

Розрахунок основних показників роботи горизонтально-осьової вітроелектричної установки у складі системи автоматизованого енергопостачання автономного споживача в умовах Кіровоградського регіону

Розраховано основні показники енергетичної ефективності роботи горизонтально-осьової вітроелектричної установки, з урахуванням метеорологічних умов Кіровоградського регіону. **автономне енергопостачання, енергетична ефективність, вітрова електрична установка, вітроколесо, генератор, потужність ВЕУ, крутний момент, коефіцієнт використання енергії вітру**

Останнім часом Україна потерпає від нестачі власних традиційних енергоресурсів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми може стати використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Найпоширенішим різновидом ВДЕ в нашій країні є вітрова енергія. Для отримання електроенергії з енергії вітру, доцільно використовувати автоматизовані системи, які включають в себе вітроелектричні установки (ВЕУ).

Технічні характеристики ВЕУ, які наводяться виробниками, не завжди дають змогу визначити кількість електроенергії, яку буде генерувати ВЕУ, особливо в умовах стохастичного характеру зміни вітрового потоку. Тому виникає необхідність розрахувати показники енергетичної ефективності роботи конкретної ВЕУ з урахуванням метеорологічних умов конкретної місцевості. В якості піддослідного об'єкта візьмемо горизонтально-осьову ВЕУ-08 виробництва ПП «Світ Вітру», м. Харків.

Метою даної роботи є визначення (розрахунково-аналітичним шляхом) основних показників енергетичної ефективності роботи ВЕУ-08 в кліматичних метеоумовах Кіровоградського регіону.

Основні матеріали дослідження. З різних джерел [1-7] відомо, що основними показниками енергетичної ефективності роботи горизонтально-осьової ВЕУ є:

- швидкість вітру на висоті щогли ВЕУ;
- площа поверхні, яку обмітає вітроколесо (ВК) з радіусом R ;
- потужність вітрового потоку, який проходить за 1 с через поперечний переріз площі поверхні, яку обмітає ВК;
- коефіцієнт використання енергії вітру в номінальному режимі роботи;
- потужність ВК при різних швидкостях вітру;
- потужність ВЕУ при різних швидкостях вітру;
- вихідна потужність генератора при різних швидкостях вітру;
- коефіцієнт гальмування вітрового потоку;
- коефіцієнт лобового опору, який діє на ВК;
- крутний момент;
- максимальне навантаження, яке діє на ВК;

- середньодобова кількість електроенергії, що генерує ВЕУ.

Зазвичай виробниками ВЕУ не надається інформація про переважну більшість перерахованих вище показників роботи ВЕУ (в окремих випадках, можуть бути відомі коефіцієнт використання енергії вітру та ККД генератора).

Основні технічні характеристики ВЕУ-08, згідно технічного паспорта, наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики ВЕУ-08

Основні характеристики	
Номінальна потужність, Вт	800
Діаметр вітроколеса, м	3,1
Номінальна частота обертів вітроколеса, об/хв	310
Кількість лопатей, шт.	3
Спосіб орієнтації за вітром	за допомогою кіля
Регулювання частоти обертів	аеромеханічне
Тип генератора – багатополосний трифазний із збудженням від постійних магнітів	
Номінальна напруга генератора, В	24
Рекомендована висота щогли, м	11-17
Коефіцієнт потужності вітроколеса	0,45
ККД генератора	0,85
Робочий діапазон швидкостей вітру, м/с	
Стартова (початок роботи)	2,5
Номінальна (генератор розвиває потужність 800 Вт)	8
Максимальна експлуатаційна	50

Порядок розрахунку наступний.

1. *Аналіз даних метеоспостережень в даній місцевості.*

У відповідності до методики аналізу даних метеоспостережень [4, 8] встановлено, що для Кіровоградського регіону на висоті анемометра максимальна швидкість вітру V_{ϕ} становить 13 м/с, а максимальний енергетичний потенціал вітрового потоку $N_{max}(V_{\phi}) = 1428 \text{ Вт/м}^2$.

2. *Визначення швидкості вітру на висоті головки ВЕУ.*

Зазвичай головки ВЕУ, розташовані на висоті від 5 до 50 м [4]. Збільшення енергетичного потенціалу з висотою пояснюється зростанням швидкості вітру, яка в приземному шарі змінюється за степеневим законом [3, 4, 6, 7]:

$$V = V_{\phi} \cdot \left(\frac{h}{h_{\phi}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

де V та V_{ϕ} – швидкість вітру на розсіяній висоті h та на стандартній висоті флюгера h_{ϕ} ;

α – показник степені, який залежить від швидкості вітру. В [3] наведено залежність показника α від швидкості вітру.

З [9] відомо, що для Кіровоградського регіону $\alpha = 0,2$. Згідно даних виробника ВЕУ-08 (див. табл. 1) висота щогли даної установки знаходиться в межах від 11 м до 17 м. При розрахунку будемо вважати, що головка ВЕУ-08 розташована на висоті щогли $h = 17$ м.

