

ПЕРСПЕКТИВИ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ НА ПРИКАРПАТТІ

Проаналізовано дані швидкості, поривів та напрямку вітру на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015 рр. Розраховано середню швидкість вітру на висоті 30, 50, 70, 100 м за допомогою логарифмічної та ступенневої залежності. Побудовано рози вітрів. Запропоновано класифікацію перспективності швидкостей вітру для вітроенергетичних установок (ВЕУ). Визначено повторюваності перспективних для роботи ВЕУ швидкостей. Розраховано питому потужність вітру та питомий вітроенергетичний потенціал на висоті 10 м. Розраховано технічний вітроенергетичний потенціал для трьох категорій ВЕУ – малої, середньої та великої потужності. Виділено перспективні території Івано-Франківської області для малої, середньої та великої вітроенергетики.

Ключові слова: швидкість вітру, вітроенергетичні характеристики, вітроенергетичні установки (ВЕУ)

Проанализированы данные скорости, порывов и направления ветра на метеостанциях Ивано-Франковской области за 2005-2015 гг. Рассчитано среднюю скорость ветра на высоте 30, 50, 70, 100 м с помощью логарифмической и степенной зависимости. Построено розы ветров. Предложена классификация перспективности скоростей ветра для ветроэнергетических установок (ВЭУ). Определены повторяемости перспективных для работы ВЭУ скоростей. Рассчитано удельную мощность ветра и удельный ветроэнергетический потенциал на высоте 10 м. Рассчитано технический ветроэнергетический потенциал для трех категорий ВЭУ - малой, средней и большой мощности. Выделены перспективные территории Ивано-Франковской области для малой, средней и большой ветроэнергетики.

Ключевые слова: скорость ветра, ветроэнергетические характеристики, ветроэнергетические установки (ВЭУ)

The data speed, gusts and wind direction at weather stations in Ivano-Frankivsk region for years 2005-2015 were analyzed. The average wind speed at a height of 30, 50, 70, 100 m using a wind profile power law and a log wind profile was calculated. The wind roses were built. The classification of promising wind speeds for wind turbines was proposed. The repeatability promising for wind turbines velocity was determined. The wind power density and specific wind power capacity at 10 m were calculated. The technical wind energy potential for wind turbines in three categories - small, medium and large capacity was calculated. The promising the Ivano-Frankivsk region for small, medium and large wind power has been allocated.

Keywords: wind speed, wind power characteristics, wind turbine

Постановка проблеми. Об'єкти традиційної енергетики є причиною багатьох тисків на біосферу: впливу на повітря, клімат, води, ґрунти і живу природу, ландшафт, підвищення рівня шкідливого випромінювання. У зв'язку з цим, необхідним є перехід на відновлювальні джерела енергії, які істотно безпечніше порівняно з використанням викопного та ядерного палива, пропонують рішення багатьох екологічних і соціальних проблем.

За даними Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики (IRENA) сукупна потужність об'єктів відновлюваної енергетики за 2016 р. склала 1542 МВт, включаючи 525 МВт вітрових електростанцій, 938 МВт сонячних станцій та 59 МВт станцій на біомасі та 20 МВт біогазі [11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У 2016 році ВЕС, розташовані на материковій частині України, виробили 1 047,086 млн кВт·год електроенергії, в тому числі 924, 483 млн кВт год електроенергії за «зеленим» тарифом. Постачання електроенергії вітровими електростанціями (87,8 МВт), які перебувають на анексованій території АР Крим, до Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України припинено з квітня 2014 року. Також три ВЕС, які знаходяться на території ведення АТО, не можуть постачати електроенергію до ОЕС України. З точки зору встановленої вітроенергетичної потужності на даний час лідирує Запорізька область – 200 МВт, Донецька – 88 МВт, Миколаївська – 52, МВт, Луганська – 50 мВт. Українські Карпати є одними з кращих в країні регіоном з точки зору існуючого вітропотенціалу, однак ще не достатньо охопленим вітроенергетичним розвитком. Впродовж 2016 року 6,6 МВт нових вітроенергетичних потужностей були введені в експлуатацію на першій у Західному регіоні ВЕС Старий Самбір. На сьогодні вітроелектростанція, загальною потужністю 13,2 МВт, складається із 4 вітротурбін V 112 номінальною потужністю 3,3 МВт виробництва датської компанії VESTAS. Очікується, що щорічно ВЕС буде виробляти біля 36,0 млн кВт·год екологічно чистої електроенергії. У 2017 році планується реалізація вітроенергетичного проекту ВЕС «Старий Самбір-2» потужністю 20,7 МВт [3].

