

**Б. І. Мокін, д. т. н., проф.; О. Б. Мокін, д. т. н., доц.;  
В. П. Базалицький; В. В. Горенюк**

## **ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ, ЯКА МОЖЕ БУТИ ОТРИМАНА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВІТРОВОГО ПОТОКУ, СТВОРЮВАНОВОГО ЗАЛІЗНИЧНИМ ПОТЯГОМ**

*У роботі викладено результати експериментального дослідження вітрових потоків, створюваних залізничним потягом, виконаного з метою оцінювання потужності, яку можна відібрати від цих потоків за допомогою вітроенергетичної установки, розміщеної біля залізничної колії.*

***Ключові слова:** залізничний транспорт, вітроенергетика, вітрові потоки, вітроенергетична установка, оцінювання потужності, експеримент.*

### **Вступ**

Відомо [1, 2], що потужність  $P_{ен}$  (Вт), яка відбирається у вітрового потоку, що має густину  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), за допомогою вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання і площею осьового перерізу вітрового колеса  $S_o$  (м<sup>2</sup>) та коефіцієнтом потужності  $\varepsilon$ , є пропорційною цій площі та кубу швидкості  $v_{ен}$  (м/с) вітрового потоку, тобто

$$P_{ен} = \varepsilon \frac{S_o}{2} \rho v_{ен}^3. \quad (1)$$

А кожен, хто стояв на пероні вокзалу під час проходження без зупинки вантажного потяга, міг переконатися в тому, що швидкості вітрових потоків, створюваних цими потягами під час руху, можуть сягати значних величин, а за надвисоких швидкостей потягів досягати швидкості штормового вітру. На сьогодні енергія цих вітрових потоків розсіюється в атмосфері без жодної користі, у той час як її можна використовувати для генерації електричної енергії за допомогою вітроенергетичної установки, розміщеної поряд із залізничною колією.

Нагадаємо, що для живлення додаткового обладнання (допоміжних систем) залізничного господарства використовують спеціальні додаткові лінії електропередачі, які тягнуться вздовж усього залізничного шляху, що призводить до суттєвих і витрат, і втрат електроенергії [3]. Існує також проблема підвищення надійності електропостачання додаткового обладнання залізничних ліній.

На наш погляд, суттєвий внесок у розв'язання цих проблем можна зробити шляхом підключення до системи електропостачання залізничного господарства вітроенергетичних установок, розташованих біля залізничної колії, що перетворюватимуть енергію вітрових потоків, створюваних потягами, в електричну енергію.

У роботі [4] нами вже розглянуто питання створення нових спеціальних вітроенергетичних установок (ВЕУ) та визначення умов їх розташування вздовж залізничних шляхів для перетворення енергії вітрового потоку, який створює потяг під час руху, в електричну енергію, яку планується використовувати для живлення допоміжного обладнання залізничних колій, населених пунктів, розташованих поблизу залізничних шляхів, або для рекуперації чи накопичення енергії. Але в цій роботі не були розглянуті

питання кількісної оцінки енергії, що вироблятиметься вітроенергетичними установками, на які будуть спрямовані вітрові потоки, створювані потягами, що проходять поруч.

У роботі [5] нами було здійснено кількісне оцінювання потужності вітрових потоків, які створює потяг під часу руху, але з використанням даних, наведених Американською залізничною асоціацією в роботі [6].

З метою уточнення результатів цього оцінювання та наближення до реалій експлуатації вітчизняного залізничного транспорту ми провели власний експеримент з вимірювання характеристик вітрового потоку, створюваного залізничним потягом, за допомогою оригінальної вимірювальної установки, сконструйованої нами спеціально для вимірювання вітрових потоків, створюваних потягами, детальний опис якої здійснено в нашій роботі [7].

### Опис умов і місця проведення експерименту та характеристика вимірних величин

Для проведення експерименту було обрано відрізок залізничного шляху недалеко від м. Вінниці на закритому переїзді с. Парпурівці. Це місце було обрано з дозволу залізничної адміністрації, виходячи з міркувань зручного монтування вимірювальної установки, зручного дорожнього під'їзду та відносно великої швидкості руху потягів.