За допомогою виразу (2) було розраховано швидкості вітру на висоті щогли ВЕУ-08, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика швидкостей вітру на різних висотах

h=10 м	Швидкість вітру V, м/с													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
h=17 м	0	1,11	2,22	3,34	4,45	5,56	6,7	7,8	8,9	10	11,1	12,2	13,3	14,5

Як видно з табл. 2, швидкість вітру на висоті головки ВЕУ-08 є дещо більшою, ніж швидкість вітру на висоті анемометра. В подальших розрахунках будемо використовувати саме швидкість вітру на висоті щогли $h = 17$ м.

3. *Визначення енергетичного потенціалу вітрового потоку.*

Енергетичний потенціал визначається рівнем питомої потужності вітрового потоку, тобто потужністю, віднесеною до 1 м^2 площі та перпендикулярній напрямку вітру [6-8]:

$$N(V) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3, \quad (2)$$

де ρ – густина повітря, кг/м^3 ;
 V – швидкість вітру, м/с .

В середньому густина повітря становить $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ [1-3, 5], але вона відчутно залежить від температури та тиску. Якщо врахувати метеорологічні умови Кіровоградського регіону, наведені в [10], то останній вираз набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned} N(V) &= 0.559 \cdot V^3 \quad \text{для зими} \\ N(V) &= 0.527 \cdot V^3 \quad \text{для весни та осені} \\ N(V) &= 0.508 \cdot V^3 \quad \text{для літа} \end{aligned} \quad (3)$$

За допомогою виразу (3) було отримано залежність енергетичного потенціалу вітрового потоку $N(V)$ від швидкості вітру V , представлена на рис. 1.

4. *Визначення потужності потоку P_{Π} , який проходить за 1 с через поперечний переріз, площею F .*

Вона визначається за допомогою формули [4-6]:

$$P_{\Pi} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^3}{2}, \quad (4)$$

де F – площа поверхні, яку обмітає ВК з радіусом R , м^2 . Для обраної установки $F = 7,5438 \text{ м}^2$.

Залежність потужності вітрового потоку P_{Π} від швидкості вітру V , наведено на рис. 2.

5. *Визначення коефіцієнту використання енергії вітру (або коефіцієнта потужності ВЕУ) ζ .*

Цей параметр характеризує ефективність використання ВК енергії вітру. Він залежить від типу вітродвигуна та режиму його роботи. Його знаходять за допомогою формули [5]:

$$\xi = \frac{P_{BK}}{P_{\Pi}}, \quad (5)$$

де P_{BK} – потужність вітроколеса, Вт.

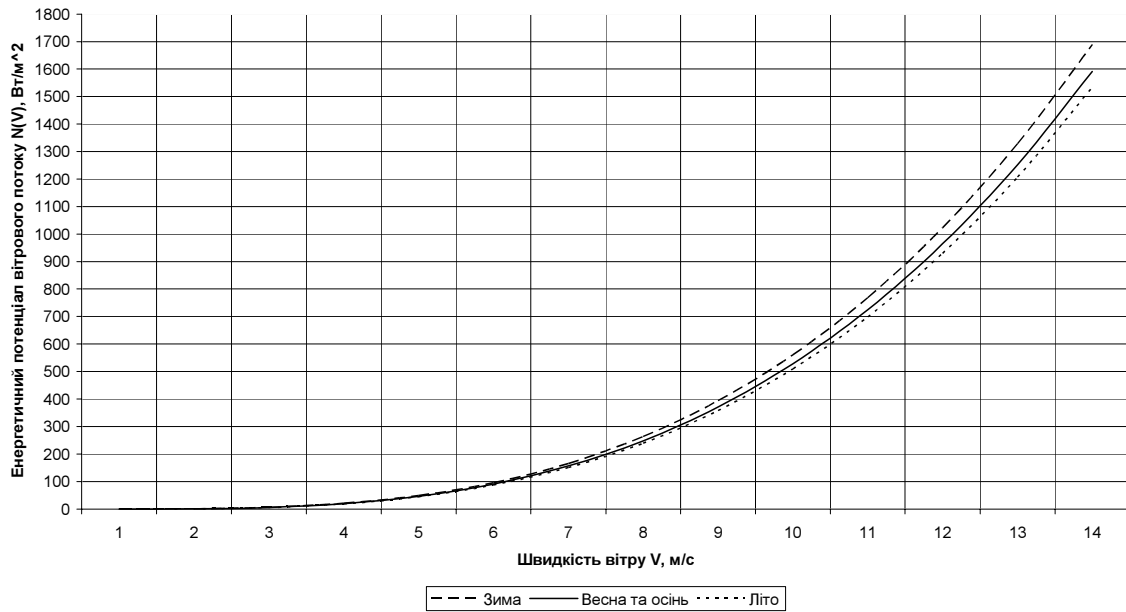


Рисунок 1 - Залежність енергетичного потенціалу вітрового потоку від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