Виклад основного матеріалу. З метою оцінки сучасного стану вітроенергетичних характеристик було проаналізовано дані швидкості, поривів та напрямку вітру. База даних містила щотрьохгодинні дані на висоті 10-12 метрів над землею поверхнею, осереднених за 10-хвилинний період, що безпосередньо передував терміну спостереження (м/с) сформованих за даними [10] по 5 метеостанціях Івано-Франківської області: Долина, Івано-Франківськ, Коломия, Яремча, Пожижевська за період 2005-2015рр (табл.1).

На території Івано-Франківської області середня швидкість вітру на висоті 10 м коливається від 1,7 до 3,5 м/с. Щодо річного ходу швидкостей (рис.1), то максимум на території Івано-Франківської області припадає на холодну пору року і співпадає з сезонним піком споживання теплової та електричної енергії, мінімум спостерігається у серпні. Різниця між зимовим максимумом та літнім мінімумом швидкостей на різних метеостанціях коливається від 0,7 (Яремча) до 2,6 м/с (Пожижевська).

Таблиця 1

Характеристики вітру на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015 рр.

№ п/п	Метеостанція	Висота, м н.р.м.	Середня швидкість, м/с	Абсолютний максимум, м/с	Штіль, %	Переважаючий напрям вітру, %
-------	--------------	------------------	------------------------	--------------------------	----------	------------------------------

1	Долина	470	2,3	44 (16.10.2009)	14	ЗхПнЗх 11 Сх 11 Зх 10
2	Івано-Франківськ	270	2,4	18 (23.02.2008)	29	ЗхПнЗх 13 СхПдСх 9 ПдСх 8
3	Коломия	295	1,8	48 (03.06.2007)	23	ЗхПнЗх 15 ПнЗх 13 Сх 10
4	Яремча	531	1,7	50 (24.07.2008)	21	ЗхПдЗх 20 ПнСх 12 Зх 9
5	Пожижевська	1451	3,5	42 (18.06.2007)	36	ПдЗх 15 ЗхПдЗх 14 Зх 7

У зв'язку з тим, що швидкість вітру на рівні ротора вітроенергетичної установки (ВЕУ) відрізняється від швидкості на стандартній висоті спостережень на метеостанціях, виникає необхідність розрахунку параметрів вітру на вищих висотах. Вертикальні профілі вітру в нижній частині атмосфери апроксимувалися логарифмічною (1) та степеневою (2) залежностями [1,5,7]:

$$V(h_2) = V(h_1) \frac{\ln \frac{h_2}{z_0}}{\ln \frac{h_1}{z_0}}, \quad (1)$$

де h_1 та h_2 – висоти над поверхнею землі, z_0 – довжина шорсткості поверхні.

$$V(h_2) = V(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha, \quad (2)$$

де h_1 та h_2 – висоти над поверхнею землі, α – емпіричний коефіцієнт (експонента Гельмана), що залежить від стабільності атмосфери та шорсткості підстильної поверхні.

Логарифмічний профіль вітру, як правило, вважається точнішою оцінкою середньої швидкості вітру ніж степеневий у нижньому (10-20 м) прикордонному шарі атмосфери. Між 20 м і 100 м обидва методи є досить об'єктивними для передбачення середньої швидкості вітру в нейтральних атмосферних умовах [8]. Було розраховано середню швидкість вітру на висоті 30, 50, 70, 100 м, у розрахунках використовувались $z_0=0,1$ м та $\alpha=0,2$ які відповідають територіям розташування метеостанцій (табл.2). Із збільшенням висоти від 10 до 100 м швидкість вітру в

середньому збільшується на 1,2 м/с при використанні логарифмічної залежності та 1,4 м/с – степеневій.

