

В статті розглянуті питання, які пов'язані з вдосконаленням ергономічної системи „працівник-вітроенергетична установка-середовище” за фактором шуму. Запропонована математична модель для розрахунку рівней звукового тиску від вітроенергетичних установок. Отримані аналітичні вирази, які можуть бути використані для проведення інженерних розрахунків, для вдосконалення ергономічної системи „працівник-вітроенергетична установка-середовище”

Ключові слова: ергономічна система „працівник-вітроенергетична установка-середовище”, вдосконалення, фактор шуму, математична модель

В статье рассмотрены вопросы, связанные с усовершенствованием эргономической системы «работник-ветроэнергетическая установка-среда» по фактору шума. Предложена математическая модель для расчета уровней звукового давления от ветроэнергетических установок. Получены аналитические выражения, которые могут быть использованы для проведения инженерных расчетов, для усовершенствования эргономической системы «работник - ветроэнергетическая установка-среда»

Ключевые слова: эргономическая система «работник-ветроэнергетическая установка-среда», усовершенствование, фактор шума, математическая модель

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ЕРГОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ АКУСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

О. М. Пархоменко

Аспірантка

Кафедра безпеки життєдіяльності
Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова
вул. Революції, 12, м. Харків, Україна,
61001

E-mail: rigena@mail.ru

1. Вступ

Проектування техніки та організація виробничого процесу потребує урахування можливостей людини. Розв'язання цих завдань неможливо без використання ергономіки. Загальна мета ергономіки формулюється як єдність трьох аспектів дослідження та проектування: зручність і комфортні умови ефективної діяльності людини, а відповідно і ефективне функціонування систем „людина-техніка-середовище” (ЛТС), збереження здоров'я та розвиток особистості [1].

Актуальність роботи полягає в тому, що створення ергономічних умов середовища перебування працівників в різних системах ЛТС сприяють соціально-економічному розвитку держави. Це, насамперед, сприяє ефективному функціонуванню, безпеці та комфортності системи.

Вплив шуму викликає порушення ефективності і надійності діяльності людини та системи ЛТС в цілому, а саме: підвищення нервового напруження, призводить до хронічного перевтомлення, виснаження центральної нервової системи і кори головного мозку, що проявляється у зниженні рівня творчої діяльності, працездатності, безпеки праці, швидкої втомленості, ослабленні пам'яті, уваги, гостроти зору й чутливості до попереджувальних сигналів. Шкідливий вплив шуму на організм людини проявляється і в патологічних змінах органів слуху, центральної нервової та серцево – судинної системах.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Черговий інженер станції є найбільш значущою ланкою в системі „працівник-вітроенергетична установка-середовище” (ПВЕУС). Від його дій на 70-80% залежить надійність роботи цієї системи.

Аналіз літератури показує, що поряд зі значними перевагами вітроенергетики, функціонування вітроелектричних станцій (ВЕС) характеризується і негативними антропогенними факторами, так ВЕС є одним із джерел шумового забруднення навколишнього середовища.

Yoshinori Nii, Geoff Leventhall та інші проводили дослідження шумових характеристик ВЕС [2 - 5]. Вони вказують на те що, шум виникає у всіх конструктивних частинах вітроенергетичних установок ВЕУ. Опубліковані данні містять залежності шумових характеристик ВЕС від напрямку та повторюваності вітру.

Створення математичної моделі для забезпечення комфортних умов ефективної діяльності працівників на ВЕС, а відповідно і ефективне функціонування систем „працівник-вітроенергетична установка-середовище” та збереження здоров'я та розвиток працівника.

3. Мета і задачі дослідження

Проведення досліджень системи ПВЕУС для підвищення ефективності трудової діяльності, з подальшим збереженням здоров'я і розвитку особистості праців-

ників вітроелектричної станції (ВЕС). Дослідження залежності шумового забруднення в системі ПВЕУС від умов розташування вітроенергетичних установок (ВЕУ) на ВЕС, ставить мету розробку математичну модель для ергономічного забезпечення зниження рівнів звукового тиску на території ВЕС та в середині виробничої будівлі.

4. Основний матеріал

Математичне моделювання виконано за допомогою блочно-ієрархічного підходу. Побудуємо блок - схему з наступними блоками (рис. 1).