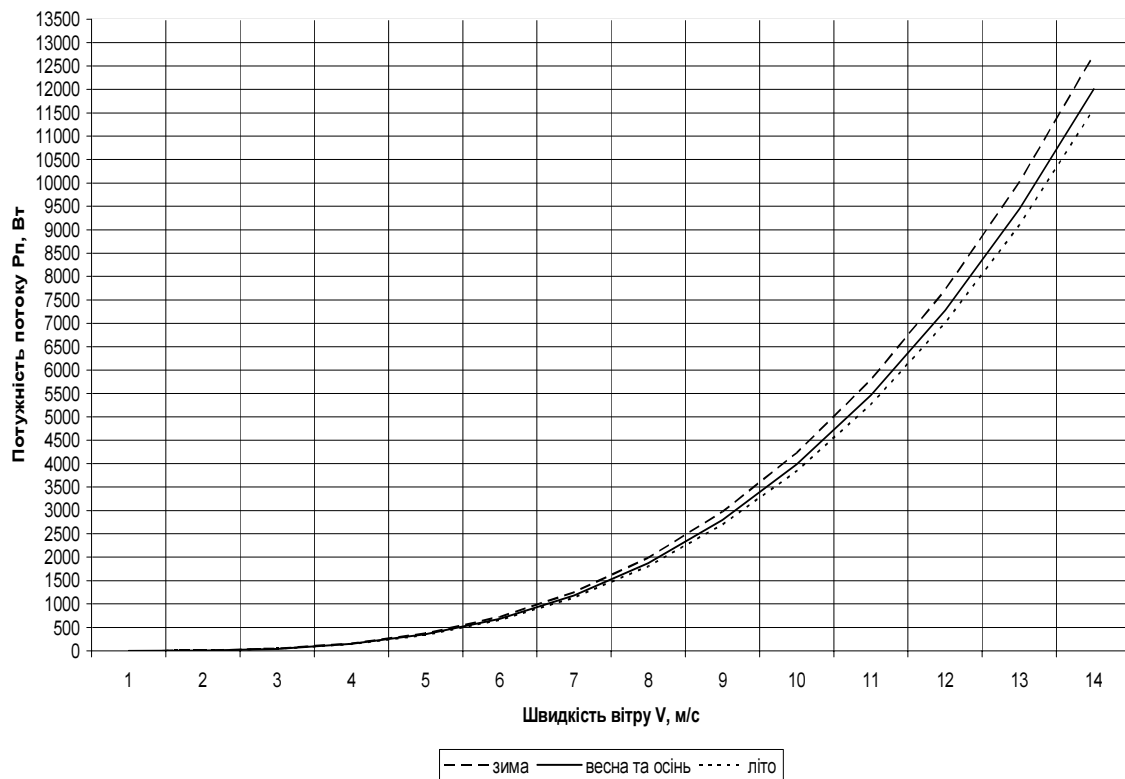


Рисунок 2 – Залежність потужності вітрового потоку від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

Максимальна енергія, яку можна отримати від ідеального ВК складає 59% від кінетичної енергії повітряного потоку (згідно закону Бетца-Жуковського), тобто $\xi_{max} = 0,59$. Для сучасних горизонтально-осьових ВЕУ коефіцієнт потужності зазвичай знаходиться в діапазоні 0,41-0,49 [9].

Згідно даних виробника ВЕУ-08 (див. табл. 1), $\xi = 0,45$.

6. *Визначення коефіцієнту гальмування k .*

Його називають також коефіцієнтом індукції або збудження. Визначають його за допомогою формули [4, 6]:

$$\xi = 4k(1-k)^2, \quad (6)$$

Крім того, в джерелі [4] наведено залежність коефіцієнта ξ від коефіцієнта k . Згідно з нею приймаємо $k = 0,159$

7. *Визначення лобового опору, який діє на ВК.*

Лобовий опір, який діє на вітроколесо, знаходимо за допомогою співвідношення [2, 4, 5]:

$$C_F = 4k(1-k), \quad (7)$$

Максимальне $C_F = 1$ буде у випадку, коли $k = 0,5$. В нашому випадку $C_F = 0,535$.

8. *Визначення швидкохідності вітроколеса Z .*

Швидкохідність ВК визначається за допомогою виразу [1, 4, 5]:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V}, \quad (8)$$

де ω – швидкість обертання вітроколеса, рад/с.

Також Z можна визначити за допомогою таблиці, наведеної в [4]. Згідно цієї таблиці приймаємо $Z = 2$

9. *Визначення вихідної потужності генератора ВЕУ.*

Вихідна потужність генератора ВЕУ визначається за допомогою формули [3]:

$$P_{ген}(V) = P_{ном} \cdot \bar{P}_{ген}(V), \quad (9)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність генератора (зазвичай дорівнює встановленій потужності), Вт;

$\bar{P}_{ген}(V)$ – коефіцієнт вихідної потужності генератора.