При аналізі максимальної швидкості вітру відмічено, що найчастіше сильні вітри спостерігаються на високогірній метеостанції Пожижевська. Кількість вітрів зі швидкістю від 20 м/с спостерігалася 35 разів за 2005-2015рр., вітри із швидкістю від 30 м/с за 10 років по всіх метеостанціях були поодинокими.

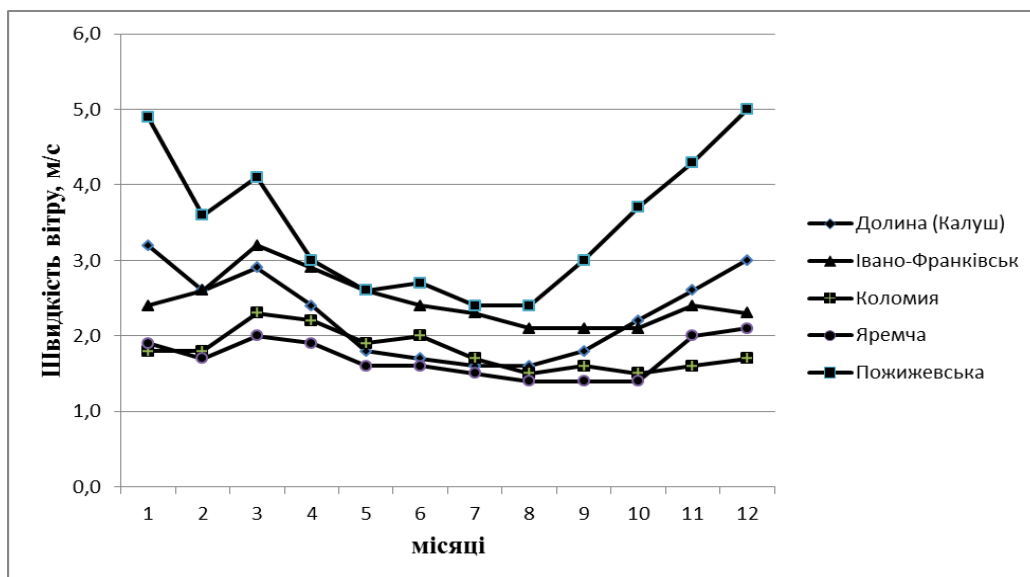


Рис. 1. Річний хід швидкості вітру в Івано-Франківській області за 2005-2015 рр.

Таблиця 2

Середня швидкість вітру на висоті 10, 30, 50, 70, 100 м на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015рр.

№ п/п	Метеостанція	V ₁₀ , м/с	V ₃₀ , м/с		V ₅₀ , м/с		V ₇₀ , м/с		V ₁₀₀ , м/с	
			лог.	степ.	лог.	степ.	лог.	степ.	лог.	степ.
1	Долина	2,3	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
2	Івано-Франківськ	2,5	3,1	3,1	3,4	3,4	3,6	3,7	3,8	4,0
3	Коломия	1,8	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,9
4	Яремча	1,7	2,1	2,1	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
5	Пожижевська	3,5	4,3	4,4	4,7	4,8	5,0	5,2	5,3	5,5

Визначення оптимального розташування ВЕУ на певній території залежить від правильності врахування напрямку вітру. Розрахунок повторюваності напрямку вітру дав можливість побудови рози вітрів (рис.2).