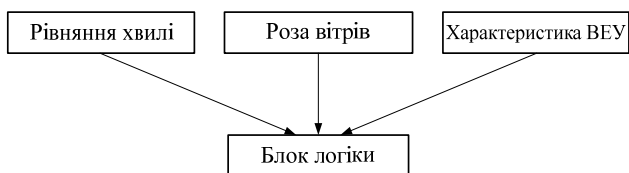


Рис. 1. Блок-схема для математичного моделювання визначення рівня звукового тиску ВЕУ або ВЕС

1. Блок математичної моделі „Рівняння хвилі”

Хвильове рівняння сферичної хвилі.

Хвиля, фронт якої представляє собою сферу, називається сферичною, а звукові промені, при цьому співпадають з радіусами сфери (рис. 2).

У загальному вигляді хвильове рівняння сферичної хвилі має вигляд

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \Delta u, \tag{1}$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа;

$u = u(r,t)$ - функція; $t \in \mathbb{R}$ - час;

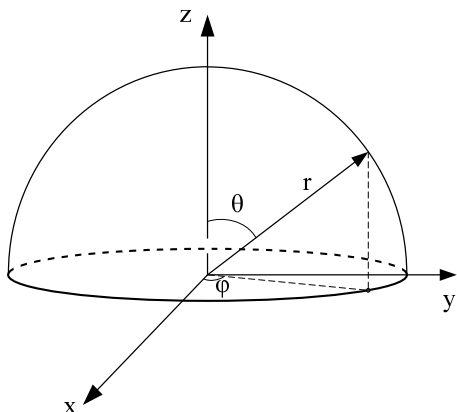


Рис. 2. Схематичне зображення випромінювання сферичної хвилі

де r – радіус розповсюдження сферичної хвилі;

θ – кут між радіусом сферичної хвилі і віссю z ;

ϕ – кут між радіусом сферичної хвилі і віссю x ;

$x \in \mathbb{R}^n$ - просторова змінна;

$$u = \frac{\bar{u}_0}{r} \cos(\omega t - kr), \tag{2}$$

$$\omega = 2\pi f; \quad \omega = kc.$$

Параметричне рівняння сфери

$$x = r \cdot \sin\Theta \cdot \sin\Phi; \quad y = r \cdot \sin\Theta \cdot \cos\Phi; \quad z = z \cdot \cos\Theta,$$

$$\Delta u = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin\Theta} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left(\sin\Theta \frac{\partial u}{\partial \Theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2\Theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \Phi^2}. \tag{3}$$

2. Блок математичної моделі „Роза вітрів”

Клімат є однією з фізико – географічних характеристик середовища, яке оточує людину та впливає на діяльність людини. У вузькому сенсі клімат - це сукупність атмосферних умов за багаторічний час, які властиві тій чи іншій місцевості в залежності від географічного розташування [6].

В атмосфері протікають різні фізичні процеси, які безперервно змінюють її стан. Фізичний стан атмосфери у земної поверхні і в нижніх (30 – 40 км) шарах в даний момент часу називається погодою, яка характеризується метеорологічними величинами (температура, тиск, вологість повітря, вітер, хмарність, атмосферні опади) та атмосферними явищами (гроза, туман, пилова буря, завірюха та ін.).

Рушійною силою для вироблення електричної енергії вітроенергетичними установками є вітер.

Рух повітря відносно земної поверхні називається вітром. Він характеризується вектором швидкості. Відповідно, вітер визначається швидкістю і напрямком. Напрямок вітру називається напрямком звідки він дме.

За даними [7, 8] на розповсюдження звуку впливає напрямок вітру. Звук по вітру чутний на більшу відстані, ніж проти вітру. Насамперед, це обумовлено тим, що рух повітря у поверхні землі сповільнюється із-за тертя та наявності перешкод. Зі збільшенням висоти, швидкість звуку збільшується.

Ефект сліду від вітрової турбіни (ВТ). ВТ виробляє електричну енергію з енергії вітру, тому енергія що „пройшла крізь турбіну” буде менше енергії вітрового потоку перед турбіною [4]. У підвітряному від ВЕУ напрямку буде утворюватися повітряний мішок. Фактично, позаду турбіни завжди буде турбулентний слід, довгий хвіст вітрового потоку, який є безладним і сповільнений в порівнянні з прибуваючим вітром. На вітростанціях ВТ розташовані одна від одної на відстані, що дорівнює потрійній довжині діаметра ротора ВТ.

Це дає змогу уникнути дуже великої турбулентності навколо ВЕУ, що знаходяться у підвітряному напрямку. В реальності відстань між ВЕУ становить 17 м.

