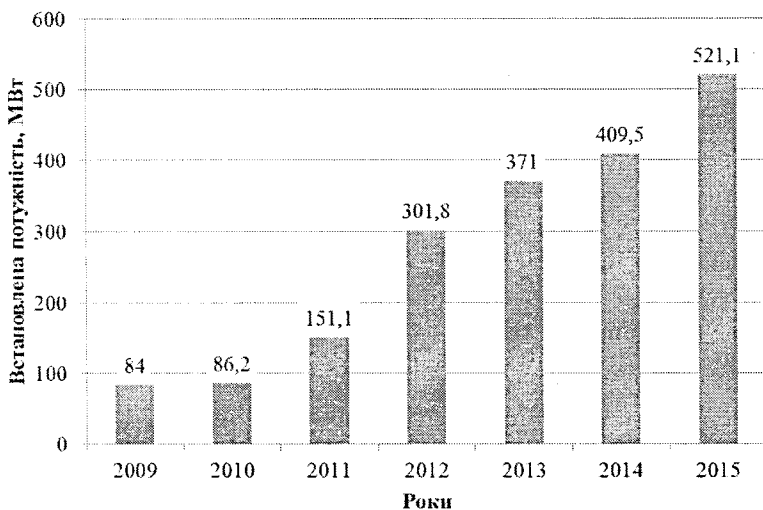


Рис. 1.4. Динаміка зростання потужності вітроелектричних станцій в Україні

Перспективними планами розвитку вітроенергетики України було доведення встановленої потужності у 2014 році до 600 МВт і у 2015 році – до 900 МВт.

Перспективними планами використання відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії на Львівщині до 2020 року передбачається будівництво вітрових електростанцій загальною потужністю 400 МВт. Щодо територій, на яких будівництво ВЕС мало б найбільшу ефективність, то це райони Орівського гірського хребта (Сколівський район) – 25–30 МВт, села Рибник (Дрогобицький район) – 6 МВт, села Ісаї (Турківський район) – 14 МВт, села Явора (Турківський район) – 35 МВт, хребти Оровій і Верхній Оровій (Старосамбірський район) – 65 МВт, а також пагорби в Золочівському районі.

На сучасному етапі розвитку промислової вітроенергетичної галузі в Україні інтенсивно розвиваються ВЕС на базі установок мегаватного класу.

### **Питання для самоконтролю**

1. Розкрийте природу виникнення вітрового потоку.
2. Охарактеризуйте різновиди вітрів.
3. Запишіть формулу для визначення потужності вітрового потоку.
4. Яким чином можна здійснити візуальну оцінку швидкості вітру?
5. Дайте визначення енергетичного кадастру.
6. Охарактеризуйте види вітроенергетичного потенціалу.
7. Назвіть найбільш перспективні райони України для розвитку вітроенергетики.
8. Зробіть короткий історичний огляд розвитку вітроенергетики у світі та в Україні.

## 2. ПАРАМЕТРИ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

### 2.1. Структура вітрового потоку

З погляду мікроскопії вітер є впорядкованим потоком вільних частинок – молекул та їх тимчасових утворень. Швидкість вітру є рівнодійною швидкостей хаотичного руху окремих частинок та напрямленої макроскопічної складової, що виникає внаслідок градієнта тиску. У макроскопічних об'ємах рухом окремих частинок нехтують, але хаотична природа їхнього руху є причиною структурування єдиного потоку повітря на дрібніші потоки. Останні характеризують середньостатистичними величинами: швидкістю, перерізом, напрямом, часом життя тощо. З іншого боку, у земній атмосфері, як макроскопічно нерівноважній системі, постійно зароджуються та зникають вертикальні й горизонтальні повітряні потоки різного масштабу. Вітер, зустрічаючи на своєму шляху інші потоки або перешкоди земної поверхні, також частково змінює швидкість, напрям, розбивається на окремі потоки (турбулізується) або, навпаки – посилюється об'єднуючись з іншими потоками. Таким чином, у суцільному потоці повітря можна виділити окремі фрагменти з іншою швидкістю, які називають поривами.

У загальному випадку порив характеризують часовою залежністю швидкості потоку протягом періоду його існування. Параметри цієї залежності – швидкість наростання і спадання, форма й амплітуда відхилення – разом характеризують структуру пориву. Тривалість пориву рідко перевищує кілька секунд: тривалі і сильні пориви називають шквалами. Вітер з частими поривами називають поривчастим, а з тривалими і сильними – шквальним. Типову структуру пориву, зареєстрованого в одній точці малоінерційним анемометром, наведено на рис. 2.1.

Миттєвою вважають швидкість, виміряну малоінерційним приладом за період, що не перевищує 0,2 с. Випадкові відхилення миттєвої швидкості



формують пориви різної амплітуди й тривалості, хід яких позначено пунктирною лінією. Потовщеною суцільною лінією позначено зміну середньої швидкості вітру, яку реєструють стандартними анемометрами з часовим усередненням до 10 с.

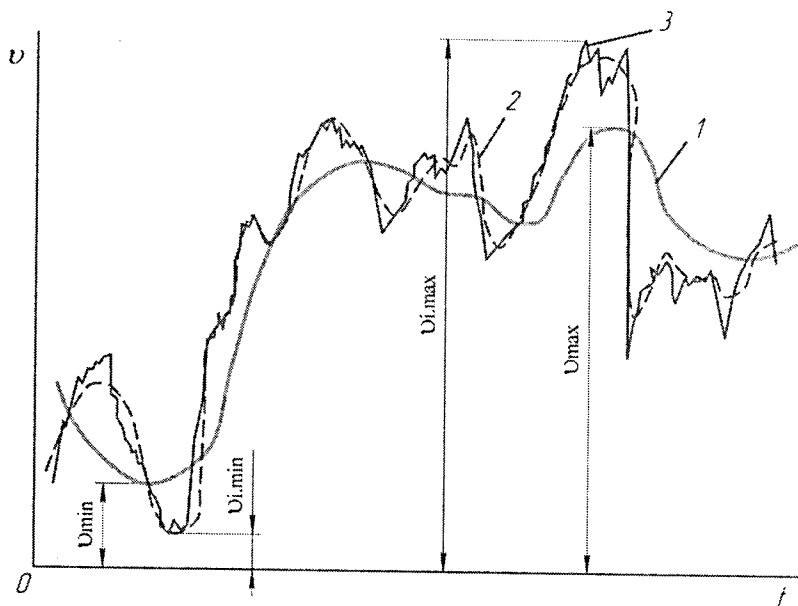


Рис. 2.1. Схематичний запис швидкості вітру з різним періодом усереднення: 1 – тривалістю; 2 – середньої тривалості; 3 – миттєві значення

На рис. 2.2 наведено структуру окремого пориву вітру. Амплітуда пориву 1 за час формування пориву 2 протягом 0,3–0,35 с досягла максимального значення, удвічі перевищуючи усереднену протягом 2 с миттєву швидкість. Час спадання пориву виявився приблизно рівним часу формування, а варіація швидкості (різниця між максимальним і мінімальним значеннями) приблизно удвічі більша за амплітуду пориву.

Характерні часові рамки існування поривів однозначно пов'язані з просторовою нерівномірністю потоку. Наприклад, за середньої швидкості

вітру в 10 м/с порив тривалістю 0,35 с формує просторовий перепад швидкості розміром  $10 \times 0,35 = 3,5$  м. Сильні пориви тривалістю приблизно 1 хв називають шквалами. Поривчастість потоку  $K_{\text{пор}}$  кількісно оцінюють відношенням максимальної швидкості  $v_{\text{max}}$  до середньої  $\bar{v}$  за вибраний інтервал часу (зазвичай не більше 2 хв):

$$K_{\text{пор}} = \frac{v_{\text{max}}}{\bar{v}}. \quad (2.1)$$

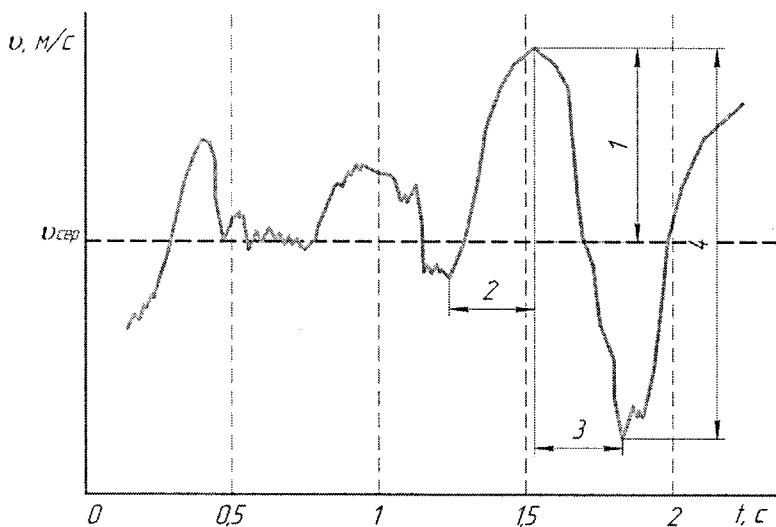


Рис. 2.2. Схема формування пориву вітру:

1 – амплітуда пориву; 2 – період формування пориву; 3 – період спадання пориву; 4 – варіація швидкості

Нерідко причиною руйнування вітроагрегату є не стільки надмірна швидкість вітру, скільки його динаміка за короткі проміжки часу: прискорення і тривалість поривів, їх збіг у різних точках охопленої поверхні вітроколеса. За сильних поривів у елементах вітроенергетичної установки можуть виникати значні поперечні навантаження, нехтування якими загрожує механічній міцності конструкції. Саме тому перед

проектуванням вітроенергетичних установок необхідно проводити попереднє дослідження вітрових характеристик (анеморозвідку) перспективних майданчиків для їх встановлення.

Параметри мікропульсацій, які впливають на механічну стійкість вітроенергетичних установок (ВЕУ) та їх елементів (опор, лопатей тощо), встановлюють спектральним аналізом вітрового потоку. Пульсації (варіації) вітру кількісно характеризують різницею між сусідніми максимальним та мінімальним значеннями швидкості. Їх просторово-часові властивості найчастіше вивчають методами композиційного аналізу закономірної і стохастичної складових мінливості потоку у вибраному інтервалі часу і на обмеженій території. Відтак результати вимірювання швидкості вітру інерційними приладами з часом усереднення в 1 хв, прийнятною за стандартами метеорології (рис. 2.3), у випадку вітроенергетики недостатні, оскільки таке усереднення певною мірою приховує дрібніші деталі структури потоку, але суттєві для роботи вітроенергетичних установок.

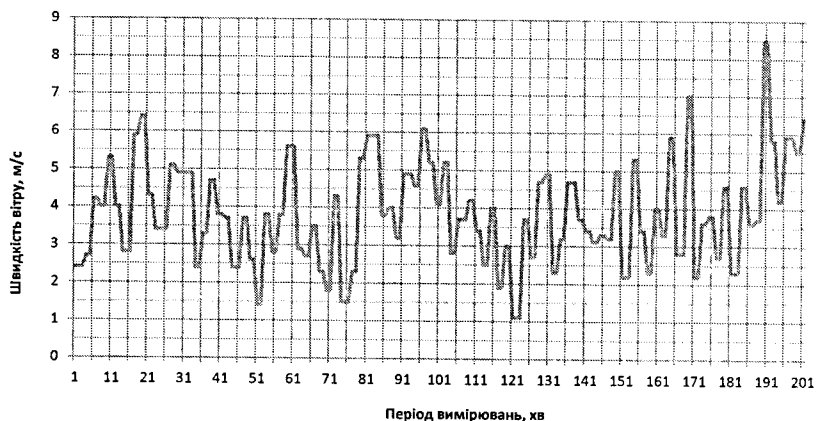


Рис. 2.3. Осцилограма вітрового потоку з усередненням за 1 хв, отримана з метеорологічної станції La Crosse WS-2350

У загальному випадку швидкість вітру містить закономірну та випадкову (стохастичну) складові. Закономірними переважно вважають сезонні значення середньої швидкості вітру, які формуються великомасштабними атмосферними циркуляціями разом з накладеними на них місцевими вихровими утвореннями менших масштабів. Натомість середньоденні відхилення швидкості від сезонних значень, а також пориви вітру є, скоріш, випадковими величинами.

Середнє значення швидкості вітру прийнято розраховувати як середнє арифметичне результатів вимірювань  $v_i$ , проведених через рівні проміжки часу:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}. \quad (2.2)$$

Припускається, що за випадкового характеру зміни швидкості вітру і великого масиву даних ймовірність отримати значення у певному діапазоні швидкостей пропорційна частоті результатів. У разі обмеженого числа результатів усі обчислення проводять за загальними правилами математичної статистики.

Середньодобову швидкість  $\bar{v}_{\text{доб}}$  знаходять за формулою

$$\bar{v}_{\text{доб}} = \frac{\sum_{j=1}^{24} v_{\text{год}}}{24}. \quad (2.3)$$

Середньорічну швидкість  $\bar{v}_p$  розраховують за формулою

$$\bar{v}_p = \frac{\sum_{j=1}^{365} v_{\text{доб}}}{365}. \quad (2.4)$$

Середні значення швидкостей у регіоні, як правило, визначають за даними спостережень на місцевих метеостанціях, а в низці випадків – за матеріалами анеморозвідок. Залежно від категорії й класу метеостанції, вимог і особливостей об'єктів, розташовуваних поблизу обслуговуючих

станцій, приймають різні метеорологічні терміни спостережень. Традиційно це інтервали в 4 або 8 год з вимірюваннями в певний час, але на частині метеостанцій і спеціальних об'єктів ведуть безперервний запис швидкостей (наприклад, на телевежах, при аеропортах, у зонах з аномальним вітровим режимом тощо) або проводять щогодинні спостереження. На метеостанціях отримують і накопичують достатньо точні для практики відомості про середньоперіодні швидкості, які порівняно з даними, обчисленими за середньогодинними швидкостями, дають відносно невелику похибку.

## 2.2. Вертикальний профіль вітрового потоку

Вітер виникає внаслідок перепадів атмосферного тиску, просторовий розподіл якого характеризують баричним градієнтом. На висотах понад 1000 м існує тільки *геострофічний* вітер, напрям якого визначається лише баричним градієнтом і силою Коріоліса. Нижчий приземний шар атмосфери називають шаром тертя, а вітер у ньому *геотриптичний*. Шар тертя, у свою чергу, поділяють на два:

- поверхневий пограничний шар від поверхні землі до висоти приблизно 100 м, де рух повітря визначається умовами тертя потоку з підстилаючою поверхнею;
- шар Екмана, від 100 м до висот, не менших за 600 м, де фактор впливу тертя об земну поверхню поступово компенсується факторами баричного тиску і сил Коріоліса.

Для порівняння вісь ротора сучасних потужних ВЕУ нерідко перевищує 100 м.

Напрямок вітру, як правило, не змінюється з висотою лише у приповерхневому шарі тертя, але у вищому шарі Екмана під дією сили Коріоліса зміщується за годинниковою стрілкою (у Північній півкулі).

Унаслідок тертя швидкість вітру на суходолі на висоті флюгера удвічі менша, ніж на висоті 1000 м. А внаслідок добової циклічності вертикальних

турбулентних потоків нагрітого повітря максимум швидкості приземного вітру над суходолом спостерігається приблизно о 14 годині, мінімум – уночі або вранці. Але приблизно з висоти 500 м добовий хід протилежний: максимум уночі, мінімум удень. Натомість над морем послаблення вітру внаслідок тертя менше: там на висоті флюгера швидкість потоку становить близько двох третин від швидкості геострофічного вітру. В обох випадках максимальна зміна швидкості вітру спостерігається в поверхневому пограничному шарі (нижче 100 м), який безпосередньо прилягає до поверхні землі.

У випадку плоскої горизонтальної поверхні вертикальний профіль вітру визначається ступенем стійкості прилеглому шару повітря. Розрізняють стійкий, нестійкий і нейтральний стани. Максимальна стійкість реалізується, коли приповерхневі шари мають нижчу температуру, що унеможливорює утворення вертикальних потоків. Такий стан повітря ще називають інверсією. За протилежного розподілу температури виникають конвективні потоки і шар повітря стає нестійким. У загальному випадку ступінь вертикальної стійкості повітря залежно від сезону, періоду доби, хмарності, снігового чи рослинного покриву тощо визначають за спеціальними метеорологічними таблицями.

Стан нейтральної стійкості реалізується за особливих умов, коли вертикальна компонента швидкості незначна порівняно з горизонтальною, а її градієнт відповідає вертикальному градієнту сухої адіабати в не насиченому вологою повітрі і градієнту насиченої адіабати насиченого повітря. Такі умови виконуються при вітрі, який забезпечує ефективне перемішування повітря. Таким чином, для нейтрально стійкого поверхневого шару зміна швидкості з висотою  $h$  описується рівнянням Прандтля:

$$v(h) = \frac{v^*}{k} \ln \frac{h}{h_0}, \quad (2.5)$$

де  $v^*$  – швидкість тертя або динамічна швидкість – середня швидкість турбулізованого потоку біля підстилаючої поверхні;

$h_0$  – висота турбулентного шару, залежна від шорсткості покриття, яка для типових випадків зазвичай наводиться у довідниках;

$k \approx 0,38$  – стала Кармана.

За наявності місцевих перешкод  $h_0$  приймають рівною висоті флюгера – у метеорології зазвичай 10 або 12 м.

За нестійкого прилеглого шару зміна швидкості з висотою буде меншою, а стійкого, навпаки – більшою. В обох цих випадках вертикальний профіль швидкості вітру найчастіше описують степеневим законом:

$$v(h) = v_\phi \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha, \quad (2.6)$$

де  $v_\phi$  – швидкість на висоті флюгера;

$\alpha$  – параметр, залежний від стійкості, ступеня шорсткості підстилаючої поверхні і висоти, значення якого змінюються в межах від 0 до +1. Цей закон переважно використовують при великих швидкостях вітру за адіабатних умов стійкості.

Показник  $\alpha$  рекомендують вибирати рівним  $1/7 = 0,14$ , або з поправкою на швидкість вітру – з табл. 2.1. Зростання швидкості вітру спостерігається до висот 60–100 м, після яких темп зростання сповільнюється, а на висоті кількох сотень метрів стабілізується.

Таблиця 2.1

Рекомендовані значення показника степеня  $\alpha$  залежно від швидкості вітру

$v$ , м/с	0–3	3,5–4	4,5–5	5,5	6–11,5	12–12,5	13–14	14,5
$\alpha$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,135	0,13	0,125

Співвідношення (2.6) часто подають у вигляді формули Лайхтмана з відліком висоти у відносних одиницях товщини приземного турбулізованого шару  $h_0$ :

$$v(h) = v_0 \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h}{h_0}}, \quad (2.7)$$

де  $v_0$  – швидкість вітру, виміряна на висоті  $h_0$ , залежна від шорсткості поверхні землі. Зокрема, для снігового покриву  $h_0$  приймають рівним 0,5 м, для поля під паром – 10 см, луку з низькою травою – 20 см, бурякового поля – 45 см, пшеничного поля – 130 см.

Територію з окремими місцевими перешкодами, наприклад деревами чи будинками, можна штучно звести до рівнинної, якщо ввести умовний нульовий рівень висотою  $d$ , трохи меншою за висоту перешкод. Вище, аж до висоти флюгера, знаходиться умовний шорсткий шар товщиною  $z_0$ , де швидкість вітру дорівнює  $v_0$ . Відтак вертикальний профіль вітру розраховують за формулою (рис. 2.4):

$$v(z) = v_0 \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right). \quad (2.8)$$

У зоні турбулентності аж до висоти  $z_1$  швидкість вітру нестабільна за значенням і напрямом, тому її залежність від висоти позначено пунктирною лінією. Фактичне зростання швидкості доцільніше апроксимувати ламаною, що несуттєво відхиляється від прямолінійної. Масштаб зони турбулентності важливий для обґрунтування проектної висоти осі вітрового ротора з метою зменшення механічних напружень протилежних його лопатей.

У малій вітроенергетиці для проектних розрахунків монтажу вітроустановок з висотою осі ротора від 5 до 50 м швидкість вітру на цих висотах рекомендується розраховувати через швидкість на висоті флюгера 10 м за степеневу залежністю



$$v_z = v_\phi \left( \frac{z}{10} \right)^{b'} \quad (2.9)$$

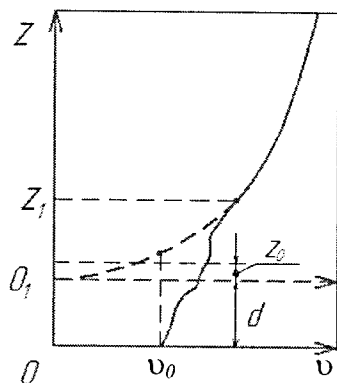


Рис. 2.4. Вертикальний профіль вітру за наявності місцевих перешкод:  
*d* – умовний нульовий рівень; *z*<sub>0</sub> – товщина умовного шару шорсткості;  
*z*<sub>1</sub> – верхня межа зони турбулентності

Для відкритої місцевості значення показника степеня рекомендують прийняти рівним  $b' = 1/7 = 0,14$ , як і у випадку виразу (2.6). Натомість за інших підстилаючих поверхонь цей показник можна вибрати з табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Вплив підстилаючої поверхні на гальмування вітру

Вид підстилаючої поверхні	Степеневий показник $b'$
Водна поверхня, рівна земна поверхня	0,10
Низький трав'яний покрив	0,14
Висока рослинність, с.-г. культури	0,16
Окремі дерева	0,20
Лісосмуга	0,22
Фруктові сади, фермерські будівлі, хутори	0,24
Сільські поселення, приміська зона	0,28
Лісові масиви	0,30
Міські райони	0,40

У будівництві для оцінки вітрового навантаження використовують триступеневу класифікацію місцевості з відповідним значенням показника  $b'$ :

- А – відкрита (з нечисленними перешкодами малої висоти),  $b' = 0,14$ ;
- Б – сільська (з низькою забудовою або рідколісся),  $b' = 0,19$ ;
- В – міська (з високою забудовою),  $b' = 0,24$ .

Для потреб вітроенергетики більш придатним є поділ на 6 ступенів шорсткості поверхні місцевості (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

## Класифікаційна характеристика шорсткості місцевості

Ступінь шорсткості	Степеневий показник $b'$	Опис місцевості
0	0,13	Місцевість плоска відкрита, на якій висота нерівності є меншою ніж 0,5 м.
1	0,16	Місцевість плоска відкрита або незначно горбиста. Можуть зустрічатись поодинокі будівлі або широкі дерева.
2	0,18	Місцевість плоска або горбиста з великим відкритим простором. Можуть зустрічатися групи дерев або низька забудова значної площі.
3	0,24	Місцевість із перешкодами: лісиста місцевість, передмістя великих міст або малі міста, зони промислової забудови.
4	0,3	Місцевість з численними перешкодами, які розташовані недалеко одна від одної: скупчення дерев, будинків на відстані, меншій ніж 300 м, від місця обстеження.
5	0,4	Місцевість з численними великими перешкодами, які знаходяться близько одна від одної, лісові масиви, центри великих міст тощо.

Відповідно до цієї класифікації місцевості можливим є перерахунок швидкості вітру з висоти 10 м до висоти 100 м за графічною залежністю, наведеною на рис. 2.5.

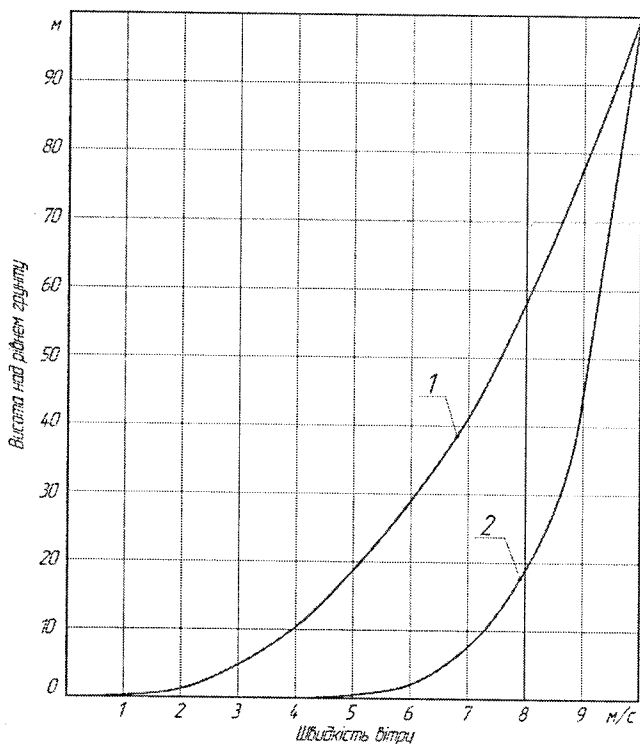


Рис. 2.5. Залежність вертикального профілю швидкості вітру від класу шорсткості поверхні: 1 – для класу шорсткості "4"; 2 – для класу шорсткості "0"

Вертикальний профіль епюри швидкостей накладає певні обмеження на довжину лопаті вітродвигуна з горизонтальною віссю обертання. За високого вертикального градієнта швидкості протилежні лопаті піддаватимуться нерівноосильним поперечним навантаженням, що загрожує доточасним руйнуванням матеріалу. Тому під час проектування установок малої вітроенергетики важливіше знати висоту, на якій генерується номінальна потужність. Відповідну швидкість називають розрахунковою і визначають з графічної залежності відносно виміряної на 10-метровій висоті.

Відповідні графічні залежності для відомих флюгерних швидкостей 3, 4, 5, 6, 7, 8 м/с наведені на рис. 2.6.

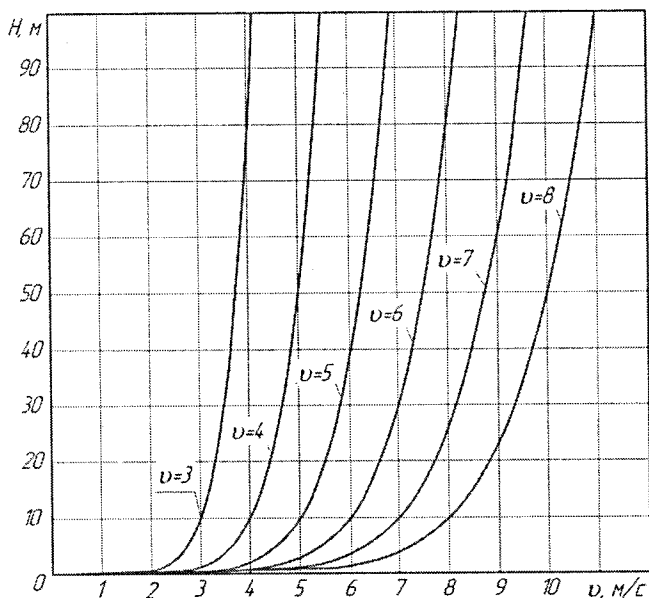


Рис. 2.6. Зміна вертикального профілю швидкості вітру при різних початкових, виміряних на висоті 10 м

Усі наведені співвідношення для розрахунку вертикального профілю вітрового потоку отримані для випадку рівнинної поверхні з рівномірним ступенем шорсткості підстилаючої поверхні. За складного рельєфу потрібно враховувати умови обтікання анемометра на висоті флюгера.

### 2.3. Розподіл вітру за швидкостями

Швидкість вітру на метеорологічних станціях більшості країн світу зазвичай вимірюють на висоті 10–12 м у режимі 10-хвилинного усереднення з 8-кратним добовим повторенням. Останнім часом у вітроенергетиці швидкість вітру відстежують у неперервному режимі зі щогодинним

усередненням, що відповідає 24-кратній добовій періодичності. З огляду на річний цикл зміни погодних умов, отримані результати також є випадковими величинами, а їх річний набір утворює генеральну сукупність, яка характеризує вітроенергетичний потенціал конкретного майданчика. Незалежно від кратності щоденних вимірювань, їх результати обробляють за правилами математичної статистики, а розраховані середні величини мають ймовірнісний зміст.

У масиві даних багаторазових вимірювань загальним числом  $N$  окремі результати повторюються частіше за інші. Якщо весь діапазон зареєстрованих значень розділити на вузькі інтервали однакової ширини  $\Delta v$ , то в кожному з них можна виявити  $n_i$  результатів. Наприклад, у разі щогодинних цілорічних вимірювань  $n_i$  дорівнює сумарній тривалості вітру  $t_i$  в заданому інтервалі значень при загальній кількості годин у році  $T = 8760$ . Відтак повторюваність вітру характеризують кількістю годин, протягом яких зареєстровано його швидкість у заданому інтервалі значень.

Перші систематичні вимірювання швидкості вітру на різних метеостанціях Європейського континенту проведені тільки наприкінці XIX ст., а результати їх статистичного опрацювання узагальнені в роботі М. М. Поморцева, де, зокрема, показано, що повторюваність вітру має ймовірнісний зміст з розподілом за швидкостями, близьким до нормального. Пізнішими, точнішими дослідженнями було доведено, що розподіли вітрів за швидкостями описуються переважно асиметричним функціями розподілу.

Ймовірність вітру  $P_i$  в певному швидкісному діапазоні  $(v_i + \Delta v)$  прийнято оцінювати відношенням сумарної кількості годин  $t_i$  до тривалості року  $T=8760$ , або відношенням числа результатів до загального числа  $N$  вимірювань:

$$\frac{t_i}{T} = \frac{n_i}{N} = P_i(v_i + \Delta v). \quad (2.10)$$

Але таким чином визначена ймовірність залежить від швидкості й ширини інтервалу, що незручно для порівняння результатів різних вимірювань та способів їх обробки. Тому на практиці користуються нормованою інтервальною ймовірністю  $\Phi_v$ , яку розраховують за формулою

$$\Phi_v = \frac{P_i}{\Delta v_i}. \quad (2.11)$$

В ідеальному випадку кількість вимірювань  $N \rightarrow \infty$ , ширина інтервалу  $\Delta v \rightarrow 0$ , а інтервальна густина переходить у точкову:

$$\Phi(v) = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta v}. \quad (2.12)$$

Значення точкової ймовірності, розташовані в порядку зростання швидкості, утворюють функцію розподілу за швидкостями. Відповідні залежності, побудовані в результаті статистичної обробки масиву експериментально виміряних значень швидкостей протягом року, називають емпіричними розподілами. За відомої функції розподілу ймовірність вітру в безмежно малому інтервалі  $dv$  розраховують через диференціал, у вузькому  $\Delta v$  – через приріст, а в широкому – інтегруванням у відповідних межах  $[v_1; v_2]$ :

$$\left. \begin{aligned} dP &= \Phi(v)dv \\ \Delta P &= \Phi(v)\Delta v \\ P[v_1; v_2] &= \int_{v_1}^{v_2} \Phi(v)dv \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Для узагальнення емпіричних залежностей і зручності їх опрацювання методами теорії ймовірності, множину експериментальних значень  $\Phi_v$  у повному діапазоні швидкостей від 0 до  $v_m$  апроксимують близькою за формою аналітичною залежністю  $\Phi(v)$  – найчастіше двопараметричною функцією розподілу Вейбулла:

$$\Phi(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (2.14)$$

де  $k$  – параметр форми кривої;

$c$  – параметр масштабу, близький до значення середньої швидкості.

Підбором цих параметрів узгоджують експериментальний масив даних з параметрами апроксимаційної функції (рис. 2.7; 2.8).

$\Phi(v), \%$

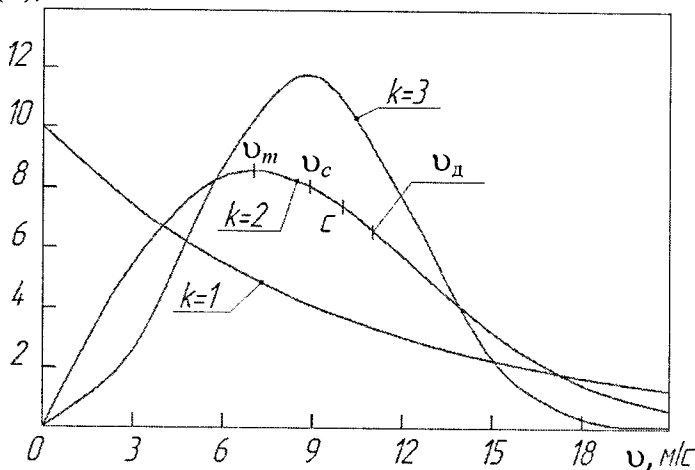


Рис. 2.7. Зміна вигляду двопараметричної функції розподілу вітру за швидкостями при сталому значенні показника масштабу  $c = 10,0$  м/с і різних показниках форми:  $k = 1$  – експоненційний;  $k = 2$  – Релея;  $k = 3$  – Вейбулла;  $v_c = 8,86$  м/с;  $v_m = 7,07$  м/с;  $v_d = 11,1$  м/с

У частковому випадку при  $k = 3$  розподіл Вейбулла стає майже симетричним дзвоноподібним, подібним до нормального. Натомість при  $k = 2$  розподіл явно асиметричний, який називають розподілом Релея:

$$\Phi(v) = \frac{2v}{(c)^2} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]. \quad (2.15)$$

При  $k = 1$  розподіл переходить в експоненційний:

$$\Phi(v) = \frac{1}{c} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)\right]. \quad (2.16)$$

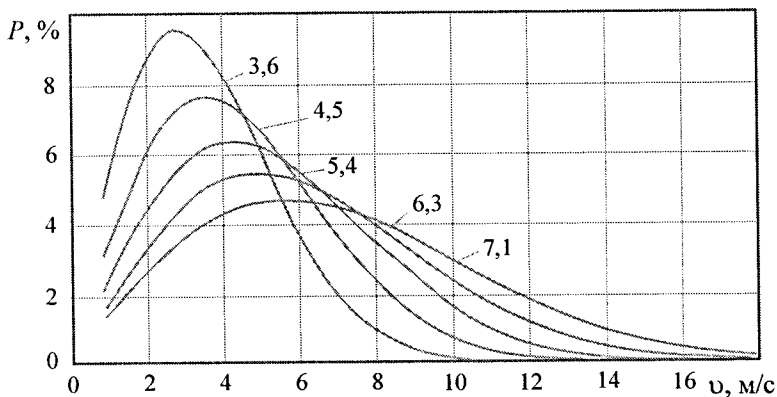


Рис. 2.8. Розподіл Релея за різних значень параметра масштабу  $c$

Апроксимація емпіричних розподілів величин аналітичною функцією спрощує розрахунки таких важливих для практики середніх величин та співвідношень між ними:

- $v_m$  – найімовірніша швидкість, при якій функція розподілу досягає свого максимуму;
- $\bar{v}$ ,  $v_c$  – середня швидкість;
- $v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\bar{v}^2}$  – середньоквадратична швидкість;
- $v_d = \sqrt[3]{\bar{v}^3}$  – середньокубічна (діюча) швидкість (Root Mean Cube Speed, "rms").

У загальному випадку довільного значення параметра  $k$  співвідношення для розрахунку найімовірнішої швидкості отримують за правилом знаходження максимуму функції розподілу і його наступного прирівнювання до нуля:



$$\begin{aligned}
[\Phi(v)]' &= \left\{ \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \right\}' = \\
&= \frac{k}{c} \left\{ \frac{k-1}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-2} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] - \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \frac{k}{c} \right\} = \\
&= \frac{k}{c^2} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \cdot \left[ (k-1) \left( \frac{v}{c} \right)^{k-2} - k \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \right] = \\
&= \frac{k}{c^2} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \cdot \left( \frac{v}{c} \right)^{k-2} \left[ (k-1) - k \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] = 0,
\end{aligned}$$

звідки

$$\left( \frac{v}{c} \right)^k = \frac{k-1}{k} \quad \text{або} \quad \frac{v}{c} = \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (2.17)$$

Отже, співвідношення між найімовірнішою швидкістю і параметром масштабу  $c$  для кількох типових функцій розподілу з цілими та напівцілими значеннями показника  $k$ :

$k = 1$  (експоненційний розподіл):  $v_m = 0$ ;

$$k = 1,5: \quad v_m = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} = c \left( \frac{1,5-1}{1,5} \right)^{\frac{1}{1,5}} = c \left( \frac{1}{3} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{c}{\sqrt[3]{9}} = 0,481c;$$

$$k = 2 \text{ (розподіл Релея): } v_m = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} = c \left( \frac{2-1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{c}{\sqrt{2}};$$

$$k = 2,5: \quad v_m = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} = c \left( \frac{2,5-1}{2,5} \right)^{\frac{1}{2,5}} = \left( \frac{3}{5} \right)^{0,4} c = 0,815c;$$

$$k = 3 \text{ (розподіл Вейбулла): } v_m = c \left( \frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} = c \left( \frac{3-1}{3} \right)^{\frac{1}{3}} = \sqrt[3]{\frac{2}{3}} c = 0,874c.$$

У загальному випадку довільного значення показника степеня  $n$  та параметра розподілу  $k$  формулу для розрахунку середньої, середньоквадратичної та середньокубічної швидкостей можна отримати за правилами теорії ймовірності:

$$\overline{v^n} = \int_0^{\infty} v^n \Phi(v) dv = \int_0^{\infty} v^n \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv = k \int_0^{\infty} v^{n-1} \left(\frac{v}{c}\right)^k e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv. \quad (2.18)$$

Введемо таку заміну:

$$\left(\frac{v}{c}\right)^k = U; \quad \left(\frac{v}{c}\right)^{n-1} = U^{\frac{n-1}{k}}; \quad dU = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} dv; \quad dv = \frac{c}{k} (U)^{\frac{1-k}{k}} dU. \quad (2.19)$$

Тепер

$$\overline{v^n} = k \int_0^{\infty} c^{n-1} U^{\frac{n-1}{k}} U e^{-U} \frac{c}{k} U^{-1} U^{\frac{1}{k}} dU = c^n \int_0^{\infty} U^{\frac{n}{k}} e^{-U} dU. \quad (2.20)$$

Аналітично цей інтеграл можна розв'язати лише для натуральних і напівцілих значень параметрів  $n$  і  $k$ , якщо його попередньо звести до вигляду гамма-функції:

$$\Gamma(z+1) = \int_0^{\infty} v^z e^{-v} dv. \quad (2.21)$$

Для цієї функції виконується така тотожність:

$$\Gamma(z+1) = z \Gamma(z) = z!. \quad (2.22)$$

Зокрема, у випадку цілочисельних значень  $z$ :

$$\left. \begin{aligned} \Gamma(1) &= 0! = 1; \\ \Gamma(2) &= 1! = 1; \\ \Gamma(3) &= 2! = 2 = 2; \\ \Gamma(4) &= 3! = 3 \cdot 2 = 6. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Розв'язки  $\Gamma$ -функції для всіх напівцілих, більших за  $z = 1/2$ , шукають з використанням співвідношень (2.21) і (2.22) за зразком рівнянь (2.24):

$$\left. \begin{aligned} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) &= \sqrt{\pi}; \\ \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) &= \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \sqrt{\pi}; \\ \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) &= \Gamma\left(1 + \frac{3}{2}\right) = \frac{3}{2} \Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{3}{4} \sqrt{\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

У разі зведення аргументу  $(z+1)$  до дробу в інтервалі між 1 і 2 користуються табличними значеннями  $\Gamma$ -функції (табл. 2.4).