Для потреб вітроенергетики велике значення має розподіл швидкості вітру, оскільки беручи до уваги тільки значення середньої швидкості вітру можна припуститись хибних висновків при визначенні вітроенергетичного потенціалу місцевості. Враховуючи класифікацію перспективності швидкостей, а саме:

- $V < 2$ м/с безперспективні для будь-яких типів ВЕУ;
- $2 \leq V < 3$ м/с малоперспективні, стартова швидкість для малих ВЕУ,
- $3 \leq V < 4$ м/с перспективні для малих ВЕУ, стартова швидкість для великих ВЕУ;
- $4 \leq V < 5,5$ м/с перспективні для ВЕУ малої та середньої потужності;
- $5,5 \leq V$ м/с перспективні для будь-яких ВЕУ; також було визначено повторюваність перспективних для роботи ВЕУ швидкостей на метеостанціях (рис. 3).

Однією із основних характеристик вітроенергетичних ресурсів досліджуваної території є питома потужність вітру [4,5]:

$$P_{num} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 f_i, \quad (3)$$

де ρ – густина повітря; v_i – модуль швидкості вітру; f_i – повторюваність швидкості, частки одиниці; n – кількість градацій швидкостей вітру.

При розрахунках враховувалась повторюваність швидкостей від 1 до 25 м/с. Швидкості вище 25 м/с не враховувались. Приймалось, що $\rho = 1,225$ кг/м³ – стандартна густина сухого повітря при 15°C і тиску 101330 Па.

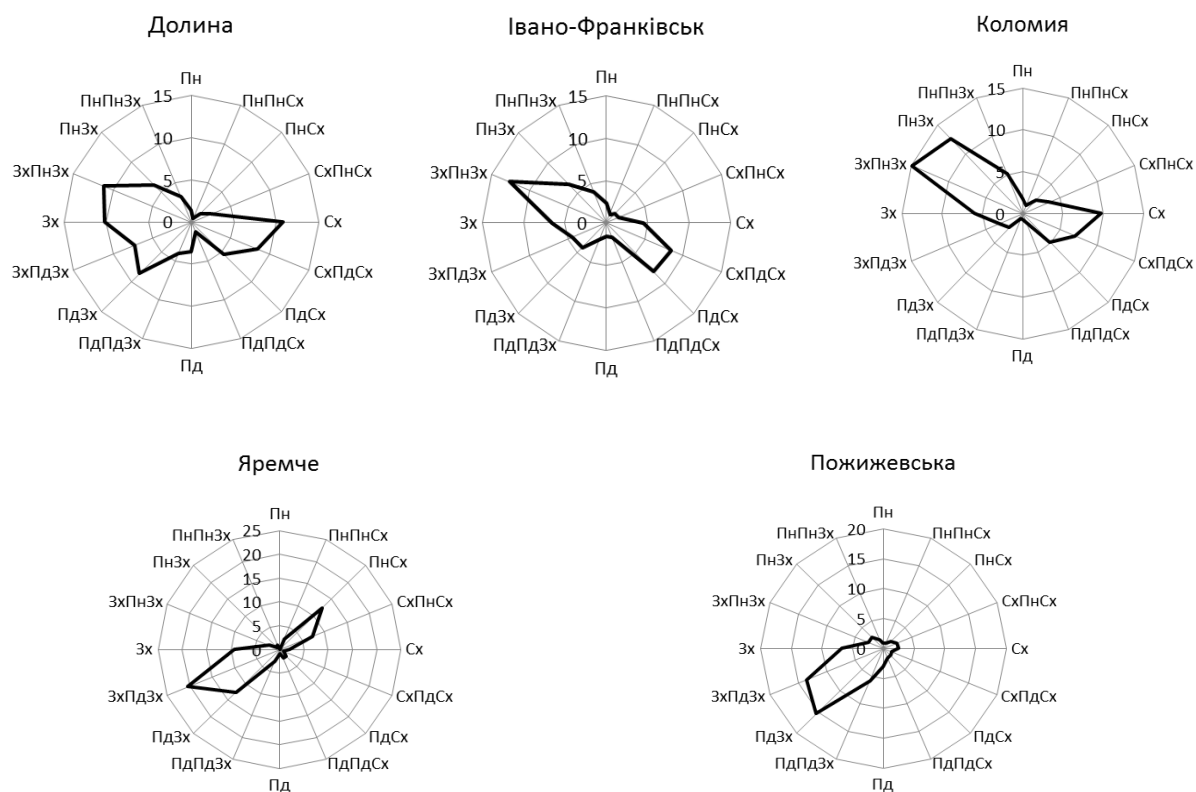


Рис. 2. Рози вітрів на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015 рр.

