УДК 621.311.245(045)

П. С. Соченко, канд. техн. наук,
М. В. Тригуб,
А. А. Маєвський

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З КОНЦЕНТРАТОРОМ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: fsu@nau.edu.ua

Розглянуто модель вітроенергетичної установки з концентратором енергії вітру на основі теорії ідеального вітряка для визначення коефіцієнта використання енергії вітру.

Постановка завдання. Навести розрахунки коефіцієнта використання енергії вітру, показати загальну схему вітроенергетичного пристрою, який можна використовувати на дахах будинків.

Вступ. Натепер, коли збільшується кількість користувачів джерел енергії, зокрема електроенергії, а можливість отримання енергії надалі складніша та дорожча, виникає необхідність потреба в заміні традиційних джерел енергії альтернативними. Альтернативних джерел енергії на сьогодні існує багато. Але найбільш прибуткове, відносно недороге у виготовленні та експлуатації – це використання енергії вітру. Найбільш поширене – застосування звичайних вітряків, але їх установлення можливе лише на відкритих місцевостях з постійними та відносно сильними вітрами. Тому такий вітряк є складною конструкцією як щодо виготовлення, так і під час використання. Крім цього, використовувати їх у великих містах, таких як Київ, неможливо.

Таким чином, розробляються установки для отримання електроенергії за допомогою вітрів, які мають набагато менші розміри порівняно зі звичайними вітряками, конструкція яких відносно нескладна. Актуальним використанням цих установок у містах є те, що їх можливо встановлювати на дахах будівель. Також вони можуть працювати за слабких швидкостей і потужностей вітрів, що характерно для міських територій. Ефективність установки полягає у використанні аеродинамічної труби, тобто концентратора енергії слабких (малопотужних) вітрів. Цей аеродинамічний компонент має на вході діаметр більший в три рази відносно вихідного. Тому розміри лопатей порівняно зі звичайними вітряками набагато менші. Отже, виникає явище концентрації вітрового потоку, і як наслідок, збільшення його швидкості.

Статистичні дані швидкості руху повітря за рік на висоті 10 м над землею (м. Київ)

V, м/с	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, год	453	1692	2970	2097	1071	327	117	24	9	0	0

У масштабі всієї України такий спосіб використання великої кількості малопотужних вітроенергетичних установок з концентраторами енергії вітру має такі переваги:

1) м. Київ та інші великі міста в Україні можна забезпечити електроенергією за рахунок вітру на 20−30 %, а це відповідно забезпечить економію споживання газу тепловими електростанціями;

2) суттєво збільшиться кількість високооплачуваних робочих місць, оскільки при кожному ЖЕК повинна працювати бригада висококваліфікованих спеціалістів з технічного обслуговування великої кількості малопотужних вітроенергетичних установок, розташованих на дахах високих будівель;

3) покращує екологічну обстановку в Україні за рахунок запобігання викидам в атмосферу шкідливих речовин з теплових електростанцій.

Розрахунок коефіцієнта використання енергії вітру. Винахід стосується вітроенергетики і може бути використаний в системах з малою вартістю постачання електричної енергії в загальну електричну мережу в умовах нестабільної швидкості та напрямку вітру.

Відома вітроенергетична установка, в якій повітряний потік проходить через напрямні пристрої, кожний з яких виконано у вигляді трубопроводу для повітря, з'єднаного з привідним обертальним приймачем вітру, при цьому вітрові потоки надходять на турбіну, і потім – через пристрої для відведення повітря на вихід. Основний недолік такого пристрою – складність механічного обладнання та пов'язана з цим низька технічна надійність, і як наслідок, висока вартість виготовлення та практичного використання.

Відома вітроенергетична установка, яка містить звужувальну вентиляційну трубу у вигляді зрізаного конуса, в середині якої розташовано декілька вітродвигунів з поступово зменшуваними розмірами вентиляторів, які кінематично з'єднані з відповідними електрогенераторами. Основним недоліком такого пристрою є низький коефіцієнт використання енергії вітру, який визначається як співвідношення корисної енергії на валу обертання вітродвигунів до загальної енергії вітру, що проходить через звужувальну вентиляційну трубу.

В основу винаходу поставлено завдання збільшити коефіцієнт використання енергії вітру за рахунок виконання вентиляційної труби у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди, яка розташована горизонтально, в середині якої розташовані вітродвигуни у вигляді обертаючих двох пар прямокутних лопатей, розташованих перпендикулярно потоку вітру, який проходить через піраміду.