Якщо в рівняння (2.20) ввести заміну  $z = n/k$ , то його загальний розв'язок зведеться до такого вигляду:

$$\bar{v}^n = c^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right). \quad (2.25)$$

У частковому випадку середньої швидкості  $\bar{v}$  показник  $n = 1$ , і при довільному значенні  $k$  вираз (2.25) набуває вигляду:

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right), \quad (2.26)$$

звідки співвідношення між середньою швидкістю і параметром масштабу  $c$  для кількох типових функцій розподілу з цілими та напівцілими значеннями показника  $k$  будуть такими:

$$k = 1 \text{ (експоненційний розподіл): } \bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1}\right) = c;$$

$$k = 1,5: \quad \bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{1,5}\right) = c \cdot \Gamma(1,67) \approx 0,9033 \cdot c;$$

$$k = 2 \text{ (розподіл Релея): } \bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi} = 0,8862 \cdot c;$$

$$k = 2,5: \quad \bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2,5}\right) = c \cdot \Gamma(1,4) \approx 0,8873 \cdot c;$$

$$k = 3 \text{ (розподіл Вейбулла)} \quad \bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{3}\right) \approx 0,8934 \cdot c.$$

Підстановками  $n = 2$  та  $n = 3$  у розв'язок (2.25) отримують вирази для розрахунку середньоквадратичної та середньокубічної (розрахункової) швидкостей відповідно:

$$\bar{v}^2 = c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right); \quad (2.27)$$

$$\bar{v}^3 = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right). \quad (2.28)$$

Таблиця 2.4

Значення  $\Gamma$ -функції

$1+z$	$\Gamma(1+z)$	$1+z$	$\Gamma(1+z)$	$1+z$	$\Gamma(1+z)$	$1+z$	$\Gamma(1+z)$
1,00	1,0000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1,07	0,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9187
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8952	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8959	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,92	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0,9156	1,46	0,8856	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9126	1,97	0,9877
1,23	0,9108	1,48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9030	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9959

Відповідні значення усереднених швидкостей відносно параметра масштабу  $c$  розподілів Вейбулла з цілими і напівцілими значеннями  $k$  поміщено у четверту, п'яту і шосту колонки табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Аналitичні вирази і числові значення особливих швидкостей  
для цілих і напівцілих  $k$

$k$	$v_m$	$\bar{v}$	$\overline{(v^2)}$	$\overline{(v^3)}$	Розрахункова швидкість
1	0	$c$	$2c^2$	$6c^3$	$1,817c$
1,5	$c\left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{2}{3}}; 0,4807c$	$0,9033c$	$1,1911c^2$	$2c^3$	$1,260c$
2	$\frac{c}{\sqrt{2}}; 0,7071c$	$\frac{\sqrt{\pi}}{2}c; 0,8862c$	$c^2$	$\frac{3\sqrt{\pi}}{4}c^3; 1,3293c^3$	$1,099c$
2,5	$c\left(\frac{3}{5}\right)^{0,4}; 0,8152c$	$0,8873c$	$0,9314c^2$	$1,1018c^3$	$1,033c$
3	$\sqrt[3]{\frac{2}{3}}c; 0,8736c$	$0,8934c$	$0,9026c^2$	$c^3$	$c$

З табл. 2.5 видно, що при фіксованому значенні показника форми кривої розподілу співвідношення між характерними швидкостями залишаються сталими і залежними тільки від параметра масштабу  $c$ . Тому для апроксимації емпіричної залежності двопараметричною функцією розподілу потрібно попередньо розрахувати принаймні дві усереднені швидкості, за якими визначають обидва параметри – форми  $k$  і масштабу  $c$ .

Двопараметрична функція розподілу типу Вейбулла лише якісно моделює типову форму й масштаб емпіричних розподілів, але не відтворює їх окремі особливості. Зокрема, при  $v = 0$  розподіл Вейбулла дорівнює нулю, тоді як емпіричні розподіли мають ненульові значення внаслідок високої ймовірності безвітряної погоди. Натомість з боку великих швидкостей

розподіл Вейбулла необмежений, а емпіричні практично рівні нулю вже при швидкостях у десятки метрів за секунду. Накінець, окремі інтервали емпіричних розподілів можуть виділятися великими відхиленнями від лінії тренду внаслідок сезонних змін і особливостей рельєфу тощо. Водночас зведення емпіричних залежностей до аналітичних функцій розподілу спрощує оцінку усереднених швидкостей та енергетичного потенціалу досліджуваного майданчика.

Таблиця 2.6

Залежність  $v_c$  і  $v_d$  від найбільш імовірної швидкості  $v_m$  за різних значень параметра форми розподілу Вейбулла  $k$

$k$	$v_m$	$v_c$	$v_d$	$v_c/v_m$	$v_d/v_m$
1,25	0,276	0,931	1,439	3,37	5,21
1,4	0,409	0,912	1,317	2,23	3,21
1,5	0,4810	0,903	1,260	1,88	2,62
1,75	0,616	0,891	1,160	1,45	1,88
2,0	0,707	0,886	1,099	1,25	1,55
2,25	0,770	0,886	1,060	1,15	1,38
2,5	0,815	0,887	1,033	1,09	1,27
2,75	0,848	0,890	1,014	1,05	1,20
3,0	0,874	0,893	1,000	1,02	1,14

#### 2.4. Розподіл вітрів за напрямками

Миттєва швидкість вітру є змінною в часі векторною величиною, параметри якої визначаються місцевими умовами майданчика спостереження: рельєфу, оточення, шорсткості підстилаючої поверхні, пори року тощо. На рівні поверхні землі вітровий потік розсіюється перешкодами, він нестійкий як за швидкістю, так і за напрямом. З висотою руйнівний вплив підстилаючої поверхні зменшується, а напрям і швидкість вітру стабілізуються.

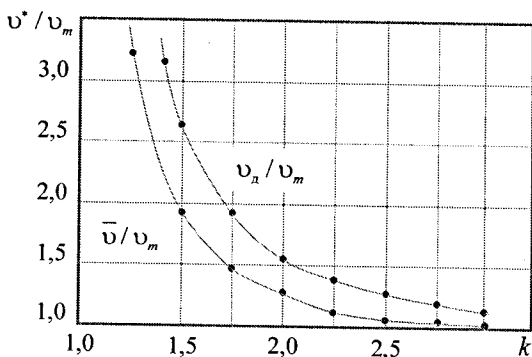


Рис. 2.9. Графічна залежність відношень  $\bar{v}/v_m$  і  $v_d/v_m$  від параметра форми розподілу Вейбулла  $k$

Тому метеорологічні спостереження за вітром проводять на висоті, де впливом підстилаючої поверхні можна знехтувати. З практики відомо, що напрям вітру протягом кількох годин, як правило, можна вважати сталим.

Напрямок вітру прийнято визначати за сторонами світу, звідки він дме. У переважній більшості обмежуються вісьмома напрямками: північний (Пн), північно-східний (ПнСх), східний (Сх), південно-східний (ПдСх), південний (Пд), південно-західний (ПдЗх), західний (Зх) і північно-західний (ПнЗх). Натомість у навігації та вітроенергетиці, а останнім часом і в метеорології вітер прийнято характеризувати за 16-ма напрямками, які називають румбами (1 румб =  $360/16 = 22,5^\circ$ ). Відлік градусів починають з північного напрямку, обходячи лінію горизонту за годинниковою стрілкою. Результати спостережень наводять у вигляді таблиць, а для наочності відображають у вигляді графічних залежностей, виконаних у полярних координатах, які називають "трояндою вітрів". Відповідні дані публікуються в довідковій літературі у вигляді таблиць або діаграм (карт) повторюваності.

Найпростішу "троянду вітрів" представляють радіальними відрізками, з кутовим зміщенням через один румб, де довжина відрізка пропорційна повторюваності вітру у відсотках до тривалості року (рис. 2.10).

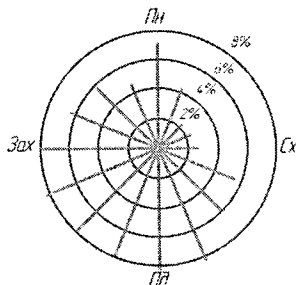


Рис. 2.10. Графічне зображення "троянди вітрів" у полярних координатах

Існує декілька методик графічного оформлення "троянди вітрів", які відрізняються побудовою рисунка і обсягом поданої інформації. Так, діаграма на рис. 2.11 містить додаткову інформацію про розподіл швидкостей: довжина прямокутника пропорційна повторюваності вітру, а ширина – діапазону.

На рис. 2.12 подано варіант "троянди вітрів", де кінці відрізків, які виражають повторюваність вітру, сполучені ламаною лінією. Утворений багатокутник віддалено нагадує схематичне зображення троянди, звідки й походить назва "троянда вітрів".

Подвійна "троянда вітрів", наведена на рис. 2.13, окремо подає інформацію про повторюваність вітру (ліворуч) і його середню швидкість за напрямками.

Побудову діаграм повторюваності та швидкості вітру за напрямками здійснюють як за річний період, так і помісячно. Отримання інформації про наявну в конкретному регіоні "троянду вітрів" дає змогу проводити попередній аналіз енергетичного потенціалу території або перспективного майданчика для встановлення вітроенергетичної установки певного класу.



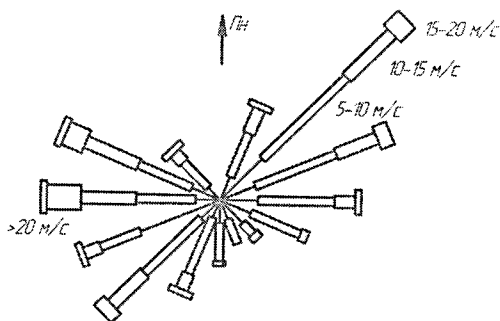


Рис. 2.11. "Троянда вітрів" з розподілом вітру за швидкостями

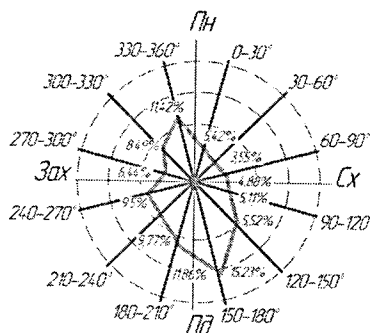


Рис. 2.12. "Троянда вітрів" з фігурою багатокутника, побудованою на кінцях векторів повторюваності

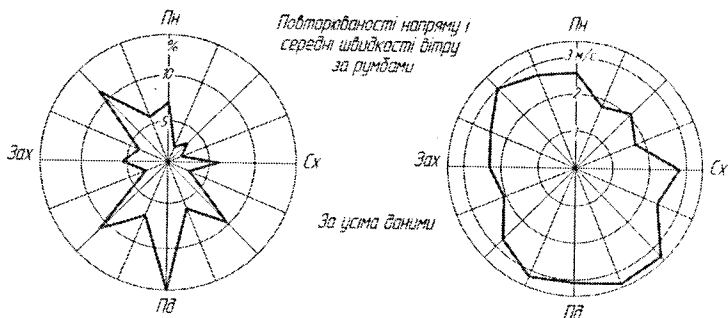


Рис. 2.13. Подвійна діаграма "тройнда вітрів" з відображенням повторюваності вітру і середньої швидкості за румбами

### Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте відмінності схематичного запису швидкості вітру з різним періодом усереднення.
2. Що відображає коефіцієнт пориву?
3. Опишіть методику формування середньодобової та середньорічної швидкості вітру.
4. Наведіть формули для визначення швидкості вітру на довільній висоті.
5. У чому полягає відмінність формул для визначення швидкості вітру на довільній висоті?
6. Яким чином характер підстилаючої поверхні впливає на формування вертикального профілю вітру?
7. Охарактеризуйте загальний підхід до формування поняття розподілу вітру за швидкостями.
8. Охарактеризуйте особливості розподілу вітру за швидкостями з використанням двопараметричної функції розподілу Вейбулла.
9. Опишіть часткові випадки розподілу вітру за швидкостями.
10. Охарактеризуйте особливості відображення вітрів за напрямками.

### 3. ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ

#### 3.1. Вимірювання швидкості вітру

Історично першим вимірювальним приладом, який використовували на метеостанціях для вимірювання швидкості вітру, був флюгер Вільда, складений з двох чутливих елементів (рис. 3.1). Нижній елемент (флюгарка) вказує напрям вітру, а верхній (вимірювальна дошка) – швидкість вітру за кутом відхилення від рівноважного вертикального положення.

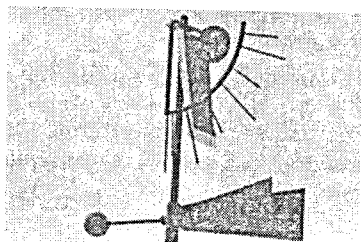


Рис. 3.1. Загальний вигляд флюгера Вільда

Вимірювальна шкала швидкостей складається з чотирьох довгих і чотирьох коротких радіальних штифтів, закріплених торцями до металевої дуги, розгорнутої на  $90^\circ$ . Пластина розміром  $15 \times 30$  см масою 200 г (легка) або 800 г (важка) може вільно коливатися біля горизонтальної осі з дисковою противагою. Вісь коливання і площина вимірювальної дошки перпендикулярна флюгарці, а отже, й напрямку вітру. Флюгер встановлюють на щоглі висотою 10...12 м на відкритому для вітру місці й віддалі, не меншій за двадцятикратну висоту найвищої перешкоди.

Потік вітру відхиляє дошку від прямовисного положення на кут, пропорційний швидкості вітру. Кут відраховується за суміщенням ребра дошки з кутовими відмітками, у вигляді серії штифтів. Значення швидкості вітру залежно від маси дошки і середнього кута відхилення визначають з точністю до 1 м/с за табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Визначення швидкості вітру за допомогою флюгера Вільда

Значення показчика	Швидкість вітру, м/с	
	пластина 200 г	пластина 800 г
1	0	0
1-2	1	2
2	2	4
2-3	3	6
3	4	8
3-4	5	10
4	6	12
4-5	7	14
5	8	16
5-6	9	18
6	10	20
6-7	12	24
7	14	28
7-8	17	34
8	20	40

Навіть на висоті 10...12 м вітер рідко дме стабільним рівномірним потоком, тому кут відхилення вимірювальної дошки постійно змінюється практично синфазно наростаючим та спадним фронтам поривів. Тому флюгером Вільда нескладно оцінювати приблизну частоту й тривалість поривів, але не їх амплітуду. Натомість швидкість вітру визначається з похибкою порядку  $\Delta v \approx 1$  м/с внаслідок грубої суб'єктивної оцінки середнього кута відхилення.

Наведена у градууювальній таблиці кількість швидкісних інтервалів занадто мала для відтворення особливостей кривої розподілу навіть в області максимуму, що не дозволяє об'єктивно розрахувати середні величини чи апроксимувати її аналітичною залежністю. Отже, результати вимірювання швидкості вітру флюгером Вільда у вітроенергетиці можна використовувати тільки для попередньої оцінки потенціалу вітрового майданчика. Зате перевагою флюгера Вільда над іншими вимірювальними приладами є наочна

демонстрація структури вітрового потоку та можливість візуальної оцінки її параметрів – амплітуди, періоду й тривалості поривів.

Швидкість вітру для потреб вітроенергетики тепер вимірюють анемометрами. За типом перетворювача й методом вимірювання розрізняють чашковий, крильчастий, ультразвуковий і термоанемометр. Найпростіший за своєю будовою чашковий анемометр винайдений ще у 1846 році. Свою назву отримав завдяки напівсферичній формі чутливих елементів, зовні подібних на чашки. Три або чотири чашки закріплені на кінцях радіальних стрижнів в одну конструкцію, яку називають ротором (рис. 3.2). Обертний момент виникає внаслідок різного опору потоку повітря протилежними випуклими та вгнутими поверхнями чашок. Чашковими анемометрами вимірюють швидкість вітру незалежно від його напрямку, але за вертикальної орієнтації осі обертання.

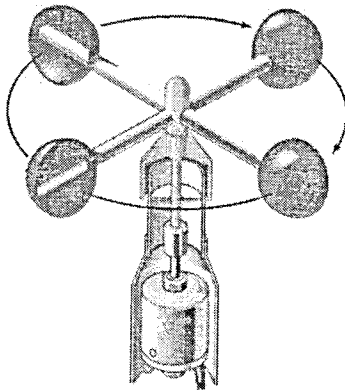


Рис. 3.2. Чашковий анемометр

У чашковому анемометрі з механічним відліковим пристроєм реєструють кількість обертів ротора за певний часовий інтервал, а швидкість вітру визначають за градуювальною таблицею. За однорідного і стабільного потоку повітря середню швидкість вітру визначають з похибкою порядку

0,1 м/с при вимірюванні протягом 100 с. У тричашкових анемометрів з чашками спеціальної форми зберігається лінійна залежність між числом обертів і швидкістю вітру з похибкою в 3 % аж до значень 27 м/с. Тричашковий анемометр відрізняється більшим обертовим моментом порівняно з чотиричашковим, завдяки чому він чутливіший до поривів вітру.

Типовий чашковий анемометр МС-13 з механічним відліком кількості обертів і часових інтервалів, яким користуються дотепер, має такі метрологічні характеристики:

- діапазон вимірюваних швидкостей від 1 до 20 м/с;
- чутливість – не більше за 0,8 м/с;
- основна похибка не вища за  $\pm(0,3+0,05v)$ , де  $v$  – виміряна швидкість.

Вимірювання проводять протягом однієї або двох хвилин, після чого за показами двох стрілкових лічильників, секундоміра і градуовальної шкали визначають швидкість вітру.

Поза метеорологією чашкові анемометри широко використовують на баштових кранах та висотних конструкціях для сигналізації перевищення швидкості вітру. У них замість механічного редуктора використовується індукційний перетворювач швидкості обертання на електричний струм.

Значно вищу чутливість і точність вимірювання мають ручні крильчасті (млинові) анемометри, але за рахунок звуження діапазону вимірювання – зазвичай від 0,3 до 5 м/с. У них чутливий елемент виконаний у формі вентилятора або пропелера, вісь обертання якого потрібно встановлювати паралельно потоку повітря з максимально допустимим відхиленням  $\pm 15^\circ$ .

Для поточного вимірювання параметрів потоків повітря використовують ручний крильчастий анемометр з циферблатним індикатором (рис. 3.3).

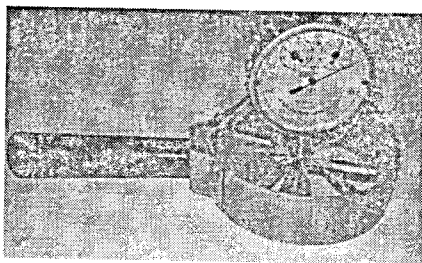
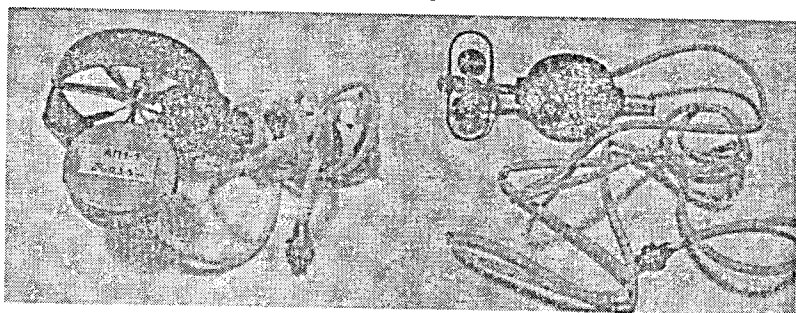


Рис. 3.3. Ручний крильчастий анемометр

На циферблатному покажчику відображається лише кількість обертів крильчатки за певний проміжок часу, який стандартно повинен становити 1хв. Далі за лінеаризаційним графіком кількість обертів переводять у швидкість вітрового потоку.

Сучасні ручні анемометри комплектують електронними засобами реєстрації. Ранні версії цифрових анемометрів мають два вимірювальні прилади: крильчастий анемометр (рис. 3.4, а) з діапазоном вимірювання від 0,3 до 5 м/с та чашковий анемометр (рис. 3.4, б) із діапазоном вимірювання від 1 до 20 м/с. До складу вимірювального пристрою також входить блок обчислення та індикації результатів вимірювання.



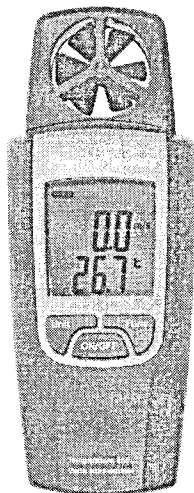
а)

б)

Рис. 3.4. Первинні вимірювальні перетворювачі приладу серії АП

Відповідно до типу вимірювального перетворювача та його робочого діапазону змінюються й чутливість та точність вимірювання. Так, крильчастий анемометр зазвичай має чутливість близько 0,2 м/с, а точність вимірювання –  $\pm(0,1+0,05v)$ . Чашковий вимірювальний пристрій характеризується меншою чутливістю, яка оцінена у 0,8 м/с. Похибка вимірювання чашковим пристроєм становить  $\pm(0,3+0,05v)$ .

Сучасні портативні крильчасті анемометри оснащують мікропроцесорним блоком для цифрової індикації поточного значення швидкості вітру, їх архівування та наступної передачі даних на ПК з метою статистичної обробки. Діапазон вимірювання швидкості вітру в таких приладах зазвичай складає від 0 до 30 м/с, з похибкою 3 %, індикація показів здійснюється з дискретністю 0,1 м/с. Прилади такого типу мають вбудовану (рис. 3.5, а) або виносну крильчатку (рис. 3.5, б).



а)



б)

Рис. 3.5. Ручні мікропроцесорні анемометри



Динамічні параметри потоків повітря та їх просторовий розподіл тепер вимірюють малоінерційними термоанемометрами (рис. 3.6) з чутливим елементом у вигляді дрютяного термоопору. Діапазон вимірювання швидкості вітру складає від 0,1 до 25 м/с з похибкою від  $\pm(0,1 + 0,05v)\%$  до 5% залежно від моделі. Індикація показів здійснюється з дискретністю 0,01 м/с.



Рис. 3.6. Термоанемометр

Зауважимо, що за допомогою ручних анемометрів будь-якої конструкції можна виконати експрес-аналіз вітрової ситуації, однак вони не можуть використовуватися для ретельного дослідження вітрового потенціалу. Тому для проведення тривалих досліджень вітрового потоку сьогодні застосовують комп'ютеризовані метеорологічні комплекси (рис. 3.7). Багатофункціональні метеорологічні комплекси призначені як для професійного (рис. 3.7, а), так і для побутового (рис. 3.7, б) використання. У них швидкість вітру зазвичай вимірюють чашковим анемометром, а напрям – флюгерним перетворювачем.

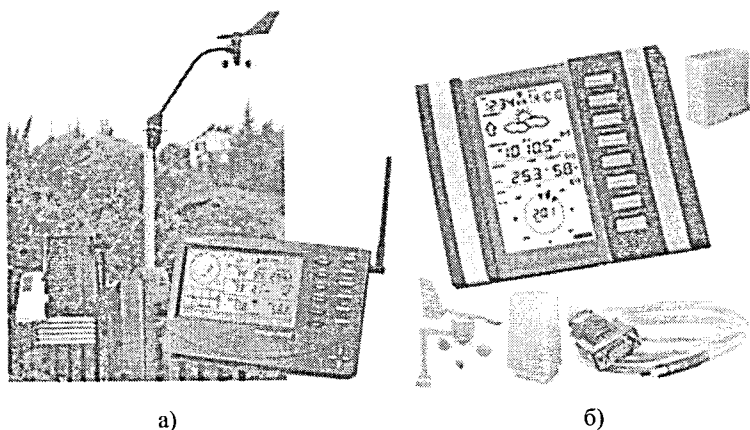


Рис. 3.7. Загальний вигляд вимірювального комплексу (давачів і блока обробки даних) професійного (а) та побутового (б) багатofункціональних метеорологічних комплексів

Індикація усередненої швидкості вітру здійснюється за період 10 с; діапазон вимірювання швидкості вітру може становити від 1 до 68 м/с. Дискретність вимірювання становить 0,5 м/с або 1 м/с з точністю  $\pm 5\%$ . Вимірювальний інтервал зазвичай становить 2,5–3 с. Крім того, такі прилади забезпечують відображення напрямку вітру з відзначенням домінуючих напрямів (за останній період вимірювання) за шкалою компаса, що має 16 румбів (1 румб =  $22,5^\circ$ ); відображення напрямку вітру в діапазоні від 0 до  $360^\circ$ . Дискретність вимірювання напрямку вітру становить 1 або  $10^\circ$  із точністю  $\pm 7^\circ$ .

Вимірювальні комплекси обладнані інтерфейсами для приєднання до ПК і комплектуються спеціалізованим програмним забезпеченням, яке може здійснювати візуалізацію поточних значень вимірюваних параметрів, а також первинну обробку результатів вимірювань і відповідно формувати бази даних. На рис. 3.8 подано зразок екранного інтерфейсу побутової метеорологічної станції.

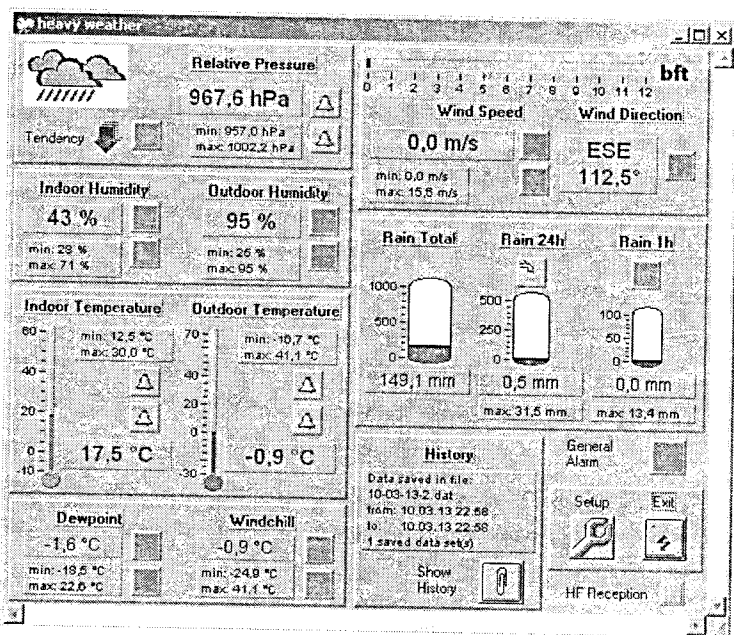
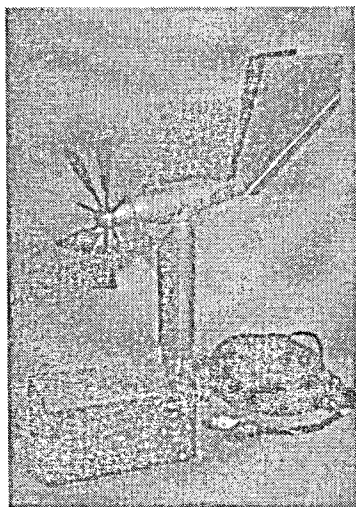


Рис. 3.8. Зразок екранного інтерфейсу метеорологічної станції

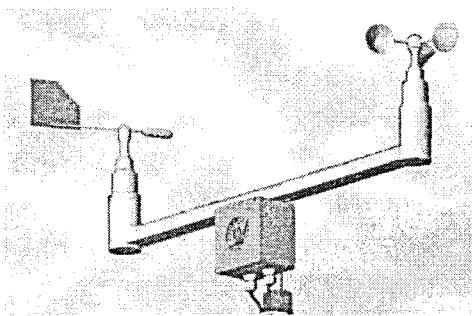
Станіонарні метеорологічні прилади для одночасного вимірювання швидкості й напрямку вітру називають анеморумбометрами (рис. 3.9). Основні метрологічні характеристики типового анеморумбометра М63-М1 такі:

- діапазон вимірювання:
  - миттєвої швидкості вітру – від 1,5 до 60 м/с;
  - максимальної швидкості – від 3 до 60 м/с;
  - середньої швидкості – від 1,2 до 40 м/с;
  - напрямку вітру – від 0 до 360°;
- основна похибка при вимірюванні швидкості вітру не більша за  $\pm (0,5+0,05v)$  м/с, де  $v$  – виміряна швидкість;

- основна похибка при вимірюванні напрямку вітру  $\pm 10^\circ$ ;
- поріг чутливості не більший:
  - за швидкістю вітру – 0,8 м/с;
  - за напрямом вітру – 1,2 м/с.



а)



б)

Рис. 3.9. Загальний вигляд метеорологічних анеморумбометрів:  
М-63М-1 (а) і MARK 60.1 (б)

В автоматизованих вимірювальних комплексах застосовують високочутливі малоінерційні датчики швидкості й напрямку вітру, наприклад ДВ-160. Передача даних здійснюється інтерфейсом RS485 лінією довжиною до декількох сотень метрів. Вбудований мікропроцесор здійснює попередню обробку даних і накопичує їх у пам'яті. За інтерфейсом можна запросити як поточні параметри потоку, так і накопичені в пам'яті усереднені величини.

У метеорології вимірювання параметрів вітру тепер прийнято проводити 8 разів на добу. Донині на більшості метеостанцій України для визначення напрямку вітру використовують метод автономного візуального

усереднення окремих показів (повороти покажчика флюгера чи відхилення стрілки анеморумбометра) за 2 хв. Впровадження у практику спостережень нового покоління електронних приладів дає змогу визначати напрям вітру з поточним усередненням за 10 хв та використовувати векторний спосіб усереднення характеристик вітру. При цьому можливі порушення однорідності з таких причин:

- зміна періоду усереднення напрямку вітру (10 хв замість 2 хв);
- зміна методики усереднення швидкості (векторне замість скалярного);
- позбавлення від суб'єктивізму спостережника.

Вплив періоду усереднення на покази румбометра показано на рис. 3.10.

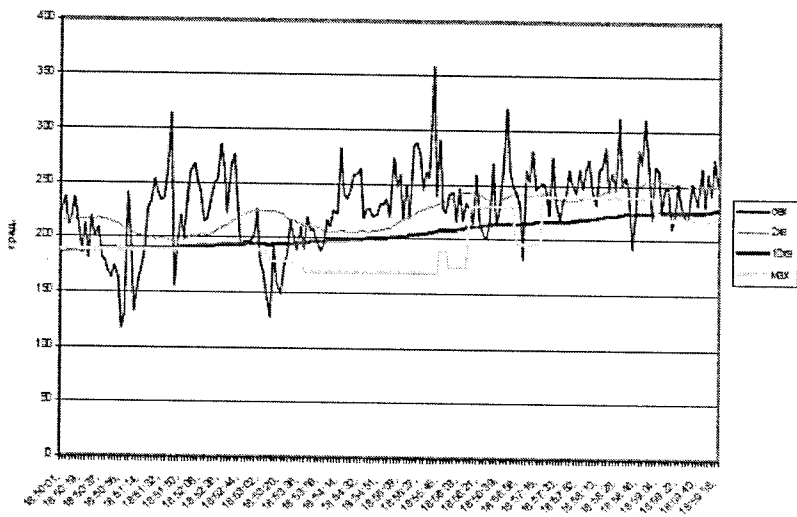


Рис. 3.10. Типовий графік реєстрації напрямку вітру з усередненням за 3 с, 2 і 10 хв та за максимальної швидкості вітру 30 липня 2002 р. на ОГМС Київ

З 2001 року у метеорологічній мережі України відбувається заміна вітровимірювальних приладів – анеморумбометрів М-63М-1 з усередненням

за 45–55 хв (інтервал перед терміном спостережень) на анеморумбометри нового покоління МАРК з векторним способом усереднення характеристик вітру за період 50 хв. У разі значної турбулентності потоку можлива додаткова похибка, зумовлена способом усереднення. Тому у світовій практиці під час розроблення нових приладів для вимірювання характеристик вітру перевагу надають усередненню складових вітру над усередненням незалежно від визначених швидкості та напрямку.

Систематичними дослідженнями швидкості вітру виявлено такі закономірності. Біля поверхні землі найчастіше спостерігаються вітри, швидкість яких становить 4–8 м/с і лише іноді може перевищувати 12–15 м/с. При шквалах і маломасштабних вихорах (смерчах і тромбах) швидкості вітру можуть на невеликий час сягати й 100 м/с. Під час штормів та ураганів у помірних широтах швидкості вітру можуть перевищувати 30 м/с впродовж досить тривалого часу і під час окремих поривів сягати 60 м/с. За тропічних ураганів швидкості вітру становлять 65 м/с, а швидкість окремих поривів сягає 100 м/с. Середня швидкість вітру в так званих струминних течіях у верхній тропосфері та нижній стратосфері за довгий термін і на великій площі становить від 70 до 100 м/с.

Метеорологічні щогли, які традиційно використовують для вимірювання швидкості вітру і подальшого проектування вітрових електростанцій, вимірюють показники строго у фіксованих точках. А тенденція до збільшення довжини лопатей вітрогенераторів вимагає встановлення ще вищих вимірювальних щогл, що спричинює великі витрати на будівництво. Тому останнім часом поширюються технології дистанційного вимірювання швидкості вітру лідарами (Light Detection and Ranging) – лазерними установками, принцип роботи яких ґрунтується на ефекті Доплера. Їх встановлюють на вітроелектростанціях, в аеропортах для вимірювання швидкості вітру на різних висотах і турбулентних потоків від літаків. У 2001 році було запропоновано встановлювати лідари на літаках та

спутниках для дистанційного моніторингу повітряних потоків, у тому числі приземних. Точність вимірювання швидкості вітру не уступає чашковому анемометру. У світі розгорнуто кілька постійно діючих дослідних мереж, які постійно вимірюють параметри атмосфери.

### 3.2. Побудова функції розподілу за результатами вимірювань

Енергетичні характеристики вітру розраховують виходячи з результатів стандартних, прийнятих у метеорології 8-кратних щоденних вимірювань. Верхню межу діапазону швидкостей приймають рівною максимальній зареєстрованій швидкості.