Вітропотенціал України та роза вітрів. За даними [9], Україна має великий вітропотенціал (за оптимістичним прогнозом, до 1000 млн кВт).

Для того щоб охарактеризувати кліматичний режим вітру, побудуємо діаграму розподілу повторюваності напрямку вітру – розу вітрів. Систематизуємо дані [10] та побудуємо розу вітрів за рік для м. Євпаторія (рис. 3, 4).



Рис. 3. Роза вітрів за кількістю повторень напрямку вітру за рік в м. Єваторія

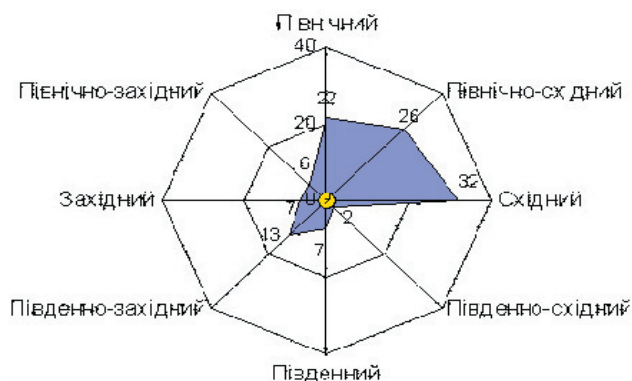


Рис. 4. Роза вітрів за середнім значення швидкості вітру за рік в м. Єваторія

3. Блок математичної моделі „Характеристика ВЕУ”

В цьому блоці наводиться інформація про основні технічні характеристики вітроенергетичної установки.

4. Блок математичної моделі „Логіка”

Умовно задамося, що ВЕС складається з пої кількості вітроенергетичних установок.

Вони знаходяться на різній відстані від розрахункової точки (т. М) (рис. 5).

Напишемо математичну модель для знаходження розповсюдження звукової хвилі від ВЕУ з урахуванням інтерференції, дифракції, відбиття та заломлення звукової хвилі.

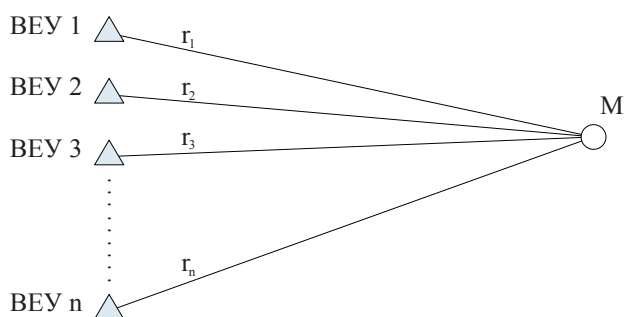


Рис. 5. Схематичне зображення розміщення ВЕУ відносно т. М

Розглянемо кожний випадок окремо для обраного варіанту розміщення ВЕУ.

Виходячи з рівняння (2), отримаємо:

$$u_1 = \frac{A_1}{r_1} \sin(\omega t - kr_1);$$

$$u_2 = \frac{A_2}{r_2} \sin(\omega t - kr_2); \quad u_3 = \frac{A_3}{r_3} \sin(\omega t - kr_3);$$

$$u_n = \frac{A_n}{r_n} \sin(\omega t - kr_n),$$

де $A_1 = P_1 \cdot r_0, \dots, A_n = P_n \cdot r_0$ - виміряний рівень звукового тиску, Па·м,

r_0 - мінімальна відстань випромінювання від ДШ $r_0 = 8,5$ м.

$P_1 \dots P_n$ - рівень звукового тиску в Па, знаходиться з $L = 20 \text{Lg} \frac{P_i}{P_0}$, $p_i = p_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}}$.

Математичне рівняння, що описує поширення звукової хвилі для пої кількості ВЕУ з урахуванням інтерференції в т. М:

$$u = \sum_{i=1}^N \left[\frac{A_i}{r_i} \sin(\omega t - kr_n) \right]. \quad (4)$$

Рівень звукового тиску в будь-якій точці простору визначається:

$$L = 20 \text{Lg} \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{A_i}{r_i} \sin(\omega t - kr_n) \right]}{P_0}. \quad (5)$$

Розглянемо відбиття хвилі від будівлі, в якій знаходиться диспетчерський пункт ВЕС. Пройшовши відстань r від ДШ до приймача, незначна частина звукової хвилі відбивається, а друга частина хвилі проникає у виробничу будівлю крізь стінку, з меншою інтенсивністю.