Поставлене завдання удосконалення винаходу вирішується тим, що вітроенергетична установка для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру, яка складається з вентиляційної труби, в середині якої розташовано вітродвигуни, що кінематично з'єднані з відповідними електрогенераторами. Згідно з винаходом вентиляційну трубу виконано у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди, розміщеної горизонтально, а вітродвигуни – у вигляді обертальних двох пар прямокутних лопатей, розташованих перпендикулярно до потоку вітру, який проходить через зрізану піраміду, причому осі обертання лопастей розташовано на нижній горизонтальній грані піраміди, а нижні частини обертальних навколо осі лопатей закриті від зовнішнього вітру.

Загальну структуру вітроенергетичної установки для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру зображено на рис. 1, векторну діаграму для визначення діючої складової вектора швидкості вітру – на рис. 2, діаграму затінення від діючого вітру попередньої лопаті наступною, якщо лопатей більше двох пар, – на рис. 3, графіки залежності коефіцієнта використання енергії вітру від кількості пар лопатей та кількості послідовно розташованих вітродвигунів у піраміді – на рис. 4, графіки коефіцієнта ефективності застосування послідовно розташованих вітродвигунів у піраміді – на рис. 5, графіки залежності коефіцієнта використання енергії вітру в круглій трубі від кількості пар вентиляторів та кількості послідовно розташованих вітродвигунів – на рис 6.

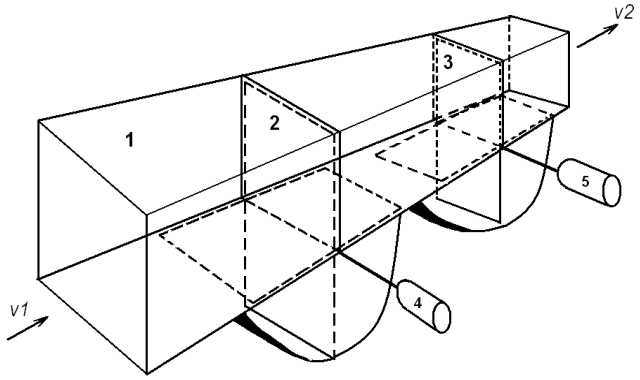

Рис. 1

Як показано на рис. 1, вітроенергетичну установку для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру виконано у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди *1*, в середині якої розташовано декілька вітродвигунів *2* і *3*, які кінематично з'єднані з відповідними генераторами *4* і *5* електричної енергії.

Вітроенергетична установка для підвищення коефіцієнта використання енергії вітру відповідно до винаходу працює таким чином. Чотиригранна зрізана піраміда *1* розташована горизонтально і здатна обертатися в горизонтальній площині для того, щоб більший отвір був завжди напрямлений назустріч вітру, який, проходячи через піраміду, обертає лопаті вітродвигунів *2* і *3* навколо осей. Осі розташовано на нижній грані піраміди *1* з таким, щоб нижні лопаті, які обертаються назустріч вітру, були розташовані за пірамідою *1* та закриті від вітру. При цьому буде значно знижений гальмівний ефект під час обертання, який створюється нижніми лопатями, які обертаються назустріч вітру. Осі обертання лопатей кінематично з'єднані з електрогенераторами *4* і *5*.

Відомо, що потужність $P_в$ вітру в середині i-го перетину піраміди визначають за формулою

$$P_в = \frac{pa_i^2}{2} V_i^3 \quad , \tag{1}$$

де p – густина повітря; a_i – ширина піраміди в i-му перетині; V_i – швидкість вітру в i-му перетині.

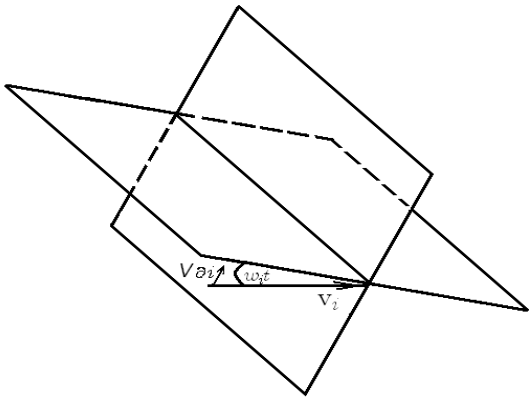

Рис. 2

Як показано на рис. 2, діюча складова V_{di} вектора V_i швидкості вітру в i-му перетині піраміди напрямлена перпендикулярно до грані лопаті й виражається формулою