Нехай річний масив даних вимірювань (вбірка) складається з  $N$  результатів, а весь діапазон швидкостей розбито на вузькі інтервали однакової ширини  $\Delta v$ , наприклад 1 м/с: 0...0,9; 1,0...1,9; 2,0...2,9 .... Оскільки параметри швидкості вітру є результатами випадкового процесу, то ймовірність потрапляння значення  $v_i$  у виділений інтервал  $(v_i + \Delta v)$  розраховують відношенням числа потраплянь  $\Delta N_i$  до загального обсягу річної вибірки  $N$ :

$$\Delta P_i = \frac{\Delta N_i}{N}. \quad (3.1)$$

Розташуванням усіх результатів у порядку зростання швидкості будують ймовірнісну стовпчикову діаграму. В ідеальному випадку переходу до безмежно вузьких інтервалів за безмежно великої кількості результатів отримують діаграму густини ймовірності розподілу швидкостей:

$$\lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta v} = \Phi_i(v). \quad (3.2)$$

Для апроксимації експериментальної функції розподілу аналітичним виразом типу функції Вейбулла попередньо розраховують середню та середньоквадратичну швидкості за такими співвідношеннями:

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^N v_i \cdot \Phi_i(v); \quad (3.3)$$

$$\bar{v}^2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N v_i^2 \cdot \Phi_i(v)}. \quad (3.4)$$

Як видно з виразів (2.26) і (2.27), незалежно від значень параметрів форми  $k$  і масштабу  $c$  розподілу Вейбулла завжди виконується таке співвідношення:

$$\frac{\bar{v}^2}{v^2} = \frac{\left[ c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^2}{c^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} = \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}. \quad (3.5)$$

Підбором значень параметра  $k$  домагаються найкращого задоволення відношень  $\Gamma$ -функцій попередньо розрахованим відношенням  $\bar{v}^2 / v^2$ . Надалі за співвідношенням (2.28) розраховують значення параметра масштабу  $c$ . Такий процес визначення параметрів апроксимаційної функції є досить громіздким, тому Європейський вітровий атлас рекомендує метод визначення обох величин з графічних залежностей:

$$k = f\left(\bar{v}^2 / v^2\right); \quad (3.6)$$

$$c / \bar{v} = f(k). \quad (3.7)$$

Обидві залежності побудовані на рис. 3.11 і 3.12 з використанням табличних значень  $\Gamma$ -функції, наведених у табл. 2.4.

Надалі, за відомого значення  $k$ , параметр масштабу також зручніше визначати графічно за залежністю  $c / \bar{v} = f(k)$  (рис. 3.12).

Експериментальна залежність рідко повністю збігається з апроксимаційною функцією розподілу, визначеною за усередненими величинами (рис. 3.13), з двох причин: по-перше, середнє значення не є однозначною функцією членів ряду сумування  $(v_i \Phi_i)$ , а по-друге – двопараметрична функція Вейбулла не враховує випадкових погодних, сезонних чи інших відхилень, походження яких передбачити неможливо.



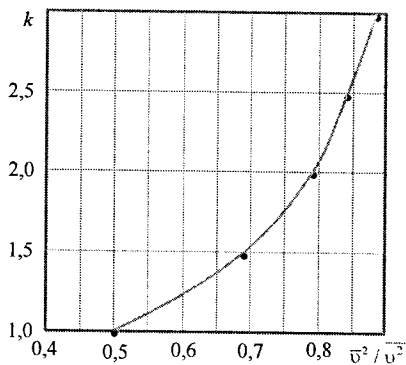


Рис. 3.11. Графічна залежність для визначення параметра форми функції розподілу Вейбулла за відношенням  $\bar{v}^2 / \bar{v}^2$

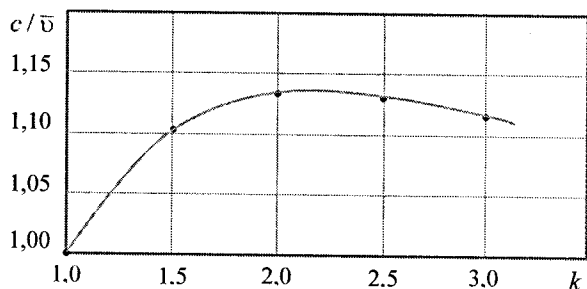


Рис. 3.12. Графічна залежність для визначення параметра масштабу за відношенням  $c / \bar{v}$

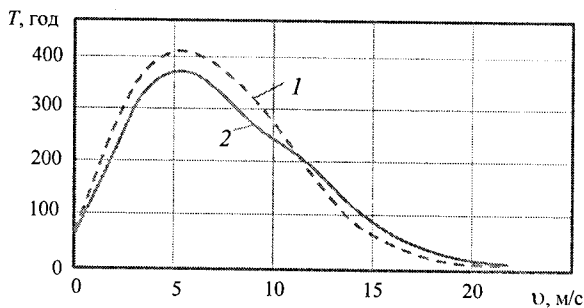


Рис. 3.13. Порівняння функції розподілу Релея (1) при  $c = 7$  м/с з експериментальним річним розподілом (2)

### 3.3. Оцінка розрахункової швидкості вітру

Не існує вітродвигуна, який працює в повному діапазоні швидкостей, – від нуля до максимально можливої. Тому для практики достатньо знати функцію розподілу тільки в інтервалі робочих швидкостей вітроустановки від початкової (стартової)  $v_n$  до критичної  $v_{кр}$ . Наприклад, річну механічну продуктивність вітродвигуна оцінюють за таким співвідношенням:

$$W_{мех} = C_p \frac{1}{2} \rho S v_d^3 t_p, \quad (3.8)$$

де  $S$  – площа перерізу вітрового потоку;

$\rho$  – густина повітря;

$C_p$  – коефіцієнт використання енергії потоку;

$t_p$  – річна тривалість вітру в робочому діапазоні, год, значення якої можна знайти за таким виразом:

$$t_p = 8760 \sum_{v_n}^{v_{кр}} \Phi(v_i). \quad (3.9)$$

Якщо, згідно з визначенням (2.12) і (2.13), тривалість роботи у безмежно вузькому інтервалі виразити через функцію розподілу

$$t_i = 8760 \Phi(v_i), \quad (3.10)$$

то річну продуктивність роботи вітроенергетичної установки можна записати так:

$$W = 4380 \rho S v^3 \Phi(v) = 4380 C_p \rho S \cdot v^3 \cdot \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right]. \quad (3.11)$$

У вітроенергетиці використовують поняття розрахункової швидкості  $v_p$ , при якій реалізується максимальна річна продуктивність. Її значення очевидно відповідає максимуму добутку  $v^3 \Phi(v)$ , координату якого можна визначити за відомим правилом знаходження максимуму функції. Для цього у правій частині виразу (3.11) упустимо сталий множник  $4380 C_p \rho S$  з метою спрощення операції диференціювання і введемо заміну  $v/c = U$ :

$$c^3 \left(\frac{v}{c}\right)^3 \cdot \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] = c^2 k \left(\frac{v}{c}\right)^{k+2} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] = c^2 k U^{k+2} e^{-U^k}. \quad (3.12)$$

Тепер

$$\left(U^{k+2} e^{-U^k}\right)' = (k+2)U^{k+1} e^{-U^k} + x^{k+2} \cdot e^{-U^k} \cdot (-1)kU^{k-1} = e^{-U^k} [(k+2)U^{k+1} - kU^{2k+1}] = 0$$

$$\frac{k+2}{k} = U^k \text{ або } U = \left(\frac{k+2}{k}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{v_{\text{опт}}}{c}. \quad (3.13)$$

Приклади розрахунку співвідношень між розрахунковою та середньою швидкостями і параметром масштабу розподілу Вейбулла з цілими і напівцілими значеннями параметра форми подано нижче.

При:  $k=1 \quad v_p = c \left(\frac{1+2}{1}\right)^{\frac{1}{2}} = c \cdot \sqrt{3} = 1,7321c = 1,7321\bar{0}$ ;

$$k=1,5 \quad v_p = c \left(\frac{1,5+2}{1,5}\right)^{\frac{1}{2}} = c \cdot \sqrt{2,3333} = 1,5275c = 1,6910\bar{0}$$
;

$$k=2 \quad v_p = c \left(\frac{2+2}{2}\right)^{\frac{1}{2}} = c \cdot \sqrt{2} = 1,4142c = 1,5958\bar{0}$$
;

$$k=2,5 \quad v_p = c \left(\frac{2,5+2}{2,5}\right)^{\frac{1}{2}} = c \cdot \sqrt{1,8} = 1,3416c = 1,5120\bar{0}$$
;

$$k=3 \quad v_p = c \left(\frac{3+2}{3}\right)^{\frac{1}{2}} = c \cdot \sqrt{1,6666} = 1,2910c = 1,4450\bar{0}.$$

Результати розрахунку зведено у табл. 3.2, а відповідні графічні залежності наведено на рис. 3.14.

Згідно з Твайделлом, більшість розподілів, побудованих за експериментальними даними, добре апроксимуються двопараметричною функцією Вейбулла при значеннях параметра форми  $k = 1,8 \dots 2,3$  та параметром  $c$ , близьким до середньої швидкості.

Таблиця 3.2

Розрахункова швидкість для розподілів Вейбулла з цілим та напівцілим  $k$ 

Параметр	$k=1$	$k=1,5$	$k=2$	$k=2,5$	$k=3$
$v_p$	$1,7321c$	$1,5275c$	$1,4142c$	$1,3416c$	$1,2910c$
$v_p / \bar{v}$	1,73	1,69	1,60	1,51	1,45
$v_p / v_d$	0,95	1,21	1,29	1,30	1,29

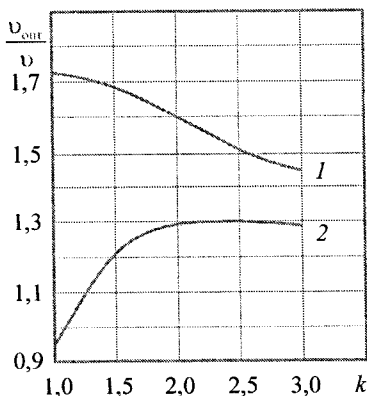


Рис. 3.14. Співвідношення між оптимальною і середньою (1) та розрахунковою (2) швидкостями вітру

У цьому діапазоні значень розрахункова швидкість становить  $(1,28 \dots 1,30)v_c$ , а відношення розрахункової до середньої майже лінійно спадає з ростом  $k$ . Тому рекомендації приймати оптимальну швидкість пропорційною середній, можна допустити тільки в разі розподілу, близького до нормального.

Існують й інші методики визначення розрахункової швидкості вітру для наближеного розрахунку енергетичного потенціалу вітрового потоку.

Залежність розрахункової швидкості вітру від заданої середньорічної швидкості вітру подана у [17].

Для вибору розрахункової, або, як її ще називають, встановленої, швидкості вітру  $v_p$  за відомою середньорічною швидкістю вітру  $v_{c.p.}$  можна скористатися таблицями М. М. Поморцева. Аналіз даних таблиць допоміг отримати результати, які подано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Реальні значення середньорічної швидкості вітру  $v_{c.p.}$  та відповідні їм розрахункові  $v_p$

$v_{c.p.}, \text{ м/с}$	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
$v_p, \text{ м/с}$	5,0	6,5	7,5	8,5	9,7	10,8	12,0	13,3

Середньорічна швидкість з достатньою для розрахунків точністю може бути апроксимована ламаною лінією з трьома ділянками і відповідними їм лінійними залежностями (рис. 3.15):

- на 1-й ділянці ( $3 \text{ м/с} \leq v_{c.p.} < 4 \text{ м/с}$ )

$$v_p = 0,5 + 1,5 \cdot v_{c.p.}, \quad (3.14)$$

- на 2-й ділянці ( $4 \text{ м/с} \leq v_{c.p.} \leq 6 \text{ м/с}$ )

$$v_p = 2,5 + v_{c.p.}, \quad (3.15)$$

- на 3-й ділянці ( $v_{c.p.} > 6 \text{ м/с}$ )

$$v_p = 1,3 + 1,2 \cdot v_{c.p.} \quad (3.16)$$

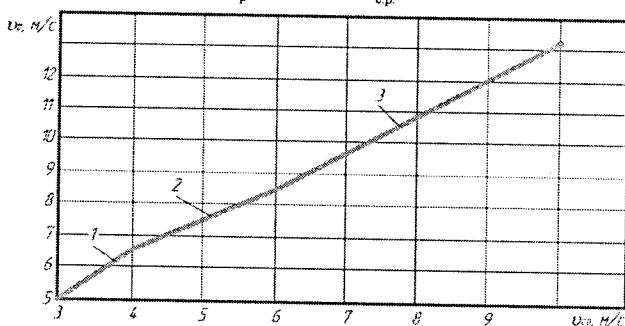


Рис. 3.15. Залежність розрахункової швидкості вітру  $v_p$  від середньорічної швидкості вітру  $v_{c.p.}$

Ми пропонуємо визначати розрахункову швидкість вітру подібно до того, як знаходять діюче значення струму в електротехніці. Через те що потужність потоку повітря пропорційна кубу його швидкості, розрахункове значення середньої швидкості вітру пропонуємо визначати за формулою [26]:

$$v_p = \sqrt[3]{\frac{\sum v_i^3 \cdot t_i}{\sum t_i}}, \quad (3.17)$$

де  $v_i$  – швидкості вітру протягом періоду часу  $t_i$ , м/с.

У результаті розрахунків одержано можливість представити з достатньою точністю (близько 1 %) залежність між розрахунковими значеннями швидкостей вітру  $v_p$  та їх середніми значеннями  $v_c$  у вигляді емпіричної лінійної функції

$$v_p = 0,638 + 1,082 \cdot v_c. \quad (3.18)$$

### 3.4. Використання довідкової бази даних

Для попереднього аналізу метеорологічної ситуації, зокрема вітрового потенціалу досліджуваної території, можна скористатись довідником з метеорології або числовими даними з метеорологічних сайтів, наприклад, сайту NASA Surface meteorology and Solar Energy. Зокрема, наведені такі усереднені за місяць і рік енергетичні характеристики вітру:

- середня швидкість на висоті 50 м;
- різниця між максимальною і середньою швидкостями;
- повторюваність вітру в діапазонах: 0–2; 3–6; 7–10; 11–14; 15–18 і 19–25 м/с;
- термінові середні швидкості вітру, виміряні з 8-кратною добовою періодичністю;
- середньомісячні напрями вітру в градусах на висоті 50 м;
- термінові напрями вітру, виміряні з 8-кратною добовою періодичністю;
- швидкість вітру на висоті 10 м для територій, подібних до аеропортів;

- різниця між швидкостями на висоті 50 і 10 м за наявності 14 м деревостою і 50 % покриття;
- середня швидкість, приведена до 10-метрової висоти, за наявності 14 м деревостою і 50 % покриття;
- середня швидкість на висотах 50, 100, 150 і 300 м за наявності 14 м деревостою і 50 % покриття;
- середньомісячна швидкість вітру на висоті 10 м за 16-ма типами відкритості території з рослинним покривом (табл. 3.4).

Наведені табличні дані дистанційного моніторингу атмосфери призначені насамперед для потреб метеорології, тому дають змогу розв'язати лише обмежене коло задач вітроенергетики. Наприклад, за ними неможливо однозначно встановити параметри функції розподілу швидкостей внаслідок занадто грубого поділу повторюваності на швидкісні інтервали. Водночас за останнім у переліку сервісом можна з високою достовірністю прогнозувати вертикальний профіль вітру у приземному шарі внаслідок екстраполяції залежності з висот 50, 100, 150 і 300 м. Наприклад, на запит даних щодо параметрів вітру в м. Дублянах Жовківського району Львівської області на висоті 10 м отримано результати розрахунку для висоти 10 м, розмішені у таблиці з 16 варіантами структури підстилаючої поверхні (див. табл. 3.4), зокрема для типової ділянки з 20-метрових широколистяних дерев (10 % покриття) і пшеничного поля розрахована швидкість вітру на висоті 10 м становить 3,54 м/с при середній на висоті 50 м – 5,89 м/с. Наведених даних достатньо для розрахунку швидкості на довільній висоті  $z$ , якщо попередньо розрахувати показник степеня  $b'$  за залежністю (2.9):

$$5,89 = 3,54 \left( \frac{z}{10} \right)^{b'} \quad \text{або} \quad \ln \frac{5,89}{3,54} = b' \ln 5,$$

звідки

$$b' = \frac{\ln 1,6638}{\ln 5} = 0,3163.$$

Таблиця 3.4

Середньомісячні швидкості вітру для м. Дубляни на висоті 10 м

Тип поверхні	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	У серед- ньому за рік
35 м – широколистяні вічнозелені дерева (70 % покриття)	3,69	3,29	2,42	2,31	2,08	2,65	2,61	2,52	2,95	2,43	2,67	3,55	2,76
20 м – широколистяні породи дерев із сезонним падолістом (75 % покриття)	4,55	4	2,89	2,71	2,37	2,87	2,74	2,73	3,36	2,85	3,19	4,31	3,21
20 м – широколистяні і хвойні дерева (75 % покриття)	3,46	3,29	2,58	2,54	2,37	3,06	3,02	2,77	3,15	2,47	2,63	3,38	2,89
17 м хвойні, вічнозелені дерева (75 % охолднення)	3,94	3,75	2,89	2,85	2,53	3,16	3,07	2,96	3,47	2,81	3,04	3,91	3,19
14 м хвойні, листяні дерева (50 % покриття)	4,07	3,75	2,84	2,8	2,53	3,26	3,22	2,91	3,2	2,55	2,8	3,79	3,14
Савава (лісоств): 18 м широколистяні дерева (30 %) і ґрунтовий покрив	4,07	3,63	2,66	2,54	2,3	2,92	2,88	2,77	3,25	2,67	2,94	3,91	3,04
0,6 м багаторічний ґрунтовий покрив (100% покриття)	5,1	4,55	3,34	3,19	2,88	3,65	3,61	3,47	4,07	3,35	3,69	4,9	3,81
0,5 м широколистяні чагарники (змінний відсоток) і ґрунтовий покрив	5,1	4,55	3,34	3,19	2,88	3,65	3,61	3,47	4,07	3,35	3,69	4,9	3,81
0,5 м широколистяні чагарники (10 % покриття) з оголеним ґрунтом	5,1	4,55	3,34	3,19	2,88	3,65	3,61	3,47	4,07	3,35	3,69	4,9	3,81
Тундра: 0,6 м дерева / кущі (змінний відсоток) і ґрунтовий покрив	5,1	4,55	3,34	3,19	2,88	3,65	3,61	3,47	4,07	3,35	3,69	4,9	3,81
Шторсткий оголений ґрунт	5,53	4,93	3,62	3,45	3,12	3,96	3,91	3,76	4,42	3,63	4	5,31	4,13
Місце збору: 20 – метрові широколистяні дерева (10 % покриття) і пшениця	5,02	4,33	3,56	2,8	2,53	3,21	3,17	3,05	3,58	3,04	3,46	4,75	3,54
Шторсткий льодяний сніг/лід	4,48	4,13	3,18	3,14	2,83	3,6	3,55	3,42	3,88	3,04	3,29	4,31	3,57
Гладкий лід	5,89	5,52	4,25	4,26	3,84	4,88	4,82	4,42	4,94	3,81	4,19	5,58	4,7
Відкрита волойма	6,7	5,98	4,39	4,19	3,78	4,81	4,75	4,57	5,36	4,4	4,85	6,45	5,01
Аеропорт: площка шторстка трава	6,18	5,52	4,05	3,87	3,49	4,43	4,38	4,21	4,94	4,06	4,47	5,95	4,63



Результати розрахунку на інших висотах подано на рис. 3.16.

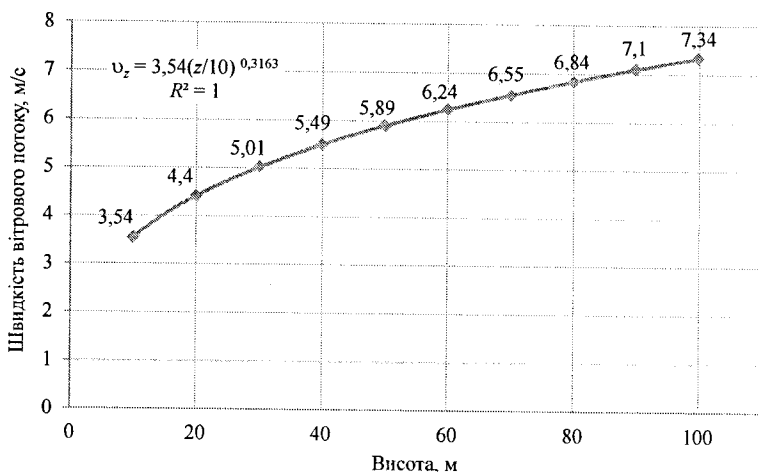


Рис. 3.16. Вертикальний профіль вітру у м. Дублянах, побудований за даними сайту NASA Surface meteorology and Solar Energy

### 3.5. Репрезентативність результатів вимірювань швидкості вітру

У загальному випадку шорсткість підстилаючої поверхні та рельєф рідко відповідають стандартизованим умовам, наведеним у табл. 3.4. До того ж, вибираючи майданчик для встановлення ВЕУ, часто орієнтуються на особливості рельєфу, забудови, водойм, де формуються сильніші або стабільніші повітряні потоки. Тому для приведення результатів вимірювання до стандартизованих умов вводять поняття класу відкритості місцевості. За прийнятою в Україні класифікацією, клас відкритості залежить також від рельєфу, площі і віддаленості водойм, розташування й висоти окремих природних чи антропогенних перешкод тощо (див. табл. 3.4).

Відтак результати вимірювань, проведених за умов, що відрізняються від стандартизованих, належить виправити за допомогою коефіцієнта відкритості території. Майданчики, загальний клас відкритості яких за табл. 3.5 не нижчий

7б (10), називають репрезентативними, позаяк результати вимірювання на них не потребують виправлення.

Таблиця 3.5

Шкала відкритості метеорологічної станції за В. Ю. Мілевським

Ступінь відкритості флюгера	Форма рельєфу		
	випукла ( $a, \alpha$ )	плоска ( $b, \beta$ )	увігнута ( $c, \gamma$ )
Поблизу водойм			
Відкрите узбережжя:			
- океану або відкритого (зовнішнього) моря	12 $a$ (23)	11 $b$ (21)	10 $c$ (18)
- закритого (внутрішнього) моря	11 $a$ (22)	10 $b$ (19)	9 $c$ (15)
- затоки, великого озера	10 $a$ (20)	9 $b$ (16)	8 $c$ (12)
- великої річки	9 $a$ (17)	8 $b$ (13)	7 $c$ (9)
Далеко від великих водойм			
Флюгер вище навколишніх предметів:			
- немає жодних елементів затінення (пагорби, дерева)	8 $a$ (14)	7 $b$ (10)	6 $c$ (6)
- окремі елементи затінення (пагорби, дерева)	7 $a$ (11)	6 $b$ (7)	5 $c$ (4)
- серед елементів затінення (пагорби, дерева)	6 $a$ (8)	5 $b$ (5)	4 $c$ (3)
Флюгер нижче навколишніх предметів:			
- серед елементів затінення	4 $a$ (2)	4 $b$ (1)	4 $c$ (0)

Клас відкритості метеостанції, визначається за класифікацією В. Ю. Мілевського і характеризує ступінь відкритості вимірювального приладу вітровому потоку за кожним напрямом. Загальний клас відкритості розраховують за формулою

$$K_{\text{зар}} = \sum_1^{\text{НР}} K_{\text{табл}} \cdot \Delta\Phi, \quad (3.19)$$

де НР – кількість напрямів у румбах, може бути 8 або 16, що відповідає азимутальному сектору у 45 і 22,5° відповідно.

$K_{\text{табл}}$  – табличний клас відкритості за кожним румбом напрямку вітру;

$\Delta\Phi$  – табличне значення повторюваності вітру в цьому румбі протягом року, %.

У випадку нерепрезентативного вимірювального майданчика, поблизу якого передбачається встановлення ВЕУ, результати вимірювання виправляють за допомогою поправкового коефіцієнта відкритості  $K_v$ , який розраховують за формулою

$$K_v = \sum_1^{HP} \frac{K_{\max}}{K_{\text{табл}}} \cdot \Delta\Phi, \quad (3.20)$$

де  $K_{\max}$  – максимальний коефіцієнт відкритості, який приймають:  $K_{\max} = 9$  для районів, що знаходяться на відкритому узбережжі моря або океану, а також для островів;  $K_{\max} = 8$  – для районів, що знаходяться у прибережній зоні;  $K_{\max} = 7$  – для районів, віддалених від берегової лінії; якщо максимальне значення табличного коефіцієнта відкритості  $K_{\text{табл.макс}}$  більше, ніж вказані вище значення  $K_{\max}$ , то слід прийняти  $K_{\max} = K_{\text{табл.макс}}$ .

Швидкість вітру для умов відкритої місцевості  $v$  з урахуванням поправкового коефіцієнта  $K_v$  визначається співвідношенням

$$v = v_{\text{табл}} \cdot K_v, \quad (3.21)$$

де  $v_{\text{табл}}$  – табличне (задане) значення швидкості вітру без урахування поправки на відкритість.

Особливий вітровий режим, який можна визначити лише безпосередніми вимірюваннями, встановлюється на узвишсях та в ущелинах. Наприклад, на вершині крутого пагорба (рис. 3.17, а) внаслідок утворення вихорів вітровий потік неоднорідний. Якщо хоча б частина ротора вітроустановки омивається таким потоком, то його частота обертання буде нижчою, ніж на рівнині, за однакової середньої швидкості вітру. Саме тому для монтажу часто вибирають пологі схили пагорбів замість вершини (рис. 3.17, б).

Для нормальної роботи агрегату необхідно, щоб відстань від осі ротора вітроустановки була не менш як удвічі більшою за висоту перешкоди (рис. 3.18) або забезпечувалась десятикратна відстань від перешкоди до місця встановлення вітрового ротора з відповідними висотами. Зокрема будівлі, дерева та інші одиничні перешкоди, що знаходяться в безпосередній близькості від установки, мають бути принаймні на 2 м нижчими, ніж розташування

нижнього кінця лопаті. Також, згідно з рекомендаціями, висота розташування осі вітрового ротора в такому разі повинна бути вдвічі вищою від висоти перешкоди.

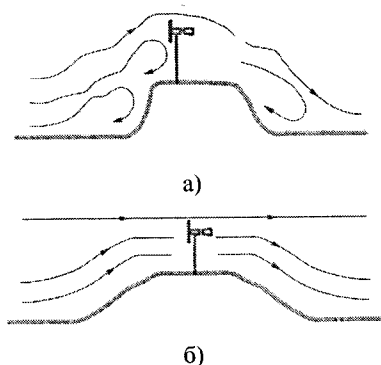


Рис. 3.17. Проходження вітровим потоком пагорба:  
а – з пологим схилом; б – з крутим схилом

На рис. 3.18 наведені варіанти вдалого і невдалого розташування вітроустановки відносно природних і штучних перешкод.

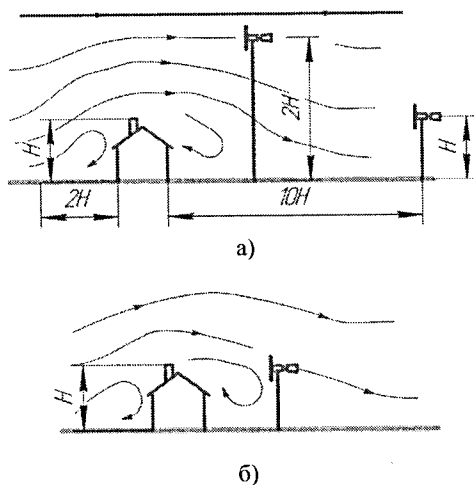


Рис. 3.18. Умови розташування вітроустановки:  
а – вдале розташування, б – невдале розташування

### Питання для самоконтролю

1. Які існують методи вимірювання швидкості вітру?
2. Охарактеризуйте вимірювальні прилади для оцінки параметрів вітру механічного типу.
3. Подайте відомості про види сучасних мікропроцесорних приладів для оцінки швидкості вітру.
4. Охарактеризуйте сучасні метеорологічні станції для оцінки швидкості вітру.
5. Які сучасні технічні засоби можна використати для вимірювання швидкості вітру?
6. Опишіть методику побудови функції розподілу за результатами вимірювань.
7. Дайте визначення розрахункової швидкості вітру.
8. Викладіть методику визначення розрахункової швидкості вітру.
9. Яке співвідношення належить використовувати для визначення розрахункової швидкості вітру при відомому середньому значенні?
10. Охарактеризуйте технологію оцінки швидкості вітру за матеріалами відкритих довідкових баз даних.
11. Охарактеризуйте поняття та методику оцінки репрезентативності результатів вимірювань швидкості вітру.
12. Подайте відомості щодо вдалого та невдалого розташування вітроустановки відносно природних або штучних затіновачів.

## 4. ВІТРОПРИЙМАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ І ПРИСТРОЇ

### 4.1. Сила лобового тиску вітру

Найпростішим робочим механізмом для перетворення енергії потоку на корисну роботу є непроникна поверхня (перешкода), яка переміщується під дією вітру. У випадку плоскої перешкоди, перпендикулярної напрямку потоку (рис. 4.1), спереду утворюється зона підвищеного швидкісного напору потоку, а позаду, навпаки – зменшеного. Різниця тисків зрівноважується протилежною силою лобового опору пластинки  $F_x$ . За малих швидкостей обтікання завихрення не виникають, тому силу тиску на площину, яка переміщується зі швидкістю  $v_n$  вздовж вектора швидкості вітру  $v_0$  можна розрахувати за відомою формулою аеродинаміки:

$$F_x = C_x S \rho \frac{(v_0 - v_n)^2}{2}, \quad (4.1)$$

де  $S$  – площа взаємодіючої поверхні;

$\rho$  – густина повітря;

$C_x$  – аеродинамічний коефіцієнт опору, залежний від геометричних параметрів поверхні та умов її обтікання потоком.

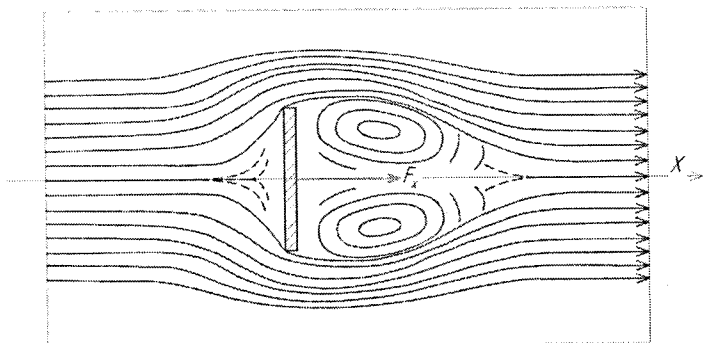


Рис. 4.1. Обтікання плоскої перешкоди перпендикулярно вектору швидкості

Значення коефіцієнтів  $C_x$  для тіл різної форми при їх обтіканні вільним потоком (вітром) наведені на рис. 4.2.

Назва тіла	Форма тіла і напрям потоку	Площинна мітка (місцевий переріз)	Відношення сторін поверхні	Коефіцієнт опору $C_x$
Кругла пластина		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	1,11
Конус		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,44
Конус із заокругленою вершиною		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,22
Еліпсоїд обертання		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,044
Прямокутна пластина		$a \times b$	$\frac{a}{b}$ 4 10 $\infty$	1,1 1,1 1,28 1,83
Куля		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,47
Півкуля		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,47
Пустотіла півкуля		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,34
Циліндр		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,84
Циліндр із заокругленням		$\frac{\pi \cdot d^2}{4}$	-	0,23
Циліндр		$l \times d$	$\frac{l}{d}$ 1 5 40	0,63 0,74 1,2

Рис. 4.2. Характеристики лобового опору тіл залежно від їх форми та розташування у вітровому потоці

Корисну потужність, яку поверхня передає робочому механізму, можна розрахувати як добуток сили на швидкість переміщення робочої поверхні  $v_n$ :

$$P = F_x v_n = C_x S \rho \frac{(v_0 - v_n)^2}{2} v_n. \quad (4.2)$$

Відтак важливий для практики показник – коефіцієнт ефективності використання потужності вітрового потоку  $C_p$  (коефіцієнт потужності) – розраховують за відношенням (4.2) до (1.4):

$$C_p = \frac{C_x S \rho \frac{(v_0 - v_n)^2}{2} v_n}{\frac{S \rho v_0^3}{2}} = C_x (v_0 - v_n)^2 \frac{v_n}{v_0^3}. \quad (4.3)$$

Після перетворень отримаємо:

$$C_p = C_x \cdot \left(1 - \frac{v_n}{v_0}\right)^2 \frac{v_n}{v_0}. \quad (4.4)$$

Значення  $C_p$  залежить від швидкості переміщення поверхні і дорівнює нулю у двох крайніх випадках: для нерухомої поверхні, коли  $v_n = 0$ , та при вільному переміщенні у потоці, коли  $v = v_n$ . Очевидно, що свого максимального значення коефіцієнт потужності набуває всередині проміжку  $0 < v_n < v$ , а відповідну оптимальну швидкість переміщення можна розрахувати, користуючись загальним правилом пошуку екстремуму функції. Для спрощення введемо величину  $v_n/v_0 = e$ . Після підстановки у рівняння (4.4) маємо:

$$C_p = C_x \cdot (1 - e)^2 e = C_x (e - 2e^2 + e^3). \quad (4.5)$$

Прирівнюючи першу похідну рівняння (4.5) до нуля

$$\frac{\partial C_p}{\partial e} = C_x (1 - 4e + 3e^2) = 0, \quad (4.6)$$

отримаємо квадратне рівняння

$$3e^2 - 4e + 1 = 0, \quad (4.7)$$



яке має два розв'язки при  $e_1=1/3$  і  $e_2=1$ . Але при  $e=1$   $C_x=0$ , тому необхідно прийняти єдиний критерій максимуму:

$$e = \frac{v_n}{v_0} = \frac{1}{3}. \quad (4.8)$$

Таким чином, щоб отримати максимальні значення  $C_p$ , поверхня повинна рухатись із швидкістю

$$v_n = \frac{1}{3}v_0. \quad (4.9)$$

З урахуванням останнього співвідношення коефіцієнт використання енергії вітру визначається такою формулою:

$$C_p = \frac{4}{27}C_x = 0,148 \cdot C_x. \quad (4.10)$$

Максимальний коефіцієнт лобового опору  $C_x \approx 1,3$  мають угнуті (чашкоподібні) поверхні, розташовані перпендикулярно до потоку вітру, тому коефіцієнт використання енергії вітру при використанні сили лобового тиску опору не може перевищувати значення

$$C_{p\max} = 0,148 \cdot 1,3 = 0,192. \quad (4.11)$$

Силу лобового тиску перетворюють в обертовий момент вала робочого механізму за допомогою жорстко сполучених і протилежно спрямованих напівсфер (чашковий анемометр) або порожнистих напівциліндрів (ротор Савоніуса, рис. 4.3).

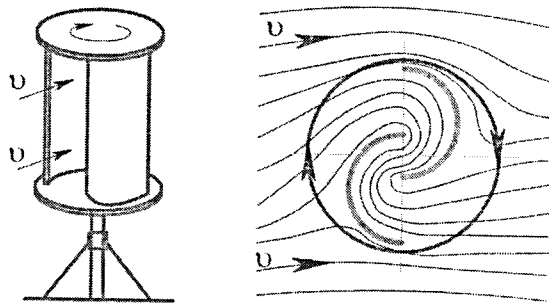


Рис. 4.3. Ротор Савоніуса

#### 4.2. Взаємодія вітру з похилою поверхнею

Вісь обертання ротора, який використовує силу лобового тиску, може приймати довільну просторову орієнтацію, але тільки в площині, перпендикулярній вектору швидкості. Такі вітродвигуни нечутливі до зміни напрямку вітру, що значно спрощує вимоги до їх конструктивного виконання. Але самі сприймальні елементи при обертанні періодично змінюють орієнтацію відносно вітру на протилежну з відповідною зміною лобового опору від мінімального значення до максимального і навпаки. Таким чином сприймальні елементи ротора лобового тиску обдуваються вітром переважно під змінним кутом до основного осьового перерізу, коли виникають додаткові бокові тиски. Навіть найпростіший пристрій лобового опору – корабельне вітрило – часто виставляють під кутом до потоку з метою руху судна в потрібному напрямі. Тому умови взаємодії поверхні з боковим вітром вивчають на прикладі похилої площини зі специфічним розподілом потоків, які її обтікають, наведеним на рис. 4.4.

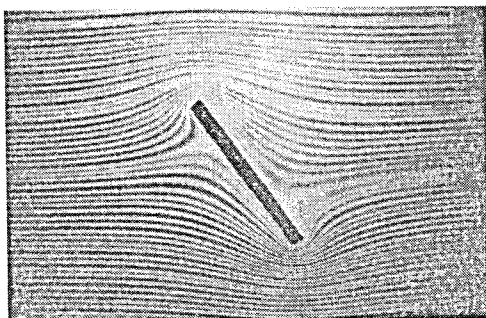


Рис. 4.4. Обтікання плоскої похилої поверхні ламінарним потоком

З несиметричного розподілу струмин випливає, що лобовий тиск на поверхні пластини розподілений нерівномірно і несиметрично відносно її центра. Відтак загальну силу  $R$ , яка діє на нерухому похилу пластину, можна розкласти на дві: лобового тиску в напрямі потоку  $Q$  та поперечного

відхилення  $F$ , яку називають підйомною силою. Кут  $\alpha$  між площиною і вектором швидкості називають кутом атаки (рис. 4.5).