Оскільки безпечна відстань від залізничного полотна згідно з нормативними документами складає 3 м, експериментальна вимірювальна установка була розміщена саме на цій відстані (рис. 1) перпендикулярно до колії, тобто перпендикулярно до осі вітрових потоків, що рухаються паралельно з потягом.



Рис. 1. Місце розміщення експериментальної вимірювальної установки (рамку сенсорів обведено червоною лінією)

Як видно з рис. 1, сенсори розміщувалися по чотири у три стовпці на відстані 3, 4, 5 м від колії відповідно.

Дані на комп'ютер записувались одночасно для кожного з сенсорів швидкості з інтервалом в 1 секунду у вигляді пачок імпульсів, кожна з яких містила кількість імпульсів, пропорційну швидкості обертання валів цих сенсорів (рис. 2). Повірка кожного вимірювального каналу була здійснена в аеродинамічній трубі кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів (ВЕТЕСК) Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) за допомогою еталонного анемометра. Для Наукові праці ВНТУ, 2013, № 2

всіх вимірювальних каналів були побудовані залежності швидкості вітрових мас у функції кількості дискретних імпульсів сенсорів [7].

```

7,8,8,6,7,7,8,5,13,2,15
5,8,7,5,6,7,7,5,12,3,13
6,8,6,4,6,7,7,4,13,2,12
6,7,7,5,7,7,7,4,12,3,12
5,8,6,4,7,8,8,4,11,3,11
7,8,6,6,7,8,9,5,12,4,11
4,6,5,4,6,7,8,4,11,3,10
7,7,5,5,6,8,13,4,13,9,13
6,8,7,17,8,29,57,4,20,43,14
6,8,13,25,13,35,73,5,34,71,17
10,11,22,50,15,37,83,7,50,93,20
25,29,49,59,34,60,93,24,67,74,31
48,32,59,79,35,62,82,31,72,41,33
58,31,57,78,36,50,90,35,71,58,27
61,27,92,98,42,87,143,33,69,127,42
62,33,68,72,39,75,110,41,79,90,46
63,45,72,94,55,84,124,39,92,97,49
94,87,103,138,113,116,163,77,120,77,68
90,76,75,127,82,85,121,59,98,65,68
83,63,65,113,69,95,127,56,98,90,55
57,73,72,82,69,91,108,50,96,79,68
71,96,93,88,63,92,107,35,86,71,112
65,88,102,100,75,98,116,50,87,74,93
66,80,84,96,75,87,113,44,76,72,88
61,62,64,80,59,77,103,39,63,61,66
74,52,59,85,50,71,109,36,61,79,55
64,43,50,73,44,73,114,39,79,96,50
50,40,43,62,49,66,97,36,71,81,49

```

Рис. 2. Формат отриманих експериментальних даних

Усі отримані під час проходження потяга показання сенсорів вносились до матриці вхідних значень F1 у пакеті прикладних програм (ППП) Mathcad (рис. 3).

Експериментальні дані знімалися під час проходження вантажного потяга з локомотивом ВЛ80к та змішаним складом вагонів у кількості 56 шт. Швидкість руху потяга складала 66 кілометрів за годину, а час його проходження повз експериментальну вимірювальну установку становив 45 секунд.

