

УДК 620.92

Б. І. Мокін, акад. НАПН України, д-р. техн. наук, проф.;
О. Б. Мокін, канд. техн. наук, доц.; **В. П. Базалицький, асп.**

ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ, ЯКА МОЖЕ БУТИ ОТРИМАНА З ВІТРОВОГО ПОТОКУ, СТВОРЮВАНОВОГО РУХОМ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОТЯГУ

Здійснено оцінку потужності, яка може бути отримана з вітрового потоку, створюваного рухом залізничного потягу.

Вступ

Залізничний транспорт є одним із найбільших споживачів електроенергії в країні, це і не дивно з огляду на той факт, що цей вид транспорту є основним в плані перевезення людей і товарів.

Виходячи з теорії газів та рідин, на тіло, що рухається в деякому середовищі, діє сила опору, створювана даним середовищем. Не виключенням є і залізничний транспорт, який під час руху стикається як з лобовим так і з боковим опором повітряних мас. Опір руху збільшується з ростом швидкості потяга, що потребує додаткової потужності тягових двигунів. Авторами висувається ідея використання аеродинамічних потоків, створених потягом, для забезпечення повернення частини енергії, використаної транспортним засобом, у вигляді електроенергії.

Розв'язання задачі

Авторами в роботі [1] запропоновано структури пристроїв для відбору такої потужності. Тепер, ставиться задача кількісної оцінки потужності вітрових потоків, які створює залізничний потяг під час руху.

З цією метою, було використано експериментальні залежності, що показують характер дії потяга на розташований поряд об'єкт. В експерименті, проведеному американською залізничною асоціацією та описаному в роботі [2], потяг проходив повз розташовану поруч залізничну платформу, з розміщеними на ній контейнерами (рис. 1) на швидкості 130 миль/год.



Рис. 1. Експериментальна установка з розміщеними на ній датчиками тиску

За допомогою розміщених на контейнерах тензодатчиків була отримана емпірична залежність тиску (рис. 2), який створює потяг при проходженні повз дану установку.

Для представлення емпіричної залежності в математичному вигляді, дану залежність, з метою математичного опису, розбито на більш прості відрізки (рис. 3).

Як приклад, розглянемо процедуру опису емпіричної залежності на відріжку 1 графіка, зображеного на рис. 3. Проведені розрахунки показують, що залежність на цьому відріжку можна описати поліномом четвертого порядку, тому рівняння квадрату похибки матиме вигляд

$$\sum_{i=1}^N \left(at_i^4 + bt_i^3 + ct_i^2 + dt_i + g - p_i(t) \right)^2 \quad (1)$$

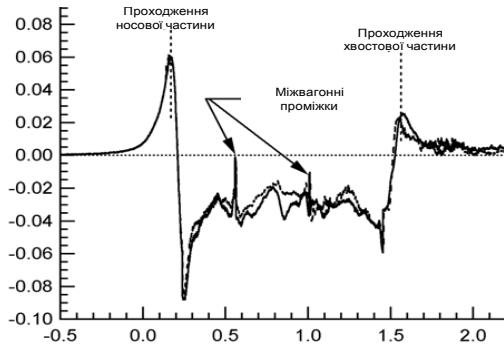


Рис. 2. Діаграма тиску, що діє на контейнер при проходженні його потягом на швидкості 130 миль/год(208 км/год)

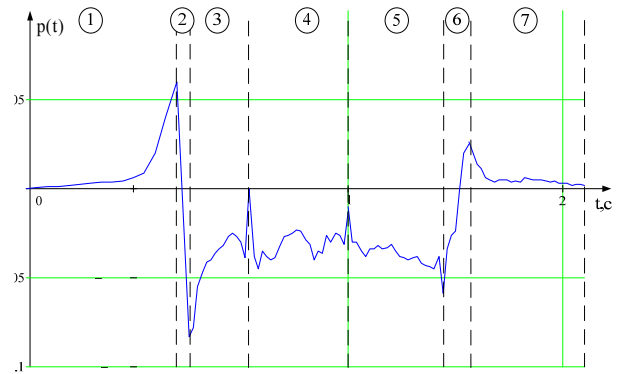


Рис. 3. Графік експериментальної залежності $p(t)$, розбитий на відрізки

А далі згідно з алгоритмом МНК продиференціюємо вираз (1) у частинних похідних за кожним із невідомих коефіцієнтів поліному (a, b, c, d, g), та провівши деякі нескладні арифметичні перетворення, отримаємо систему рівнянь Гауса у вигляді