$$V_{di} = V_i \cdot \sin(w_i t). \tag{2}$$

Кутова частота повороту лопатей в i-му перетині

$$w_i = \frac{V_i}{a_i}. \tag{3}$$

Максимальне значення часу t_{mi} повороту лопаті з крайнього лівого положення в крайнє праве в i-му перетині можна визначити за формулою

$$t_{mi} = \frac{2a_i}{V_i}, \tag{4}$$

де $2a_i$ – максимальна відстань, яку проходить вітер в i-му перетині зі швидкістю V_i при повороті лопаті з крайнього лівого положення в крайнє праве.

З урахуванням умов (2) та (4) середнє значення V_{di} вектора діючої швидкості вітру в i-му перетині можна визначити відповідно виразу

$$V_{di} = V_i 2 \int_0^{\frac{tmi}{2}} \sin\left(w_i t\right) dt . \tag{5}$$

Після обчислення інтеграла (5) з урахуванням умов (3) та (4) можна визначити середнє значення V_{di} діючої швидкості вітру в i-му перетині:

$$V_{di} = 2V_i\left(1-\cos(1)\right). \tag{6}$$

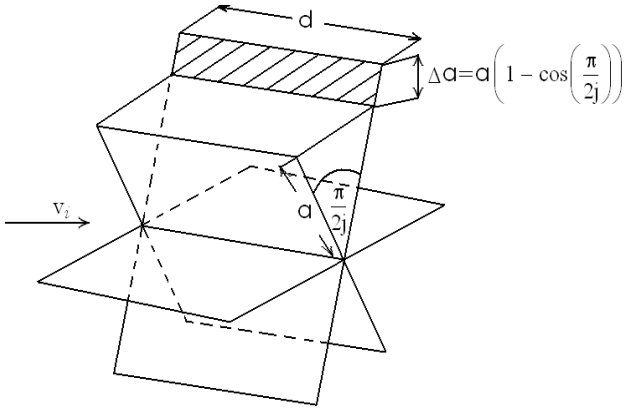

Рис. 3

Якщо замість двох пар лопатей (рис. 1), які зсунуті між собою на кут $\frac{\pi}{2}$, застосувати j лопатей так, як показано на рис. 3, тоді кут між сусідніми лопатями буде дорівнювати $\frac{\pi}{2j}$, а незатінену частину ΔS_{ij} попередньої лопаті можна визначити наступною лопатю в i-му перетині (рис. 3) відповідно до виразу:

$$\Delta S_{ij} = a_i^2\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2j}\right)\right). \tag{7}$$

Індекси i та j в формулі (7) відповідно вкажуть на номер i-го перетину та кількість j додаткових пар лопастей.

З урахуванням формул (6) та (7) вираз (1), який визначає потужність $P_{\text{в}}$ вітру в i-му перетині, неважко скоригувати для визначення діючої потужності $P_{\text{д. в}}$ вітру в i-му перетині:

$$P_{\text{д. в}} = 4pa_i^2V_i^3 j\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2j}\right)\right)\left(1-\cos(1)\right)^3. \tag{8}$$

Коефіцієнт використання n_{ij} енергії вітру в i-му перетині при j пар лопатей можна визначити за формулою

$$n_{ij} = \frac{P_{\text{д. в}}}{P_{\text{в}}}. \tag{9}$$

З урахуванням формул (1) та (8) вираз (9) можна записати у вигляді

$$n_{ij} = 8j\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2j}\right)\right)\left(1-\cos(1)\right)^3. \tag{10}$$

Аналіз формули (10) показує, що значення коефіцієнта n_{ij} використання енергії вітру в i-му перетині при j пар лопатей не залежить від місця розташування вітродвигунів (див. рис. 1), а залежить тільки від кількості j додаткових пар лопатей.

Для підвищення загального значення коефіцієнта n_0 використання енергії вітру доцільно послідовно розташувати вздовж піраміди (див. рис. 1) декілька агрегатів лопатевих перетворювачів, які мають бути розташовані на відстані Δl_{i+1}, що перевищує щонайменше в 1,5 разу значення $a_i + a_{i+1}$, тобто Δl_{i+1} визначають відповідно до формули

$$\Delta l_{i+1} \geq 1,5(a_i + a_{i+1}).$$

Коефіцієнт 1,5 знижує турбулентність використовуваного потоку вітру, який стабілізує швидкість цього вітру на вході наступного вітродвигуна.