На рис. 6, 7 наведено проникнення звукової хвилі крізь стінку виробничої будівлі до робочого місця диспетчера.

Звукова хвиля падає на стінку будівлі під якимось кутом α , пройшовши крізь стінку, долає відстань r' до т. М.

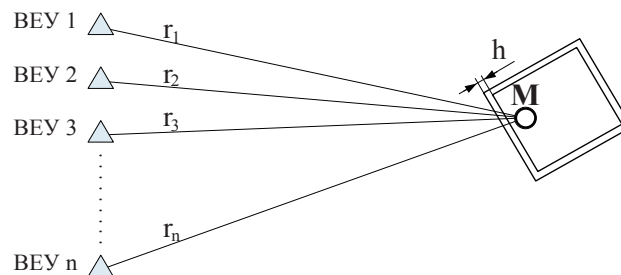


Рис. 6. Проникнення звукової хвилі в виробничу будівлю

Запишемо математичне рівняння звукової хвилі u' для т. М в будівлі з урахуванням коефіцієнта поглинання середовища поширення, для кожної ВЕУ:

$$u' = \frac{T}{r} \sin(\omega t - kr), \tag{6}$$

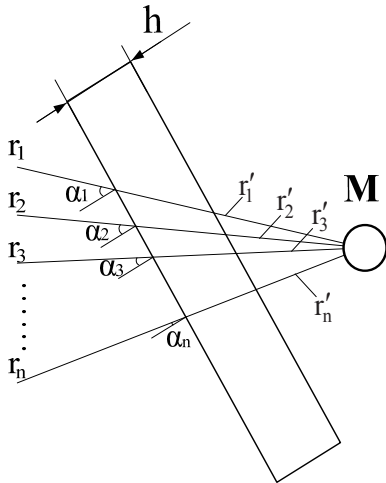


Рис. 7. Кут падіння хвилі на стінку виробничої будівлі

де $T = f\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$, (7)

де c_1 - швидкість звуку в матеріалі стінки;
 c_2 - швидкість звуку в повітрі.

У рівнянні (6) складова kr включає в себе проходження хвилі відстані r від ДШ до стінки в повітрі, проходження хвилі крізь стінку з урахуванням коефіцієнта пропускання стінки і відстані від стінки до т. М в повітрі.

$$kr = kr + \frac{k}{n} \cdot r_{cr} + kr', \tag{8}$$

На рис. 8 зображений процес проходження хвилі крізь стінку будівлі.

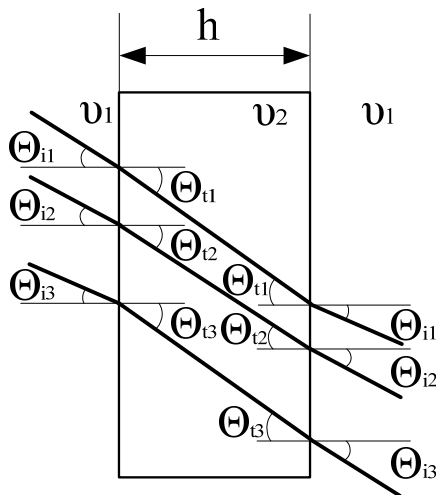


Рис. 8. Кути падіння та заломлення звукової хвилі

Співвідношення $\frac{\sin \Theta_i}{\sin \Theta_t} = \frac{c_2}{c_1}$.

звідси знаходимо $\sin \Theta_t$:

$$\sin \Theta_t = \frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}, \tag{9}$$

Θ_i, Θ_t - кут під яким звукова хвиля падає на стінку та виходить з неї;

c_1, c_2 - швидкість звуку в повітрі та в стінці виробничої будівлі, м/с.

В свою чергу, r_{cr} дорівнює:

$$r_{cr} = \frac{h}{\cos \Theta_t}.$$

З основного тригонометричного рівняння отримаємо

$$\cos \Theta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right)^2},$$

підставимо цей вираз у r_{cr} .

Отримаємо формулу:

$$r_{cr} = \frac{h}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right)^2}}, \tag{10}$$

де h - товщина стінки.

Хвильовий вектор у різних середовищах різний і знаходиться наступним чином:

$$k_1 = \frac{\omega}{c_1}, k_2 = \frac{\omega}{c_2}. \tag{11}$$

Коефіцієнт проходження T знаходимо за формулою Френеля:

$$T_p = \frac{\sin 2\Theta_i \sin 2\Theta_t}{\sin^2(\Theta_i + \Theta_t) \cos^2(\Theta_i - \Theta_t)},$$

де Θ_i - кут падіння; Θ_t - кут заломлення.