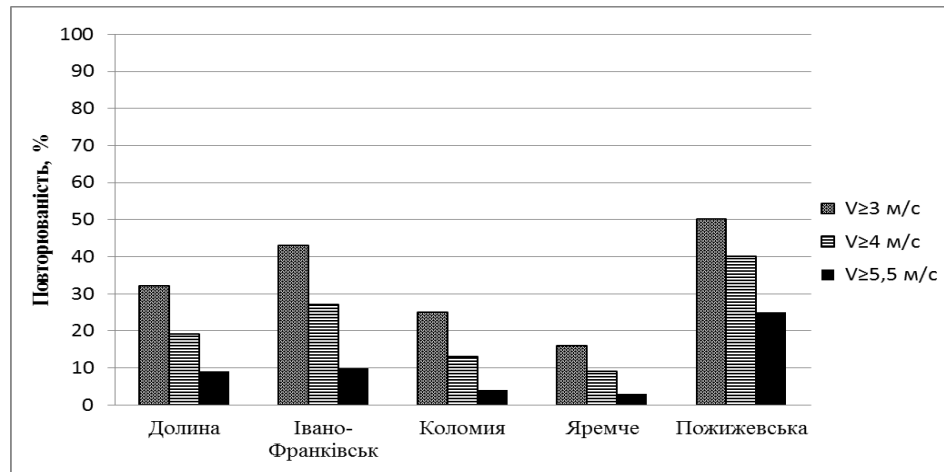


Рис. 3. Повторюваність перспективних швидкостей на висоті 10 м на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015 рр.

Поряд з питомою потужністю було розраховано питомий вітроенергетичний потенціал, тобто енергію, що протікає за рік через 1 м^2 поперечного перерізу. Він залежить від повторюваності швидкості вітру, тобто від того, впродовж якого періоду річного часу t_i дув вітер зі швидкістю v_i :

$$W_{num} = T \sum_{i=1}^n P_{num i} f_i \quad (4)$$

де $P_{num i}$ – питома потужність вітру, $\text{кВт}/\text{м}^2$ при швидкості v_i , n – кількість градацій швидкостей вітру, f_i – повторюваність швидкості v_i , частки одиниці, T – кількість годин у році – 8760. Результати розрахунків представлено в табл. 3.

Ще однією важливою характеристикою є технічний потенціал вітрової енергії – тобто сумарна електрична енергія, яка може бути отримана від використання питомого вітроенергетичного потенціалу при сучасному рівні розвитку технічних засобів і дотриманні екологічних норм. Технічний потенціал, таким чином, залежить від параметрів вітроенергетичної установки, середньої швидкості вітру на висоті щогли [6].

Таблиця 3

Вітроенергетичні характеристики на метеостанціях Івано-Франківської області за 2005-2015 рр.

№ п/п	Метеостанція	Питома потужність вітру P_{num} , $\text{Вт}/\text{м}^2$	Питомий вітроенергетичний потенціал W_{num10} , $\text{кВт год}/\text{м}^2\text{рік}$
1	Долина	42	364
2	Івано-Франківськ	39	340
3	Коломия	19	163
4	Яремча	32	281
5	Пожижевська	182	1592

Технічний вітроенергетичний потенціал розраховують за:

$$W_m = T \sum_{i=1}^n P_i f_i, \quad (5)$$

де P_i – потужність вітру, кВт при швидкості v_i , f_i – повторюваність швидкості v_i , частки одиниці, T – кількість годин у році – 8760.