Крім того, для виразу (9) існують такі умови [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{ген}(V) = 0, \quad \text{при } V < V_{\min} \text{ та } V > V_{\max}; \\ \bar{P}_{ген}(V) = \bar{P}_{ген}(V), \quad \text{при } V_{\min} \leq V \leq V_{\max}; \\ \bar{P}_{ген}(V) = 1, \quad \text{при } V_{ном} \leq V \leq V_{\max} \end{array} \right. , \quad (10)$$

Згідно даних табл. 1, умови (10) можна записати в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{ген}(V) = 0, \quad \text{при } V < 2.5 \text{ та } V > 50; \\ \bar{P}_{ген}(V) = \bar{P}_{ген}(V), \quad \text{при } 2.5 \leq V \leq 50; \\ \bar{P}_{ген}(V) = 1, \quad \text{при } 8 \leq V \leq 50 \end{array} \right. , \quad (11)$$

Коефіцієнт вихідної потужності генератора $\bar{P}_{ген}(V)$ розраховують за допомогою виразу [3]:

$$\bar{P}_{ген}(V) = \frac{N(V)}{P_{ген.пит}} \cdot \xi \cdot \eta, \quad (12)$$

де $N(V)$ – питома потужність вітрового потоку, Вт/м²;

$P_{ген.пит}$ – питома потужність генератора, Вт/м²;

η – ККД перетворення механічної енергії вітроколесом в електричну, або ККД генератора (зазвичай $\eta = 0,80-0,90$).

Питому потужність генератора знаходять за допомогою співвідношення [3]:

$$P_{ген.пит} = \frac{P_{ном}}{F}, \quad (13)$$

Підставивши відповідні значення у вирази (9), (12), (13) та врахувавши умови (11), одержимо залежність вихідної потужності генератора ВЕУ-08 від швидкості вітру, яка наведена на рис. 3.

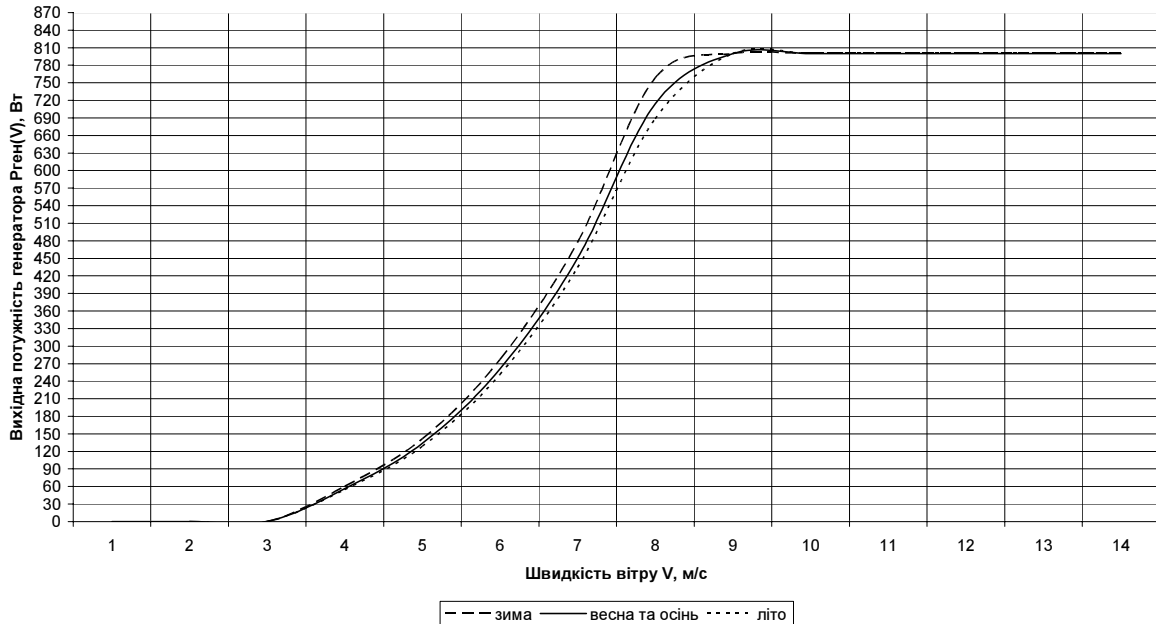


Рисунок 3 – Залежність вихідної потужності генератора ВЕУ-08 від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

10. Визначення крутного моменту M на вихідному валу ВК.

Згідно виразів, зазначених в [4], можна отримати формулу для знаходження крутного моменту, що має наступний вигляд:

$$M = \frac{\xi \cdot \rho \cdot F \cdot R \cdot V^2}{2 \cdot Z}, \quad (14)$$

На рис. 4 наведено залежність крутного моменту M , який розвиває ВК ВЕУ-08, при різних швидкостях вітру.