З співвідношення (9) витікає $\sin \Theta_t = \frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}$,

а кут $\Theta_t = \arcsin\left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right)$.

Визначаємо коефіцієнт проходження (T_{pBC}), звукової хвилі з повітря в стінку виробничої будівлі:

$$T_{pBC} = \frac{\sin 2\Theta_i \left[2 \left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right)^2} \right]}{\sin^2\left(\Theta_i + \arcsin\left[\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right]\right) \cos^2\left(\Theta_i - \arcsin\left[\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2}\right]\right)}. \tag{12}$$

Визначаємо коефіцієнт проходження (T_{pCB}), звукової хвилі з стінки виробничої будівлі в повітря:

$$T_{pCB} = \frac{\sin 2\Theta_t \left[2 \left(\frac{c_2 \sin \Theta_t}{c_1} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{c_2 \sin \Theta_t}{c_1} \right)^2} \right]}{\sin^2 \left(\Theta_t + \arcsin \left[\frac{c_2 \sin \Theta_t}{c_1} \right] \right) \cos^2 \left(\Theta_t - \arcsin \left[\frac{c_2 \sin \Theta_t}{c_1} \right] \right)}. \quad (13)$$

Запишемо для т. М. рівняння хвилі для n-ї кількості ВЕУ:

$$u'_i = \sum_{i=1}^N \frac{T_{pBC_i} T_{pCB_i}}{r_i + r_{cpi} + r_i} \sin \left(\omega t - \left(\frac{\omega r_i}{c_1} + \frac{\omega}{c_2} \frac{h}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_1 \sin \Theta_i}{c_2} \right)^2}} + \frac{\omega r'_i}{c_1} \right) \right). \quad (14)$$

Для більш повного прогнозу рівня звукового тиску на відкритій місцевості та в середині виробничої будівлі, від вітроенергетичних установок, необхідно врахувати вплив метеорологічних умов та вплив поверхні землі.

5. Висновки

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що вітроенергетичні установки є джерелом шумового забруднення системи „працівник-вітроенергетична установка-середовище”.

Для забезпечення комфортних умов ефективної діяльності працівників вітроенергетичної станції була розроблена математична модель. За допомогою якої можна визначити оптимальне взаємне розташування вітроелектричних установок на ВЕС з метою нормалізації рівня звукового тиску на робочих місцях, що дозволить удосконалити ергономічні умови для трудової діяльності.

Література

1. Гюлев, Н. У. Особливості ергономіки та психофізіології в діяльності водія: навч. посібник [Текст] / Н. У. Гюлев // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ. - 2012. – 185 с.
2. Yoshinori, N. Effects of splitting a ground board on wind turbine noise measurements [Текст] / Nii Yoshinori // Acoustic Sci. & Tech., 24, 2. – 2003. - p. 90 – 92.
3. Leventhall, G. Notes on Low Frequency Noise from Wind Turbines with special reference to the Genesis Power Ltd Proposal, near Waiuku NZ [Текст] / Geoff Leventhall, UK – 2004. – 20 p.
4. Migliore, P. Acoustic Tests of Small Wind Turbines [Текст] / P. Migliore, J. van Dam, A. Huskey // National Renewable Energy Laboratory. – Colorado. – 2003. – 17 p.
5. Moorhouse, A. Research into Aerodynamic Modulation of Wind Turbine Noise: Final report [Текст] / Andy Moorhouse, Malcolm Hayes, Sabine von Hunerbein, Ben Piper, Mags Adams // University of salford a greater Manchester university – Manchester. – 2000. – 58 p.
6. Хромов, С. П. Метрология и климатология: Учебник 5-е изд, перераб. и доп. [Текст] / С. П. Хромов, М. А. Петросянц // Моск. гос. универ. – М. : МГУ. – 2001. – 528 с.
7. Справочник по технической акустике [Текст] / Под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера – Л. : Судостроение. – 1980. – 440 с.
8. Тэйлор, Р. Шум [Текст] / пер. с англ. Д. И. Арнольда. под ред. М. А. Исааковича - М., Мир. – 1978. – 308 с
9. Потенциал ветровой энергии в Украине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://esco-ecosys.narod.ru/2005_11/art07_71_1.htm.
10. Український гідрометеорологічний центр [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.gov.ua/ua/>.