|         | 1   | 2   | 3   | 4  | 5   | 6   | 7   | 8  | 9  | 10  | 11 | 12  |
|---------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|
| 47      | 74  | 93  | 59  | 25 | 67  | 60  | 49  | 28 | 24 | 34  | 29 | 31  |
| 48      | 41  | 82  | 79  | 48 | 72  | 62  | 59  | 41 | 31 | 35  | 32 | 33  |
| 49      | 58  | 90  | 78  | 58 | 71  | 50  | 57  | 43 | 35 | 36  | 31 | 27  |
| 50      | 127 | 143 | 98  | 61 | 69  | 87  | 92  | 52 | 33 | 42  | 27 | 42  |
| 51      | 90  | 110 | 72  | 62 | 79  | 75  | 68  | 54 | 41 | 39  | 33 | 46  |
| 52      | 97  | 124 | 94  | 63 | 92  | 84  | 72  | 56 | 39 | 55  | 45 | 49  |
| 53      | 77  | 163 | 138 | 94 | 120 | 116 | 103 | 81 | 77 | 113 | 87 | 68  |
| F1 = 54 | 65  | 121 | 127 | 90 | 98  | 85  | 75  | 79 | 59 | 82  | 76 | 68  |
| 55      | 90  | 127 | 113 | 83 | 98  | 95  | 65  | 69 | 56 | 69  | 63 | 55  |
| 56      | 79  | 108 | 82  | 57 | 96  | 91  | 72  | 63 | 50 | 69  | 73 | 68  |
| 57      | 71  | 107 | 88  | 71 | 86  | 92  | 93  | 92 | 35 | 63  | 96 | 112 |
| 58      | 74  | 116 | 100 | 65 | 87  | 98  | 102 | 79 | 50 | 75  | 88 | 93  |
| 59      | 72  | 113 | 96  | 66 | 76  | 87  | 84  | 77 | 44 | 75  | 80 | 88  |
| 60      | 61  | 103 | 80  | 61 | 63  | 77  | 64  | 64 | 39 | 59  | 62 | 66  |
| 61      | 79  | 109 | 85  | 74 | 61  | 71  | 59  | 65 | 36 | 50  | 52 | 55  |
| 62      | 96  | 114 | 73  | 64 | 79  | 73  | 50  | 57 | 39 | 44  | 43 | ... |

Рис. 3. Матриця вхідних даних для ППП Mathcad

Побудувавши отримані залежності у функції часу, отримаємо графік, який відображає зміну швидкостей для кожного каналу вимірювання у функції часу і який наведено на рис. 4 в координатах: вісь абсцис – секунди, вісь ординат – метри за секунду.

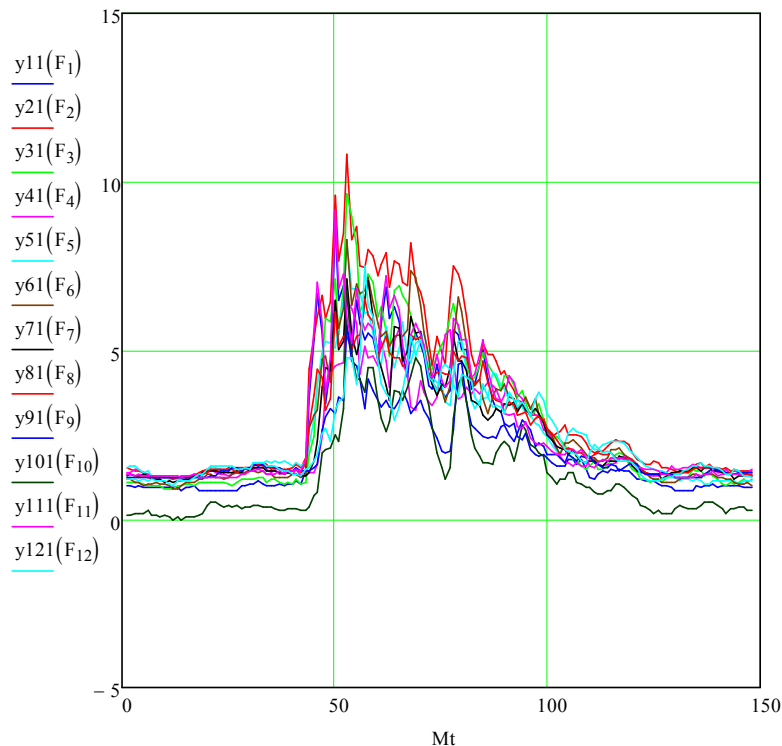


Рис. 4. Графіки швидкості вітрових потоків, виміряної кожним з вимірювальних каналів

З рис. 4 чітко видно момент часу ( $M_t = 43 \text{ c}$ ), у який потяг досягає вимірювальної установки, та те, що вітровий потік збільшується в декілька разів порівняно зі значеннями природної швидкості вітру. Цікавим є той факт, що після проходження потяга ( $M_t = 88 \text{ c}$ ) ще деякий час  $t_n$ , який становить за швидкості потяга 66 кілометрів за годину приблизно  $35 \text{ c}$  (аж до  $M_t^* = 121 \text{ c}$ ), спостерігається помітне перевищення швидкості вітрового потоку над її значенням у незбуреному потягом стані.