$$\begin{cases} q \cdot N + d \cdot \sum_{i=1}^N t_i + c \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^N t_i^3 + a \cdot \sum_{i=1}^N t_i^4 = \sum_{i=1}^N p_i; \\ q \cdot \sum_{i=1}^N t_i + d \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^N t_i^3 + b \cdot \sum_{i=1}^N t_i^4 + a \cdot \sum_{i=1}^N t_i^5 = \sum_{i=1}^N p_i \cdot t_i; \\ q \cdot \sum_{i=1}^N t_i^2 + d \cdot \sum_{i=1}^N t_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^N t_i^4 + b \cdot \sum_{i=1}^N t_i^5 + a \cdot \sum_{i=1}^N t_i^6 = \sum_{i=1}^N p_i \cdot t_i^2; \\ q \cdot \sum_{i=1}^N t_i^3 + d \cdot \sum_{i=1}^N t_i^4 + c \cdot \sum_{i=1}^N t_i^5 + b \cdot \sum_{i=1}^N t_i^6 + a \cdot \sum_{i=1}^N t_i^7 = \sum_{i=1}^N p_i \cdot t_i^3; \\ q \cdot \sum_{i=1}^N t_i^4 + d \cdot \sum_{i=1}^N t_i^5 + c \cdot \sum_{i=1}^N t_i^6 + b \cdot \sum_{i=1}^N t_i^7 + a \cdot \sum_{i=1}^N t_i^8 = \sum_{i=1}^N p_i \cdot t_i^4. \end{cases} \quad (2)$$

Розв'язавши систему (2), отримаємо коефіцієнти поліному, який описує графік зміни тиску на відріжку 1

$$p(t) = 1,718t^4 + 1,786t^3 + 0,587t^2 + 0,073t + 5,946 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Аналогічним чином знайдено поліноми, які описують зміну тиску для кожної з інших відрізків емпіричної залежності. В результаті, отримано кусково-неперервну функцію залежності тиску від часу, на всьому проміжку взаємодії потягу з поряд розташованим об'єктом $p_{\Sigma}(t)$:

$$p_{\Sigma}(t) = \begin{cases} p(t) = 1,718t_i^4 + 1,786t_i^3 + 0,587t_i^2 + 0,073t_i + 5,946 \cdot 10^{-3}, & \text{якщо } -0,5 \leq t < 0,2; \\ p(t) = -10,321t^2 + 2,364t, & \text{якщо } 0,2 \leq t < 0,26; \\ p(t) = -0,8671t^2 + 0,889t - 0,25, & \text{якщо } 0,26 \leq t < 0,54; \\ p(t) = 0,012t - 0,039, & \text{якщо } 0,54 \leq t < 1; \\ p(t) = -0,049t + 0,023, & \text{якщо } 1 \leq t < 1,44; \\ p(t) = 0,689t - 1,048, & \text{якщо } 1,44 \leq t < 1,56; \\ p(t) = 0,015t^3 + 0,015t^2 - 0,23t + 0,281, & \text{якщо } 1,56 \leq t < 2,1. \end{cases} \quad (4)$$

Однією з основних переваг вітроенергетичних установок (ВЕУ) з вертикальною віссю є відсутність необхідності встановлення ВЕУ в напрямку руху повітряних мас [3, 4, 5], тобто необхідність налаштування ВЕУ на вітер, адже вона захоплює вітер з будь-якого боку. Тому, можна визначити сумарну кількість енергії, яку отримає ВЕУ внаслідок проходження повз нього потягу, проінтегрувавши модуль функції $P_s(t)$ за часом взаємодії потяга з ВЕУ:

$$P_{\Sigma} = \int_{t_{\text{поч.}}}^{t_{\text{кін}}} |P_s(t)| dt. \quad (5)$$

Із закону Бернуллі [6] відомо, що тиск F_n формується сумою двох складових

$$F_n = F_{\text{ст}} + F_{\text{дин}}, \quad (6)$$

де $F_{\text{ст}}$ – статична складова тиску (Па); $F_{\text{дин}}$ – динамічна складова тиску (Па), яка визначається як

$$F_{\text{дин}} = \rho \frac{V^2}{2}. \quad (7)$$

Припустимо, що за час проходження окремо взятого потягу повз ВЕУ значення постійної складової тиску залишається незмінним. Тоді, повний тиск на ВЕУ буде визначатись тільки динамічною складовою.