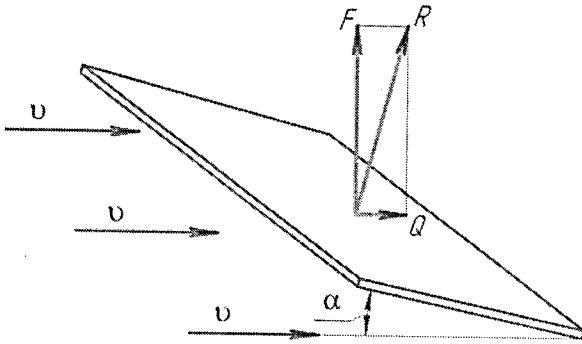


Рис. 4.5. Складові сили при обтіканні плоскої похилої поверхні

Співвідношення між підйомною силою і лобовим опором змінюється залежно від кута атаки і умов обтікання потоком. Обидві сили визначаються тільки експериментально, наприклад за допомогою продування відповідних моделей в аеродинамічних трубах. Результат вимірювання зазвичай подають через відповідний коефіцієнт до виразу динамічного тиску потоку  $\rho v^2/2$ .

З практики використання пристроїв лобового тиску вітру відомо, що співвідношення між силами залежить від кута нахилу поверхні до вектора потоку (кута атаки) і топології сприймальної поверхні (див. рис. 4.5 і 4.6) внаслідок різних умов обтікання (див. рис. 4.4, 4.7). Складові сил, моментів та інших аеродинамічних величин позначають з відповідним індексом або просто їх координатами:  $Q \equiv R_x \equiv X$  і  $F \equiv R_y \equiv Y$ . Коефіцієнти для їх розрахунку за результатами вимірювань позначають як  $C_R$ ,  $C_x$  і  $C_y$ .

Поступальну енергію потоку перетворюють на корисну роботу за допомогою поворотної лопаті – похилої поверхні з віссю обертання, паралельною вектору швидкості вітру.

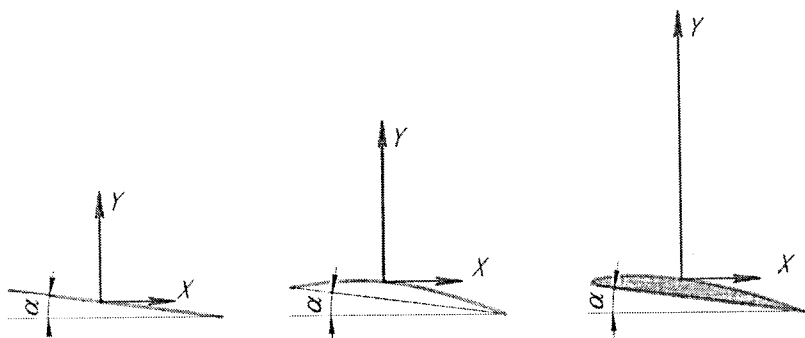


Рис. 4.6. Співвідношення сил при взаємодії потоку з похилою поверхнею різного профілю: плоскою, угнутою (вітрило), обтічною

Лопать під дією підйомної сили обертається у площині, перпендикулярній потоку, зі збереженням заданого кута атаки. Аеродинамічну якість лопаті характеризують відношенням підйомної сили до сили опору або пропорційних їм відповідних коефіцієнтів:

$$k = \frac{Y}{X} = \frac{C_y}{C_x}. \quad (4.12)$$

Найкраще відношення обох сил мають поверхні обтічного профілю завдяки незначному збуренню набігаючого потоку навіть при великих швидкостях (див. рис. 4.7). Зокрема, якість профілю авіаційних крил з ламінованою поверхнею при малих кутах атаки може досягати значення  $k$  від 150 до 180.

Криві, які характеризують аеродинамічні співвідношення між складовими компонентами сил, що діють на профільовану поверхню, називають її аеродинамічними характеристиками, а відповідну залежність між коефіцієнтами  $C_y = f(C_x)$  за фіксованих значень  $\alpha$  – полярами Лілієнталя (рис. 4.8).

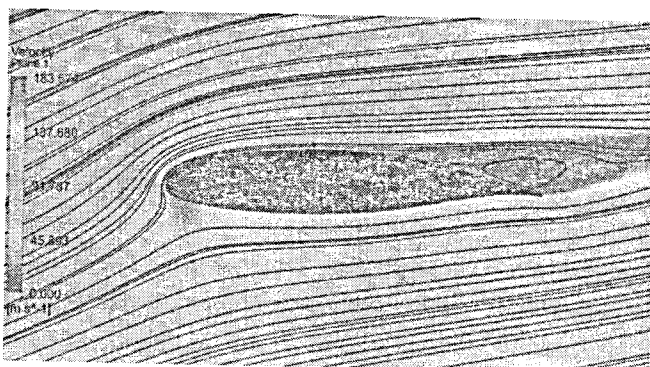


Рис. 4.7. Розподіл струмин навколо обтічної профільованої поверхні

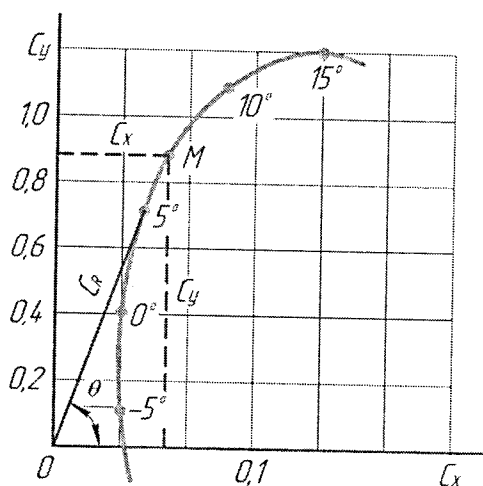


Рис. 4.8. Поляра Лілієнталя

Поляри будують за результатами вимірювання відповідних сил при обдуванні моделей потоком повітря. З графічної побудови зручно визначати основні аеродинамічні характеристики взаємодіючої поверхні. Наприклад, відрізок, який сполучає початок координат з будь-якою точкою поляри, рівний значенню  $C_R$ , а тангенс кута його нахилу до  $X$  – якості профілю:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{C_y}{C_x} = k. \quad (4.13)$$

У разі збільшення кута атаки зростає й площа поперечного перерізу потоку. Найбільший за площею переріз у площині, перпендикулярній напрямку вектора швидкості, називають перерізом Міделя. Відтак зміною кута атаки регулюють співвідношення між силами опору та підйомною з метою стабілізації швидкості обертання або повної зупинки ротора вітроустановки за надмірної швидкості вітру.

Профіль лопаті суттєво впливає на її аеродинаміку, зокрема співвідношення сили опору і підйомної сили, турбулізацію повітряного потоку, зрив повітряного потоку з поверхні лопаті тощо.

У сучасній вітротехніці переважно використовують профілі, зображені на рис. 4.9, за полярями яких визначають їх аеродинамічні параметри.



Рис. 4.9. Основні типи аеродинамічних профілів: *a* – опуклий (Есперо); *б* – симетричний (NACA-0016); *в* – угнута поверхня (вітрило); *г* – опукло-угнутий

Серед профілів, зображених на рис. 4.9, кращі аеродинамічні показники мають профілі *a*, *б*, *г*.

#### 4.3. Вирази для сил і моментів, що діють на лопать

Кінетичну енергію вітру перетворюють на енергію обертового руху за допомогою лопаті – сприймальної поверхні, закріпленої одним кінцем до обертового вала робочого механізму. Статичні й динамічні характеристики поворотної лопаті описують переважно тривимірною прямокутною системою координат – потоковою або зв'язаною. У потоковій системі вісь ординат паралельна вектору швидкості набігаючого потоку, обидві сили – лобового

тиску  $F_x$  і підйомна – знаходяться у площині  $xy$ , а крутний момент діє вздовж осі  $z$ . (рис. 4.10).

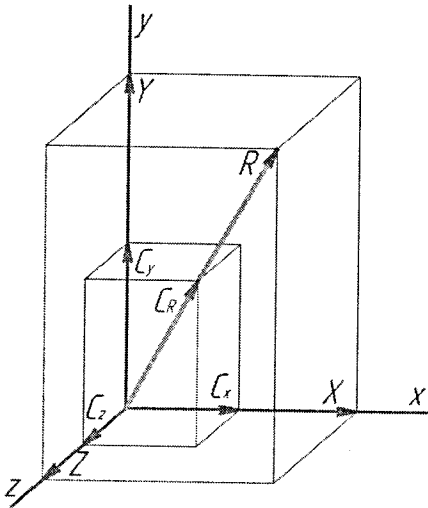


Рис. 4.10. Розклад повної аеродинамічної сили  $R$  та її коефіцієнта  $C_R$  на складові за осями координат

В аеродинаміці для скорочення викладок сили і моменти прийнято позначати через узагальнені величини  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ , а відповідні формули для їх розрахунку – через коефіцієнти  $C_x$ ,  $C_y$  і  $C_z$  до виразу для швидкісного напору потоку  $q = \rho v^2/2$ :

- лобовий опір:

$$X = C_x Sq = C_x S \rho \frac{v^2}{2}; \quad (4.14)$$

- підйомна сила:

$$Y = C_y Sq = C_y S \rho \frac{v^2}{2}; \quad (4.15)$$

- бічна сила (закручування):

$$Z = C_z Sq = C_z S \rho \frac{v^2}{2}, \quad (4.16)$$

де  $C_z$  – коефіцієнт бічної сили;  
 $S$  – площа натуральної моделі, м<sup>2</sup>.

Сила  $R_a$  і коефіцієнт  $C_R$  є рівнодійними відповідних компонентів, тобто

$$R_a = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \quad (4.17)$$

$$C_R = \sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}. \quad (4.18)$$

Подібні співвідношення можна отримати й для моментів сил:

- момент крену:

$$M_X = C_{mx} SLq = C_{mx} SL\rho \frac{v^2}{2}; \quad (4.19)$$

- момент ристання:

$$M_Y = C_{my} SLq = C_{my} SL\rho \frac{v^2}{2}; \quad (4.20)$$

- момент тангажа:

$$M_Z = C_{mz} SLq = C_{mz} SL\rho \frac{v^2}{2}. \quad (4.21)$$

Рівнодійний, або повний, момент:

$$M = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2 + M_Z^2}; \quad (4.22)$$

$$C_m = \sqrt{C_{mx}^2 + C_{my}^2 + C_{mz}^2}, \quad (4.23)$$

де  $C_{mx}$ ,  $C_{my}$ ,  $C_{mz}$  – безрозмірні коефіцієнти моментів. Коефіцієнт  $C_m$  називаються коефіцієнтом повного аеродинамічного моменту.

Тоді основна формула аеродинаміки для моментів запишеться так:

$$M = C_m SL\rho \frac{v^2}{2}, \quad (4.24)$$

де  $S$  – площа лопатей;

$L$  – умовна довжина лопаті – до точки прикладання сили.

Поняття центра тиску, а за давнішою термінологією – центра вітрильності, виникло у зв'язку з вивченням стійкості тіл під час їх обдування потоком повітря. У загальному випадку положення центра тиску



визначається координатою  $x_g$ , яка знаходиться на перетині повної аеродинамічної сили  $R$  з віссю  $OX$  (рис. 4.11). Центр тиску чисельно характеризують безрозмірним коефіцієнтом  $C_g$ , який для обтічних профілів розраховують через відношення координати центра тиску  $x_g$  до ширини (хорди) лопаті  $b$ :

$$C_g = \frac{x_g}{b} \text{ або } C_g = \frac{x_g}{b} 100\%. \quad (4.25)$$

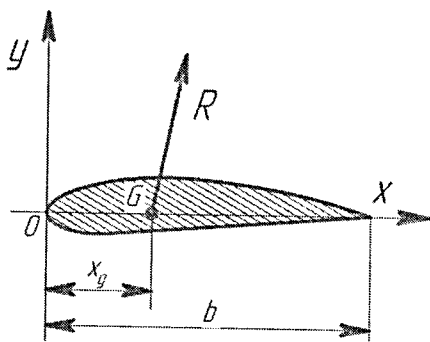


Рис. 4.11. Величини для розрахунку центра тиску

Величини  $C_m$  і  $C_y$  відомі з продувок в аеродинамічній трубі, отже, за їх часткою можна визначити коефіцієнт  $C_g$ . Для цього коефіцієнти моменту  $C_m$  і центр тиску  $C_g$  наносять у вигляді кривих на графік з кривою Лілієнталя:  $C_m$  як функцію  $C_y$ , а  $C_g$  – як функцію  $\alpha$ :

$$C_m = f(C_y) \text{ і } C_g = f(\alpha). \quad (4.26)$$

Для розрахунків аеродинамічних векторних величин лопаті, яка обертається, зручно користуватися так званою зв'язаною (з лопаттю) системою координат з початком у центрі тиску (рис. 4.12). Координатні осі зв'язаної системи координат  $(x_1; y_1)$  повернуті на кут атаки  $\alpha$  відносно осей  $(x; y)$  потокової системи.

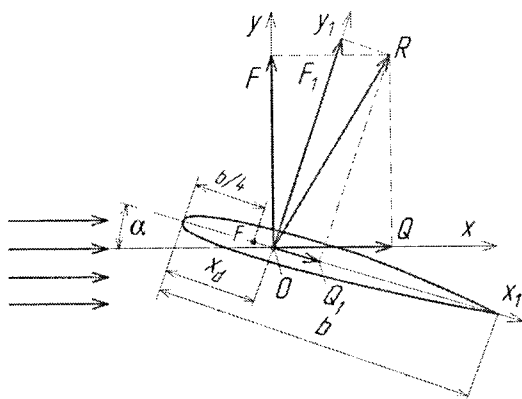


Рис. 4.12. Потокова ( $x; y$ ) та зв'язана ( $x_1; y_1$ ) системи координат: для симетричного профілю центр тиску знаходиться на віддалі  $1/4$  довжини хорди

#### 4.4. Умови обтікання лопаті під час її обертання

Обтічний профіль крила літака створює підйомну силу для руху паралельно вектору швидкості потоку, тоді як лопаті – для перетворення кінетичної енергії потоку в обертний рух ротора вітродвигуна у площині, перпендикулярній потоку. Саме тому крило орієнтують у потоці під малим кутом атаки, а лопать – під великим (рис. 4.13).

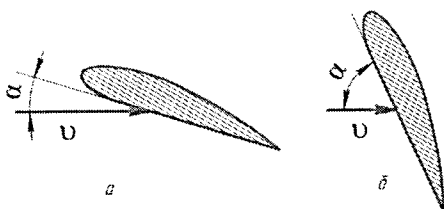


Рис. 4.13. Типові кути атаки набігаючого потоку на: а – крило літака; б – лопать вітродвигуна

Для елемента лопаті, яка обертається впоперек потоку з коловою швидкістю  $\omega r$  ( $\omega$  – кутова швидкість і  $r$  – радіус обертання елемента), відносна швидкість  $W$ , кут атаки  $\alpha$  та відповідний розклад сил визначаються за правилом додавання векторів, як показано на рис. 4.14.

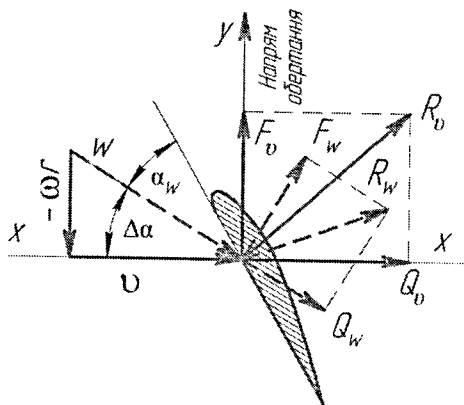


Рис. 4.14. План швидкостей і сил елемента лопаті, яка обертається у площині, перпендикулярній рисунку:  
 $X-X$  – вісь обертання;  $\Delta\alpha$  – кут скосу;  $\alpha$  – ефективний кут атаки

З побудови на рис. 4.14 випливає, що при зміні швидкості вітру одночасно змінюється й кут атаки на елемент лопаті на величину  $\Delta\alpha$  (кут скосу), що веде до зміни співвідношення складових сил і відповідної зміни швидкості обертання. Отже, для її стабілізації необхідно коригувати кут атаки поворотом лопаті.

Оскільки лопать складається з багатьох елементів з різним радіусом обертання, то ефективний кут атаки і відповідно співвідношення між аеродинамічними величинами вздовж лопаті також змінюються (рис. 4.15). Тому, з метою запобігання деформації кручення і збільшення ефективності перетворення, лопаті надають спіралеподібного вигину вздовж її осі.

Лопать, яка обертається в поперечній до потоку площині, викликає (індукує) у ньому два додаткові потоки: осьовий  $\Delta v_1$ , протилежний до набігаючого потоку, та коловий  $u_1$ . Перший чисельно дорівнює втраті швидкості набігаючого потоку в області площини обертання лопаті внаслідок перетворення частини кінетичної енергії вітру на роботу обертання.

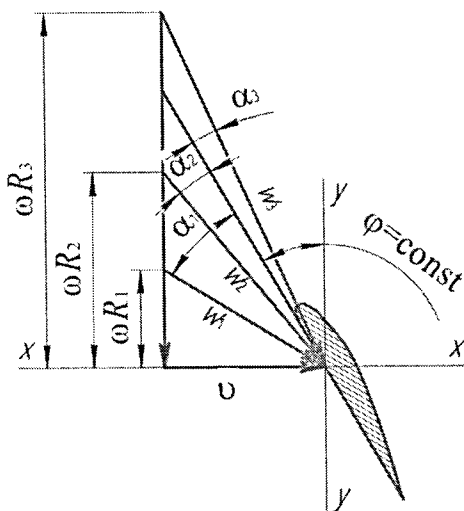


Рис. 4.15. Зміна кута атаки вздовж лопаті:  $R_1 < R_2 < R_3$

Натомість другий завдячує перетіканню частини потоку з області високого тиску під крилом в область низького тиску над ним. Результативні швидкості й сили визначають за векторною діаграмою, наведеною на рис. 4.16.

На схемі елемент лопаті обертається навколо осі, паралельної вектору  $u$  набігаючого потоку, у площині, перпендикулярній рисунку і лінії перетину  $y$ - $y$ . Відносна швидкість вітру  $W$ , при обертанні елемента лопаті, яка обертається з коловою швидкістю  $\omega r$  ( $\omega$  – кутова швидкість і  $r$  – радіус обертання елемента), є геометричною сумою таких складових: вхідної швидкості вітру  $u$ , швидкості у площині ротора  $u_1 = u - \Delta u_1$  та різниці індуктивної швидкості  $u_1$  і колової. Її розраховують як гіпотенузу трикутника за формулою

$$W = \sqrt{u_1^2 + (-\omega r - u_1)^2}. \quad (4.27)$$

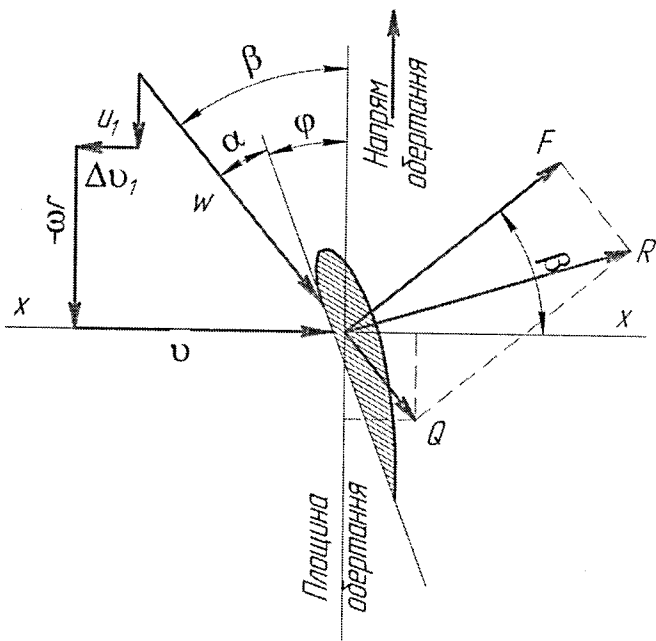


Рис. 4.16. План сил і швидкостей реального елемента лопаті:  
 $\beta$  – кут між площиною обертання ротора і напрямом набігаючого повітряного потоку;  $\phi$  – кут заклинення;  $\alpha$  – ефективний кут атаки

Значення  $u_1$  змінюється за довжиною лопаті і на практиці його приймають рівним середньому в робочій зоні.

Підйомна сила, відома під назвою ефекту Магнуса, виникає також і при обтіканні циліндра, який обертається в потоці повітря. Сила завжди скерована в напрямі, де вектор лінійної швидкості твірної поверхні збігається з напрямом вітру (рис. 4.17). Зокрема, ефектом Магнуса пояснюються складні траєкторії польоту м'яча при кручених ударах. А відомий океанограф Жак-Ів Кусто у 1985 р. навіть встановив на двоцогловій яхті "Алкіона" експериментальне циліндричне турбовітрило.

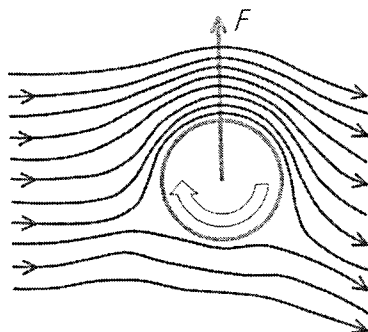


Рис. 4.17. Схема виникнення підйомної сили під час обтікання обертового циліндра

Значення підйомної сили турбовітрила визначають за теоремою Жуковського:

$$F = \rho \Gamma v L, \quad (4.28)$$

де  $\rho$  – густина повітря;

$\Gamma$  – циркуляція швидкості;

$L$  – довжина циліндра.

#### 4.5. Ротор горизонтально-осьової вітроенергетичної установки

Ротор вітроустановки складається з кількох лопатей – від 1 до 24, а загалом їх може бути й більше ніж 24. Швидкість обертання ротора визначається числом лопатей, залежить від їх геометричних та аеродинамічних параметрів та просторової орієнтації відносно потоку. Конструктивна схема горизонтально-осьового лопатевого ротора наведена на рис. 4.18.

Лопать складається з маху  $a$  і власне лопаті  $b$ , закріпленої на маху таким чином, що її сприймальна поверхня утворює з площиною обертання кут заклинення  $\phi$ . Цей кут зменшується вздовж лопаті з метою оптимізації кута атаки для кожного її елемента. Лопать зі змінним кутом заклинення  $\phi$

отримує форму гвинтової поверхні. Механізмом зміни кута заклинення регулюють швидкість обертання ротора від нульової до максимальної. Площу, окреслену кінцем лопаті, називають площею обмаху. Вітряком зазвичай називають вітроустановку з лопатевим ротором і горизонтальною віссю обертання.

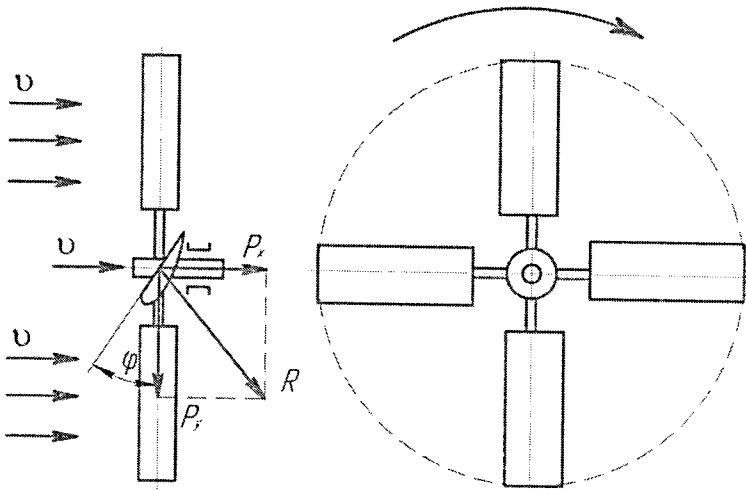


Рис. 4.18. Конструктивна схема горизонтально-осьового лопатевого ротора: а – мах; б – лопать

Перетікання потоку з області високого тиску під лопаттю (крилом) в область низького над ним відбувається на незакріплених кінцях лопаті за схемою, наведеною на рис. 4.19, а. Під дією набігаючого потоку лінії перетoku відхиляються з відривом від кромки і закручуються у конусоподібний вихор (рис. 4.19, б). А при одночасному обертанні лопаті утворена вихрова трубка закручується у спіраль діаметром, більшим за діаметр обмаху ротора. Таким чином, сукупність вихорів, відірваних від кінців усіх лопатей, утворює позаду ротора вихровий соленоїд, який поступово затухає від змішування з іншими потоками повітря.

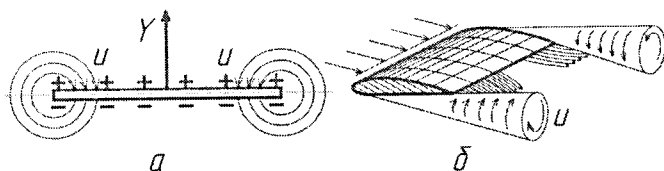


Рис. 4.19. Механізми утворення вихрового соленоїда: а – перетікання повітря навколо кінцівок лопаті; б – утворення вихрового конуса як елемента вихрового соленоїда

Навіть за нульового кута атаки швидкість обтікаючого потоку над крилом завжди більша, ніж під ним, з максимальною різницею біля задньої гострої кромки. Там, на межі злиття двох різношвидкісних потоків, через великий градієнт швидкостей порушується умова стійкості потоку, внаслідок чого зароджуються вихрові утворення (рис. 4.20).

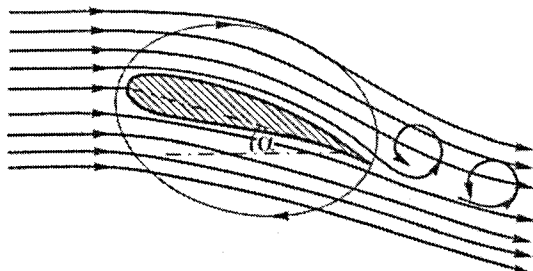


Рис. 4.20. Зона вихроутворення на задній кромці крила

Перший від кромки вихор називають "розгінним", який після зростання до критичних розмірів "зривається" з кромки і відноситься потоком, а на його місці відразу зароджується новий. Кожен такий вихор має певний момент імпульсу, який в ізолюваній системі "потік-крило" компенсується зворотною складовою циркуляції швидкості навколо крила. Ця складова зменшує ефективну швидкість потоку під крилом і збільшує її над ним, що в кінцевому підсумку впливає на зростання підйомної сили. Циркуляцію



швидкості кількістю оцінюють криволінійним інтегралом уздовж замкнутого контуру  $L$  добутку проекції вектора швидкості  $\vec{v}_\tau$  на елемент довжини контуру  $d\vec{s}$ :

$$\Gamma = \oint_L \vec{v}_\tau d\vec{s}. \quad (4.29)$$

Для вихрового руху цей інтеграл відмінний від нуля і для тонкого крила має такий розв'язок:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \pi b v \alpha, \quad (4.30)$$

де  $b$  – довжина хорди крила,

$\alpha$  – кут атаки.

#### 4.6. Швидкохідність ротора

Швидкість обертання ротора вітроустановки залежить від режиму його навантаження. У режимі флюгерування, який відбувається без відбору корисної потужності, обертовому моменту підйомної сили протидіють лише моменти гальмування лопатей від поперечного перетинання потоку і тертя у підшипниках. У такому режимі, наприклад, працює ротор лопатевого анемометра. У разі зростання навантаження швидкість обертання поступово спадає аж до повної зупинки при надмірному навантаженні, наприклад у загальмованому режимі з нульовою корисною потужністю. Звідси очевидно, що максимальна потужність на валу реалізується за певної швидкості вітру, яку називають номінальною для ротора з певними аеродинамічними характеристиками.

У випадку флюгерування втрата швидкості потоку в перерізі ротора практично відсутня, а потік долає зону мінімального перепаду тисків довжиною  $L = b \cos \alpha$  зі швидкістю  $v_1$ , близькою до початкової  $v$ . Час прольоту елемента потоку через робочу зону оцінюють відношенням

$$t \approx \frac{L}{v}. \quad (4.31)$$

Для ротора з числом лопатей  $n$ , який обертається з кутовою швидкістю  $\omega_0$ , період обертання ротора  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ , а часовий інтервал зміни лопатей загальним числом  $n$  рівний  $T/n$ :

$$t = \frac{T_0}{n} = \frac{2\pi}{\omega_0 n}. \quad (4.32)$$

Прирівнюючи (4.31) з (4.32), отримаємо

$$\frac{2\pi}{\omega_0 n} = \frac{L}{v}, \quad (4.33)$$

звідки

$$\omega_0 = \frac{2\pi v}{nL}. \quad (4.34)$$

У режимі максимальної ефективності ротора, якому відповідає номінальна швидкість вітру  $v_n$ , робоча зона розширена за рахунок підпору потоку перед ротором і зони збурення за ним. Прийнято вважати, що в цьому режимі її характерний розмір дорівнює половині радіуса:

$$L_n \approx R/2. \quad (4.35)$$

З урахуванням (4.35) вираз (4.33) для номінального режиму набуде вигляду

$$\frac{2\pi}{\omega_n n} = \frac{R}{2v_n}; \quad (4.36)$$

$$\omega_n = \frac{4\pi v_n}{nR}. \quad (4.37)$$

Помножимо обидві частини рівності на  $R/v$  і отримаємо безрозмірну величину, яку називають швидкохідністю, або модульністю, ротора в режимі максимального коефіцієнта використання енергії вітру:

$$Z_n = \frac{\omega_n R}{v_n} = \frac{v_R}{v_n} \approx \frac{4\pi}{n}, \quad (4.38)$$

де  $v_R$  – лінійна швидкість кінця лопаті.

Натомість для довільного режиму умова (4.38) не виконується, тому поточне значення швидкохідності є змінною величиною, яку записують виразом

$$Z = \frac{\omega R}{v} = \frac{v_R}{v}. \quad (4.39)$$

У теоретичних побудовах користуються поняттям модуля для елемента лопаті, розміщеного на віддалі  $r < R$  від осі обертання, який позначають малою літерою  $z$ . Модуль елемента з меншим радіусом можна виразити через модуль більшого радіуса за очевидним співвідношенням:

$$z_r = Z_R \frac{r}{R}. \quad (4.40)$$

Але, як уже було зазначено, характерний розмір області збуреного потоку залежить від кута атаки. Тому для кількісної оцінки аеродинамічних величин при обертанні ротора використовують поняття відносного модуля елемента лопаті  $z_u$ , який чисельно дорівнює відношенню суми колової та індуктивної швидкостей  $\omega r + u_i$  до швидкості в перерізі ротора  $v_1 = v - \Delta v_1$ . Згідно з планом розкладу векторів швидкостей на рис. 4.16, відносний модуль рівний з котангенсу кута  $\beta$  між вектором відносної швидкості набігаючого потоку  $W$  і площиною обертання ротора:

$$z_u = \frac{\omega r + u_i}{v_1} = \text{ctg} \beta. \quad (4.41)$$

Розглянуті вище закономірності взаємодії тіл різної конфігурації з вітром стосуються однорідного за структурою набігаючого потоку з рівномірним у його перерізі полем швидкостей. На практиці параметри потоку і характер обтікання змінюються залежно від місцевих умов, атмосферного тиску, температури повітря, вологості тощо, які спричиняють різноманітні відхилення від наведених співвідношень. Тому основні співвідношення вітроенергетики прийнято прив'язувати до певних ідеалізованих умов обтікання, нехтуючи другорядними факторами, вплив

яких можна вважати незначним. Тому під час розроблення теорії вітроенергетичного перетворення використовують модель (наближення) ідеального вітряка. Теоретичні засади цієї моделі, розробленої В. П. Ветчинкіним і М. Є. Жуковським та розвинутої Г. Х. Сабініним, відомі широкому загалу в Україні з монографії Є. М. Фатсева "Ветродвиатели и ветроустановки".

### Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення сили лобового тиску на площину.
2. Охарактеризуйте лобовий опір тіл залежно від їх форми та розташування у вітровому потоці.
3. Дайте характеристику коефіцієнта потужності (коефіцієнт використання енергії вітру) для поверхні, що розташована перпендикулярно до потоку вітру.
4. Охарактеризуйте взаємодію вітру з похилою поверхнею.
5. Дайте характеристику співвідношенню сил при взаємодії потоку з похилою поверхнею різного профілю.
6. Дайте визначення полярі Лілієнталя.
7. Які є основні типи аеродинамічних профілів?
8. Наведіть вирази для сил і моментів, що діють на лопать.
9. Охарактеризуйте умови обтікання лопаті під час її обертання.
10. Наведіть формулу наближеного розрахунку швидкохідності ротора.

## 5. ТЕОРІЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВОГО РОТОРА

### 5.1. Класична модель ідеального ротора

Розроблена М. С. Жуковським класична теорія вважає вітряк ідеальним, якщо виконуються такі умови:

- ротор обертається навколо осі, паралельної напрямку швидкості вітру;
- ротор складається з безмежно великого числа лопатей мінімальної ширини;
- профільний опір кожної лопаті дорівнює нулю, а циркуляція швидкості вздовж них стала ( $\Gamma = \text{const}$ );
- втрата швидкості набігаючого потоку на роторі стала в будь-якій точці поверхні обмаху;
- кутова швидкість ротора прямує до безмежності.

За теорією М. Є. Жуковського, ідеальний ротор взаємодіє з рівномірним потоком у перерізі  $AA'$ , який набігає з початковою швидкістю  $v$  (рис. 5.1).

Набігаючий потік віддає частину своєї кінетичної енергії ротору у перерізі  $BB'$ , за рахунок чого початкова швидкість  $v$  зменшується на величину  $\Delta v_1$ , а потік сповільнюється до швидкості  $v_1$ :

$$v_1 = v - \Delta v_1. \quad (5.1)$$

Внаслідок змішування непаралельних потоків – відпрацьованого з індуктивними – загальна швидкість зменшиться на величину  $\Delta v_2$  і на деякій відстані позаду ротора в перерізі  $CC'$  встановиться швидкість

$$v_2 = v - \Delta v_2. \quad (5.2)$$

Схематично зміни швидкості потоку зображено на рис. 5.1 (крива  $L$ ).