Оскільки значення коефіцієнта n_{ij} перетворення енергії (10) в i-му перетині не залежить від місця розташування вітродвигунів, то загальне значення n_i коефіцієнта перетворення для i вітродвигунів можна визначити відповідно до таких рекурентних формул:

$$\begin{aligned} n_2 &= n+(1-n)n; \\ n_3 &= n_2+(1-n_2)n; \\ n_4 &= n_3+(1-n_3)n. \end{aligned} \qquad (12)$$

У формулах (12) через n_1, n_3, та n_4 позначені коефіцієнти використання енергії вітру відповідно при двох, трьох та чотирьох вітродвигунах. Через n позначено коефіцієнт використання енергії вітру від одного вітродвигуна, який, як відомо, не залежить від місця розташування вітродвигуна і визначається за формулою (10).

Формули (12) виведено з умови додавання до використаної енергії, що визначається коефіцієнтом n залишкової невикористаної енергії, яку визначають величиною 1-n, яку доцільно помножити на коефіцієнт n використання енергії вітру наступним вітродвигуном:

$j = 1, 2, ..., 6;$

$$n(j) = j\left(1-\cos\left(\frac{\pi}{2j}\right)\right)\left(1-\cos(1)\right)^3 8;$$

$$n_2(j) = 2n(j) - n(j)^2; \quad n_3(j) = 3n(j) - 3n(j)^2 + (j)^3;$$

$$n_4(j) = 4n(j) - 6n(j)^2 + 4(j)^3 - n(j)^4.$$

$$k_2(j) = \frac{n_2(j)}{n(j)}; \quad k_3(j) = \frac{n_3(j)}{n_2(j)}; \quad k_4(j) = \frac{n_4(j)}{n_3(j)}.$$

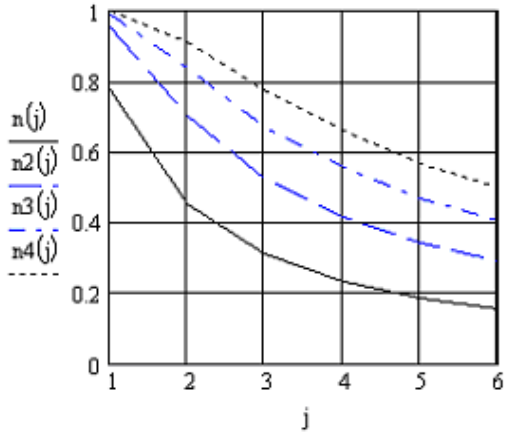

Рис. 4

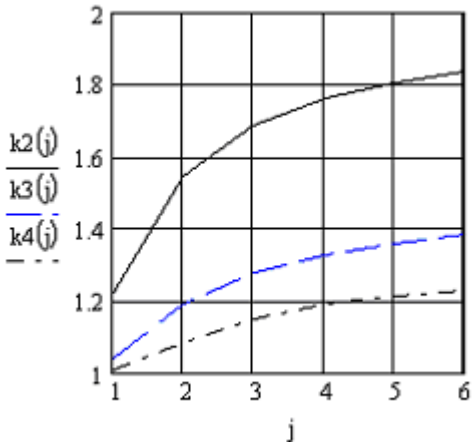

Рис. 5

На графіках рис. 4 показано залежності коефіцієнтів $n(j), n_2(j), n_3(j), n_4(j)$ відповідно для одного, двох, трьох та чотирьох вітродвигунів, розташованих послідовно і оснащених j додатковими парами лопатей.

На графіках рис. 5 наведено залежності коефіцієнтів k_{2j}, k_{3j}, k_{4j} ефективності застосування відповідно двох, трьох та чотирьох вітродвигунів, розташованих послідовно, які мають j пар додаткових лопастей.