11. Визначення максимального крутного моменту M_{max} .

Максимальний крутний момент розраховують за допомогою наступного виразу [4]:

$$M_{max} = W_{max} \cdot R, \quad (15)$$

де $W_{max} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^2}{2}$ – максимальне навантаження, яке діє на ВК.

На рис. (5) та рис. (6) наведено залежності максимального навантаження W_{max} та максимального крутного моменту M_{max} ВК від швидкості вітру.

12. Визначення коефіцієнту крутного моменту C_M .

Якщо відомі M та M_{max} вітроколеса, то можна визначити коефіцієнт крутного моменту C_M . Він визначається за допомогою формули [4-6]:

$$C_M = \frac{M}{M_{max}}, \quad (16)$$

або, згідно [4]:

$$C_M = \frac{\xi}{Z}, \quad (17)$$

Для ВЕУ-08 цей коефіцієнт дорівнює 0,225.

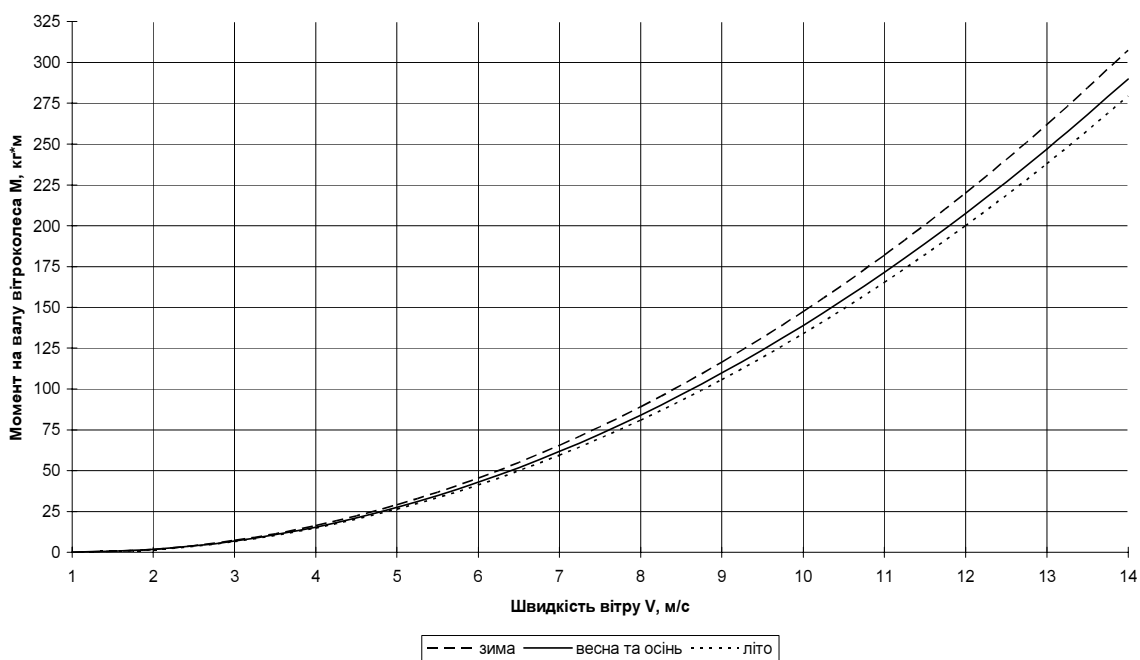


Рисунок 4 - Залежність крутного моменту вітроколеса ВЕУ-08 від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