Потужність вітру виражається:

$$P = C_p P_{num} S, \quad (6)$$

де C_p – коефіцієнт використання енергії вітру; P_{num} – питома потужність вітру, кВт/м², S – обмахувана площа вітроколеса, м²

Оскільки для різних ВЕУ відрізняються значення стартової, розрахункової та максимально експлуатаційної швидкості вітру було розраховано технічний вітроенергетичний потенціал на метеостанціях для трьох категорій ВЕУ – малої, середньої та великої потужності. Для малих, середніх та великих ВЕУ дані швидкостей вітру були приведені до висоти існуючих ВЕУ цих класів. Швидкості вітру на відповідних висотах розраховані на основі степеневі залежності. При розрахунку питомої потужності P_{num} за швидкість v використовувалась початкова швидкість діапазону Δv . Розрахунки виконувались для тих метеостанцій, які характеризувалися перспективними значеннями швидкості вітру та питомої потужності вітру на заданих висотах.

ВЕУ великої потужності. Згідно даних Української вітроенергетичної асоціації [10] лідируючими компаніями вітроенергетичної промисловості України є ТОВ «Вінд Пауер», ТОВ «УК «Вітряні парки України» і ТОВ «Віндкрафт Україна». На території Західної України найбільшою на даний час є ВЕС «Старий Самбір-1» ТОВ «Еко-оптіма». На сьогодні вітроелектростанція, загальною потужністю 13,2 МВт, складається із 4 вітротурбін V 112 номінальною потужністю 3,3 МВт виробництва датської компанії Vestas. Тому, як приклад, було розраховано вітроенергетичний потенціал для вітряної турбіни Vestas V112-3.3MW. В брошурі компанії Vestas про продукти 3МВт класу [9] надані такі технічні характеристики вітрової турбіни (табл.4).

Таблиця 4

Технічні характеристики ВЕУ Vestas V112-3.3MW [9]

Номінальна потужність	3,3 МВт
Стартова швидкість	3 м/с
Максимальна експлуатаційна швидкість	25 м/с
Діаметр ротора	112 м
Обмахувана площа	9852 м ²
Висота щогли	119 м

Згідно аналізу попередніх розрахунків перспективними для великої вітроенергетики можна вважати території метеостанцію Пожижевська. У табл. 5 подано результати розрахунків вітроенергетичного потенціалу на цій метеостанції на висоті 119 м.

Таблиця 5

Вітроенергетичні характеристики на метеостанції Пожижевська для Vestas V112-3.3MW на висоті 119 м

Діапазон швидкості вітру Δv , м/с	Повторюваність f_i	Кількість годин у році при даній швидкості t_i , год/рік	Потужність вітру P , кВт	Річний вітроенергетичний потенціал W , кВт*год/рік
0-0,9	0,35533	3113	-	-
1-1,9	0,05401	473	-	-
2-2,9	0,00000	0	-	-
3-4	0,09517	834	23	19175
4-4,9	0,09915	869	88	76430
5-5,9	0,00000	0	301	0
6-6,9	0,07437	652	557	362886
7-7,9	0,06843	599	912	0
8-8,9	0,00000	0	1377	825440
9-9,9	0,05113	448	1954	875210
10-10,9	0,00000	0	2572	0
11-11,9	0,05190	455	2988	1358415
12-12,9	0,03757	329	3276	0
13-13,9	0,00000	0	3300	1086059
14-14,9	0,02827	248	3300	817315
15-15,9	0,02171	190	3300	0
16-16,9	0,00000	0	3300	627531
17-17,9	0,01327	116	3300	0
18-18,9	0,00000	0	3300	383722
19-19,9	0,01605	141	3300	464068
20-20,9	0,00110	10	3300	0
21-21,9	0,00000	0	3300	31861
22-22,9	0,00177	16	3300	51255
23-23,9	0,01394	122	3300	0
24-24,9	0,00000	0	3300	403116
25-25,9	0,00867	76	3300	0
від 26	0,00815	71	-	-
Всього				7382484

ВЕУ середньої потужності. Щодо середньої вітроенергетики, тобто ВЕУ потужністю від 100 до 1000 кВт, то було розраховано річний вітроенергетичний потенціал для вітряної турбіни «NORDEX» потужністю 600 кВт. Дані турбіни плануються до встановлення на ВЕС у с. Шевченкове Долинського району Івано-Франківської області. В детальному плані території під будівництво даної ВЕС [2] зазначаються такі технічні характеристики вітряної турбіни (табл. 6).