Ротор при обертанні створює перед собою підпір, унаслідок чого початковий тиск  $p_1$  зростає до значення  $p_1$  з одночасним збільшенням перерізу до значення  $S_1$  за рахунок гальмування. При проходженні через

ділянку обмаху тиск різко зменшується до значення  $p_2$  (рис. 5.1, крива II), а на деякій віддалі за ротором тиск відновлюється до початкового, але при ще більшому перерізі  $S_2$ . Співвідношення між тисками і швидкостями до і після ротора оцінюють за рівнянням Бернуллі:

$$p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} = p_0 + \frac{\rho v^2}{2}. \quad (5.3)$$

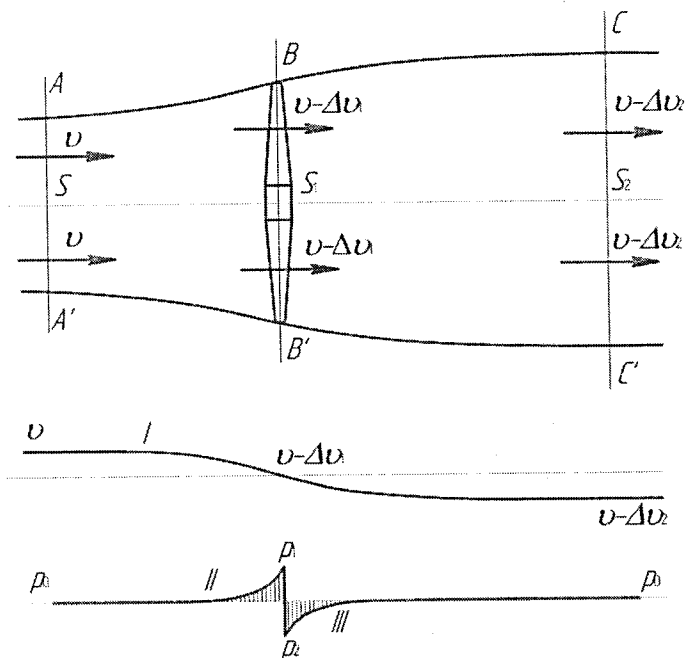


Рис. 5.1. Схема розподілу параметрів вітрового потоку, що протікає через ідеальний ротор (за наближенням М. Є. Жуковського)

Згідно із законом збереження через усі перерізи переноситься однакова маса

$$m = \rho S v t, \quad (5.4)$$

тому кінетична енергія потоку перед ротором і за ним дорівнює відповідно:

$$E = \frac{m\nu^2}{2}, \quad (5.5)$$

$$E_2 = \frac{m(\nu - \Delta\nu_2)^2}{2}. \quad (5.6)$$

За відсутності втрат різниця цих енергій перетворюється на енергію обертання ротора:

$$E_1 = \frac{m\nu^2}{2} - \frac{m(\nu - \Delta\nu_2)^2}{2}. \quad (5.7)$$

Перетворивши праву частину рівняння (5.7), отримаємо

$$\frac{m}{2}[\nu^2 - (\nu - \Delta\nu_2)^2] = \frac{m}{2}[2\nu\Delta\nu_2 - \Delta\nu_2^2] = m\Delta\nu_2\left(\nu - \frac{\Delta\nu_2}{2}\right), \quad (5.8)$$

звідки

$$E_1 = m\Delta\nu_2\left(\nu - \frac{\Delta\nu_2}{2}\right). \quad (5.9)$$

У випадку стаціонарного процесу сприйняту ротором енергію за довільний час  $t$  можна також виразити через добуток сили лобового тиску вітру  $F$  і зміни швидкості в площині ротора  $\nu_1 = \nu - \Delta\nu_1$ :

$$E_1 = F(\nu - \Delta\nu_1)t. \quad (5.10)$$

Імпульс сили при втраті масою  $m$  швидкості на величину  $\Delta\nu_2$  дорівнює зміні кількості руху, який у випадку стаціонарного процесу запишеться так:

$$Ft = m\Delta\nu_2. \quad (5.11)$$

Підставивши (5.11) у (5.10), отримаємо:

$$E_1 = m\Delta\nu_2(\nu - \Delta\nu_1). \quad (5.12)$$

Прирівнявши рівняння (5.12) і (5.9), отримаємо такі співвідношення між обома втратами швидкості:

$$\Delta\nu_1 = \frac{\Delta\nu_2}{2}, \text{ або } \Delta\nu_2 = 2\Delta\nu_1. \quad (5.13)$$

Якщо зіставити енергію, сприйняту ідеальним ротором (5.9), з кінетичною енергією набігаючого потоку, то отримаємо ідеальний коефіцієнт використання енергії вітру, або коефіцієнт потужності  $C_p$ :

$$C_p = \frac{F(v - \Delta v_1)}{\frac{\rho S v^3}{2}}. \quad (5.14)$$

Перетворивши цей вираз, отримаємо

$$\frac{F(v - \Delta v_1)}{\frac{\rho S v^3}{2}} = \frac{2F}{\rho S v^2} \cdot \frac{v - \Delta v_1}{v}. \quad (5.15)$$

Перший множник отриманого добутку відображає навантаження на площу обмаху ротора і називається коефіцієнтом лобового тиску  $C_F$ , а другий – коефіцієнтом гальмування  $a$ :

$$C_F = \frac{2F}{\rho S v^2}, \quad (5.16)$$

$$a = \frac{v - \Delta v_1}{v}. \quad (5.17)$$

Силу лобового тиску на переріз ротора можна виразити через співвідношення швидкостей, якщо в рівнянні (5.11) масу виразити через потік:

$$m = \rho S t (v - \Delta v_1), \quad (5.18)$$

$$F = \rho S (v - \Delta v_1) \Delta v_2 = \rho S (v - \Delta v_1) 2 \Delta v_1. \quad (5.19)$$

Після підстановки (5.19) у (5.16) отримаємо:

$$C_F = \frac{2\rho S (v - \Delta v_1) 2\Delta v_1}{\rho S v^2} = \frac{4(v - \Delta v_1)\Delta v_1}{v^2}. \quad (5.20)$$

У вітроенергетиці співвідношення між параметрами зручно представляти через коефіцієнт гальмування  $a$ , який розраховують за таким співвідношенням:

$$a = \frac{v - \Delta v_1}{v}. \quad (5.21)$$



Тепер

$$C_F = 4a(1-a). \quad (5.22)$$

Подібним чином можна подати коефіцієнт потужності (5.14), якщо виконати такі перетворення:

$$C_p = \frac{S\rho(v-\Delta v_1)^2 2\Delta v_1}{\frac{\rho S v^3}{2}} = \frac{4(v-\Delta v_1)^2 \Delta v_1}{v^3} = \frac{4(v-\Delta v_1)}{v} \cdot \frac{(v-\Delta v_1)}{v} \cdot \frac{\Delta v_1}{v}, \quad (5.23)$$

звідки

$$C_p = 4a(1-a)^2. \quad (5.24)$$

Згідно з визначенням (5.21) коефіцієнт гальмування змінюється в межах від нуля до одиниці. Перший випадок реалізується за повного гальмування потоку ( $\Delta v_1 = v$ ), наприклад суцільною непроникною перешкодою, а другий – за відсутності приймача енергії вітру. Натомість максимальну корисну потужність можна визначити за правилом знаходження екстремуму функції (5.24):

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{d}{da} [4a(1-a)^2] = \frac{d}{da} (4a - 8a^2 + 4a^3) = 0, \quad (5.25)$$

або

$$4 - 16a + 12a^2 = 0. \quad (5.26)$$

Остання рівність виконується при  $a=1/3$ , яке підставимо у (5.24) для оцінки максимального значення коефіцієнта потужності  $C_p$ :

$$C_p = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0,593. \quad (5.27)$$

Згідно з (5.22) цій умові відповідає коефіцієнт лобового тиску

$$C_F = 4 \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{8}{9} = 0,888. \quad (5.28)$$

Таким чином, за теорією М. Є. Жуковського за оптимальних умов:

- максимальне значення коефіцієнта використання енергії вітру, або коефіцієнта потужності, становить  $C_p = 0,593$ ;

- швидкість вітру в площині ротора за цих умов дорівнює одній третій швидкості вітру перед ним:  $v_1 = \frac{1}{3}v$ , або втрата швидкості  $\Delta v_1 = \frac{2}{3}v$ ;
- повна втрата швидкості вітру за ротором у два рази більша від втрати швидкості в його площині  $\Delta v_2 = \frac{2}{3}v$ , швидкість вітру за ротором у три рази менша від швидкості вітру перед ним  $v_2 = \frac{1}{3}v$ ;
- коефіцієнт навантаження, що характеризується коефіцієнтом лобового опору, складає  $C_F = 0,888$ .

Задаючись коефіцієнтом гальмування  $a = \frac{v - \Delta v_1}{v}$  в межах від 0 до 1 і розраховуючи коефіцієнти потужності та лобового опору, отримаємо табличні значення (табл. 5.1) та графічне відображення (рис. 5.2).

Таблиця 5.1

Розрахункові значення залежностей коефіцієнтів потужності та лобового опору від коефіцієнта гальмування за М. Є. Жуковським

$a = \frac{v - \Delta v_1}{v}$	0,1	0,2	0,333	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$C_p$	0,324	0,512	0,593	0,576	0,5	0,384	0,252	0,128	0,036	0
$C_F$	0,36	0,64	0,888	0,96	1	0,96	0,84	0,64	0,36	0

Співвідношення, отримані в рамках наближення ідеального вітряка, на практиці виконуються з певними відхиленнями. Але тут наведені теоретичні величини отримують просте й зрозуміле тлумачення, тому їх і приймають першим наближенням у теорії реального вітряка. Подібним підходом керуються для опису законів реальних газів, де нульовим вважається наближення ідеального газу.

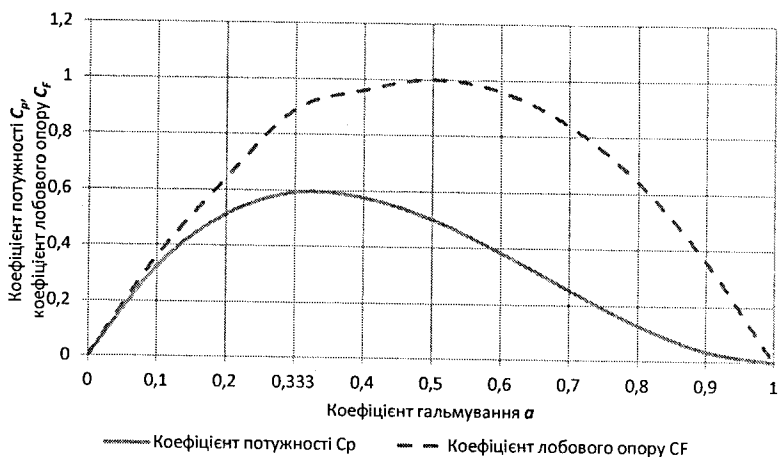


Рис. 5.2. Залежність коефіцієнта потужності та лобового опору від коефіцієнта гальмування

## 5.2. Імпульсний варіант класичної моделі ідеального ротора

У класичній моделі ідеального вітряка приймається, що енергія потоку передається ротору лише в перерізі обмаху. Насправді ротор отримує додаткову енергію від частини потоку, перетвореної у вихровий соленоїд. Приймається, що початковий діаметр соленоїда поступово розширюється і на певній віддалі від ротора стабілізується, набуваючи форми тонкостінної циліндричної перехідної зони між відпрацьованим та обвідним потоками (рис. 5.3).

У моделі ідеального ротора Г. Х. Сабініна припускається, що сили тиску на ротор належить розраховувати не за перерізом обмаху, а за перерізом вихрового соленоїда в тому місці, де він набуває стабільного циліндричного діаметра. Тому сила лобового опору, коефіцієнт потужності та інші аеродинамічні величини моделі Г. Х. Сабініна дещо відрізняються від розрахованих за класичною моделлю М. Є. Жуковського.

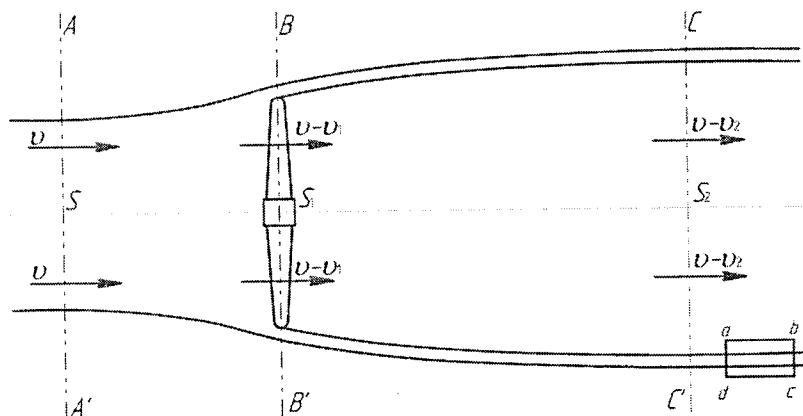


Рис. 5.3. Схема проходження вітрового потоку через ротор

Результати розрахунку деяких аеродинамічних величин за обома теоретичними наближеннями зіставлено у табл. 5.2 та на рис. 5.4.

Таблиця 5.2

Порівняльна оцінка характерних величин ідеального ротора, отриманих за теоріями М. Є. Жуковського та Г. Х. Сабініна

Параметр	Теорія	
	М. Є. Жуковського	Г. Х. Сабініна
Повна втрата швидкості за ротором	$\Delta v_2 = 2\Delta v_1$	$\Delta v_2 = \frac{2\Delta v_1}{1+a}$
Коефіцієнт потужності	$C_p = 4a(1-a)^2$	$C_p = 4a \frac{1-a}{1+a}$
Коефіцієнт лобового опору	$C_F = 4a(1-a)$	$C_F = \frac{4a}{1+a}$
Коефіцієнт гальмування потоку при $C_{pmax}$	0,333	0,414
Коефіцієнт лобового опору при $C_{pmax}$	0,888	1,172
Максимальний коефіцієнт потужності $C_{pmax}$	0,593	0,687

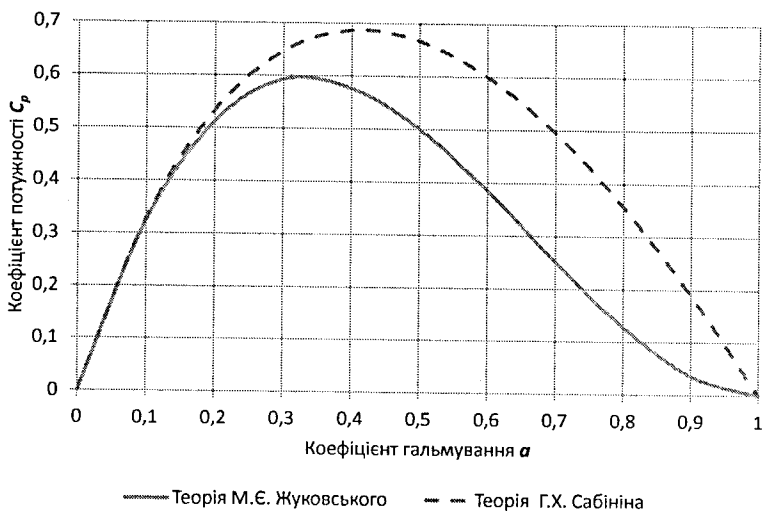


Рис. 5.4. Графічні залежності коефіцієнта потужності від коефіцієнта гальмування для теорій М. С. Жуковського та Г. Х. Сабініна

На завершення наведемо основні положення теорій М. С. Жуковського та Г. Х. Сабініна.

1. За теорією М. С. Жуковського втрата швидкості вітру за ротором дорівнює подвоєній втраті швидкості вітру в площині ротора, тобто

$$\Delta v_2 = 2\Delta v_1.$$

За теорією Г. Х. Сабініна це ж зменшення швидкості вітру за ротором визначається співвідношенням

$$\Delta v_2 = \frac{2\Delta v_1}{1+a}.$$

2. Осьовий тиск на ротор згідно з теорією М. С. Жуковського становить

$$F = m_1 \Delta v_2,$$

де

$$m_1 = \rho S_1 (v - \Delta v_1).$$

За теорією Г. Х. Сабініна, окрім маси повітря, що проходить через площу обмаху ротора, береться до уваги маса повітря  $m_2$ , залучена всередину вихрового соленоїда з потоку, що його оточує. Осьовий тиск дорівнюватиме

$$F = (m_1 + m_2)\Delta v_2,$$

при цьому залучена ротором маса дорівнює

$$m_1 + m_2 = \rho S_1 v = \text{const}.$$

Практично неможливо побудувати ротор з безмежно великим числом лопатей, безмежно великою швидкістю обертання і який до того ж працює без втрат, як це обумовлено визначенням ідеального ротора. Насправді доводиться мати справу з реальним ротором, що має обмежену кількість лопатей (від 1 до 24), обертається з обмеженою швидкістю і працює з втратами. Тому співвідношення, отримані в рамках обох наведених теоретичних підходів, на практиці підлягають уточненню виходячи з конструктивних особливостей ротора та умов його роботи. При цьому використовується поняття безмежно малого елемента ротора, який взаємодіє з набігаючим потоком у перерізі потоку включно з вихровим соленоїдом.

### 5.3. Рівняння зв'язку для елемента реального ротора

Енергетичні характеристики реального ротора розраховують за двома рівняннями зв'язку, які складають для елемента лопаті, розташованого в елементарному кільці з внутрішнім  $r$  і зовнішнім  $r+dr$  радіусами й шириною  $b$  з використанням плану швидкостей (див. рис. 4.16).

Перше рівняння зв'язку для елемента ротора з числом лопатей  $n$  визначає співвідношення між перепадом тиску і проекціями сил на площину обертання таким виразом:

$$2\pi r dr (p_1 - p_2) = n(dF \cos\beta + dQ \sin\beta). \quad (5.29)$$

Згідно з рівняннями (4.19) і (4.20) для елемента лопаті шириною  $b$  обидві елементарні сили можна представити такими виразами:

$$dF = C_y b dr \frac{\rho}{2} W^2; \quad (5.30)$$

$$dQ = C_x b dr \frac{\rho}{2} W^2. \quad (5.31)$$

Перепад тиску дорівнює зміні кількості руху повної маси потоку:

$$p_1 - p_2 = (m_1 + m_2) v_2 = \rho v v_2. \quad (5.32)$$

Підставивши останні три рівняння в перше рівняння зв'язку (5.29), отримаємо:

$$2\pi r dr v v_2 = n \left( b dr C_y \frac{\rho}{2} W^2 \cos \beta + \right) b dr C_x \frac{\rho}{2} W^2 \sin \beta. \quad (5.33)$$

Після скорочення, підстановки виразів для відносної швидкості  $W$  з (4.27) і відносної швидкохідності  $z_u$  з рівності (4.41) та наступних елементарних перетворень отримаємо такий проміжний вираз:

$$4\pi r v v_2 = n b C_y (v - v_1)^2 (1 - z_u^2) \frac{z_u}{\sqrt{1 + z_u^2}} \left( 1 + \frac{\mu}{z_u} \right), \quad (5.34)$$

де множник  $\mu = \frac{C_x}{C_y}$  – обернена якість крила. Якщо використати співвідношення (5.21), то отримаємо зв'язок між шириною лопаті, коефіцієнтом гальмування і підйомною силою в такому вигляді:

$$n b C_y = 8\pi r \frac{a}{(1+a)(1-a)^2} \cdot \frac{1}{(z_u + \mu)\sqrt{1+z_u^2}}. \quad (5.35)$$

Силу, дотичну до кола обертання елемента лопаті, можна визначити через алгебраїчну суму проєкцій підйомної сили і лобового тиску на вісь обертання, виражені через відповідні коефіцієнти (4.19) і (4.20):

$$dF_{\tau} = n b dr \frac{\rho}{2} W^2 (C_y \sin \beta - C_x \cos \beta). \quad (5.36)$$

Помноживши обидві частини (5.36) на радіус обертання, після низки перетворень, з урахуванням наведених вище співвідношень та скорочених позначень, отримаємо вираз для аеродинамічного моменту сили:

$$dM = dF_1 r = 4\pi r^2 dr \rho \frac{a}{1+a} v^2 \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu}. \quad (5.37)$$

Відтак елемент поверхні, який при обертанні окреслює кільцеву площу  $dS=2\pi r dr$ , розвиває механічну потужність  $dP$ :

$$dP = dM\omega = 4\pi r dr \frac{a}{1+a} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \cdot \frac{1}{2} \rho v^3 z. \quad (5.38)$$

Ефективність використання енергії потоку можна оцінити, якщо врахувати, що набігаючий потік через цю елементарну площу  $dS$  переносить потужність

$$dP_0 = 2\pi r dr \cdot \frac{1}{2} \rho v^3. \quad (5.39)$$

Поділивши (5.38) на (5.39) та провівши необхідні перетворення, отримаємо вираз для реального коефіцієнта використання потужності (енергії) набігаючого потоку:

$$C_p = \frac{dP}{dP_0} = 4a \frac{1-a}{1+a} \cdot \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \cdot \frac{z}{1-a} = C_{pi} \eta. \quad (5.40)$$

Перший множник  $4a \frac{1-a}{1+a}$  збігається з виразом для коефіцієнта використання енергії вітру  $C_{pi}$  ідеальної моделі (див. табл. 5.2), а добуток другого і третього називають відносним елементарним ККД ротора:

$$\eta = \frac{1-\mu z_u}{z_u + \mu} \cdot \frac{z}{1-a}. \quad (5.41)$$

Друге рівняння зв'язку відображає рівність моментів аеродинамічних сил та імпульсу повної маси потоку  $(m_1 + m_2)$  відносно осі обертання і записується таким диференціальним рівнянням для елемента ротора:

$$n(dF \sin \beta - dQ \cos \beta) r = d(m_1 + m_2) \cdot 2u_1 r = 2\pi r dr \cdot \rho v \cdot 2u_1 r. \quad (5.42)$$

Після заміни елементарних сил відповідними їм коефіцієнтами (4.19) і (4.20) отримаємо



$$nbdr(C_y \sin \beta - C_x \cos \beta) \frac{1}{2} \rho W^2 r = 2\pi r dr \rho v \cdot 2u_r. \quad (5.43)$$

Внаслідок громіздких перетворень з використанням наведених вище співвідношень, які для скорочення викладок упускаємо, отримаємо такий вираз для розрахунку відносної швидкохідності ротора з лопатями великої аеродинамічної якості:

$$z_u = z \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{C_p}{z^2}}}{2(1-a)}. \quad (5.44)$$

За допомогою рівнянь (4.38), (5.35) і (5.44) виконують повний аеродинамічний розрахунок ротора для заданих значень  $v$  і  $\omega R$ , а також форми профілю крила. При цьому використовують експериментально побудовану діаграму Лілієнтала обраного профілю. Задаючи значення коефіцієнта гальмування і найвигіднішого кута атаки, за діаграмою Лілієнтала знаходять обернену якість лопаті  $\mu$ . Підставивши  $z$ ,  $a$  у вираз (5.44), розраховують відносну швидкохідність  $z_u$ , а використовуючи рівняння (5.35) – ширину лопаті  $b$ . Кут заклинення лопаті  $\phi$  на довільному радіусі  $r$  розраховують за співвідношенням:

$$\phi = \arcsin \cdot \operatorname{ctg} z_u - \alpha. \quad (5.45)$$

#### 5.4. Момент і потужність реального ротора

Момент усієї лопаті отримують інтегруванням рівняння (5.37) у межах від  $r_0$  до  $R$ , де  $r_0$  і  $R$  – віддаль від осі ротора до початку лопаті та її кінця відповідно:

$$M = \int_{r_0}^R dM = \int_{r_0}^R 4\pi r^2 \rho \frac{a}{1+a} v^2 \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu} dr. \quad (5.46)$$

Момент ротора є сумою моментів усіх його лопатей, його зазвичай виражають у безрозмірних одиницях, не залежних від радіуса ротора і лобового тиску на нього, та позначають через  $\bar{M}$ . Для цього обидві частини

рівності (5.46) ділять на  $\pi R^3 \frac{\rho v^2}{2}$  і вводять позначення  $\bar{r} = \frac{r}{R}$ , яке називається відносним радіусом:

$$\bar{M} = \frac{M}{\pi R^3 \rho \frac{v^2}{2}} = \int_{\frac{R}{6}}^{\bar{R}} 8 \frac{a}{1+a} \cdot \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (5.47)$$

У загальному випадку коефіцієнт гальмування  $a$  змінюється вздовж радіуса  $r$ , тому аналітичні розв'язки цього рівняння існують лише для спеціальних умов і за допущення, що елементарні струмени сусідніх елементів ротора не впливають одна на одну. Наприклад, у стаціонарному режимі обертання ротора з постійним значенням коефіцієнта гальмування  $a$  останній можна винести з-під знака інтеграла і вираз (5.47) спростити до такого вигляду:

$$\bar{M} = 8 \frac{a}{1+a} \int_{\frac{R}{6}}^{\bar{R}} \frac{1 - \mu z_u}{z_u + \mu} \bar{r}^2 d\bar{r}. \quad (5.48)$$

У швидкохідних роторах (дво- або трилопатевих) закручування струменів незначне, тому індуктивною складовою швидкості можна знехтувати ( $u_1 \approx 0$ ), а вираз для відносної швидкохідності  $z_u$  подати в такому вигляді:

$$z_u = \frac{\omega r + u_1}{v - \Delta v_1} \cong \frac{\omega r}{v - \Delta v_1} = \frac{\omega r}{v(1-a)} = \frac{z}{1-a}. \quad (5.49)$$

Оскільки для елемента на кінці лопаті

$$Z_u \cong \frac{\omega R}{v - \Delta v_1}, \quad (5.50)$$

то, розділивши рівняння (5.49) на (5.50), можна в рівнянні (5.48) перейти до нової змінної  $dz$ :

$$\frac{r}{R} \cong \frac{z_u}{Z_u}, \quad \text{або} \quad dr = \frac{R}{Z_u} dz_u \cong \frac{R}{Z_u(1-a)} dz. \quad (5.51)$$

Якщо при цьому ще знехтувати малими величинами  $\mu^2$  і  $\frac{z_{v0}^3}{Z_u^3}$ , то отримаємо:

$$\bar{M} = \frac{4a}{z} \cdot \frac{1-a}{(1+a)} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right]. \quad (5.52)$$

А з врахуванням співвідношення (5.47) отримаємо

$$M = \frac{4a}{Z} \cdot \frac{1-a}{1+a} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right] \pi R^3 \frac{\rho v^2}{2}. \quad (5.53)$$

Для визначення крутного моменту на валу ротора можна скористатись результатами розрахунків лобового тиску. Необхідно зауважити, що в даному випадку під час аналізу крутного моменту не враховують аеродинамічний профіль лопаті, тобто розглядають плоску лопать.

Максимальний крутний момент ротора  $M$  не може перевищувати значення

$$M_{\max} = F_{\max} R, \quad (5.54)$$

де  $R$  – радіус ротора, м;  $F_{\max}$  – максимальний тиск повітряного потоку на ротор.

Оскільки

$$F_{\max} = \frac{\rho S_1 v^2}{2}, \quad (5.55)$$

то

$$M_{\max} = \frac{\rho S_1 v^2}{2} R. \quad (5.56)$$

У загальному випадку крутний момент ротора  $M$  можна подати через коефіцієнт крутного моменту  $C_M$ :

$$M = C_M M_{\max}. \quad (5.57)$$

А момент (5.56) виразимо через потужність набігаючого потоку  $P_0$ , використовуючи зв'язок радіуса зі швидкохідністю  $Z = \frac{v_R}{v} = \frac{R\omega}{v}$ :

$$M_{\max} = \frac{\rho S_1 v^2 Z v}{2\omega} = P_0 \frac{Z}{\omega}. \quad (5.58)$$

Потужність на валу дорівнює поточній потужності ротора  $P$ :

$$P = C_P P_0 = M\omega. \quad (5.59)$$

Але з урахуванням рівнянь (5.47) і (5.58) рівність (5.59) набуває вигляду

$$C_P P_0 = C_M M_{\max} \omega, \quad C_P P_0 = C_M P_0 Z, \quad C_P = Z C_M. \quad (5.60)$$

Варто зауважити, що на практиці коефіцієнти  $C_P$  і  $C_M$  не є постійними, а функціонально залежними від швидкохідності ротора  $Z$ .

На рис. 5.5 наведена характеристика реальних роторів вітроустановок, з якої видно, що ротор з більшим числом лопатей розвиває більший крутний момент за відносно малих колових швидкостей, ніж малолопатевий.

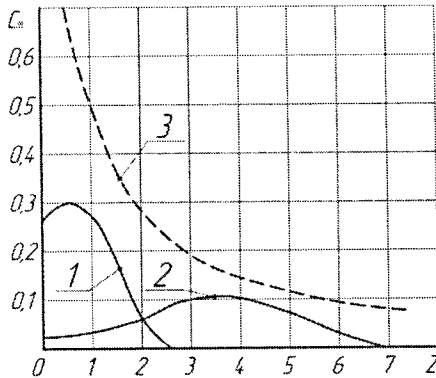


Рис. 5.5. Залежність коефіцієнта крутного моменту  $C_M$  від швидкохідності  $Z$  для роторів з різною кількістю лопатей: 1 – малолопатевих; 2 – багатолапатевиий; 3 – критерій Бетца

І навпаки, ротор з невеликою кількістю лопатей має менший початковий крутний момент, через що навіть не завжди може самостійно зрушити.

Максимальні значення коефіцієнта  $C_M$  для обох типів роторів реалізуються за високих швидкостей вітру. Варто також зазначити, що максимальним значенням крутного моменту і ККД відповідають різні значення швидкохідності (модульності).

Параметри різних вітроагрегатів зручно порівнювати за допомогою аеродинамічних характеристик, які показують, як змінюються крутний момент і коефіцієнт використання енергії вітру залежно від швидкохідності ротора. Необхідні дані для побудови аеродинамічних характеристик отримують або розрахунком, або експериментально продуванням моделі ротора в аеродинамічній трубі. За отриманими даними будують графік (рис. 5.6).

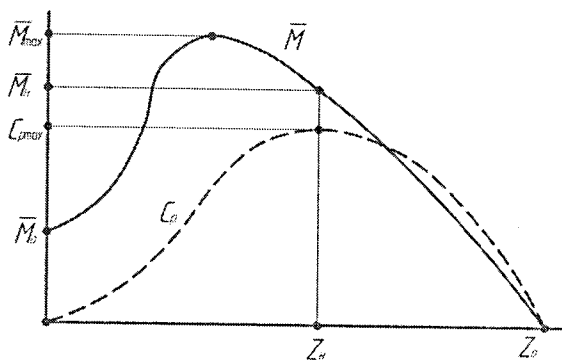


Рис. 5.6. Аеродинамічні характеристики ротора

Аеродинамічну характеристику доцільно будувати у відносних величинах, тоді вона може бути застосована для роторів будь-яких розмірів, якщо в них дотримана геометрична подібність.

Основними точками кривої, що визначають головні параметри характеристики, є:

$Z_H = \frac{\omega_n R}{v}$  – номінальна швидкохідність (число модулів), при якій коефіцієнт використання енергії вітру максимальний;

$\bar{M}_H$  – номінальний відносний обертовий момент, який розвиває ротор при номінальному числі модулів  $Z_H$ ;

$\bar{M}_0$  – початковий відносний момент, що розвивається ротором при зрушенні з місця, тобто коли  $Z = 0$ ;

$Z_0$  – синхронна швидкохідність, при якій  $\bar{M} = 0$ ;

$\bar{M}_{\max}$  – максимальний момент, який розвивається ротором; відношення  $\bar{M}_{\max} / \bar{M}_H$  називають перевантажувальною здатністю ротора.

У результаті проведених експериментальних досліджень різних типів вітроустановок було побудовано характеристики роторів різної швидкохідності (рис. 5.7), а також отримано результати теоретичних і експериментальних досліджень, на підставі яких зроблено такі висновки:

- чим більша кількість лопатей, їх ширина та кут заклинювання, тим нижча швидкохідність ротора, крива  $\bar{M}(Z)$  має крутопадаючу характеристику;
- швидкохідні ротори розвивають початковий момент  $M_0$ , у декілька разів менший від максимального  $M_{\max}$ , при вищій у 2–2,5 раза швидкохідності;
- потужність ротора, за інших рівних умов, мало залежить від кількості лопатей і коефіцієнта заповнення  $k_3 = \sum S_l / S_{\text{вк}}$ , який дорівнює відношенню сумарної площі лопатей  $\sum S_l$  до площі обмаху ротора  $S_{\text{вк}}$ ; основне значення мають форма і профіль лопатей, їх положення в потоці повітря та діаметр ротора;
- зниження початкового моменту відбувається швидше за росту швидкохідності: так, при збільшенні  $Z$  у два рази  $M_0$  знижується в шість-

- сім разів. Водночас прийомистість, що визначається як відношення  $M_0/M_{\max}$ , у шестилопатевого ротора в 3,3 раза вища, ніж у дволопатевого;
- для постійної аеродинамічної схеми частота обертання ротора прямо пропорційна швидкості вітру і його швидкохідності та обернено пропорційна діаметру ротора.

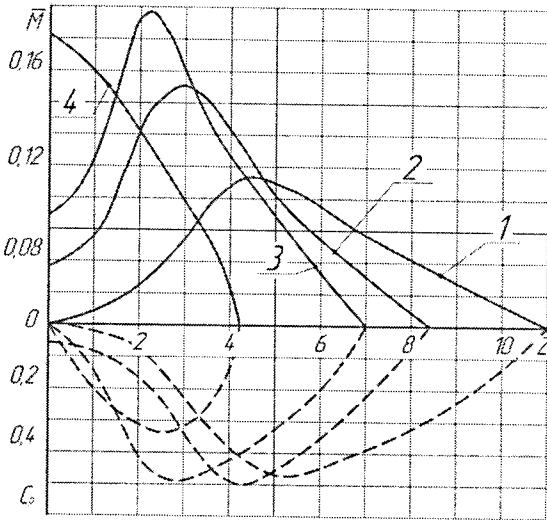


Рис. 5.7. Характеристики роторів різної швидкохідності: 1 – дволопатевого; 2 – трилопатевого; 3 – шестилопатевого; 4 – вісімнадцятилопатевого; суцільні лінії –  $M(Z)$ ; штрихові –  $\zeta(Z)$

Вибираючи вітрові агрегати, враховують аеродинамічні характеристики роторів і характеристики навантажень робочих машин. Наприклад, для приводу тихохідної робочої машини, що має великий початковий момент опору, краще використовувати багатолопатевого тихохідний ротор ( $Z = 1,5-3$ ). Це дає змогу знизити значення мінімальної робочої швидкості вітру, зменшити передавальне відношення редуктора і механічні втрати, але при цьому знижується коефіцієнт використання енергії вітру.

Для агрегування роторів з високооборотними електричними генераторами з малими пусковими моментами ефективніше використовувати швидкохідні ротори ( $Z = 5-8$ ) з малою кількістю лопатей.

### 5.5. Потужність горизонтально-осьової вітроустановки

Потужність, що розвивається ротором, визначають за формулою

$$P = M\omega = \bar{M}\pi R^3 \frac{\rho v^2}{2} \omega. \quad (5.61)$$

Підставивши  $\omega = \frac{Zv}{R}$ , отримаємо:

$$P = \bar{M}\pi R^2 \rho \frac{v^3}{2} Z. \quad (5.62)$$

Замінімо  $\bar{M}$  його значенням з рівняння (5.53) і отримаємо:

$$P = 4a \frac{1-a}{1+a} \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right] \pi R^2 \rho \frac{v^3}{2}. \quad (5.63)$$

Якщо розділити потужність вітроустановки на потужність набігаючого потоку, то отримаємо коефіцієнт використання енергії вітру, або коефіцієнт потужності:

$$C_p = \frac{P}{\pi R^2 \rho \frac{v^3}{2}} = 4a \frac{1-a}{1+a} \left[ 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right]. \quad (5.64)$$

Оскільки реальний коефіцієнт потужності  $C_p$  дорівнює добутку ідеального і відносного ККД ротора

$$C_p = 4a \frac{1-a}{1+a} \eta, \quad (5.65)$$

то відносний коефіцієнт корисної дії ротора описують виразом



$$\eta = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - 2\mu \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right). \quad (5.66)$$

У разі великої модульності ККД ротора спрощується до вигляду:

$$\eta = \frac{1 - \mu z_u}{1 + \frac{\mu}{z_u}}. \quad (5.67)$$

Втрати на роторі вітроустановки поділяються на чотири групи:

1. Кінцеві втрати, які відбуваються за рахунок утворення вихорів, що сходять з кінців лопатей. Ці втрати визначають на основі теорії індуктивного опору, і їх можна записати у вигляді

$$\bar{P}_n \cong \frac{a}{1-a} \left[ \frac{8 \sqrt{1 + \left( \frac{1-a}{Z} \right)^2}}{(1+a)iZ} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{iZ}{\pi \left( 1 - \frac{a}{2} \right)} \right)^2}} \right]. \quad (5.68)$$

2. Профільні втрати, які викликані тертям струменя повітря об поверхню лопаті і залежать тільки від профілю лопатей. Їх можна подати у вигляді безрозмірного параметра:

$$\bar{P}_n \cong 2\mu' \left[ \frac{1-a}{Z} + \frac{Z}{3(1-a)} \right], \quad (5.69)$$

де  $\mu' = \frac{C_x}{C_y}$  — середня величина оберненої якості за довжиною лопаті.

3. Втрати на кручення струменів за ротором, що викликані силою тангенціальної швидкості збігаючого з лопаті струменя, визначають так:

$$\bar{P}_k = \frac{C_p \eta_i^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0} . \quad (5.70)$$

4. Втрати за рахунок невикористання приосьової частини площі обмаху, що описуються виразом  $\left(\frac{r_0}{R}\right)^2$ .

Отже, корисну потужність вітроколеса можна записати в такому вигляді:

$$P = P_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right) - \bar{P}_v - \bar{P}_n - \bar{P}_k . \quad (5.71)$$

### 5.6. Режим роботи ротора вітроустановки

На відміну від гідротурбіни, ротор вітроустановки обтікає необмежений стінками потік повітря, тому тут немає можливості відводити пропущений ротором потік поза межі набігаючого потоку, і це певною мірою обмежує ефективність вітроустановок. Найсуттєвішими обмеженням є те, що "відпрацьоване" повітря повинно мати певну швидкість, щоб залишити простір ротора, не створюючи завад набігаючому потокові. Попередні теоретичні викладки не дозволяють визначити умови роботи ротора, які необхідно створити для досягнення такого режиму відбору енергії потоку.

Ефективність перетворення ротором енергії вітрового потоку буде нижче оптимальної, якщо (рис. 5.8):

- 1) лопаті розміщені так тісно або ротор обертається так швидко, що кожна лопать рухається в потоці, турбулізованому попередньою;
- 2) лопаті розміщені так рідко або ротор обертається так повільно, що значна частина повітряного потоку проходить через його поперечний переріз, практично не взаємодіючи з лопатями.

Звідси випливає, що для досягнення максимальної ефективної частоти обертання необхідно аеродинамічні характеристики ротора узгодити зі швидкістю вітру.

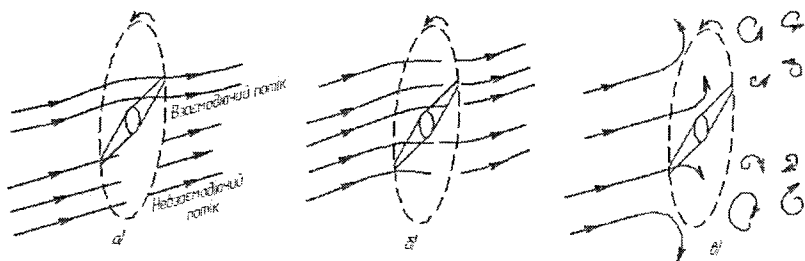


Рис. 5.8. Взаємодія вітрового потоку з ротором за різної частоти його обертання: а) частота обертання мала, тому частина вітрового потоку проходить через площину ротора, не взаємодіючи з його лопаттями; б) частота обертання оптимальна, весь потік взаємодіє з ротором; в) частота обертання занадто велика, у цьому разі вітровий потік інтенсивно турбулізується, тобто його енергія розсіюється

Ефективність роботи ротора залежить від співвідношення таких характерних часових показників:

- часу  $\tau_b$ , за який лопать переміститься на відстань, що відділяє її від сусідньої лопаті;
- часу  $\tau_w$ , за який область сильного збурення, що утворюється лопаттю, переміститься на відстань, рівну її характерній довжині. Час  $\tau_w$  залежить від розміру й форми лопатей і змінюється пропорційно швидкості вітру.