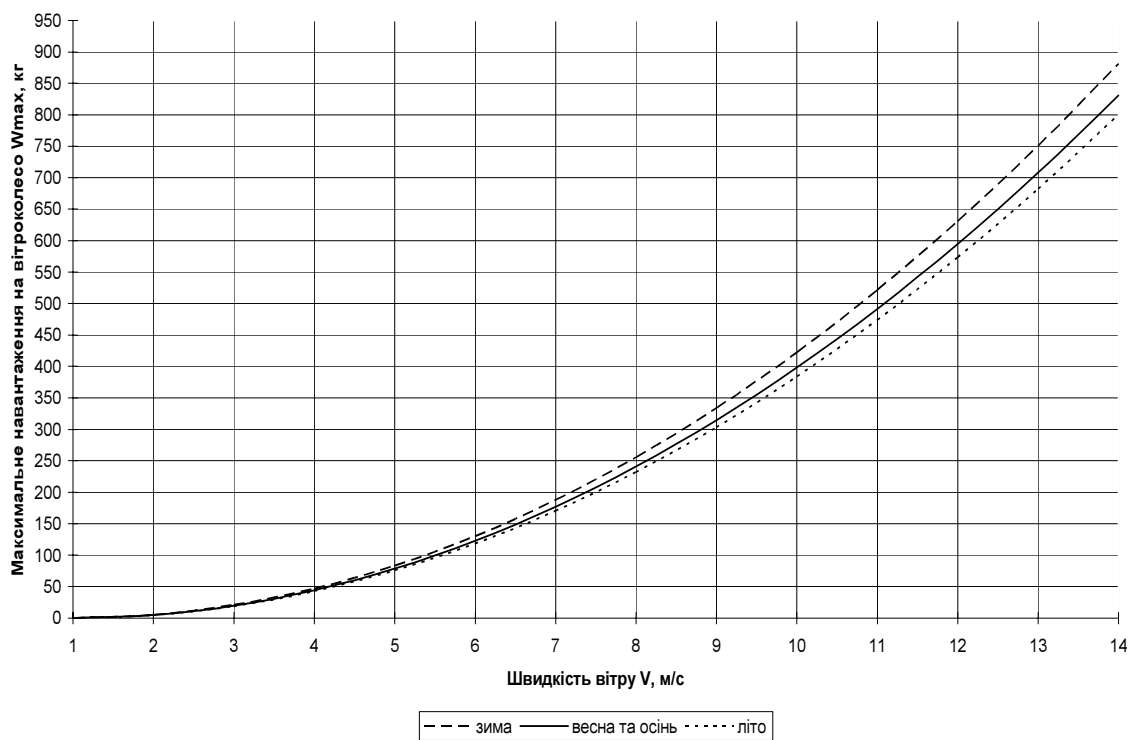


Рисунок 5 - Залежність максимального навантаження, яке діє на вітроколесо ВЕУ-08, від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

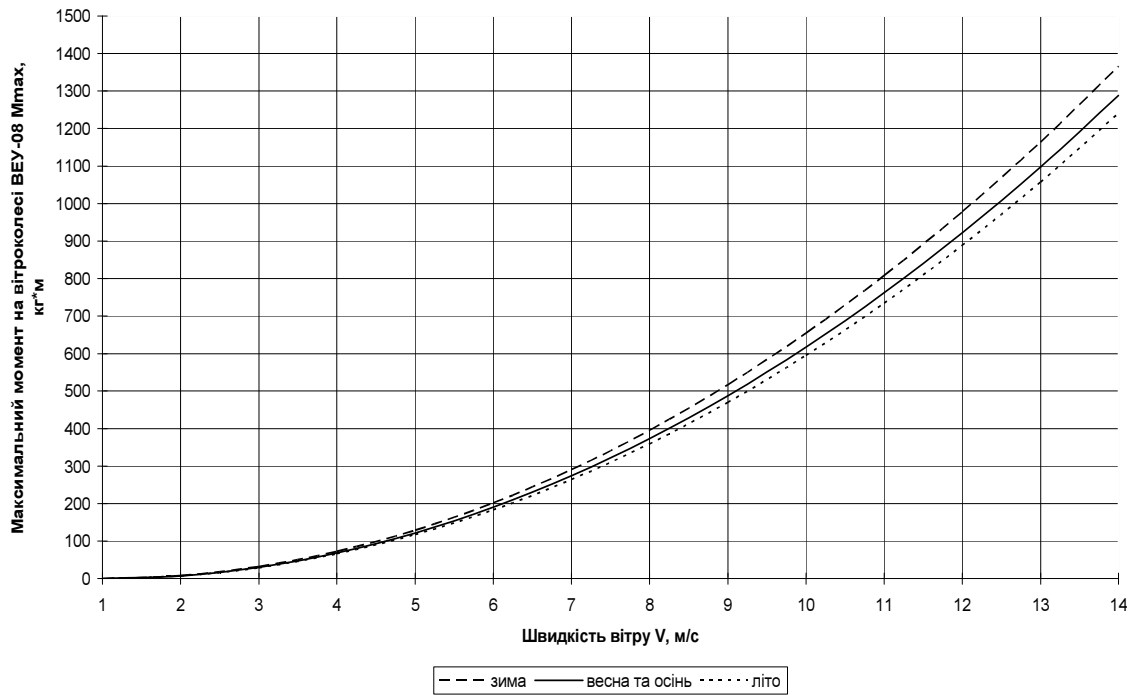


Рисунок 6 - Залежність максимального крутного моменту вітроколеса VEУ-08 від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

13. *Визначення потужності вітроколеса P_{BK} .*

Вона визначається за допомогою наступного виразу [4, 5]:

$$P_{BK} = \xi \cdot P_{II}, \quad (18)$$

Якщо у вираз (18) замість P_{II} підставити співвідношення (4), то будемо мати:

$$P_{BK} = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot \rho \cdot F \cdot V^3, \quad (19)$$

На основі виразу (19) було побудовано залежність потужності вітроколеса VEУ-08 від швидкості вітру, представлена на рис. 7.