Таблиця 6

Технічні характеристики ВЕУ NORDEX N43-600-125 43.0 [2]

Номінальна потужність	600 кВт
Мінімальна робоча швидкість вітру (стартова)	4,0 м/с
Максимальна експлуатаційна швидкість	25 м/с

Діаметр ротора	43 м
Висота башти	50 м- 60 м

Для ВЕУ середньої потужності перспективними можна вважати території метеостанцій, які є перспективними для великої вітроенергетики, а також Долину. У табл.7 подано результати розрахунків вітроенергетичного потенціалу на висоті 50 м.

Таблиця 7

**Вітроенергетичні характеристики на метеостанції Долина для NORDEX N43-600-125
43.0 на висоті 50 м**

Діапазон швидкості вітру Δv , м/с	Повторюваність f_i	Кількість годин у році при даній швидкості t_i , год/рік	Потужність вітру P , кВт	Річний вітроенергетичний потенціал W , кВт*год/рік
0-0,9	0,13965	1223	-	-
1-1,9	0,28069	2459	-	-
2-2,9	0,26387	2312	-	-
3-3,9	0,00000	0	-	-
4 -4,9	0,12828	1124	17	19104
5-5,9	0,07460	654	45	29408
6-6,9	0,02302	202	72	14519
7-7,9	0,00000	0	124	0
8-8,9	0,03367	295	196	57811
9-9,9	0,02321	203	277	56323
10-10,9	0,00000	0	364	0
11-11,9	0,01089	95	444	42353
12-12,9	0,00654	57	533	30550
13 -13,9	0,00788	69	584	40315
14-14,9	0,00000	0	618	0
15-15,9	0,00091	8	619	4921
16-16,9	0,00215	19	618	11635
17-17,9	0,00119	10	618	6464
18-18,9	0,00000	0	620	0
19-19,9	0,00186	16	610	9953
20-20,9	0,00062	5	594	3231
21-21,9	0,00000	0	592	0
22-22,9	0,00033	3	590	1728
23-23,9	0,00019	2	580	971
24-24,9	0,00024	2	575	1203
25 -25,9	0,00000	0	570	0
від 26	0,00019	2	-	-
Всього				330489

ВЕУ малої потужності. Згідно класифікації у малій вітроенергетиці використовуються вітрогенератори потужністю до 100 кВт. Однак, в Україні ринок малої вітроенергетики націлений переважно на ВЕУ, що виробляють електроенергію для приватних домогосподарств, з середньою потужністю від 1 до 25 кВт. Огляд ринку малої вітроенергетики України за 2016 рік надає першість компаніям ВЕРАНО та FLAMINGO AERO [3]. Як приклад, було розраховано річний вітроенергетичний потенціал вітрогенератора FLAMINGO AERO – 6.7, технічні характеристики якого подані у табл. 8.

Як згадувалося вище сприятливими вітровими умовами для малих ВЕУ характеризується більша частина Івано-Франківської області Тому, окрім територій метеостанцій, для яких розраховувався вітроенергетичний потенціал великих та середніх ВЕУ, малі ВЕУ можна також розташовувати на території Івано-Франківська (табл. 9).