Із залежності (7) вираз для швидкості переміщення повітряних мас, які створюються завдяки тиску від потягу, матиме вигляд

$$V = \sqrt{\frac{2F_n}{\rho}}. \quad (8)$$

Якщо підставити значення V із (8) у відомий [3] вираз для знаходження повної потужності P_B ВЕУ, то отримуємо:

$$P_B = \rho S \frac{\left(\sqrt{\frac{2F_n}{\rho}} \right)^3}{2} \quad (9)$$

або

$$P_B = S \sqrt{\frac{2F_n^3}{\rho}}. \quad (10)$$

Для оцінки енергоефективності зведемо отриману залежність у форму, в якій енергія вимірюється у Джоулях

$$E = S \sqrt{\frac{2F_n^3}{\rho}} t_B, \quad (11)$$

де t_B – час взаємодії потяга з сенсором тиску.

З метою універсалізації даної залежності, тобто визначення корисної потужності для різних швидкостей, було введено коефіцієнт зміни потужності

$$K_m = \frac{V}{V_{\text{max}}}, \quad (12)$$

де V_{max} – швидкість, яка становить 130 миль/год., і приймається максимальною для даних розрахунків.

Для врахування зміни часу проходження потяга повз ВЕУ із зміною швидкості введено коефіцієнт залежності часу проходження t_B від швидкості потягу

$$K_{\text{ч}} = \frac{V_{\text{max}} \cdot t_{\text{max}}}{V t_B} = \frac{V_{\text{max}}}{V}, \quad (13)$$

де t_{\max} — час проходження ВЕУ при швидкості V_{\max} .

Для універсалізації розрахунків перейдемо до відносних одиниць, зауваживши, що площа омаху вітроустановки S і щільність повітря ρ залишаються сталими

$$E = S \sqrt{\frac{2(K_{\text{пер}} P_n K_m)^3}{\rho}} t_B K_{\text{ч}}. \quad (14)$$

Побудовано графік залежності кількості виробленої потягом енергії у функції швидкості (рис. 4).

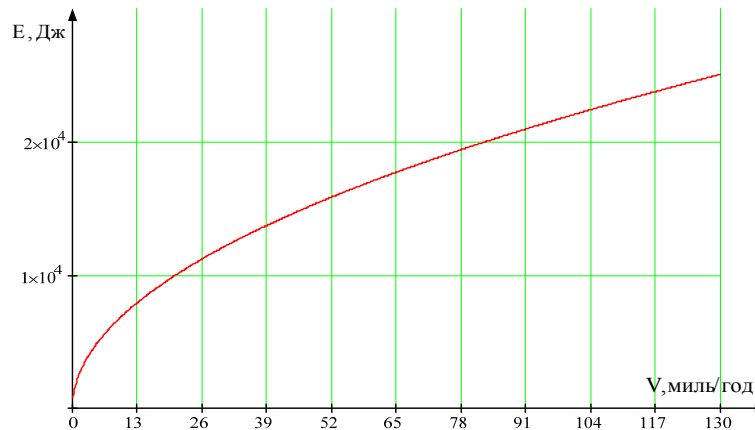


Рис. 4. Графік залежності кількості виробленої потягом енергії у функції швидкості

Висновки

1. Запропоновано математичну модель, яка відтворює експериментальну залежність, встановлену в роботі [2], що характеризує вплив потягу на розташовані поряд об'єкти.

2. Для універсалізації розрахунків введені коефіцієнти зміни тиску і часу проходження в функції швидкості руху потягу, що дозволило розраховувати потужності для різних швидкісних груп електропотягів. Показано, що зміна швидкості руху повітряних мас відносно швидкості потяга на робочій ділянці характеристики змінюється параболічно, причому, починаючи зі швидкості 40 миль/год графік стає лінійним.

3. Встановлено, що при швидкостях 80...100 км/год питома потужність, яку створює потяг, досягає значень, використання яких стає економічно вигідним. Оскільки такі швидкості є нормальними для руху потягів в нашій країні, то встановлення ВЕУ вздовж залізничної колії має перспективу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.

2. Aerodynamic effects of high-speed trains research result / U. S. department of transportation // Federal railroad administration — RR03-07 2003.

3. Фатеев Е. М. Ветроудвигатели и ветроустановки / Е. М. Фатеев. — М.: Сельхозгпз, 1948. — 545 с.

4. Янсон Р. А. Ветроустановки / Р. А. Янсон. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 38 с.

5. Шихайлов Н. А. Виды ветроустановок [Електронний ресурс]: за матеріалами сайту ООО «ФЛАЙ-ТЕК» / Н. А. Шихайлов. — 2009. — Режим доступу: fly-tech.com.ua/vidy.doc

6. Ландау Л. Д. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — изд. 5-е. — М., 2003. — 736 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів

Стаття надійшла до редакції 14.10.11

Рекомендована до друку 25.11.11

Мокін Борис Іванович — професор, **Мокін Олександр Борисович** — завідувач кафедри, **Базалицький Вадим Павлович** — аспірант.

Кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, Вінниця