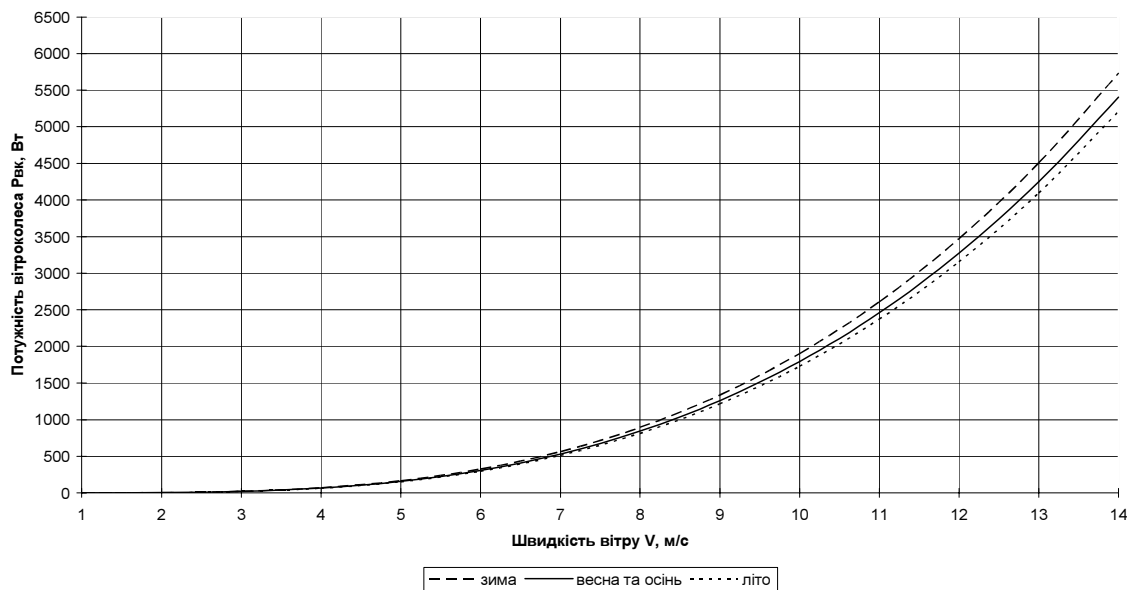


Рисунок 7 - Залежність потужності вітроколеса VEУ-08 від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

14. *Визначення потужності горизонтально-осьової ВЕУ.*

Потужність горизонтально-осьової ВЕУ розраховують за наступною формулою [4, 5, 9]:

$$P_{BEU} = \eta \cdot P_{BK}, \quad (20)$$

Врахувавши вираз (19), остання формула може бути записаний у вигляді:

$$P_{BEU} = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot \xi \cdot F \cdot V^3, \quad (21)$$

На рис. 8 наведено залежність потужності P_{BEU} ВЕУ-08 від швидкості вітру V .

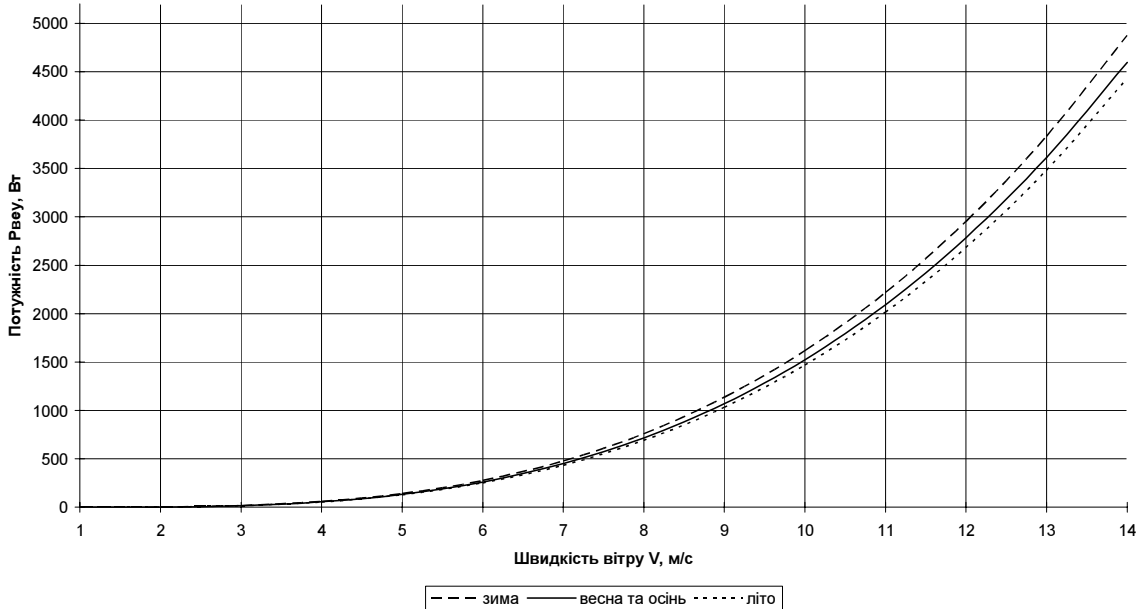


Рисунок 8 - Залежність потужності ВЕУ-08 від швидкості вітру в Кіровоградському регіоні за сезонами

15. *Визначення середньодобової кількості електроенергії, що генерує ВЕУ.*

Середньодобова кількість електроенергії, що генерує ВЕУ визначається за допомогою виразу [7]:

$$E = F \cdot N(V) \cdot \eta \cdot 24, \quad (22)$$

де 24 – кількість годин у добі.