Відповідні коефіцієнти ефективності визначено за формулами:

$$k_{2j} = \frac{n_{2j}}{n_j};$$

$$k_{3j} = \frac{n_{3j}}{n_{2j}};$$

$$k_{4j} = \frac{n_{4j}}{n_{3j}}.$$

Аналіз графіків (рис. 4 та 5) вказує на те, що найбільш доцільно застосовувати не більше двох послідовно розташованих вітродвигунів, які повинні мати тільки дві пари лопатей:

$$v = 0,2;$$

$$na(j) = jv^2 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right); \qquad na2(j) = 2na(j) - na(j)^2;$$

$$na3(j) = 3na(j) - 3na(j)^2 + na(j)^3;$$

$$na4(j) = 4na(j) - 6na(j)^2 + 4na(j)^3 - na(j)^4.$$

На графіках (рис. 6) показано залежності коефіцієнтів перетворення енергії вітру відповідно для одного n_{aj}, двох n_{a2j}, трьох n_{a3j} та чотирьох n_{a4j} послідовно розташованих

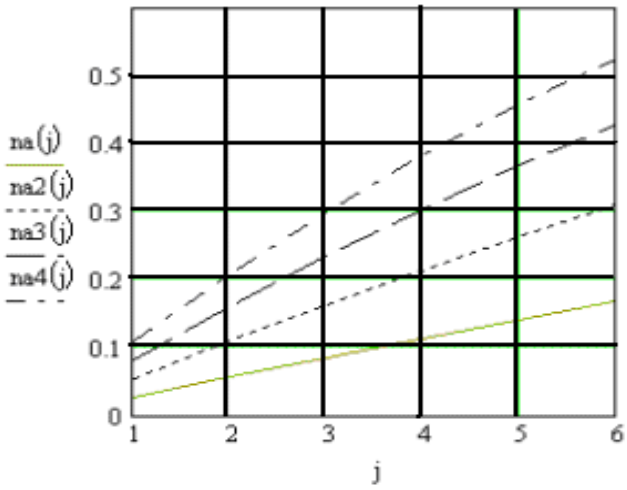

Рис. 6

вітродвигунів в круглій конусоподібній трубі. Відповідні вітродвигуни мають конструкцію чашечок діаметром $в_i$, розміщених на відстані a_i відносно осі обертання, що в центрі труби. Значення коефіцієнта n_{aj} використання енергії в круглій трубі визначають за формулою

$$n_{aj} = jk_i^2 \sin\gamma, \tag{14}$$

де через j позначено кількість додаткових пар чашечок, через γ – кут нахилу чашечки відносно вектора швидкості вітру $\gamma = 45°$, коефіцієнт $k_i = \frac{b_i}{a_i}$. Коефіцієнт k_i у формулі (14) визначено незалежно від номера i-го перетину ($k_i = 0,1$).

Аналіз порівняння графіків, зображених на рис. 4 та 6, вказує на те, що найбільш доцільною конструкцією вітроенергетичної установки є чотиригранна піраміда з одним або двома послідовно розташованими вітродвигунами, кожен з яких має тільки дві пари лопатей. При цьому коефіцієнт перетворення енергії вітру в енергію на валу обертання вітродвигуна може досягати значення 0,8 і більше.

Висновки. Виникає велика проблема у створенні та добуванні енергії, оскільки традиційні джерела поступово вичерпуються, стають дорожчими. Тому і постає потреба у використанні альтернативних джерел енергії, наприклад таких, як енергія малопотужних вітрів.

Актуальним є простота використання, відносно невелика вартість обладнання та легкість обслуговування. Отже, отримана електроенергія таким шляхом буде мати низьку та стабільну вартість.

Метою наукової роботи, частиною якої є ця робота, є впровадження та застосування комплексів вітроенергетичних установок на дахах висотних будинків. Наведено розрахунки коефіцієнта використання енергії вітру, показано загальну схему вітроенергетичного пристрою, який можна встановлювати на дахах будинків, також проведено часткові досліди окремих частин комплексу.

Концепція, яку подано в цій роботі, дає поштовх для подальшого розвитку і впровадження технології використання енергії малопотужних вітрів на території міст (мегаполісів) зі значним збереженням паливних та інших екологічно забруднювальних ресурсів.

Список літератури

1. *Забродин Ю. С.* Промышленная электроника. – М.: Высш. шк., 1982. – 486 с.
2. *Фатеев Е. М.* Ветродвигатели и ветроустановки. – М.: ОГИЗ–Сельхозгиз, 1948. – 544 с.

П. С. Соченко, М. В. Тригуб, А. А. Маевский

Ветроэнергетическая установка з концентратором энергии ветра

Рассмотрена модель ветроэнергетической установки с концентратором энергии ветра на основании теории идеального ветряка для определения коэффициента использования энергии ветра.

P. S. Sochenko, M. V. Tryhub, A. A. Mayevsky

Wind power station with the concentrator of wind energy

To be considered a model of wind power station with the concentrator of wind energy on the basis of the theory of ideal wind turbine to determine the utilization of wind energy.