#### Обробка результатів експерименту

Для визначення потужності вітрового потоку, який перетинає площу рамки вимірювальної установки, сенсорами в якій слугують 12 вітрових коліс невеликого діаметра з горизонтальною віссю обертання, використаємо вираз (1), який для кожного вимірювального каналу матиме вигляд

$$P_i = \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{S \cdot V_i^3}{2}, \quad i = 1, \dots, 12, \quad (2)$$

де  $S$  – площа круга з діаметром, що дорівнює діаметру колеса вітрового сенсора.

Використовуючи криві швидкостей, представлені на рис. 4, та кубічні сплайни для реалізації виразу (2) у ППП Mathcad, отримаємо

$$P_i(u) = \text{int erp}(cspline(M_t, P_i), M_t, P_i, u). \quad (3)$$

Графіки потужностей вітрових потоків за час проходження потяга по кожному з вимірювальних каналів, що розраховані за виразом (3), відображено на рис. 5 у координатах: вісь абсцис – секунди, вісь ординат – вати.

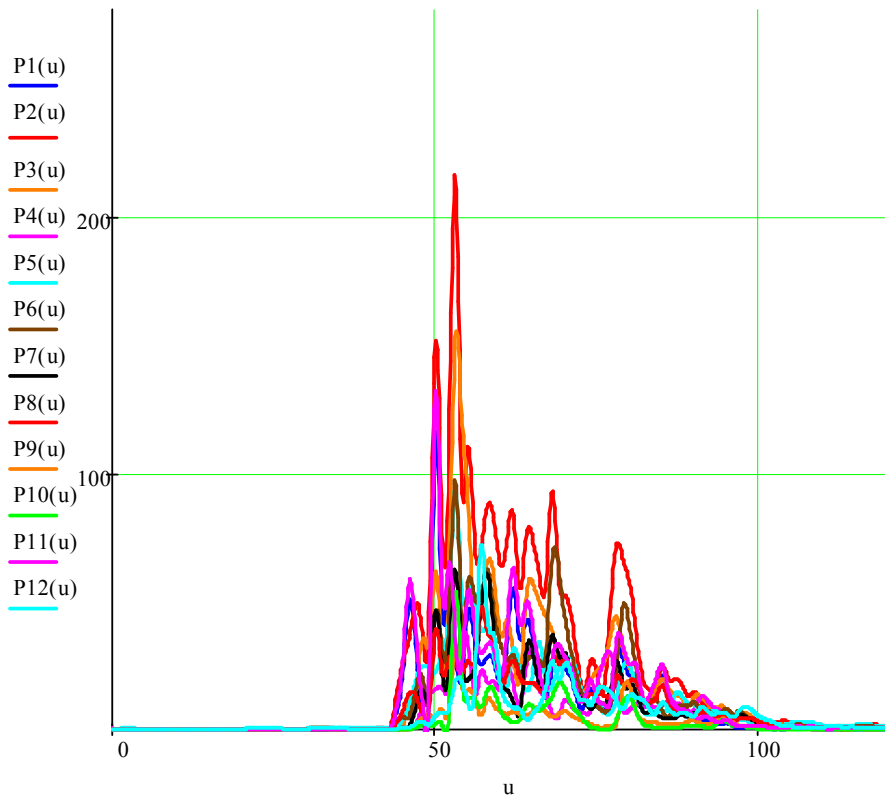


Рис. 5. Графіки потужностей вітрових потоків у функції часу для кожного з вимірювальних каналів

Із цих графіків видно, що потужності вітрових потоків відрізняються між собою залежно від місця розташування сенсора. Для більшої наочності покажемо це на тривимірному графіку, який відображає кількість отриманої потужності за кожним з вимірювальних каналів у відповідності до їхнього розміщення в рамці вимірювальної установки. Для цього кожен із залежностей, що визначає потужність вітрового потоку за кожним вимірювальним каналом, проінтегруємо в межах часу від  $M_t = 43\text{ c}$  до  $M_t^* = 121\text{ c}$  та розділимо на інтервал інтегрування  $(M_t^* - M_t)$  і в такий спосіб знайдемо середню потужність  $P_{S_i}, i = 1, 2, \dots, 12$  вітрового потоку за кожним вимірювальним каналом

$$P_{S_i} = \frac{1}{121 - 43} \int_{43}^{121} P_i(u) du, \quad i = 1, 2, \dots, 12. \quad (4)$$