Характерний час  $\tau_b$  для  $n$ -лопатєвого ротора, що обертається з кутовою частотою  $\omega$ , становить:

$$\tau_b \approx \frac{2\pi}{n \cdot \omega}. \quad (5.72)$$

Характерний час існування в площині ротора збурення, що створене лопаттю  $\tau_w$ , приблизно складає:

$$\tau_w \approx \frac{d}{v}, \quad (5.73)$$

де  $d$  – характерна довжина збуреної лопаттю області.

Ефективність використання ротором енергії вітру максимальна, коли на кінцях лопатей виконується умова  $\tau_w \approx \tau_b$ , або з урахуванням (5.72) і (5.73) умова

$$\frac{2\pi}{n \cdot \omega} \approx \frac{d}{v} \rightarrow n \cdot \omega \cdot d = 2\pi \cdot v$$

і

$$\frac{n \cdot \omega}{v} \approx \frac{2\pi}{d}. \quad (5.74)$$

Лінійна швидкість кінця лопаті  $v_R$  пов'язана з кутовою очевидним співвідношенням

$$\frac{v_R}{v} = \frac{R\omega}{v} = Z, \quad (5.75)$$

яке називають коефіцієнтом швидкохідності. А помноживши обидві частини (5.74) на радіус ротора  $R$ , отримаємо умову, яка визначає максимальну ефективність його роботи:

$$Z \approx \frac{2\pi}{n} \left( \frac{R}{d} \right). \quad (5.76)$$

З практики відомо, що характерний розмір збудованої області приблизно пропорційний радіусу ротора  $d \approx k \cdot R$ , а коефіцієнт пропорційності  $k \approx 1/2$ , тому для  $n$ -лопатевого ротора номінальна швидкохідність

$$Z_0 \approx \frac{4\pi}{n}. \quad (5.77)$$

Наприклад, для дволопатевого ротора коефіцієнт потужності  $C_p$  максимальний при  $Z_0 \approx 6,28$ , для трилопатевого – при  $Z_0 \approx 4,19$ , а для чотирилопатевого – при  $Z_0 \approx 3,14$ .

Подана методика оцінки ефективності перетворення енергії вітру дещо спрощена, однак отримані результати цілком близькі до реальних характеристик. Наприклад, у ротора з якісним профілем лопатей коефіцієнт швидкохідності приблизно на третину більший від значення, отриманого за формулою (5.77).

Під час виведення критерію Жуковського-Бетца не були враховані динамічні ефекти взаємодії повітряного потоку з ротором. Одним із найточніших результатів є критерій Глаурта, що характеризує залежність максимального коефіцієнта потужності  $C_p$  відносно швидкохідності  $Z$ . На рис. 5.9 подано межу ефективності Жуковського-Бетца і Глаурта, а також залежність  $C_p$  від  $Z$  для різних типів роторів вітроустановок.

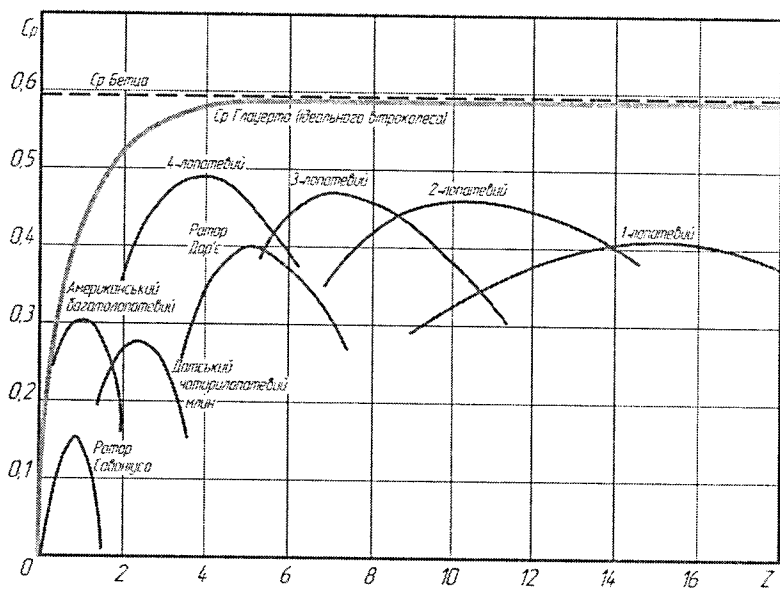


Рис. 5.9. Залежність коефіцієнта потужності  $C_p$  від швидкохідності  $Z$

Швидкохідність ротора  $z$ , можливо, найважливішим для його характеристики параметром, що залежить від трьох основних змінних: радіуса охоплюваного ротором кола, його кутової швидкості обертання і швидкості вітру. Як безрозмірна величина, він є основним параметром подібності під час дослідження і конструювання вітроустановок.

На рис. 5.10 схематично зображено характерні режими роботи ротора залежно від параметра  $a$ :

1)  $a < 0$ ,  $C_p$  від'ємний. Це режим роботи авіаційного гвинта, який створює тягу;

2)  $0 < a < 0,5$ ,  $C_p$  в цьому діапазоні додатний і досягає максимуму при

$$a = 0, v_1 = v \quad \text{і} \quad C_p = 0,$$

де  $v_1$  – швидкість вітру в площині ротора.

Це режим вільного обертання ротора за відсутності навантаження (флюгерування). При навантаженні ротора швидкість  $v_1$  зменшується і коефіцієнт потужності стає додатним;

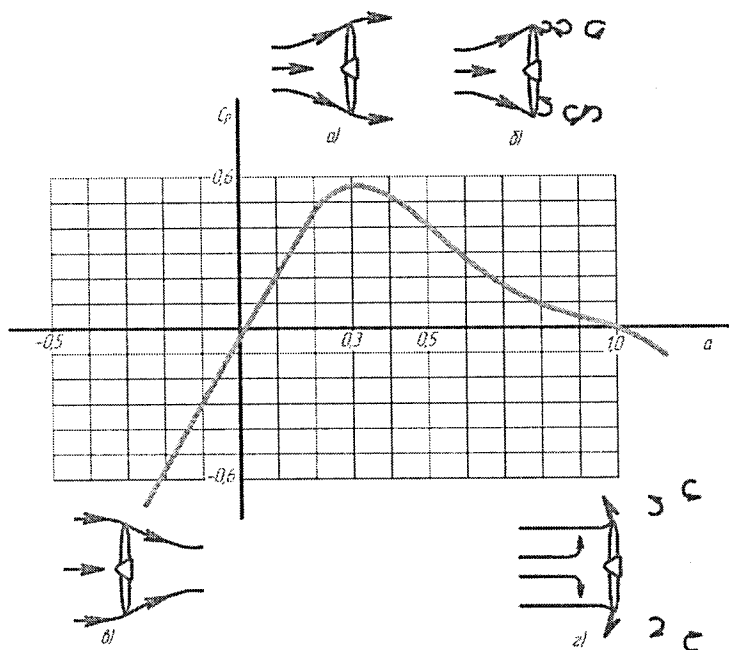


Рис. 5.10. Залежність коефіцієнта потужності  $C_p$  від коефіцієнта гальмування  $a$  за різних режимів роботи ротора

3)  $0,5 < a < 1$ ,  $C_p$  постійно зменшується до нуля. Вже при  $a = 0,5$  швидкість вітру за ротором  $v_2 = 0$ . На практиці межу  $a = 0,5$  можна вважати початком турбулентного режиму обтікання ротора, при якому, внаслідок порушення лінійної залежності частоти його обертання від швидкості вітру, коефіцієнт потужності знижується. При  $a = 1$ ,  $C_p = 0$  ротор обертається в режимі інтенсивної турбулізації потоку, який внаслідок нульової сумарної швидкості не покидає зону ротора і практично не створює корисного моменту;

4)  $a > 1$ , у цій області швидкість турбулізованого потоку  $v_1$  протилежна набігаючому. У такому режимі працюють гвинти літака при його гальмуванні після приземлення.

#### Питання для самоконтролю

1. Наведіть основні положення класичної моделі ідеального ротора.
2. Розкрийте зміст поняття коефіцієнта гальмування.
3. Значення коефіцієнта потужності горизонтально-осьового ротора.
4. Опишіть характерні особливості оптимальних умов роботи горизонтально-осьового ротора відповідно до ідеальної теорії.
5. Наведіть основні положення імпульсного варіанта класичної моделі ідеального ротора за Г. Х. Сабініним.
6. Виконайте порівняльну оцінку характерних величин ідеального ротора, отриманих за теоріями М. Є. Жуковського та Г. Х. Сабініна.
7. Дайте визначення моменту і потужності реального ротора.
8. Охарактеризуйте аеродинамічні характеристики ротора.
9. Дайте оцінку характеристик роторів різної швидкохідності.
10. Охарактеризуйте потужність горизонтально-осьової вітроустановки.
11. Охарактеризуйте режими роботи ротора вітроустановки.
12. Дайте оцінку залежностям коефіцієнта потужності від швидкохідності.

## 6. КЛАСИФІКАЦІЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

### 6.1. Класифікація вітроенергетичних установок

#### 6.1.1. Загальна класифікація вітроенергетичних установок

Вітроенергетичні установки класифікують за:

- видом енергії, що виробляється;
- сферами використання;
- призначенням.

Вітроенергетичні установки залежно від виду виробленої енергії поділяють на дві групи: механічні і електричні.

Залежно від сфери застосування механічні вітроенергетичні установки підрозділяють на дві підгрупи: вітронасосні і вітросилові.

Електричні вітроенергетичні установки підрозділяють на ВЕУ постійного і змінного струму.

Електричні вітроенергетичні установки постійного струму підрозділяють на три підгрупи: вітрозарядні, гарантованого живлення і негарантованого живлення.

Електричні ВЕУ змінного струму підрозділяють на автономні, гібридні і мережеві.

Вітронасосні вітроенергетичні установки призначені для використання в системах водопостачання та зрошування.

Вітросилові вітроенергетичні установки призначені для використання в складі засобів механізації трудомістких процесів, а також для генерування теплоти за рахунок механічної роботи.

ВЕУ постійного струму призначені:

- вітрозарядні ВЕУ – для зарядження акумуляторних батарей малопотужних віддалених електроспоживачів;
- ВЕУ гарантованого живлення – для гарантованого електропостачання споживачів;



- ВЕУ негарантованого живлення – для електроживлення малопотужних споживачів у місцях зі стійкими вітрами та в екстремальних умовах.

ВЕУ змінного струму призначені:

- автономні ВЕУ – для електричного живлення споживачів, не приєднаних до зовнішньої електричної мережі;
- комбіновані ВЕУ – для безперебійного електроживлення споживачів електроенергії номінальної потужності з дублюванням енергії;
- мережеві ВЕУ – для отримання й видачі в електричну мережу максимально можливої виробленої електроенергії.

Зручніше зобразити класифікацію вітроенергетичних установок без урахування типу сприймального органа та структурних особливостей у вигляді діаграми, яка подана на рис. 6.1.

6.1.2. Класифікація вітроенергетичних установок за структурними особливостями

Вітрові установки з урахуванням структурних особливостей можна класифікувати за:

- кінематичними показниками на: тихохідні і швидкохідні;
- видом руху робочого органа на: зі зворотно-поступальним рухом і з обертовим рухом;
- напрямом руху робочого органа з: вертикальною віссю обертання або напрямом руху; горизонтальною віссю обертання або напрямом руху; довільною фіксованою орієнтацією осі обертання або напрямом руху; змінною орієнтацією осі обертання або напрямом руху;
- видом передавального пристрою з: механічним; електричним; гідравлічним; пневматичним; комбінованим передавальним пристроєм;
- видом акумуляції енергії з: механічною, електричною, гідравлічною, пневматичною, тепловою, хімічною, комбінованою акумуляцією та без акумуляції;

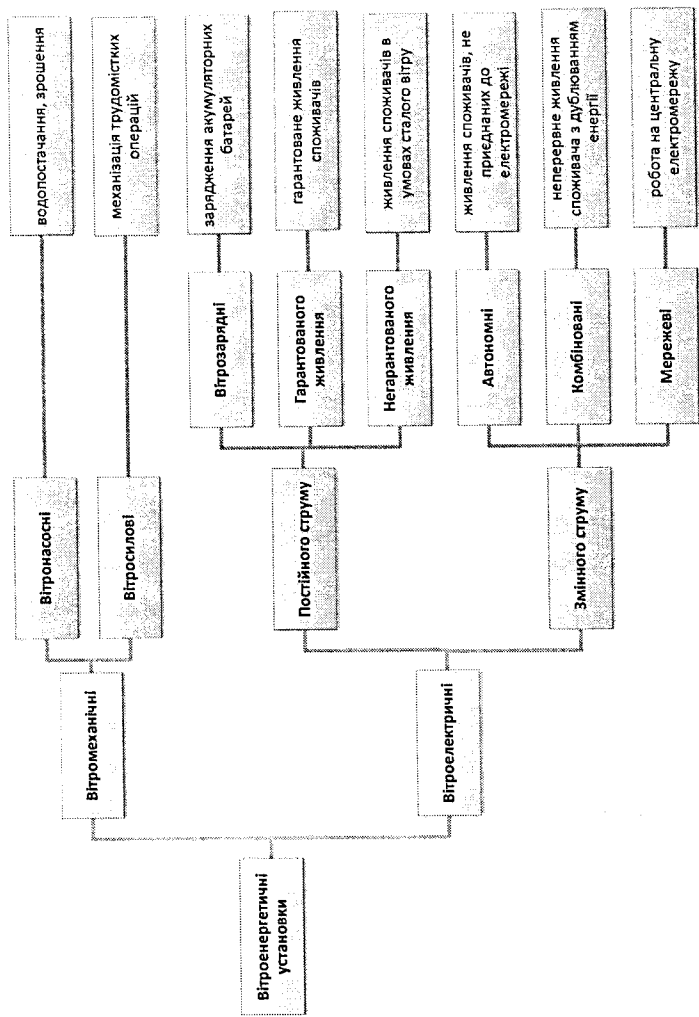


Рис. 6.1. Класифікація вітроенергетичних установок без урахуванням типу сприймального органа та структурних особливостей

– видом резервуванням енергії: електродвигуном; двигуном внутрішнього згоряння; комбінованим резервуванням.

Зручніше зобразити класифікацію вітроенергетичних установок з урахуванням структурних особливостей у вигляді схеми, поданої на рис. 6.2.

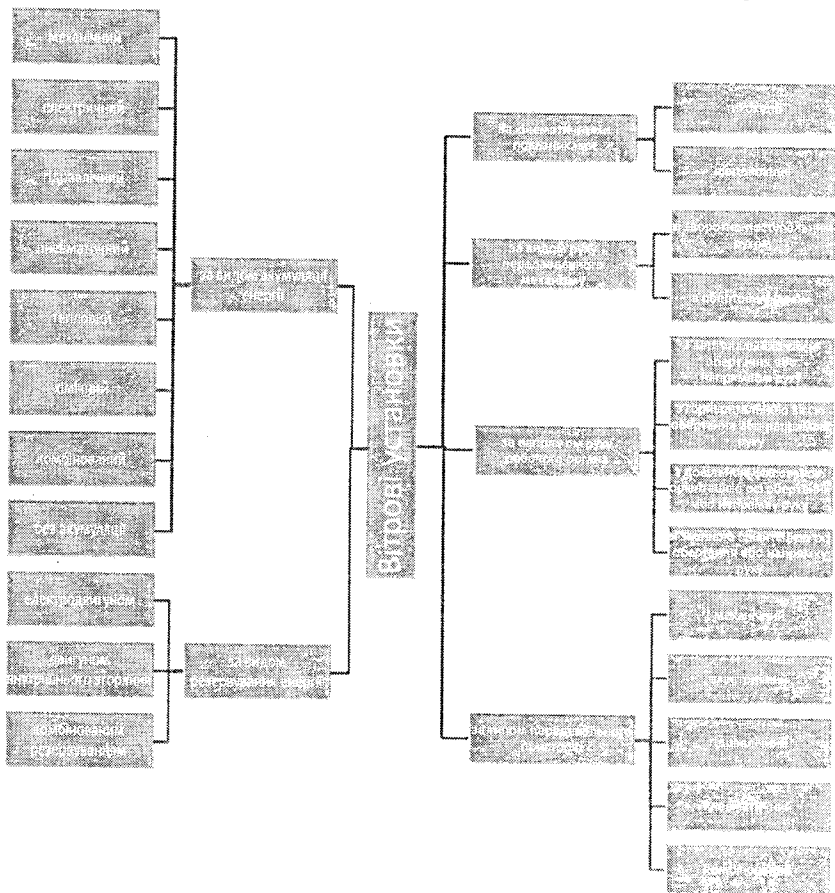


Рис. 6.2. Класифікація вітроенергетичних установок з урахуванням структурних особливостей

### 6.1.3. Класифікація вітроенергетичних установок за типом ротора

Головні ознаки для класифікації ВЕУ з урахуванням типу сприймального органа – це геометрія ротора і його положення відносно напрямку вітру. При взаємодії вітру з ротором виникають:

- сила опору, паралельна вектору швидкості набігаючого потоку;
- підйомна сила, прикладена до лопаті ротора, перпендикулярна силі опору;
- завихрення, закручування вітрового потоку, який оточує лопаті ротора;
- турбулізація потоку, тобто виникнення хаотичних за величиною і напрямом збурень швидкості повітря у вітровому потоці: турбулентність виникає як за ротором, так і перед ним. У результаті лопать часто опиняється в потоці, турбулізованому іншими лопатями;
- перешкода для набігаючого потоку: ця властивість характеризується геометричним заповненням ротора: він дорівнює відношенню площі проекції лопатей площин, перпендикулярних потоку, до площі їх обмаху: так, наприклад, при однакових лопатях чотирилопатевий ротор має удвічі більше геометричне заповнення, ніж дволопатевий.

Вітроенергетичні установки класифікують за такими ознаками з урахуванням типу сприймального органа:

**1. За орієнтацією осі обертання ротора:** вертикальна (перпендикулярно повітряному потоку) або горизонтальна (паралельно повітряному потоку). У першому випадку установку називають вертикально-осьовою, в другому – горизонтально-осьовою.

Основною обертковою силою в роторах цього типу є підйомна сила.

У ВЕУ з горизонтальною віссю обертання використовують ротори з однією (рис. 6.3, а), двома (рис. 6.3, б), трьома (рис. 6.3, в), чотирма (рис. 6.3, г) та з багатьма (рис. 6.3, д) лопатями. Також ротор може бути побудований за принципом велосипедного колеса (рис. 6.3, е).

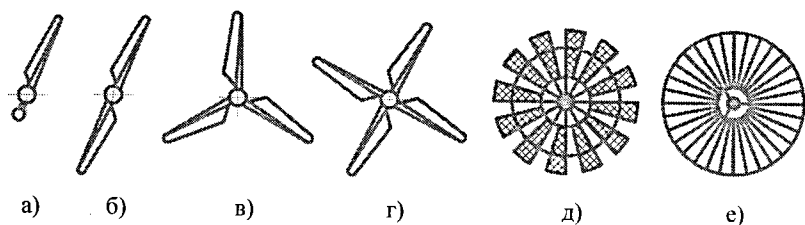


Рис. 6.3. Конструктивні особливості лопатевих роторів горизонтально-осьових вітроенергетичних установок

Окремо варто виділити у складі цього класу слабоенергетичні вітроприймальні пристрої: барабанного (рис. 6.4, а), вітрильного (рис. 6.4, б), горизонтально розташованого ротора Савоніуса (рис. 6.4, в).

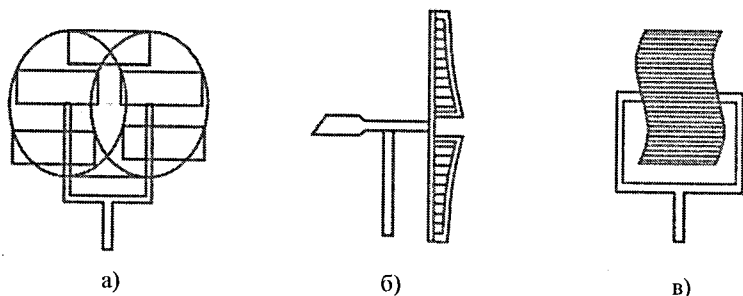


Рис. 6.4. Конструкції слабоенергетичних вітроприймальних пристроїв горизонтально-осьових вітроенергетичних установок

Також необхідно згадати про специфічні конструкції горизонтально-осьових ВЕУ, до яких належать: ротор, що використовує енергію вільних вихорів (рис. 6.5, а); з двома роторами зустрічного обертання (рис. 6.5, б); багатороторна (рис. 6.5, в).

Потужність вітроенергетичної установки залежить від ефективності використання енергії повітряного потоку. Одним зі способів підвищення

потужності вітроенергетичної установки є використання спеціальних концентраторів (підсилювачів) повітряного потоку (рис. 6.6).

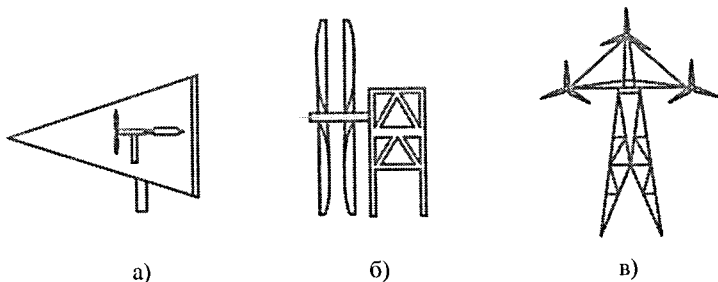


Рис. 6.5. Конструктивні особливості специфічних конструкцій горизонтально-осьових ВЕУ

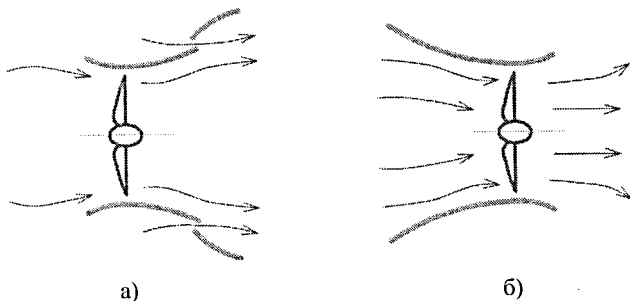


Рис. 6.6. Конструктивні особливості специфічних конструкцій горизонтально-осьових вітроенергетичних установок

Для горизонтально-осьових вітроенергетичних установок розроблені або запропоновані різні варіанти таких концентраторів. Це можуть бути дифузори (див. рис. 6.6, а) або конфузори (дефлектори) (див. рис. 6.6, б), що спрямовують на ротор повітряний потік з площі, більшої від його охопленої площі, та деякі інші пристрої, однак широкого розповсюдження вони поки що не отримали.

Вітроенергетичні установки з вертикальною віссю обертання вітроприймального пристрою завдяки своїй геометрії за будь-якого напрямку вітру завжди перебувають у робочому положенні. Крім того, така схема дозволяє тільки за рахунок подовження вала встановити редуктор з генераторами внизу вежі.

Серед вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання можна виділити такі групи:

- з використанням сили опору;
- з використанням підйомної сили;
- комбінованого типу тощо.

До ВЕУ з вертикальною віссю обертання з використанням сили опору належать: ротор Савоніуса (рис. 6.7, а); багатолопатевий ротор Савоніуса (рис. 6.7, б); пластинчастий ротор (рис. 6.7, в); чашковий ротор (рис. 6.7, г);

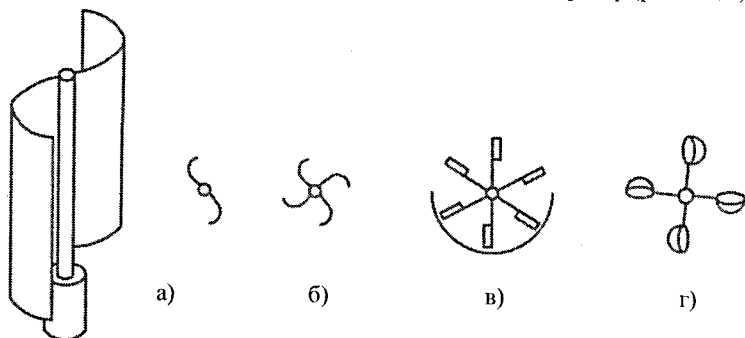


Рис. 6.7. Вітроенергетичні установки з вітроприймальними пристроями, що використовують силу опору

*Ротор Савоніуса.* Цей ротор також обертається силою опору. Його лопаті виконані з тонких зігнутих листів прямокутної форми, тобто відрізняються простотою і дешевизною. Обертаний момент створюється завдяки різному опору повітряному потоку увігнутої і вигнутої відносно

нього лопатей ротора. Внаслідок великого геометричного заповнення цей ротор характеризується великим крутним моментом і може використовуватись, наприклад, для перекачування води.

*Чашковий ротор (анемометр).* Ротор цього типу обертається силою опору. Форма чашкоподібної лопаті забезпечує практично лінійну залежність частоти його обертання від швидкості вітру.

До ВЕУ з вертикальною віссю обертання з використанням підйомної сили належать: ротор Дар'є (рис. 6.8, а); ротор Дар'є  $\Delta$ -подібний (рис. 3.8, б); ротор Масгрува (рис. 6.8, в); ротор Еванса (рис. 6.8, г); вітротурбіна (рис. 6.8, д);

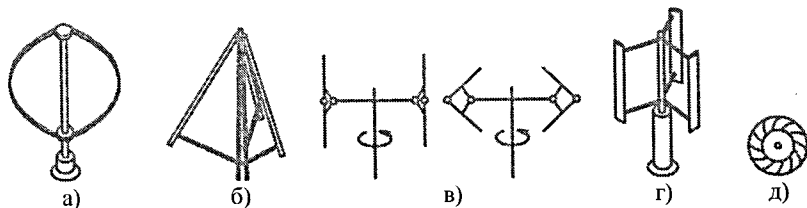


Рис. 6.8. Вітроенергетичні установки з вітроприймальними пристроями, що використовують підйомну силу

*Ротор Дар'є.* Обертаний момент створюється підйомною силою, що виникає на двох або трьох тонких зігнутих поверхнях, які мають аеродинамічний профіль. Підйомна сила максимальна в той момент, коли лопать з великою швидкістю перетинає навігаючий повітряний потік. Розкручуватися самостійно ротор, як правило, не може, тому для його запуску зазвичай використовують ротор Савоніуса.

*Ротор Масгрува.* Лопаті цього ротора в робочому стані розташовані вертикально, але мають змогу обертатися або складатися навколо горизонтальної осі при відключенні (див. рис. 6.8, в). Існують різні варіанти роторів Масгрува, але всі вони вимикаються в разі сильного вітру.



*Ротор Еванса.* Лопаті цього ротора в аварійній ситуації та при управлінні повертаються навколо власної вертикальної осі.

До ВЕУ з вертикальною віссю обертання комбінованого типу належать: ротори Дар'є і Савоніуса (рис. 6.9, а); ротор Савоніуса щільний (рис. 6.9, б); ротор з використанням ефекту Магнуса (рис. 6.9, в); вітроприймальний пристрій з несучими поверхнями (рис. 6.9, г).

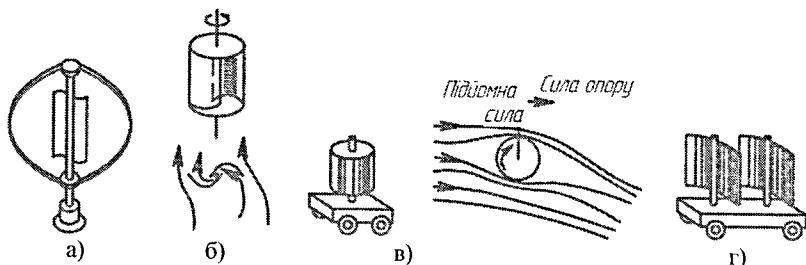


Рис. 6.9. Вітроенергетичні установки з вітроприймальними пристроями комбінованого типу

До ВЕУ з вертикальною віссю обертання інших типів належать: ротор з дефлекторним пристроєм (рис. 6.10, а); сонячно-вітровий пристрій (рис. 6.10, б); ротор з турбіною Вентурі (рис. 6.10, в); ротор з вихровим пристроєм (рис. 6.10, г).

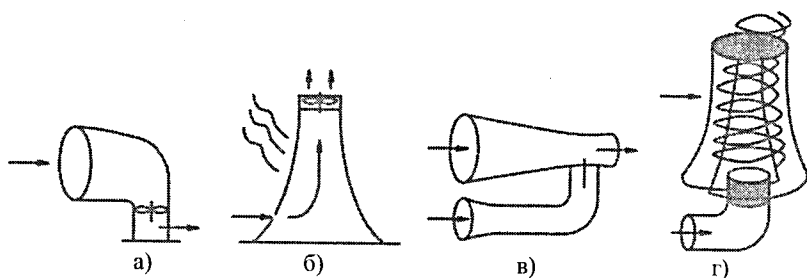


Рис. 6.10. Вітроенергетичні установки з вітроприймальними пристроями інших типів, які не можна віднести до попередніх груп класифікації

До вітроенергетичних установок з вертикальним розташуванням вітроприймального пристрою, які отримали розвиток з наведених раніше типів, можна зарахувати: SolarwindTM (рис. 6.11, а); Helikal (рис. 6.11, б); Noguchi (рис. 6.112, в); Maglev (рис. 6.11, г); Cochrane (рис. 6.11, д).

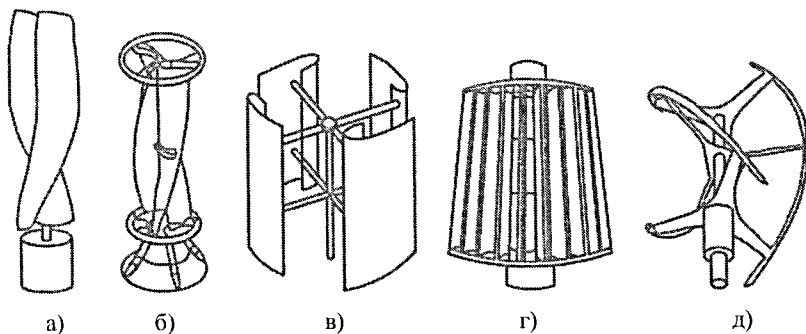


Рис. 6.11. Вітроенергетичні установки з вертикальним розташуванням вітроприймального пристрою, які походять з попередніх груп класифікації

**2. За природою обертової сили:** сила опору або підйомна сила. Установки, що використовують силу опору (драг-машини), як правило, обертаються з лінійною швидкістю, меншою від швидкості вітру, а установки, що використовують підйомну силу (ліфт-машини), мають лінійну швидкість кінців лопатей, значно більшу від швидкості вітру.

**3. За величиною геометричного заповнення ротора:** для більшості установок ця величина визначається кількістю лопатей. Вітроенергетичні установки з великим геометричним заповненням розвивають значну потужність за відносно слабкого вітру, і максимум потужності досягається за відносно невеликих обертах колеса. Вітроенергетичні установки з малим заповненням досягають максимальної потужності при великих обертах і довше виходять на цей режим. Тому перші установки зазвичай використовують для роботи млинів і водяних pomp для підйому води з колодязів і свердловин – вони навіть за слабкого вітру зберігають

працездатність, а другі – як електрогенератори, ротори яких повинні обертатися з великою частотою. Крім того, тихохідні (багатолопатеві) Вітроенергетичні установки з успіхом можуть бути використані для опалення, оскільки в цьому разі можна нехтувати частотою обертання і відповідно якістю електричної, механічної або теплової енергії, що виробляється вітроустановкою.

4. *За способом орієнтації осі ротора на вітер:* лопатевим стабілізатором (рис. 6.12, а), додатковим бічним ротором (віндрозую) (рис. 6.12, б), серводвигуном (рис. 6.12, в), самоорієнтацією розташуванням ротора за опорою (рис. 6.12, г).

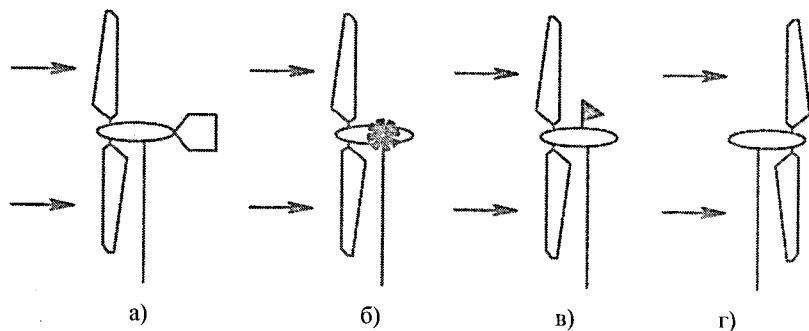


Рис. 6.12. Способи орієнтації вітрових роторів з горизонтальною віссю

Оцінку основних переваг та недоліків горизонтально- та вертикально-осьових вітроенергетичних установок зручно проводити за даними порівняльної табл. 6.1.

## 6.2. Структурні схеми вітроенергетичних установок

Завдання раціонального виконання та використання вітроенергетичних агрегатів є важливим з погляду технологічності їх виготовлення, а також економічної доцільності застосування.

## Основні переваги та недоліки різних типів вітроустановок

Вену з триєднотактною осью валу внутрішнім механізмом привертання	Вену з вертикально-осовою внутрішнім механізмом привертання
<p><b>Переваги</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вищий коефіцієнт використання енергії вітру, ніж у вітроустановки з ротором Дар'є</li> <li>2. Відносно постійний момент обертання</li> <li>3. Легкість автоматичного запуску</li> <li>4. Можливість регулювання частоти обертання зміною кута набігання вітрового потоку</li> </ol>	<p><b>Переваги</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не потрібний механізм орієнтації ротора за напрямом вітру</li> <li>2. Електрогенератор розташований знизу опори вітроустановки на землі</li> <li>3. Не потрібний механізм передачі електропроту через ковзачок контакти або обертовий трансформатор</li> <li>4. Менша маса опори вітроустановки без встановленого на ній електрогенератора</li> <li>5. Профіль лопаті симетричний. Відсутня зміна кута встановлення профлю лопаті за довжиною</li> <li>6. Ротор ротора Еванса працює за оптимальних чисел Рейнольдса</li> <li>7. Самообмеження частоти обертання ротора на значних частотах обертання через зменшення кута атаки потоку, що набігає</li> </ol>
<p><b>Недоліки</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необхідний механізм орієнтації за напрямом вітру</li> <li>2. Змінне значення числа Рейнольдса за довжиною лопаті</li> <li>3. Наявність складного профлю лопаті, змінний за довжиною кут набігання вітрового потоку – технологічно складний у виготовленні (для жорстко закріплених лопатей)</li> <li>4. Складніше обслуговування високо піднятого над землею електрогенератора</li> <li>5. Електрогенератор та мультиплікатор зазвичай знаходяться в гондолі вітроустановки</li> </ol>	<p><b>Недоліки</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вітроустановка сама не стартує. Необхідне застосування стартрової установки або примусового розкручування електродвигуном</li> <li>2. Дія на лопаті змінних з частотою обертання аеродинамічних сил на тлі відцентрових сил, що викликає автоколивання лопаті</li> <li>3. Закритичні кути атаки крила за малих коефіцієнтів швидкохідності</li> <li>4. Менший, ніж у горизонтально-осової вітроустановки, коефіцієнт використання енергії вітру</li> <li>5. Передчасне зношення опорних підшипників</li> <li>6. Відсутність надійних засобів регулювання швидкості обертання ротора</li> <li>7. Необхідність наявності відкритої місцевості</li> <li>8. Підвищена матеріаломісткість</li> </ol>

Залежно від передбачуваної сфери використання оптимізація параметрів здійснюється за різними критеріями та структурними схемами. Такі задачі можуть бути розв'язані з використанням теорії систем, аналітичних методів аналізу та синтезу енергетичних установок і дослідження їх параметрів.

Для покращання коефіцієнта використання енергії вітру доцільно використовувати структуру вітроенергетичної установки з мінімальною кількістю перетворювачів енергії від ротора до робочого органа, або споживача енергії.

