



---

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-3-1>

УДК 620.92

С. В. Галько, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

Т. І. Галько, ст. викладач

ORCID: 0009-0002-6438-9636

Д. М. Зеленков, аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: galkosv@gmail.com

### МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКЦІЙНИХ ВІТРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ НАГРІВАЧІВ

*Анотація.* Для безпосереднього перетворення енергії вітру на теплову розроблено і запатентовано проточний індукційний вітроелектромеханічний нагрівач, принцип роботи та експериментальні дослідження опубліковано авторами раніше. Нагрівач рекомендується для використання в системах гарячого водопостачання невеликих приватних домогосподарств із метою енергозбереження традиційних джерел енергії.

Для обґрунтування параметрів магнітної системи нагрівача розроблено макет зубчатої магнітної системи і приведено результати експериментальних досліджень електромагнітних величин у повітряному прошарку системи. Виконано математичну обробку результатів експериментальних досліджень. Запропоновано спосіб побудови багатомірних поверхонь із використанням поліному Лагранжа з однією змінною для розрахунків електромагнітних величин у повітряному прошарку подібних зубчатих магнітних систем, а також під час побудови поверхонь відгуку у багатофакторних експериментах. Наведені експериментальні та розрахункові дані показали високу кореляцію між собою.

*Ключові слова:* вітрова енергія, перетворення енергії, індукційні перетворювачі, нагрівання, чисельний аналіз, комп'ютерні мови, поліноми.

*Постановка проблеми.* Сучасна вітроенергетика – одна з найбільш розвинутих і перспективних галузей відновлюваної енергетики. Енергія вітру є одним із джерел відновлюваної енергії, яка найбільш швидко розвивається впродовж останніх десятиріч, забезпечуючи близько 3% світового споживання електроенергії [1–3].

Дослідження в галузі малої вітроенергетики (до 20 кВт) свідчать про те, що світовий ринок цієї галузі відновлюваної енергетики перебуває на початковій стадії розвитку. Згідно з прогнозами Світової вітроенергетичної асоціації, приріст світового сектору малої вітроенергетики з 2015 р. становить близько 125 МВт на рік. Виробники пристроїв для малої вітроенергетики зосереджені у п'яти країнах (Канада, Китай, Німеччина, Англія та США) і займають майже 50% світового ринку [4; 5].

Актуальність і перспективність використання у світі вітроустановок невеликої потужності підсилюються внаслідок інтенсифікації дачного будівництва, розвитку фермерських господарств і великої чисельності споживачів, які віддалені від джерел електричної енергії [6; 7].

Сьогодні відомі способи і пристрої, призначені для перетворення енергії вітру на теплову енергію [8].



Авторами статті запропоновано індукційний спосіб перетворення енергії вітру на теплову, який вигідно відрізняється від відомих [9; 10], і установки для його реалізації [11; 12], які основані на збудженні вихрових струмів у магнітопроводах. Як привідний двигун використовується повітряна турбіна з вертикальною віссю [13; 14]. У результаті аналізу їхньої роботи визначено й виявлено недоліки, а також намічено шляхи усунення динамічних навантажень між магнітопроводами індукційних перетворювачів енергії вітру на теплову енергію, а приклад розрахунку малопотужного вітроелектрогенератора для домогосподарств наведено в роботі [15].

У роботах [16; 17] наведено результати експериментальних досліджень зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку магнітної системи проточного індукційного вітроелектромеханічного нагрівача (для нагріву води, антифризу тощо), але програмні продукти, що розроблені на алгоритмічних мовах для проведення чисельного аналізу багатofакторного експерименту для обробки отриманих експериментальних даних, відсутні, тому розроблення способу побудови багатомірної поверхні зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку зубчатої магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітра на теплову енергію є актуальним завданням.