Для прив'язки значень середньої потужності  $P_{S_i}, i = 1, 2, \dots, 12$  вітрового потоку за кожним вимірювальним каналом, розрахованих за виразом (4), до місця розташування сенсорів швидкості на рис. 6 показана в різних кольорах у вигляді квадратів схема розміщення в рамці вимірювальної установки всіх вимірювальних сенсорів у проекції «вид спереду» за напрямком руху потяга.

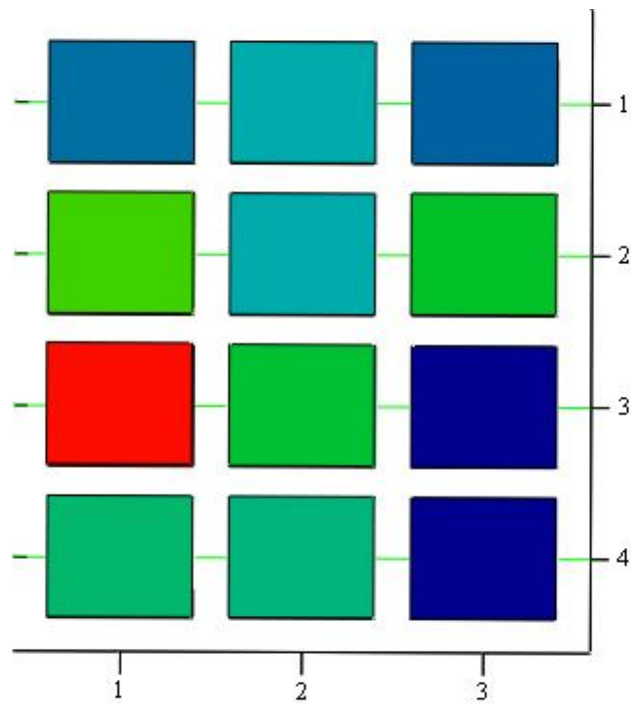


Рис. 6. Розмічена різними кольорами схема розміщення сенсорів швидкості в рамці вимірювальної установки (вид спереду за ходом потяга)

Цій схемі відповідає матриця середніх потужностей, що має вигляд

$$P_s = \begin{pmatrix} P_{s4} & P_{s8} & P_{s12} \\ P_{s3} & P_{s7} & P_{s11} \\ P_{s2} & P_{s6} & P_{s10} \\ P_{s1} & P_{s5} & P_{s9} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Після проведення розрахунків за виразом (4) ця матриця наповнюється такими значеннями сумарних потужностей (виражених у ватах):

$$P_s = \begin{pmatrix} 9.924 & 12.263 & 9.276 \\ 22.357 & 12.338 & 18.399 \\ 35.016 & 17.96 & 4.468 \\ 15.495 & 14.71 & 4.511 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

А на рис. 7 і 8 показано просторові графіки середніх потужностей, розрахованих за виразом (4), що відповідають наведеному на рис. 6 розташуванню сенсорів швидкості, причому на рис. 7 показано просторове зображення у вигляді стовпців відповідної висоти, заданої матрицею (6), а на рис. 8 показано згладжену поверхню, яка відображає зміни значень потужностей по всій площі рамки вимірювальної установки, у якій встановлені сенсори швидкості.