Вітроустановки з приводом робочого органа (РО) можуть бути виконані за різними структурними схемами, найбільш вживаними з них є такі (рис. 6.13):

- 1) розміщення в гондолі вітроустановки кривошипно-шатунного механізму (передача енергії здійснюється за допомогою штанги-шатуна);
- 2) розміщення в гондолі проміжного мультиплікатора (М) з передачею обертового моменту за допомогою довгого швидкохідного вала;
- 3) розміщення в гондолі редуктора або мультиплікатора зміни напрямку осей валів з передачею крутного моменту за допомогою довгого тихохідного вала до проміжного мультиплікатора в основі стояка;
- 4) розміщення в гондолі проміжного мультиплікатора (М) і електрогенератора (ЕГ) для передачі електроенергії до привідного електродвигуна (ЕД) робочого органа;
- 5) розміщення в гондолі редуктора або мультиплікатора зміни напрямку осей валів з передачею крутного моменту за допомогою довгого тихохідного вала до проміжного мультиплікатора (М) з електрогенератором (ЕГ) в основі стояка для живлення привідного електродвигуна (ЕД) робочого органа;
- 6) розміщення в гондолі проміжного мультиплікатора (М) і гідро- або пневмопомпи (ГП або ПП) для передачі енергії потоком рідини або

повітря до гідро- або пневмодвигуна (ГД або ПД) приводу робочого органа;

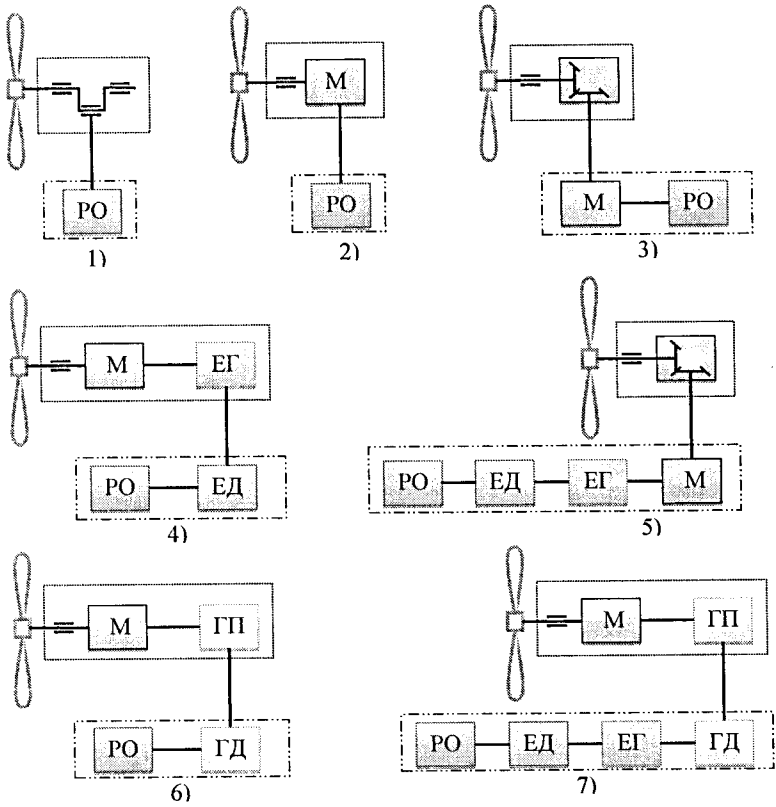


Рис. 6.13. Структурні схеми вітроенергетичних установок:

□ - розташування вузлів і агрегатів у гондолі вітроустановки;

□ - наземне розташування вузлів і агрегатів;

М – мультиплікатор; РО – робочий орган; ЕГ – електричний генератор; ЕД – електричний двигун; ГП – гідравлічна помпа; ГД – гідравлічний двигун

7) розміщення в гондолі проміжного мультиплікатора (М) і гідро- або пневмопомпи для передачі енергії потоком рідини або повітря до гідро- або пневмодвигуна приводу електрогенератора та електродвигуна робочого органа.

Дослідження структури вітроенергетичних установок, (див. рис. 6.13) показують, що в аграрному виробництві доцільно використовувати схеми 1–3 для забезпечення, наприклад, водопостачання тваринницьких ферм, переробних підприємств та інших об'єктів; 2, 3 – для приводу робочих органів подрібнювальних та інших машин з механічними енергетичними потоками; 4, 5, 7 – для електричного приводу робочих органів машин та виробництва електроенергії; 6 – для приводу робочих органів машин з гідравлічним способом передачі енергії.

### **6.3. Схеми вітроенергетичних систем**

6.3.1. Схеми генерування і використання енергії вітроенергетичними установками

Можливі технологічні схеми ефективного отримання електричної енергії за рахунок енергії вітру для автономної, мережевої та комбінованої роботи ВЕУ подано на рис. 6.14–6.20.

Схеми (див. рис. 6.14–6.15) стосуються варіанта генерування електричної енергії постійного струму. Як основний генеруючий засіб може бути використано генератор постійного або змінного струму. У разі використання генератора змінного струму його обладнують випрямлячем. Вироблена енергія подається через контролер до акумуляторних батарей або ж безпосередньо до споживача.

У схемі (див. рис. 6.15) додатковим елементом, який підвищує ефективність відбору енергії від ротора, введено тепловий акумулявальний пристрій, який виконує функцію баластного навантаження.

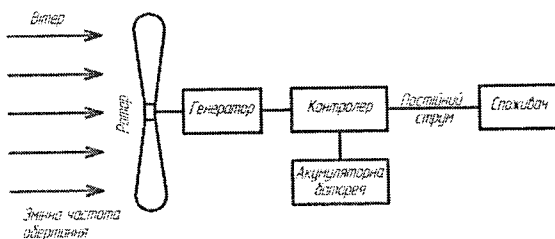


Рис. 6.14. Вітроелектрична установка постійного струму без баластного навантаження

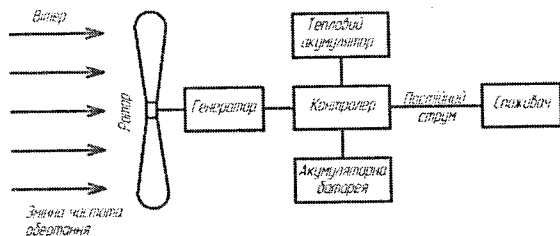


Рис. 6.15. Вітроелектрична установка постійного струму з баластним навантаженням

Основною перевагою цього способу генерування електроенергії є те, що немає потреби в регулюванні частоти обертання ротора.

У разі необхідності живлення автономного споживача змінним струмом до складу системи необхідно ввести пристрій перетворення напруги постійного струму у напругу змінного струму (див. рис. 6.16). За такою схемою працює більшість автономних ВЕУ. У цьому випадку частота обертання вітроколеса також не має визначального значення, оскільки генератор навантажується на акумуляторну батарею, з якої здійснюватиметься відбір енергії для інвертора, а далі й споживача.



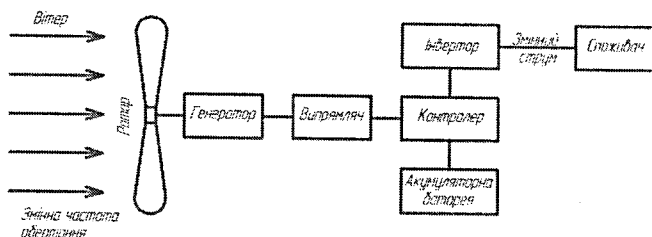


Рис. 6.16. Вітроелектрична установка змінного струму

У разі побудови вітроустановки для роботи на електричну мережу її структура буде максимально спрощена. Схема такого варіанта подана на рис. 6.17.

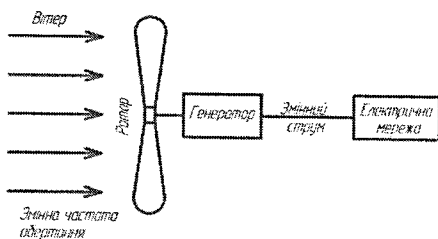


Рис. 6.17. Мережева вітроелектрична установка змінного струму

У цьому разі необхідною умовою роботи вітроустановки є постійна частота обертання ротора при агрегуванні зі синхронним електрогенератором або частота обертання, близька до постійної при агрегуванні з асинхронним електрогенератором. Інколи установки потребують застосування спеціальних конструктивних пристроїв регулювання кута атаки лопатей залежно від швидкості вітрового потоку та навантаження.

Введення до структури ВЕУ ланки постійного струму позбавляє необхідності регулювання частоти обертання ротора, а синхронізація зі

зовнішньою електричною мережею здійснюється мережевим інвертором (див. рис. 6.18).

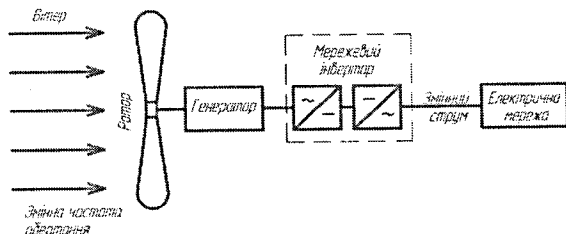


Рис. 6.18. Мережева вітроелектрична установка змінного струму з ланкою постійного струму

Для автономних споживачів доцільним є застосування комбінованих електрогенерувальних систем. Схеми варіантів побудови таких систем подано на рис. 6.19 і 6.20.

Особливістю схеми (див. рис. 6.19) є застосування вітроустановки як основного джерела електроенергії.

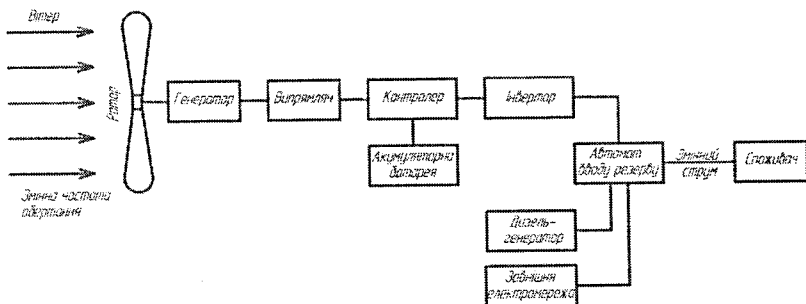


Рис. 6.19. Автономна гібридна система, побудована на базі вітроелектричної установки з додатковими джерелами енергії

За відсутності достатньої кількості генерованої вітроустановкою електроенергії здійснюється її дублювання за рахунок застосування або дизель-генератора, або зовнішньої електричної мережі. Перемикання режиму

роботи на певне джерело енергії здійснюється автоматом вводу резерву (АВР). У разі застосування дизель-генератора як дублюючого джерела енергії система може працювати в автономному режимі без приєднання до зовнішньої електромережі.

Система, яка побудована за схемою рис. 6.20, належить до класу автономних з гібридною структурою. У цій схемі основним джерелом енергії є вітроелектрична установка. Фотоелектрична установка в цьому разі виступатиме як додаткове джерело електроенергії. Споживачі можуть використовувати електричну енергію як постійного, так і змінного струму, залежно від виробничої необхідності.

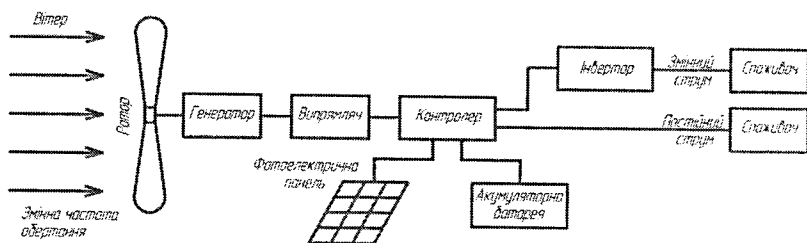


Рис. 6.20. Автономна гібридна вітро-сонячна система електропостачання

### 6.3.2. Електричні генератори вітрових установок

Залежно від умов використання та інших чинників у ВЕУ використовують різні типи електричних генераторів.

Найбільш вживані типи електричних генераторів подано на рис. 6.21.

Електричні генератори (див. рис. 6.21, б, в і г) можуть мати як однофазне, так і трифазне виконання.

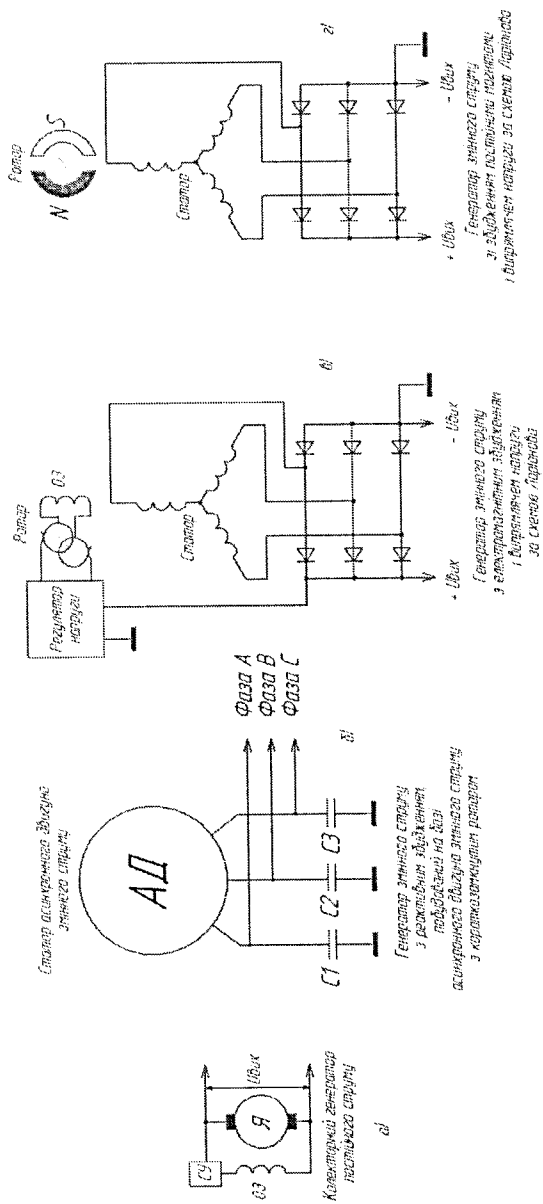


Рис. 6.21. Типи найбільш вживаних електричних генераторів для вітроселектричних установок:

а - колекторний генератор постійного струму з реактивним збудженням, побудований на базі асинхронного двигуна змінного струму з короткозамкнутим ротором; б - генератор змінного струму з електромагнітним збудженням і випрямлячем напруги за схемою Ларіонова; в - генератор змінного струму з реактивним збудженням і випрямлячем напруги за схемою Ларіонова; г - генератор змінного струму з постійним збудженням і випрямлячем напруги

Електричні генератори з електромагнітним і реактивним збудженням (див. рис. 6.21, а, б і в) використовують електричну енергію для збудження і тому мають менший ККД. Перевагою електричних генераторів постійного струму (див. рис. 6.21, а) є простота регулювання, відсутність випрямачів. Однак їх недоліком є складніша конструкція, більша металомісткість, особливо вміст міді, низька надійність за рахунок наявності колектора.

Електричний асинхронний генератор змінного струму з реактивним збудженням (див. рис. 6.21, б) має найпростішу будову, але для забезпечення найвищої ефективності роботи вимагає налаштування ємності конденсаторів до зміни навантаження.

Найпоширеніший електричний генератор змінного струму з електромагнітним збудженням (див. рис. 6.21, в), як і колекторний електричний генератор постійного струму, має щітковий вузол дещо простішої будови та потребує використання енергії для збудження.

Особливістю синхронного електричного генератора змінного струму зі збудженням від постійних магнітів (див. рис. 6.21, г) є те, що в ньому не використовується додаткова енергія для збудження. Вихідна характеристика таких генераторів близька до тахометричної, тобто вихідна напруга пропорційна кутовій швидкості ротора генератора, яка, у свою чергу, пропорційна швидкості вітру, якщо не застосовуються спеціальні пристрої для зміни кута атаки лопатей ротора або інші пристрої стабілізації частоти його обертання. У такому разі забезпечення відповідних параметрів вихідної напруги електричних генераторів здійснюється інверторами, побудованими на базі компонентів силової електроніки.

### 6.3.3. Електротехнічні системи вітрових установок

Для забезпечення роботи вітроустановки з максимальним значенням коефіцієнта використання енергії вітру  $\xi$  при змінній його швидкості, необхідно забезпечити автоматичне узгодження навантаження генератора з

миттєвою потужністю вітроустановки, яка повинна працювати на спаді характеристики  $\xi=f(\omega R/\lambda)$  поблизу її максимального значення.

Більшість регіонів України характеризується малою середньорічною швидкістю вітру 3,0–5,0 м/с. Тому близько 90 % часу вітроустановки працюють на режимах часткової потужності. У таких режимах роботи для забезпечення номінальної вихідної напруги електричних генераторів з електромагнітним збудженням необхідно забезпечувати максимальний магнітний потік у роторі, а відповідно й максимальний струм збудження. Таким чином, значна частка виробленої електричної енергії витрачається на збудження генератора, що суттєво знижує загальний ККД вітроустановки.

Таким чином, в умовах малих середньорічних швидкостей вітру доцільно використовувати генератори зі збудженням від постійних магнітів, встановлених на роторі.

Однією з особливостей використання вітроустановок є те, що надходження вітрової енергії зазвичай не збігається з її використанням. Тому необхідним є застосування акумулювальних пристроїв, що є найбільш поширеним, або приєднання вітроустановки до централізованої електричної мережі.

Для узгодження споживання електричної енергії споживачами з її виробництвом у часі та для часткової стабілізації параметрів електроенергії в автономних вітроустановках застосовують ланку постійного струму з акумуляторами. Тому відпадає гостра потреба застосування пристроїв регулювання параметрів вітрової турбіни для стабілізації її кутової швидкості.

Причому для забезпечення оптимального режиму зарядження акумуляторної батареї, у всьому робочому діапазоні швидкості вітру, без перевищення допустимого зарядного струму, що продовжує термін її експлуатації, необхідно забезпечити регулювання напруги і струму електронним засобами (пристроями).

Оскільки відбирання потужності від генератора забезпечується в основному режимом зарядження акумуляторної батареї, необхідно забезпечити узгодження потужності та вихідної напруги генератора з ємністю акумуляторної батареї, що зумовлює допустиме значення зарядного струму та напруги.

У такому разі ємність акумуляторної батареї зумовлена не тільки потребою резервування енергії, а й забезпеченням максимальної ефективності відбирання енергії від електрогенератора.

З цих міркувань напруга акумуляторної батареї повинна бути суттєво меншою від номінальної напруги електрогенератора для гарантованого забезпечення відбирання енергії при роботі установки на часткових режимах потужності в діапазоні швидкості вітру від швидкості зрушення ротора до номінальної. Можливо також із цією метою застосувати DC-DC контролери підвищувального типу, однак у такому разі складно буде забезпечити їх роботу в повному робочому діапазоні швидкості вітру.

З викладеного випливає, що електротехнічна система відбирання потужності ВЕУ повинна мати структуру, зображену на рис. 6.22.

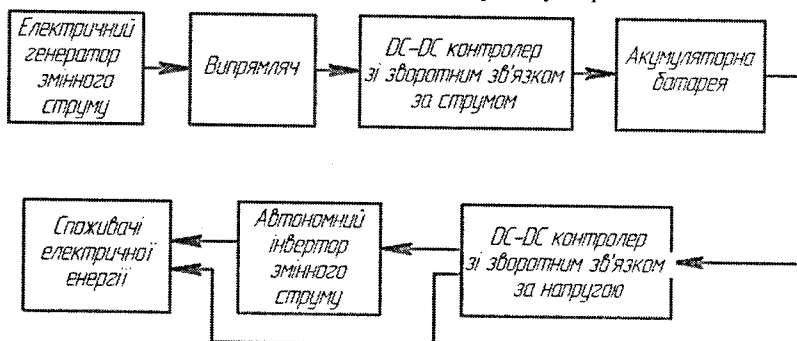


Рис. 6.22. Електротехнічна система автономної вітроелектричної установки

DC-DC контролер зарядження акумуляторної батареї може бути виконаний за схемою, наведеною на рис. 6.23, а стабілізатор вихідної напруги – за схемою, поданою на рис. 6.24.

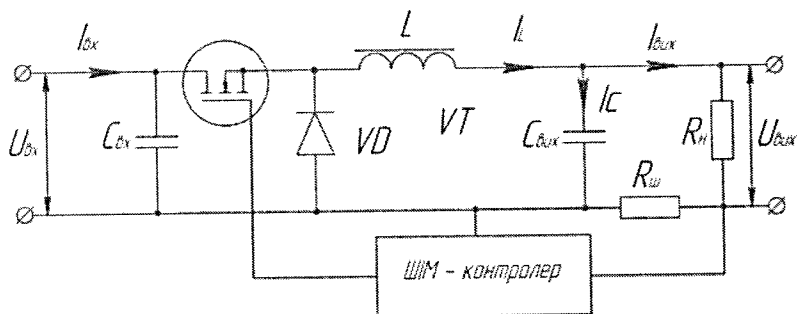


Рис. 6.23. Спрощена схема регулятора заряду акумуляторної батареї зі зворотним зв'язком за струмом

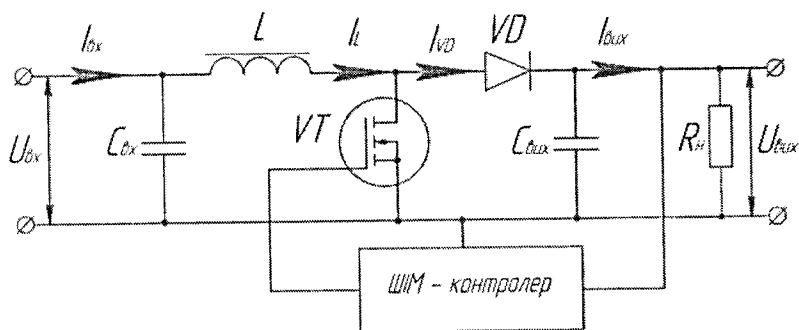


Рис. 6.24. Спрощена схема стабілізатора вихідної напруги зі зворотним зв'язком за напругою

У режимах вітрового потоку від номінальної до максимально допустимої робочої швидкості управління зарядженням акумуляторної батареї може також здійснюватися частковим або повним виведенням ротора з-під вітру із забезпеченням при цьому постійності вихідної потужності вітроустановки.



Що стосується фазності електричного генератора, то з метою спрощення випрямляча доцільно використовувати однофазний, але використання багатофазних генераторів дає змогу здійснювати регулювання зарядного струму комутацією обмоток статора.

#### **6.4. Способи регулювання вихідної потужності вітроелектричних установок**

Виділяють два основних принципи роботи ВЕУ:

- з постійною кутовою швидкістю ротора;
- зі змінною кутовою швидкістю ротора.

У ВЕУ також застосовується активне або пасивне регулювання кутової швидкості ротора та його орієнтації до напрямку вітрового потоку.

До методів активного регулювання кутової швидкості ротора та її орієнтації до напрямку вітру належить зміна кута атаки лопатей і орієнтації ротора за допомогою поворотних пристроїв. Загалом усі способи регулювання застосовують для забезпечення необхідного рівня потужності з допустимою якістю та мінімізації механічних навантажень на ротор, передавальні пристрої та електричний генератор. Останнє значно впливає на термін безаварійної експлуатації ВЕУ.

Ефективну й безпечну роботу ВЕУ забезпечують такі системи та механізми:

- система динамічної зміни кута атаки (змінює кут встановлення лопатей, забезпечуючи необхідний режим роботи установки);
- електромеханічна система динамічного регулювання швидкості обертання ротора залежно від навантаження й швидкості вітру (забезпечує необхідний режим роботи установки);
- система управління орієнтацією ротора до напрямку вітру (забезпечує орієнтацію ротора до вітрового потоку з урахуванням його змінного напрямку, поривів і турбуленції);

- система оперативного регулювання магнітного поля електричних генераторів (забезпечуються стандартні параметри якості електроенергії);

- система аеродинамічного регулювання обертового моменту (використання спеціального аеродинамічного профілю лопаті, який при перевищенні швидкості вітру заданого значення обмежує обертовий момент).

ВЕУ працюють у широкому діапазоні швидкості вітру, тому можна виділити такі характерні фази їх роботи (рис. 6.25).

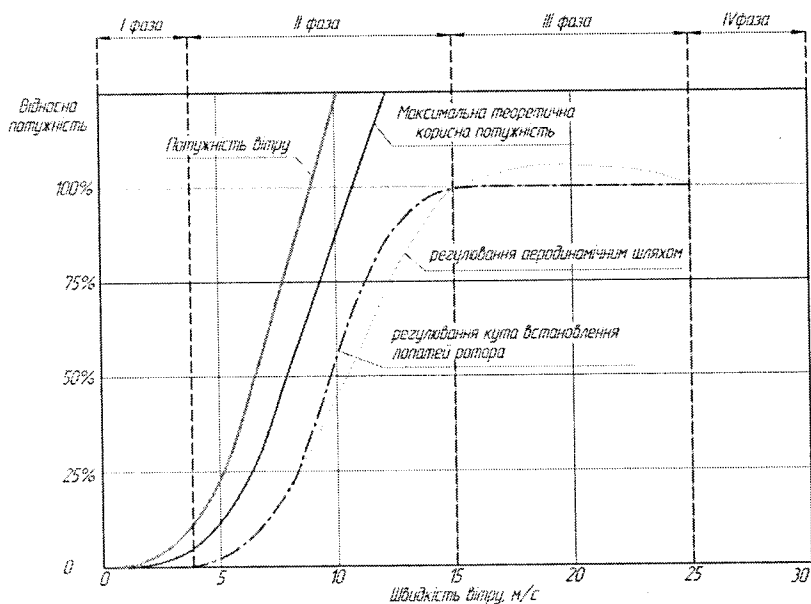


Рис. 6.25. Характерні фази роботи вітроелектричної установки залежно від швидкості вітрового потоку

Розглянемо основні з них.

Фаза I. Швидкість вітру є меншою від швидкості зрушування ротора. Потужності вітрового потоку недостатньо для подолання сил тертя ротора, сил інерції і забезпечення роботи вітротурбіни.

Фаза II. Швидкість вітрового потоку перевищує швидкість зрушення ротора, але менша від швидкості, що відповідає швидкості номінальної потужності. Теоретичне збільшення корисної енергії вітру пропорційне кубічній залежності від швидкості вітру. Фактична потужність вітроустановки є дещо меншою, оскільки наявні аеродинамічні, механічні та електричні втрати потужності. Характер кривої потужності у цій фазі залежить від способу регулювання вихідної потужності.

Фаза III. Швидкість вітрового потоку перевищує значення, що відповідає швидкості номінальної потужності, але менша від максимальної робочої швидкості, при якій вітроустановка повинна бути переведена в неробочий стан для запобігання її руйнуванню. У цій фазі здійснюється регулювання електротехнічної системи для забезпечення відповідних параметрів вироблюваної електричної енергії та запобігання виходу з ладу електромеханічної системи. Характерною особливістю цієї фази є робота вітрової установки з однаковою потужністю в широкому діапазоні зміни швидкості вітру. Це, наприклад, може бути забезпечено частковим виведенням ротора з-під вітру.

Фаза IV. Швидкість вітру перевищує максимальну робочу. У цій фазі вітроелектрична установка повинна бути зупинена та переведена у стан, що запобігає її руйнуванню.

### **6.5. Параметричні ряди вітроенергетичних установок**

Конструювання і виробництво технічних засобів завжди піддається певним законам промислового виробництва (технологічність,

універсальність, серійність тощо). Очевидно, що виготовити обладнання, яке б задовольняло вимоги всіх споживачів, неможливо.

Для забезпечення відповідності виробленого обладнання вимогам споживачів, а також забезпечення відповідних умов техніко-економічних аспектів його виготовлення виконують розробку параметричних рядів, що характеризують конструктивну ідеологію.

**Параметричний ряд** – це сукупність числових значень параметрів, яка побудована в певному діапазоні на основі прийнятої системи градацій.

Для визначення параметричного ряду необхідно враховувати його дві характеристики: діапазон ряду та градацію. Діапазон ряду – це інтервал, обмежений крайніми значеннями членів ряду. Градацією параметричного ряду називають математичну закономірність, що визначає характер інтервалів між членами ряду в певному діапазоні. Вибір оптимальної градації параметричного ряду зводиться до знаходження такого ряду переважних чисел, який найбільше відповідає вимогам народного господарства країни.

Більшість параметричних рядів, що входять до чинних параметричних стандартів, побудовано на основі ряду Ренара  $R_{10}$ . Це дає підставу вважати, що ряд  $R_{10}$  є нині найбільш доцільним для побудови параметричних рядів на машини та устаткування. У цьому разі параметр кожного наступного члена ряду є більшим або меншим від попереднього в 1,25 раза.

Особливо гостро ця тенденція проявляється у вітроенергетиці. Поряд з великою різноманітністю вітроустановок за конструктивним виконанням, спостерігається значна відмінність у параметричних рядах за потужністю, як основним показником характеристики.

Розглянемо загальний поділ ВЕУ за потужністю, який склався в цій галузі.

Згідно з європейською і американською класифікацією вітроустановки поділяються на три класи:

А (малі) – вітроустановки з діаметром ротора до 12 м і потужністю до 40 кВт;

Б (середні) – вітроустановки з діаметром ротора від 12 до 45 м і потужністю від 40 до 999 кВт;

С (великі) – вітроустановки з діаметром ротора понад 45 м і потужністю понад 1 МВт.

Згідно з ДСТУ 3896-99 вітрові електричні установки за потужністю підрозділяються на:

- установки малої потужності – номінальною потужністю до 100 кВт включно;
- установки середньої потужності – номінальною потужністю понад 100 і до 1000 кВт включно;
- установки великої потужності – номінальною потужністю понад 1000 кВт.

Також зустрічається в літературі й інша класифікація ВЕУ за потужністю. Зокрема, ВЕУ залежно від потужності підрозділяють на чотири групи:

- великої потужності – понад 1 МВт;
- середньої потужності – від 100 кВт до 1 МВт;
- малої потужності – від 5 до 99 кВт;
- дуже малої потужності – менше ніж 5 кВт.

Як свідчить аналіз ВЕУ різних виробників, на сьогодні відсутня чітка методика обґрунтування параметричних рядів.

У деяких публікаціях подана оригінальна методика формування параметричних рядів для малої вітроенергетики, яка може бути застосована не тільки в теоретичному, а й у практичному аспекті.

Визначення розмірного ряду потужностей малих вітроустановок здійснюють виходячи з вихідного (базового) значення потужності, яке розраховується, у свою чергу, виходячи з обсягів споживання електроенергії найбільш масовим споживачем. Таким споживачем вважається

середньостатистична українська сім'я з трьох осіб. За статистикою, протягом місяця така сім'я споживає близько 100–125 кВт·год електроенергії, що відповідає річному обсягу споживання на рівні 1200–1500 кВт·год.

З урахуванням економічно доцільного періоду річного функціонування ВЕУ класичного типу, який становить не менше 2000 годин, можна визначити її базову потужність:

$$(1200-1500)/2000 = (0,6-0,75) \text{ кВт.}$$

На основі такої базової потужності можна здійснювати розрахунок розмірного ряду ВЕУ як у бік збільшення потужності, так і в бік зменшення. Це дасть змогу забезпечити певну відповідність у потребах споживачів різного рівня споживання електроенергії.

Із природи та діалектики розвитку техніки відомо, що якісні зміни її можливостей досягаються при зміні одного з головних показників на 0,5 порядку, тобто приблизно у 3,16 рази.

На підставі цього й пропонується обґрунтовувати розмірні ряди потужностей ВЕУ. Отже, розмірний ряд потужностей вітротехніки для малої вітроенергетики може мати такий вигляд, кВт:

(0,6-0,75) (1,89-2,37) (5,99-7,49) (18,93-23,67) – у бік зростання потужності,  
(0,6-0,75) (0,19-0,24) (0,060-0,075) (0,019-0,024) – у бік її зменшення.

Верхня межа потужності ВЕУ для малої вітроенергетики встановлена виходячи з технічних умов її експлуатації, приєднання до електромережі та з урахуванням вимог техніки безпеки відповідно до нормативних документів, які діють в електроенергетиці України щодо підключення об'єктів вітроенергетики до національної електромережі. Таким чином, максимальна потужність вітроустановки сільськогосподарського призначення не повинна перевищувати 20 кВт.

Залежно від потужності ВЕУ можливим є живлення таких видів споживачів:

- 24,0 кВт – малі села, хутори, великі та середні фермерські господарства;

- 5,99-7,49 кВт – невеликі фермерські господарства;
- 1,89-2,37 кВт – малосімейні сільськогосподарські приватні підприємства;
- 0,60-0,75 кВт – житловий будинок середньостатистичної української сім'ї;
- 0,19-0,24 кВт – приміські дачні об'єкти;
- 0,060-0,075 кВт – автономні об'єкти (сигнальні вогні, резервне освітлення);
- 0,019-0,024 кВт – забезпечення локального резервного освітлення або роботи малопотужної переносної радіо- та відеоапаратури тощо.

Аналізуючи запропонований розмірний ряд малої вітротехніки, бачимо, що всі інші варіанти типорозмірного ряду палічуватимуть більшу кількість значень потужностей у ньому і таким чином зменшуватимуть серійність виробництва вітроустановок і через це в кінцевому підсумку робитимуть її більш дорогою. Очевидно також, що в разі збільшення в розмірному ряду вітротехніки інтервалу зростання її потужностей з 3,18 раза в 10 разів (з 0,5 порядку на 1 порядок) неможливо буде задовольнити диференційовані потреби в ній різних категорій масових споживачів.

Наведена методика формування розмірних рядів не належить до стандартизованих.

Фірми-виробники ВЕУ користуються своєю методикою визначення типорозмірного ряду. Для прикладу, проаналізуємо розмірні ряди на базі вітроустановок "Flamingo Aero" фірми "Світ вітру" (м. Харків). Як видно з рис. 6.26, тут не спостерігається погодження розвитку потужностей вітроустановок закономірності, яка була подана вище. Тут можна констатувати лише приблизне дотримання певної закономірності. У деяких випадках збільшення потужності становить коефіцієнт 2, а в деяких – коефіцієнт 2,5. Щоправда, максимальна потужність запропонованого ряду становить 5 кВт, що певною мірою не дозволяє провести повну аналогію у формуванні ідеології створення розмірних рядів.

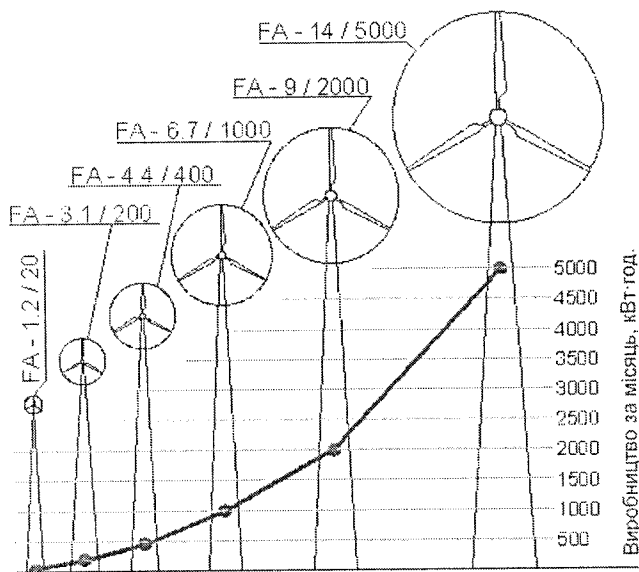


Рис. 6.26. Розмірний ряд вітроустановок "FLAMINGO AERO" фірми "Світ вітру"

Така ідеологія формування розмірних рядів не єдина. Так, зустрічаються закордонні розмірні ряди, сформовані саме за такою методикою (рис. 6.27, 6.28). У даному розмірному ряді характерним є зростання габаритного розміру вітроприймального пристрою, який починається від 5 кВт і завершується потужністю 10 МВт для вітроустановок горизонтально-осьового типу та 20 МВт – для вертикально-осьового.

#### Питання для самоконтролю

1. Загальна класифікація вітроелектричних установок.
2. Класифікація вітроустановок за видом енергії, що виробляється.
3. Класифікація вітроустановок за сферами використання.



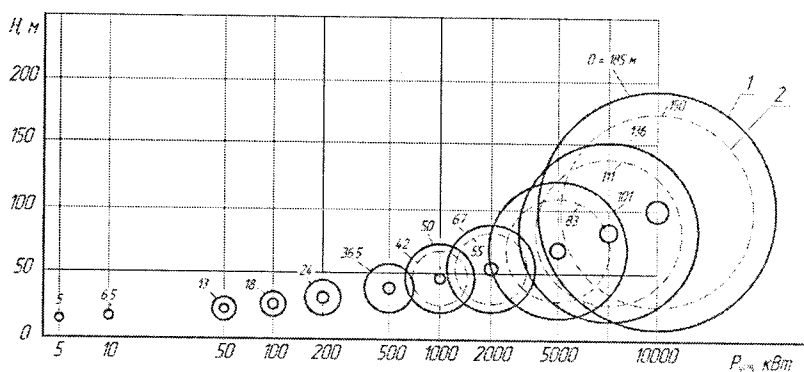


Рис. 6.27. Розмірний ряд вітроустановок з горизонтальною віссю обертання для середньорічної швидкості вітру 7,6 м/с: 1 – на території, віддаленій від узбережжя; 2 – на узбережжі ( $D$  – діаметр ротора, м)

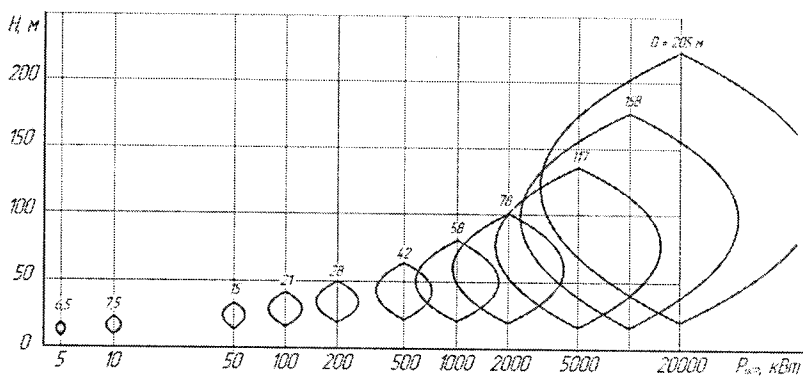


Рис. 6.28. Розмірний ряд вітроустановок з вертикальною віссю обертання (ротором Дар'є) для середньорічної швидкості вітру 7,6 м/с

4. Класифікація вітроустановок за призначенням.
5. Класифікація вітроелектричних установок за структурними особливостями.