Таблиця 8

Технічні характеристики ВЕУ FLAMINGO AERO – 6.7

Номінальна потужність	4 кВт
Мінімальна робоча швидкість вітру (стартова)	2,5 м/с
Номінальна швидкість вітру	8 м/с
Швидкість, при якій відбувається відключення (максимальна експлуатаційна)	25 м/с
Діаметр ротора	6,7 м
Висота башти	21-27 м

Таблиця 9

Вітроенергетичні характеристики на метеостанції Івано-Франківськ для FLAMINGO AERO – 6.7 (на висоті 23 м)

Діапазон швидкості вітру Δv , м/с	Повторюваність f_i	Кількість годин у році при даній швидкості t_i , год/рік	Потужність вітру P , кВт	Річний вітроенергетичний потенціал W , кВт*год/рік
0-0,9	0,28685	2513	-	-
1-1,9	0,07153	627	-	-
2-2,9	0,21459	1880	-	-
3-3,9	0,15549	1362	0,2	272
4 -4,9	0,10059	881	0,5	441
5-5,9	0,06661	583	1	583
6-6,9	0,00000	0	1,7	0
7-7,9	0,04446	389	2,7	1052
8 -8,9	0,03247	284	4	1138
9-9,9	0,01366	120	4	479
10-10,9	0,00508	45	4	178
11-11,9	0,00584	51	4	205
12-12,9	0,00136	12	4	48
13 -13,9	0,00000	0	4	0
14-14,9	0,00073	6	4	25
15-15,9	0,00041	4	4	14
16-16,9	0,00000	0	4	0

17-17,9	0,00028	2	4	10
18-18,9	0,00003	0	4	1
19-19,9	0,00000	0	4	0
20-20,9	0,00000	0	4	0
21-21,9	0,00003	0	4	1
22-22,9	0,00000	0	4	0
23-23,9	0,00000	0	4	0
24-24,9	0,00000	0	4	0
25-25,6	0,00000	0	4	0
від 26	0,00000	0		
Всього				4446

Підсумкові значення річного вітроенергетичного потенціалу малих ВЕУ на метеостанції Івано-Франківськ є не надто великими, проте перспективними для малої вітроенергетики є не тільки території цієї метеостанції, а й ті, на яких пропонується розташування ВЕУ великої та середньої потужності. Розрахунки річного вітроенергетичного потенціалу на них, безумовно, привели б до вищих результатів.

Висновки. Аналіз отриманих результатів свідчить, що найсприятливіші кліматичні умови для промислової вітроенергетики є у гірських районах Українських Карпат. ВЕУ середньої потужності доцільно розташовувати також на Передкарпатті, Опіллі, Подільській височині. Щодо малих ВЕУ, то сприятливими вітровими умовами характеризується більша частина Івано-Франківської (особливо північні, південно-західні райони). Несприятливими є глибокі річкові долини, захищені горами. Однак, при проектуванні встановлення ВЕУ у кожному конкретному місці є потреба у додаткових польових спостереженнях за швидкістю вітру, оскільки дані отримані навіть з найближчих метеостанцій можуть відрізнятися через місцеві орографічні особливості.

Література

- 1 Анапольская Л.Е., Гандин Л.С. Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки // Метеорология и гидрология. – 1978. – №7. – С. 11-17
- 2 Андрусин Р.П. Детальний план території земельних ділянок під будівництво та обслуговування вітрової електростанції в урочищі Обідний в с. Шевченкове, Шевченківської сільської ради Долинського району Івано-Франківської області. – Львів. – 2015. – 27 с.
- 3 Вітроенергетичний сектор України 2016 [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://uwea.com.ua/uploads/docs/uwea_2016_report_ua_web_open.pdf
- 4 Вітроенергетичні ресурси Українських Карпат/ В.І. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник, Р.Ю. Радченко // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. - 2014. - Вип. 266. - С. 3-11.
- 5 Де Рензо Л. Ветроэнергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
- 6 Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн.ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
- 7 Beychok, Milton R. (2005). Fundamentals Of Stack Gas Dispersion (4th ed.)
- 8 Cook, N.J. (1985). The designer's guide to wind loading of building structures: Part II

9 Vestas V112-3.3 MW. Product Brochure. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://www.nhsec.nh.gov/projects/2013-02/documents/131212appendix_15.pdf

10 <http://rp5.ua>

11 <http://irena.org>

© Н. М. Москальчук

Надійшла до редакції 15 травня 2017 р.

Рекомендувала до друку

докт. техн. наук Л. М. Архипова