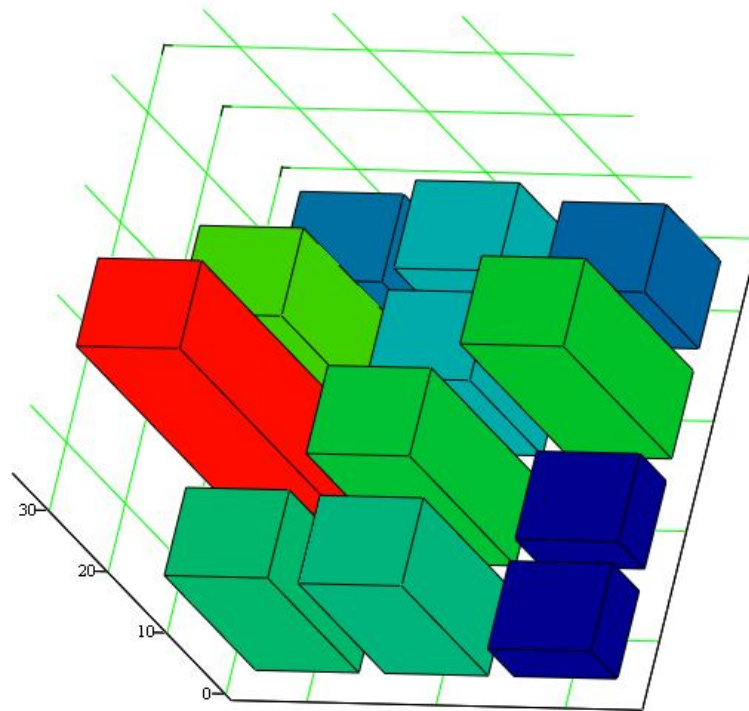


Рис. 7. Діаграма середніх потужностей, отриманих за кожним з вимірювальних каналів за час  $M_t^* - M_t$

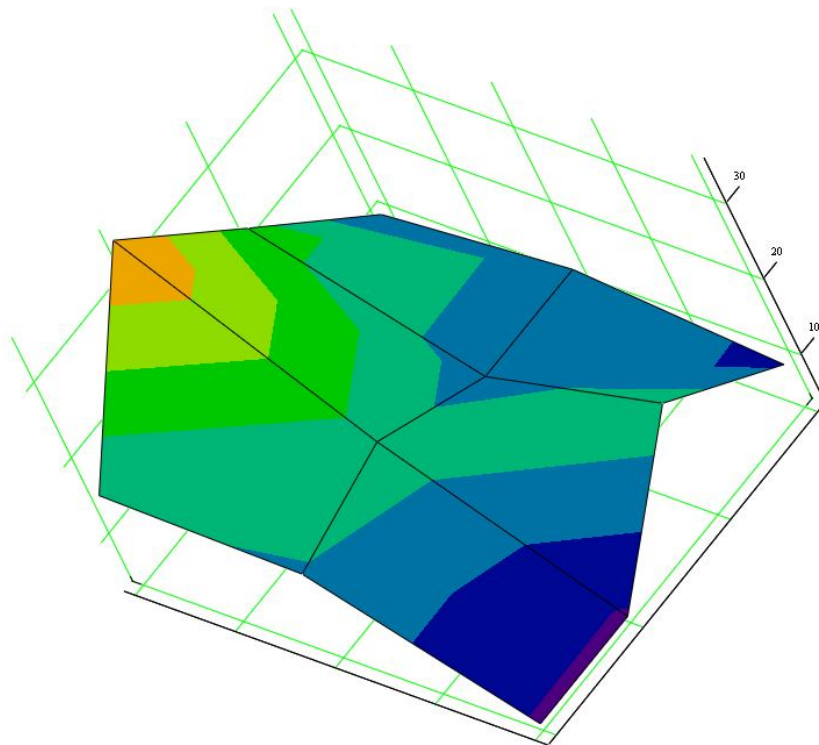


Рис. 8. Поверхня середньої потужності вітрового потоку, вимірної експериментальною вимірювальною установкою, з відображенням внеску кожного з вимірювальних каналів

Для оцінки ж сумарної потужності вітрового потоку  $P_{s\Sigma}$ , що пройшов через сенсорну рамку вимірювальної установки за час збурення повітряних мас, зумовлених проходженням потяга повз неї, підрахуємо суму потужностей за всіма вимірювальними каналами і визначимо, що



$$P_{S_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^{12} P_{S_i} = 176.715 \text{ (Вт)}. \quad (7)$$

Під час проведення експерименту, окрім вантажного потяга, повз вимірювальну установку пройшло також декілька пасажирських потягів з однопрофільними вагонами обтічної форми і декілька приміських електропоїздів. Під час їхнього проходження сенсорами експериментальної вимірювальної установки було зафіксовано незначні збурення повітряних мас і виміряно зовсім малі значення потужностей, що відбираються від вітрових потоків, створюваних потягами цього класу, до того ж без суттєвих відмінностей по всій площі вимірювання. Тобто бокові аеродинамічні потоки, зумовлені цими потягами, є суттєво менш потужними порівняно з тими потоками, що створюються вантажними потягами з різнопрофільними вагонами. Вони є більш витягнутими за потягом і майже не розходяться в сторони, як у випадку із вантажними потягами з різнопрофільними вагонами.