6. Наведіть класифікацію вітроелектричних установок за типом ротора.
7. Наведіть класифікацію вітроелектричних установок за орієнтацією осі обертання ротора.
8. Які є способи орієнтації роторів з горизонтальною віссю?
9. Основні переваги й недоліки вітроустановок з горизонтально-осьовим вітроприймальним пристроєм.
10. Основні переваги й недоліки вітроустановок з вертикально-осьовим вітроприймальним пристроєм.
11. Охарактеризуйте структурні схеми вітроенергетичних установок.
12. Наведіть схеми генерування і використання енергії вітроенергетичними установками.
13. Наведіть найбільш вживані типи електричних генераторів.
14. Структура електротехнічної системи автономної вітроелектричної установки.
15. Наведіть спрощену схему регулятора заряду акумуляторної батареї зі зворотним зв'язком за струмом.
16. Наведіть спрощену схему стабілізатора вихідної напруги зі зворотним зв'язком за напругою.
17. Назвіть основні способи регулювання вихідної потужності вітроелектричних установок.
18. Поясніть характерні фази роботи вітроелектричної установки залежно від швидкості вітрового потоку.
19. Загальний поділ вітроенергетичних установок за потужністю.
20. Параметричні ряди вітроенергетичних установок.

## 7. ПРИКЛАДНІ ЗАДАЧІ ТА РОЗРАХУНКИ

1. Розрахувати потужність вітрового потоку  $P_{\text{вп}}$ , який проходить через одиницю площі за стандартних умов.

*Розв'язок.* У стандартних умовах густину повітря приймають на рівні  $1,29 \text{ кг/м}^3$ , а швидкість вітру –  $8 \text{ м/с}$ . Тоді

$$P_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 8^3 = 330 \text{ Вт/м}^2.$$

2. Побудувати графічну залежність потужності вітрового потоку  $P_{\text{вп}}$ , який проходить через одиницю площі для діапазону швидкостей від 0 до 11 м/с. Густина повітря вважати рівною  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

*Розв'язок.* Потужність вітрового потоку визначають за формулою

$$P_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot v^3 = 330 \text{ Вт/м}^2.$$

Таблиця 7.1

Результати розрахунку потужності вітрового потоку

Швидкість вітру, м/с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Потужність вітрового потоку, Вт/м <sup>2</sup>	0	1	5	17	41	81	139	221	330	470	645	858

На основі таблиці будують графічну залежність (рис. 7.1).

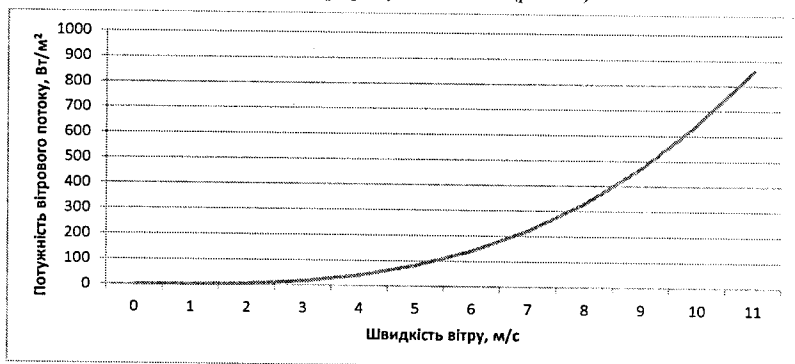


Рис. 7.1. Залежність потужності вітрового потоку від швидкості вітру

3. Визначити середньорічну швидкість вітру, якщо відомі середньомісячні значення: 5,11; 4,55; 3,34; 3,19; 2,88; 3,65; 3,61; 3,47; 4,07; 3,35; 3,69; 4,91.

Розв'язок. Для розрахунку середньорічної швидкості скористаємось формулою

$$\bar{v}_p = \frac{\sum_{i=1}^{12} v_m}{12},$$

$$\bar{v}_p = \frac{5,11+4,55+3,34+3,19+2,88+3,65+3,61+3,47+4,07+3,35+3,69+4,91}{12} = 3,81 \text{ м/с.}$$

4. Розрахувати потужність вітрового потоку, якщо відомо середньорічну швидкість вітру, яка дорівнює 4,5 м/с.

Розв'язок. Розрахунок потужності вітрового потоку здійснюють за формулою

$$P_{\text{вт}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v_p^3 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 5,507^3 = 107,72 \text{ Вт/м}^2,$$

де  $v_p$  – розрахункове значення швидкості вітру, м/с, яке визначають за формулою

$$v_p = 0,638 + 1,082 \cdot v_{\text{ср}} = 0,638 + 1,082 \cdot 4,5 = 5,507 \text{ м/с.}$$

Як варіант можна скористатись наступною методикою. Відповідно до середньорічної швидкості вітру потрібно застосовувати формулу з табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Визначення розрахункової швидкості вітру

Діапазон середньої швидкості	Формула для визначення розрахункової швидкості
$3 \text{ м/с} \leq v_{\text{ср}} < 4 \text{ м/с}$	$v_p = 0,5 + 1,5 \cdot v_{\text{ср}}$
$4 \text{ м/с} \leq v_{\text{ср}} \leq 6 \text{ м/с}$	$v_p = 2,5 + v_{\text{ср}}$
$v_{\text{ср}} > 6 \text{ м/с}$	$v_p = 1,3 + 1,2 \cdot v_{\text{ср}}$

Отже, для визначення розрахункової швидкості вітру потрібно застосувати формулу

$$v_p = 2,5 + v_{\text{ср}} = 2,5 + 4,5 = 7 \text{ м/с.}$$

Тоді потужність вітрового потоку дорівнюватиме

$$P_{\text{вт}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v_p^3 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 7^3 = 221,24 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Як зміниться потужність вітрового потоку, якщо швидкість вітру збільшиться від 4 м/с удвічі?

*Розв'язок.* Потужність вітрового потоку визначають за формулою

$$P_{\text{вт}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \text{ Вт/м}^2.$$

Для швидкості вітру на рівні 4 м/с отримаємо

$$P_4 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 4^3 = 41,28 \text{ Вт/м}^2.$$

Для швидкості вітру, рівної 8 м/с, отримаємо

$$P_8 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,29 \cdot 8^3 = 330,24 \text{ Вт/м}^2.$$

Зміну потужності вітрового потоку можна виразити через частку

$$\Delta P = \frac{P_8}{P_4} = \frac{330,24}{41,28} = 8.$$

Тобто за збільшення швидкості вітру у два рази потужність зросте у вісім разів.

6. Розрахувати енергію вітрового потоку в регіоні зі середньорічною швидкістю вітру, рівною 5 м/с, за даними таблиці повторюваності швидкості вітру М. М. Поморцева (табл. 7.3).

Таблиця 7.3

Фрагмент таблиці повторюваності вітру за М. М. Поморцевим  
для середньорічної швидкості вітру 5 м/с

Швидкість вітру, м/с	Повторюваність, год	Швидкість вітру, м/с	Повторюваність, год
0	175	7	1050
1	376	8	700
2	684	9	376
3	1003	10	183
4	1310	11	70
5	1445	12	52
6	1310	13	26

*Розв'язок.* Використовуючи дані табл. 7.3, можна розрахувати енергію вітрового потоку для кожної швидкості та повторюваності за формулою

$$E = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot \frac{\sum n \cdot v^3}{\sum n}$$

$$E = \frac{1,29}{2} \cdot 1 \cdot \frac{175 \cdot 0 + 376 \cdot 1^3 + 684 \cdot 2^3 + 1003 \cdot 3^3 + 1310 \cdot 4^3 + 1445 \cdot 5^3 + 1310 \cdot 6^3 + 1050 \cdot 7^3 + 700 \cdot 8^3 + 376 \cdot 9^3 + 183 \cdot 10^3 + 70 \cdot 11^3 + 52 \cdot 12^3 + 26 \cdot 13^3}{8760} = \frac{1,29}{2} \cdot \frac{1996156}{8760} = 146,98 \text{ Bm/m}^2.$$

7. Розрахувати швидкість вітру на висоті 50 м, якщо за даними метеорологічних вимірювань на висоті 10 м було зафіксовано швидкість вітру 4,5 м/с.

*Розв'язок.* Для перерахунку швидкості з однієї висоти на іншу можна скористатися формулою

$$v = v_1 \frac{\ln \frac{h}{h_0}}{\ln \frac{h_1}{h_0}} = 4,5 \cdot \frac{\ln \frac{50}{0,1}}{\ln \frac{10}{0,1}} = 4,5 \cdot \frac{6,21}{4,61} = 6,06 \text{ м/с},$$

де  $v_1$  – швидкість вітру, виміряна на висоті  $h_1$ ;

$h_0$  – висота, на якій швидкість вітру практично дорівнює нулю.

8. Розрахувати швидкість вітру на висоті 30 м, якщо за даними метеорологічних вимірювань на висоті 10 м було зафіксовано швидкість вітру 5 м/с. Відомо, що досліджувана ділянка розташована в сільському поселенні.

*Розв'язок.* Для перерахунку швидкості з однієї висоти на іншу можна скористатися формулою

$$v_z = v_\phi \left( \frac{z}{10} \right)^{b'} = 5 \left( \frac{30}{10} \right)^{0,28} = 6,8 \text{ м/с},$$

де  $v_\phi$  – швидкість вітру, виміряна на висоті 10 м;

$z$  – висота, для якої необхідно визначити швидкість вітру, м;

$b'$  – показник степеня, який залежить від виду підстилаючої поверхні, для сільського поселення. Згідно з табл. 2.2 (див. с. 32)  $b' = 0,28$ .

9. Якою повинна бути висота опори для встановлення вітроустановки, якщо з боку пануючих вітрів перед нею на відстані 10 м стоїть будинок заввишки 10 м?

*Розв'язок.* Відповідно до рекомендації щодо розташування вітроустановок відносно природних чи штучних перешок при відстанях, що не перевищують десятикратної висоти перешкоди, опора повинна мати подвосну висоту перешкоди. Тобто за висоти перешкоди 10 м висота опори повинна становити 20 м.

10. Чи потрібно змінювати висоту опори вітроустановки, що становить 10 м, якщо з боку пануючих вітрів перед нею на відстані 100 м стоїть будинок заввишки 10 м?

*Розв'язок.* Відповідно до рекомендації щодо розташування вітроустановок відносно природних чи штучних перешок при відстанях, що перевищують десятикратну висоту перешкоди, опора повинна мати висоту, рівну висоті перешкоди. Тобто в цьому випадку змінювати висоту опори не потрібно.

11. Розрахувати річний енергетичний потенціал вітрового потоку за даними дослідження повторюваностей та середньої швидкості за румбами (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Результати вимірювань повторюваності та середньої швидкості вітру за румбами

Румб	Повторюваність вітру, %	Середня швидкість, м/с	Румб	Повторюваність вітру, %	Середня швидкість, м/с
1	5	3,8	9	6	3,7
2	4	3,9	10	12	4
3	5	4,5	11	7	4,2
4	12	5	12	5	4
5	15	4,9	13	3	3,6
6	6	4,5	14	3	3,2
7	7	4	15	4	3
8	3	3,9	16	3	3,4

*Розв'язок.* Для визначення енергії вітрового потоку за румбом належить скористатись формулою

$$W_j = 0,645 \cdot S \cdot v_p^3 \cdot T_j.$$

З урахуванням діючої швидкості формулу енергії за румбом можна записати так:

$$W_j = 0,645 \cdot S \cdot (0,638 + 1,082 \cdot v_{cj})^3 \cdot T_j,$$

де  $v_{cj}$  – середня швидкість вітру за певним румбом, м/с.

Період часу  $T_j$  наявності вітру за певним румбом знаходять як відсоток повторюваності від періоду річних спостережень  $T$ , тобто

$$T_j = T \cdot \Pi_j,$$

де  $\Pi_j$  – відсоток повторюваності напрямку вітру за певним румбом, %.

Так, для січня енергія дорівнюватиме

$$W_j = 0,645 \cdot 1 \cdot (0,638 + 1,082 \cdot 3,8)^3 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 30,27 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

Відповідно загальну кількість енергії за всіма румбами визначимо за формулою

$$W = \sum_{j=1}^{12} W_j.$$

Отже, за всіма даними отримаємо

$$W = 30,27 + 25,91 + 47,18 + 150,0 + 177,61 + 56,62 + 48,44 + 19,43 + 33,9 + 83,04 + \\ + 55,05 + 34,6 + 15,79 + 11,69 + 13,24 + 13,64 = 816,39 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2.$$

12. Визначити коефіцієнт потужності для чашкового ротора, що використовує силу лобового опору.

*Розв'язок.* Коефіцієнт потужності для вітроустановок, що використовують силу лобового опору, становить

$$C_p = 0,148 \cdot C_x = 0,148 \cdot 0,34 = 0,05,$$

де  $C_x$  – аеродинамічний коефіцієнт лобового тиску, для чашкового ротора  $C_x = 0,34$ .

13. Довести, що для вітроустановок, які використовують силу лобового опору, коефіцієнт потужності не перевищуватиме значення 0,192.

*Розв'язок.* Для сприймальної поверхні, що перебуває під дією сили вітру, коефіцієнт потужності можна записати у вигляді

$$C_p = C_x (v - v_n)^2 \frac{v_n}{v^3} \quad \text{або} \quad C_p = C_x \cdot \left(1 - \frac{v_n}{v}\right)^2 \frac{v_n}{v}.$$



Для оптимального значення коефіцієнта потужності сприймальна поверхня повинна переміщуватись зі швидкістю

$$v_n = \frac{1}{3}v.$$

Тоді коефіцієнт потужності можна буде визначати за формулою

$$C_p = 0,148 \cdot C_x.$$

Коефіцієнт лобового опору  $C_x$  для поверхонь, які розташовані перпендикулярно до потоку вітру, становить близько 1,3. Відповідно до цього можна записати

$$C_{p\max} = 0,148 \cdot 1,3 = 0,192.$$

14. Довести, що для горизонтально-осьових вітроустановок з аеродинамічним профілем лопатей коефіцієнт потужності може становити 0,593.

Розв'язок. Для вітроколеса з аеродинамічними лопатями коефіцієнт потужності можна визначити за формулою

$$C_p = 4a(1-a)^2 = 4 \cdot \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = 0,593.$$

де  $a$  – коефіцієнт гальмування потоку, який може мати значення від 0 до 1.

Для зазначеного діапазону коефіцієнта гальмування найвищого рівня коефіцієнта потужності можна досягти при значенні  $a=1/3$ .

15. Розрахувати максимальний крутний момент на валу чотирилопатевого ротора діаметром 10 м за швидкості вітру, що дорівнює 8 м/с. Приведена ширина лопаті становить 0,5 м.

Розв'язок. Максимальний крутний момент ротора  $M$  не може перевищувати значення

$$M_{\max} = F_{\max} R,$$

де  $R$  – радіус ротора, м;

$F_{\max}$  – максимальний тиск повітряного потоку на ротор, Н, який визначають за формулою

$$F_{\max} = \frac{\rho S v^2}{2},$$

де  $S_1$  – площа міделевого перерізу ротора,  $m^2$ , яку можна визначити таким чином:

$$S_1 = R \cdot B_{\text{вп}} \cdot n_d,$$

де  $B_{\text{вп}}$  – приведена ширина лопаті, м;

$n_d$  – кількість лопатей, шт.

У кінцевому випадку максимальний крутний момент на валу ротора вітроустановки визначимо так:

$$M_{\text{пmax}} = \frac{\rho \cdot R \cdot B_{\text{вп}} \cdot n_d \cdot v^2}{2} R = \frac{\rho \cdot R^2 \cdot B_{\text{вп}} \cdot n_d \cdot v^2}{2} = \frac{1,29 \cdot 5^2 \cdot 0,5 \cdot 4 \cdot 8^2}{2} = 2064 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

16. Розрахувати момент на валу ротора за оптимальних умов, якщо відомими є його швидкохідність  $Z = 3,5$ ; радіус ротора  $R = 5$  м; швидкість вітру  $v = 8$  м/с.

Розв'язок. Габаритні і кінематичні параметри ротора вітроустановки пов'язані залежністю, яка дасть змогу визначити кутову швидкість:

$$Z = \frac{R \cdot \omega}{v}, \text{ то } \omega = \frac{Z \cdot v}{R} = \frac{3,5 \cdot 8}{5} = 5,6 \text{ рад/с}.$$

Площа ротора при його радіусі 5 м становитиме

$$S = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 5^2 = 78,5 \text{ м}^2.$$

Звідси можемо визначити момент на валу вітроколеса за формулою

$$M_{\text{пmax}} = P_0 \frac{Z}{\omega} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3 \cdot Z}{2 \cdot \omega} = \frac{1,29 \cdot 78,5 \cdot 8^3 \cdot 3,5}{2 \cdot 5,6} = 16202,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

17. Розрахувати кутову швидкість і частоту обертання трилопатевого ротора з довжиною лопаті 3 м за вітрового потоку 4 м/с.

Розв'язок. Модульність і кількість лопатей пов'язані такою залежністю:

$$Z_0 \approx \frac{4\pi}{n} \approx \frac{4 \cdot 3,14}{3} \approx 4,19.$$

З іншого боку, формулу модульності можна записати у вигляді

$$Z = \frac{R \cdot \omega}{v},$$

звідси

$$\omega = \frac{Z \cdot v}{R} = \frac{4,19 \cdot 4}{3} = 5,59 \text{ рад/с}.$$

Тоді частота обертання дорівнюватиме

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 5,59}{3,14} = 53,4 \text{ об./хв.}$$

18. Розрахувати потужність на затискачах електрогенератора вітроелектричної установки діаметром 10 м за швидкості вітрового потоку 6 м/с. Коефіцієнт потужності рівний 0,4, коефіцієнти корисної дії мультиплікатора, електрогенератора становлять відповідно 0,85 і 0,9.

*Розв'язок. Формула потужності ВЕУ має такий вигляд:*

$$N = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi \cdot \eta_m \cdot \eta_r = \frac{3,14 \cdot 10^2}{8} \cdot 6^3 \cdot 1,29 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,9 = 3347 \text{ Вт.}$$

19. Розрахувати потужність на валу ротора вітроустановки за швидкості вітру 5 м/с, якщо довжина активної частини лопаті становить 4 м, а винос лопаті відносно осі обертання – 1 м. Коефіцієнт потужності вважати рівним 0,4.

*Розв'язок. Формула потужності ротора вітроустановки має такий вигляд:*

$$N = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi.$$

*Потужність, яка припадає на площу кола ротора, не зайняту лопатями, можна визначити за цією ж формулою, але замість  $D$  підставити  $d$  – діаметр внутрішньої неробочої частини ротора.*

*Загальна потужність ротора за таких умов визначатиметься так:*

$$N = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi.$$

*Діаметр вітроколеса з урахуванням активної частини лопаті та її вносу відносно осі обертання можна записати у вигляді*

$$D = 2(L + r).$$

де  $L$  – довжина активної частини лопаті, м;

$r$  – винос лопаті відносно осі обертання, м.

*Тоді кінцевий вираз потужності вітродвигуна матиме такий вигляд:*

$$N = \frac{\pi}{2} (L^2 + 2Lr) \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi = \frac{3,14}{2} (4^2 + 2 \cdot 4 \cdot 1) \cdot 5^3 \cdot 1,29 \cdot 0,4 = 2430,4 \text{ Вт.}$$

20. Розрахувати номінальні параметри мультиплікатора для чотирилопатевого ротора вітроустановки з довжиною лопаті 4 м, якщо частота обертання електрогенератора становить  $n_{\text{ген}} = 750$  об./хв.

*Розв'язок. Модульність і кількість лопатей пов'язані такою залежністю:*

$$Z_0 \approx \frac{4\pi}{n} \approx \frac{4 \cdot 3,14}{4} \approx 3,14.$$

*З іншого боку, формулу модульності можна записати в такому вигляді:*

$$Z = \frac{R \cdot \omega}{v},$$

звідси

$$\omega = \frac{Z \cdot v}{R} = \frac{3,14 \cdot 8}{4} = 6,28 \text{ рад/с.}$$

*Частота обертання вала ротора дорівнюватиме*

$$n_{\text{нк}} = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 6,28}{3,14} = 60 \text{ об./хв.}$$

*Звідси передавальне число мультиплікатора можна визначити за формулою*

$$i = \frac{n_{\text{ген}}}{n_{\text{нк}}} = \frac{750}{60} = 12,5.$$

21. Розрахувати діаметр ротора для побудови вітроустановки потужністю 5 кВт. Робочу швидкість вітру вважати рівною 8 м/с; коефіцієнт потужності – 0,4; густину повітря – 1,29 кг/м<sup>3</sup>.

*Розв'язок. Формула потужності ротора має такий вигляд:*

$$N = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi \cdot \eta_m \cdot \eta_r.$$

*Звідси можна визначити діаметр вітроустановки, задаючись значенням необхідної потужності, за формулою*

$$D = \frac{8 \cdot N}{\pi \cdot v^3 \cdot \rho_n \cdot \xi \cdot \eta_m \cdot \eta_r} = \sqrt{\frac{8 \cdot 5000}{3,14 \cdot 8^3 \cdot 1,29 \cdot 0,4 \cdot 0,85 \cdot 0,9}} = 7,94 \text{ м.}$$

22. Побудуйте залежність потужності ротора від його діаметра для таких значень  $D$ : 2; 4; 6; 8; 10 м. Розрахункову швидкість вітру прийняти 8 м/с; коефіцієнт потужності – 0,4; густину повітря –  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

Розв'язок. Формула потужності ротора вітроустановки має такий вигляд:

$$N = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \xi.$$

Тоді, підставивши різні значення діаметрів роторів, знайдемо їх потужності. Результати розрахунків занесемо в табл. 7.5.

$$N = \frac{3,14 \cdot 2^2}{8} \cdot 8^3 \cdot 1,29 \cdot 0,4 = 415 \text{ Вт.}$$

Таблиця 7.5

Результати розрахунку потужності ротора

Діаметр ротора, м	2	4	6	8	10
Потужність ротора, Вт	415	1659	3733	6637	10370

На основі табл. 7.5 будемо графічну залежність (рис. 7.2).

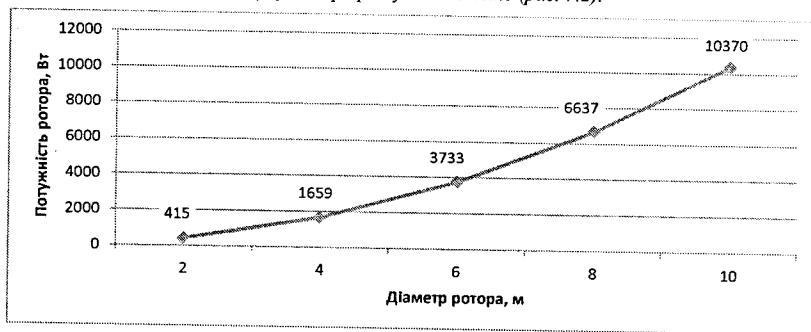


Рис. 7.2. Графічна залежність потужності ротора від його діаметра

23. Побудуйте залежність потужності ротора від швидкості вітру  $v = 4$ ; 6; 8; 10; 12 м. Діаметр ротора прийняти 8 м; коефіцієнт потужності – 0,4; густину повітря –  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

Розв'язок. Формула потужності ротора вітроустановки має такий вигляд:

$$N = \frac{\pi \cdot D^2}{8} \cdot v^3 \cdot \rho_{\text{в}} \cdot \xi.$$

Тоді, підставивши у формулу різні значення швидкості вітру, знайдемо відповідні потужності ротора. Результати розрахунків занесемо в табл. 7.6.

$$N = \frac{3,14 \cdot 8^2}{8} \cdot 4^3 \cdot 1,29 \cdot 0,4 = 830 \text{ Вт.}$$

Таблиця 7.6

Результати розрахунку потужності ротора

Швидкість вітру, м/с	4	6	8	10	12
Потужність ротора, Вт	830	2800	6637	12962	22398

На основі табл. 7.6 будемо графічну залежність (рис. 7.3).

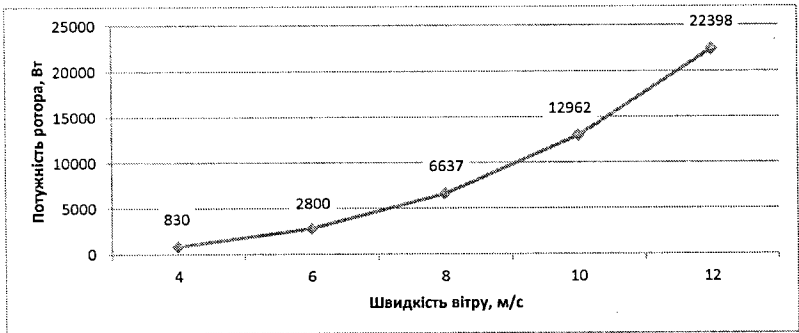


Рис. 7.3. Графічна залежність потужності ротора від швидкості вітру

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. – К. : Віол Принт, 2008. – 55 с.
2. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа / М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. – 184 с.
3. Ветроэлектрические станции / [Е. М. Фатеев, В. Н. Андрианов, Д. Н. Быстрицкий и др.]. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 320 с.
4. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо ; пер. с англ. под ред. Я. И. Шефтера. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
5. Ветроэнергетика Украины: перспектива развития на ближайшее 20 лет [Электронный ресурс]. – К., 1999. – Режим доступа: <http://ggc.com.ua/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FFile-1359644002.pdf>.
6. Воробкевич В. Ю. Характеристики вітроустановки для енергопостачання тваринницької ферми / В. Ю. Воробкевич, В. М. Сиротюк // Сільськогосподарські машини : зб. наук. статей. – Луцьк : Ред.-вид. відділ ЛДГУ, 1998. – Вип. 4. – С. 15-20.
7. Германович В. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. – СПб. : Наука и техника, 2011. – 320 с.
8. Гусаков В. Г. Энергоэффективность аграрного производства / В. Г. Гусаков и др. ; Нац. акад. наук Беларуси, отд. аграр. наук, Ин-т экономики, Ин-т энергетики ; под общ. ред. акад. В. Г. Гусакова, Л. С. Герасимовича. – Минск : Беларусю навука, 2011. – 776 с.
9. Денисенко Г. И. Возобновляемые источники энергии / Г. И. Денисенко. – К. : Вища шк., 1983. – 168 с.

10. Дикий М. О. Поновлювані джерела енергії / М. О. Дикий. – К. : Вища шк., 1993. – 416 с.
11. Дмитренко Л. В. Вітроенергетичні ресурси в Україні // Наукові праці УкрНДГМІ / Л. В. Дмитренко, С. Л. Барандич. – К., 2007. – С. 166-173.
12. Дудюк Д. Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. / Д. Л. Дудюк, С. С. Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів : Магнолія 2006, 2008. – 188 с.
13. Зубарев В. В. Использование энергии ветра в районах Севера / В. В. Зубарев, В. А. Минин, И. Р. Степанов. – Л. : Наука, 1989. – 208 с.
14. Кінаш Р. Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси України / Р. Кінаш, О. Бурнаєв. – Львів: Вид. Науково-технічної літератури, 1998. – 1152 с.
15. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
16. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы: Учебник / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т" ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
17. Кривцов В. С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: Учебник / В. С. Кривцов, Л. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т" ; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
18. Крильчатий анемометр UNI-T UT362. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://masteram.com.ua/uk/Vane-Anemometer-UNI-T-UT362.php>.
19. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії : підручник / С. О. Кудря. – К. : НТУУ "КПІ", 2012. – 492 с.



20. Кудря С. О. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії : навч. посіб. / С. О. Кудря, В. М. Головка. – К.: НТУУ "КПІ", 2011. – 184 с.
21. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии : учебное пособие / Б. В. Лукутин. – Томск : Изд-во Томск. политех. ун-та, 2008. – 187 с.
22. Метеорологічна станція Davis Vantage Pro [Електронний ресурс]. – Режим доступа : [http://davis.kiev.ua/scope/research\\_educational](http://davis.kiev.ua/scope/research_educational). Метеорологічна станція La Cross WS2355S [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://www.meteomaster.com.ua/articles/view/127.htm>.
23. Мхитарян М. Н. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Опыт и перспективы / М. Н. Мхитарян. – К. : Наукова думка, 1999. – 320 с.
24. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: Навч. посіб. / [О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен та ін.] ; за заг. ред. О. І. Солов'я. – Черкаси : ЧДТУ, 2007. – 490 с.
25. Обґрунтування структури та параметрів вітроенергетичних установок для аграрного виробництва / М. О. Медиковський, В. Ю. Воробкевич, В. М. Сиротюк, С. В. Сиротюк. // Вісник аграрної науки. – Львів, 2001. – С. 78–81.
26. Оніпко О. Ф. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О. Ф. Оніпко, Б. П. Коробко, В. М. Миханюк. – К. : УАН, Фенікс, 2008. – 168 с.
27. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – 335 с.
28. Особливості розробки електротехнічних систем вітроелектричних установок сільськогосподарського призначення / В. Сиротюк, С. Сиротюк, В. Боярчук, В. Воробкевич // Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. – 2010. – №14. – С. 423–428.

29. Поморцев М. М. О законе распределения скоростей ветра / М. М. Поморцев. – С.-Пб.: Тип. Морского министерства, 1894. – 57 с.
30. Про Комплексну програму будівництва вітрових електростанцій : Постанова Кабінету Міністрів України № 137 від 3 лютого 1997 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/137-97-%D0%BF>
- 31.Руководство по сдвигу ветра на малых высотах: Дос 9817, AN/449. – Изд-во ИКАО, 2005. – 257 с.
32. Твайделл Д. Возобновляемые источники энергии / Д. Твайдел, А. Уэйр. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
33. Тверитин А. В. Использование ветроэнергетических установок в сельском хозяйстве / А. В. Тверитин. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1985. – 60 с.
34. Термоанемометр Sentry ST73X. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : [http://www.infrared.com.tw/uploadfiles/280/Catalog/Sentry/st730-st732-st733\\_sentry\\_datasheet\\_irthermoanemometer-st73x\\_infrared.pdf](http://www.infrared.com.tw/uploadfiles/280/Catalog/Sentry/st730-st732-st733_sentry_datasheet_irthermoanemometer-st73x_infrared.pdf).
35. Термометр та крильчатий анемометр 2-в-1 Pro'sKit МТ-4015. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://masteram.com.ua/uk/Thermometer-and-Vane-Anemometer-2-in-1-Pro-sKit-МТ-4015.php>.
36. Технології та обладнання для використання поновлюваних джерел енергії в сільськогосподарському виробництві : посібник / за ред. Кравчука В. І., Дубровіна В. О. – Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2010. – 184 с.
37. Титко Р. Відновлювальні джерела енергії (досвід Польщі для України) / Р. Титко, В. Калініченко. – Warszawa : OWG, 2010. – 533 с.
38. Усаковский В. М. Возобновляемые источники энергии / В. М. Усаковский. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 126 с.
39. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е. М. Фатеев. – М. : ОГИЗ-Сельхозгиз, 1948. – 544 с.

40. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки / В. П. Харитонов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
41. Швень Н. І. Про вплив зміни методик спостережень на визначення напряму та швидкості вітру на метеорологічній мережі України / Н. І. Швень. // Наук. праці УКРНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 164-172.
42. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. / Я. И. Шефтер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
43. Шмат К. І. Конструкції та розрахунок енергетичних засобів в сільському господарстві. / [К. І. Шмат, Г. Ю. Диневич, В. В. Карманов та ін.]. – Херсон : Олді-плюс, 2004. – 236 с.
44. Янке Е. Специальные функции, формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Емде, Ф. Леш. – М. : Наука, 1964. – 344 с.
45. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://eosweb.larc.nasa.gov>. (3.12)
46. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://eurostandart-spb.ru/meteorologicheskoe-oborudovanie/oborudovanie-i-priboryi-dlya-registracii-parametrov-vozdushnyih-potokov/anemorumbometr-m63-m1.html>.
47. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://mirvetra.com.ua/vetroustanovka.html>.
48. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://rea.org.ua/dieret/Wind/wind.html>.
49. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/anometry/anometr-mark-60>.
50. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://vetrodvig.ru/wp-content/uploads/2011/01/windenergy.doc>.
51. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://www.c-o-k.ru/images/library/cok/362/36231.pdf>.
52. [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://www.osu.ru/sites/meteo/measure>.

53. Blueenergy, Solarwind™ turbine. [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.bluenergyusa.com>.
54. Cochrane R. C. Vertical-axis wind turbine with LED display, GB patent 2415750, 2006.
55. Gasch R. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation / R. Gasch, J. Twele. – Second Edition. – Verlag-Berlin-Heidelberg : Springer, 2012. – 548 p.
56. Gronowicz J. Niekonwencjonalne źródła energii / J. Gronowicz. – Radom-Poznań : Wydawnictwo ITE-PIB, 2008. – 254 s.
57. Jha A. R. Wind Turbine Technology / A. R. Jha. – Boca Raton ; London ; New York : CRC Press, 2011. – 260 p.
58. Lewandowski W. M. Proekologiczne odnawialne źródła energii / W. M. Lewandowski. – Warszawa : Wydawnictwo WNT, 2012. – 438 s.
59. Lubosny Z. Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym / Z. Lubosny. – Warszawa : Wydawnictwo WNT, 2013. – 348 s.
60. Manwell J. F. Wind energy explained. Theory, Design and Application / J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers. – 2-d Edition. – John Wiley & Sons Ltd., 2009. – 689 p.
61. Masters G. M. Renewable and efficient electric power systems / G. M. Masters. – Hoboken ; New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 654 p.
62. Nelson V. Wind Energy: Renewable Energy and the Environment / V. Nelson. – CRC Press, 2009. – 298 p.
63. Patel M. R. Wind and Solar Power System. / M. R. Patel. – London ; New York ; Washington : CPC Press. – 1999. – 350 p. [Electronic resource]. – Mode of access : [http://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind\\_and\\_Solar\\_Power\\_Systems.pdf](http://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_and_Solar_Power_Systems.pdf)
64. Patent 7,084,523 US. Windmill for wind power generation / T. Noguchi. – Publ. 2006.

65. Patent 7,344,353 US. Helical wind turbine / P. H. Naskali, A. MacLean, N. C. C. Gray, J. H. Lewis, A. P. Newall. Publ. 2005.
66. Przyjazne srodowisku zrodla energii / [A. Drzymala, T. Knap, P. Sanecki, W. Stepień, A. B. Szymanski, T. Wiecek]. – Rzeszow : Wydawnictwo Oswiatowe Forsze, 2002. – 157 s.
67. Thomas J. Colossal magnetic levitation wind turbine proposed [Electronic resource] / J. Thomas // Science & Technology. – 2007. – July 27 – Mode of access : [http://www.treehugger.com/files/2007/07/colossal\\_magnet.php](http://www.treehugger.com/files/2007/07/colossal_magnet.php).
68. Tong W. Wind Power Generation and Wind Turbine Design / W. Tong. – Southampton ; Boston : WITPress, 2010. – 725 p.
69. Troen I. European Wind Atlas / I. Troen. – Roskilde : Riso National Laboratory, 1989. – 656 p.
70. Tytko R. Urzadzenia i systermy energetyki odnawialnej. / R. Tytko. – Wydanie piate uzupelnione. – Krakow : Wydawnictwo i Drukarnia Towarystwa Slowakow w Polsce, 2014. – 671 s.
71. Wind energy handbook / [B. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi.]. – Chichester : John Wiley & Sons, LTD, 2001. – 617 p.
72. Wind power in power systems / edited by Thomas Ackermann. – John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium ; Southern Gate ; Chichester ; West Sussex, 2005. – 695 p.

Навчальне видання

**Сиротюк Сергій Валерійович,  
Боярчук Віталій Мефодійович,  
Гальчак Володимир Петрович.**

**АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ.  
ЕНЕРГІЯ ВІТРУ**

Навчальний посібник

Редактор Д. Б. Дончак  
Коректор Л. Г. Лісович-Біла

Підписано до друку 30.06.2016.  
Формат 60×84/16. Папір офс. Друк на різнографі. Гарнітура Times.  
Ум. друк. арк. 11,37.  
Наклад 300.

ПП «Магнолія 2006»  
а/с 431, м. Львів-53, 79053, Україна, тел./факс 240-54-84; 245-63-70  
e-mail: magnol@lviv.farlep.net

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції:

серія ДК № 2534 від 21.06.2006 року,  
видане Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавництва «Магнолія 2006»