На основі виразу (22) визначено, що середньодобова кількість електроенергії, яку генерує ВЕУ-08, з урахуванням метеорологічних умов Кіровоградського регіону.

В ході проведеного дослідження, розрахунково-аналітичним шляхом, з використанням програмних пакетів Microsoft Excel, MathCAD та ін., вперше було визначено наступні показники енергетичної ефективності роботи ВЕУ-08 в метеорологічних умовах Кіровоградського регіону:

- за допомогою степеневого закону були визначені швидкості вітру на висоті щогли ВЕУ-08 (17 м) та було побудовано залежність енергетичного потенціалу вітрового потоку від швидкості вітру (максимальне значення енергетичного потенціалу вітрового потоку при швидкості вітру 14,456 м/с становить взимку 1688,714 Вт/м²);
- потужність потоку P_{II} , який проходить за 1 с через поперечний переріз поверхні, яку обмітає ВК з радіусом R (максимальна потужність P_{II} взимку дорівнює 12739,37 Вт);
- коефіцієнт гальмування вітрового потоку вітроколесом ($k = 0,159$);
- вихідну потужність генератора ВЕУ-08 при різних швидкостях вітру(вона досягає свого максимуму при швидкості вітру 7,78 м/с, а потім стає рівною номінальній

потужності генератора. Взимку максимальна потужність генератора ВЕУ-08 $P_{ген}(V)_{зим.} = 758,4$ Вт);

- коефіцієнт лобового опору, який діє на вітроколесо ($C_F = 0,535$);
- площу поверхні, яку обмітає ВК ($F = 7,54$ м²);
- швидкохідність ВК ($Z = 2$);
- крутний момент на валу ВК (при максимальній швидкості вітру для Кіровоградського регіону взимку $M_{зим.} = 307,404$ кг·м);
- максимальне навантаження, яке діє на ВК (при швидкості вітру 14,456 м/с в зимовий період $W_{max} = 881,252$ кг);
- максимальний крутний момент ВК (взимку $M_{max.зим.} = 1365,941$ кг·м);
- коефіцієнт крутного моменту ($C_M = 0,225$);
- потужність вітроколеса (в умовах Кіровоградського регіону має максимальне значення взимку $P_{ВК.зим.} = 5732,717$ Вт);
- потужність ВЕУ-08 в залежності від пори року (для Кіровоградського регіону максимальна потужність взимку становить $P_{ВЕУ.зим.} = 4872$ Вт);
- середньодобову кількість електроенергії, що генерує ВЕУ-08 (в умовах Кіровоградського регіону взимку становить $E_{зим.} = 7570$ Вт·год).

Всі розраховані показники повинні бути враховані при програмуванні процесу автоматизації автономного енергопостачання з використанням горизонтально-осьових ВЕУ.

Список літератури

1. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
2. Волеваха М. М., Гойса М. І. Енергетичні ресурси клімату України. – К.: Наук. думка, 1967. – 132 с.
3. Васильев Ю. С., Хрисанов Н. И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343 с.
4. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.: ил.
5. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
6. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ.: под ред. Я.И. Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
7. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы. – К.: Наукова думка, 1999. – 320 с.
8. Голик О. П., Жесан Р. В. Одержання імовірнісних характеристик та законів розподілу швидкостей вітру на основі аналізу даних метеоспостережень // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – Вип. 8. Т.4 – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – С. 57-66.
9. Жесан Р. В. Аналіз результатів вимірювань швидкості вітру в Кіровоградському регіоні // Вісник ДУ «Львівська політехніка». Спеціальний випуск «Проблеми економії енергії» №2. – Львів: ДУ «ЛП», 1999. – С. 189-191.
10. Пащенко В. Ф., Жесан Р. В. Виявлення факторів, що впливають на ефективність роботи перетворювачів сонячної та вітрової енергії у складі комбінованого геліовітроенергетичного агрегату в умовах Кіровоградського регіону // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2000, - №1. – С. 86-92.

Выполнен расчет основных показателей энергетической эффективности работы горизонтально-осевой ветроэлектрической установки, с учетом метеорологических условий Кировоградского региона.

The calculation of basic indexes to efficiency of energy work by the wind-driven powerplant is executed with the horizontal axial of rotation, taking into account the meteorological terms of the Kirovograd region.