Отже, пріоритетним використанням ВЕУ є ті ділянки залізниці, на яких інтенсивність руху вантажних потягів є достатньо високою.

Ми експериментально дослідили й визначили ту кількість потужності, яку можна відібрати від вітрових потоків, створюваних вантажним потягом, який проходив повз вимірювальну установку зі швидкістю 66 кілометрів за годину. Але в Україні є досить багато ділянок залізниці, на яких вантажним потягам дозволена швидкість у півтора раза більша. А в недалекому майбутньому по окремих ділянках української залізниці вантажні потяги рухатимуться і зі швидкостями у два рази вищими.

І оскільки потужність, що відбирається вітроенергетичною установкою від вітрового потоку, є пропорційною кубу швидкості цього потоку, то в разі збільшення швидкості вантажного потяга до рівня 100 кілометрів за годину потужність, що відбиратиметься ВЕУ від вітрового потоку, створюваного цим потягом, буде у 3,5 рази більшою за ту, яку ми розраховали вище. А в разі збільшення швидкості вантажного потяга у два рази, тобто до 132 кілометрів за годину, потужність, що відбиратиметься ВЕУ від вітрового потоку, створюваного цим потягом, буде у 8 разів більшою за ту, яку ми розраховали вище. А це уже серйозний внесок у альтернативну енергетику.

### Висновки

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити такі висновки:

1. Польові випробування експериментальної вимірювальної установки, розробленої на кафедрі ВЕТЕСК ВНТУ для вимірювання швидкості вітрових потоків, створюваних залізничними потягами під час руху, підтвердили її високу вимірювально-обчислювальну ефективність та експериментопридатність.

2. Установлено, що досить потужні вітрові потоки на дозволений нормативними документами триметровій відстані від залізничної колії створюються лише вантажними потягами з різнопрофільними вагонами, які рухаються зі швидкостями, вищими за 60 кілометрів за годину.

3. Запропоновано вважати економічно ефективним установлення вітроенергетичних установок біля залізничної колії на ділянках, які характеризуються високою інтенсивністю руху вантажних потягів зі швидкостями 90 кілометрів за годину і вище.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фатеев Е. М. Ветродвиатели и ветроустановки / Фатеев Е. М. – М : Сельхозгпз, 1948. – 545 с.
2. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы / Мхитарян Н. М. – К. : Наукова думка, 1999. – 320 с.
3. Иванов Э. А. Электрическая централизация трілок и светофоров / Э. А. Иванов, О. Н. Масловская, О. И. Колотова. – М : Маршрут, 2002. – 167 с.
4. Мокін Б. І. Вітроелектротехнічні комплекси для відбору потужності вітрових потоків, створюваних



електропотягами / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 4 – С. 111 – 113.

5. Мокін Б. І. Оцінка потужності, яка може бути отримана з вітрового потоку, створюваного рухом залізничного потяга / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 81 – 84.

6. Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains : (Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference Washington, DC, April 23-25, 2002) [Електронний ресурс] / Robert A. MacNeill and Samuel Holmes. – Режим доступу: <http://www.acusim.com/papers/Train-Aero-Paper.pdf>.

7. Мокін Б. І. Структура та характеристики лабораторного стенда для оцінки енергетичного потенціалу вітрових потоків / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. П. Базалицький, В. В. Горенюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 69 – 72.

**Мокін Борис Іванович** – акад. НАПН України, д. т. н., професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, тел.: (0432) 598-223.

**Мокін Олександр Борисович** – д. т. н., доцент, завідувач кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, тел.: (0432) 598-223.

**Базалицький Вадим Павлович** – аспірант кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, тел.: (093) 031-47-90.

**Горенюк Віктор Васильович** – інженер 1-ої категорії, кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, тел.: (0432) 598-223.

Вінницький національний технічний університет.