*Аналіз останніх досліджень.* Для обробки експериментальних даних у різних галузях науки, техніки та економіки широко використовуються математичні методи. Сьогодні є велика кількість посібників і монографій, де викладено математичні методи і принципи вивчення різноманітних процесів та об'єктів. У багатьох дослідженнях вивчають вплив одного або декількох факторів на ту чи іншу величину [18; 19]. У найпростішому випадку за впливу фактору « $x$ » на вихідну величину « $y$ » будується залежність  $f(x)$  за допомогою поліномів або сплайнів. Цей метод часто використовується для обробки однофакторних експериментів [20–22]. Аналітичне рішення такої задачі за достатньо великого обсягу даних практично неможливе, що визначає необхідність створення програм із використанням алгоритмічних мов або звернення програмних продуктів типу Matlab. У статті розглядається можливість створення програмного продукту, що забезпечує проведення чисельного аналізу багатofакторного експерименту з використанням одномірного поліному Лагранжа для обробки експериментальних даних, отриманих під час дослідження магнітної системи індукційного вітроелектромеханічного нагрівача для використання в системах гарячого водопостачання або опалення домогосподарств.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою статті є розроблення способу побудови багатомірної поверхні зміни електромагнітних величин у повітряному прошарку зубчатої магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітра на теплову енергію.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі наукові завдання:

- розроблено електромагнітний макет магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітра на теплову енергію для проведення експериментальних досліджень зміни магнітного потоку у повітряному прошарку магнітної системи за зміни його величини і положення зубців відносно один від одного;
- розроблено програму з використанням поліному Лагранжа, що дає змогу розрахувати значення функції (магнітного потоку) декількох змінних (величина повітряного прошарку і переміщення зубців) у будь-якій точці факторного простору;
- обґрунтовано доцільність розробленої програми для математичної обробки експериментальних даних параметрів магнітних систем індукційних вітроелектромеханічних нагрівачів під час побудови поверхонь відгуку у багатofакторних експериментах.

Для проведення досліджень магнітної системи нагрівача було розроблено програму і методику.

У програму досліджень включено:

1. Розроблення електромагнітного макету магнітної системи індукційного перетворювача енергії вітру на теплову енергію.
2. Дослідження залежності повного магнітного потоку полюсної поділки в прошарку від переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора за різних значень величини прошарку.
3. Розроблення способу і програми, що дає змогу розрахувати значення функції декількох змінних у будь-якій точці факторного простору.
4. Статистичний аналіз розробленої програми.

*Основна частина.* Будова і принцип роботи індукційного проточного коаксіального вітроелектромеханічного нагрівача приведено в роботах [16; 17]. Для обґрунтування параметрів розробленого індукційного перетворювача енергії вітра на теплову енергію проведено експериментальні дослідження зміни магнітного потоку  $\Phi$  і магнітної індукції  $B$  у зубцях за різних параметрів магнітної системи. Дослідження проводилися для зубцевих зон, які мали співвідношення у межах:

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\tau}; b_{z0} = \frac{b_z}{\tau} = 0,5 \dots 1; h_{z0} = \frac{h_z}{\tau} = 0,3 \dots 1,5. \quad (1)$$

Для фізичного моделювання використовувалися електромагнітний макет магнітної системи і пакети зубцевих зон, що знімаються, з різною конфігурацією зубців, набраних з електротехнічної сталі (рис. 1).

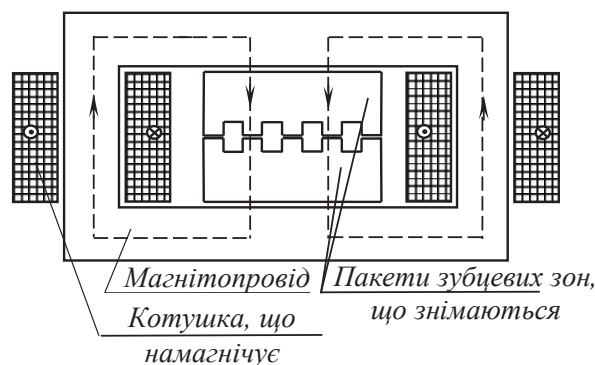


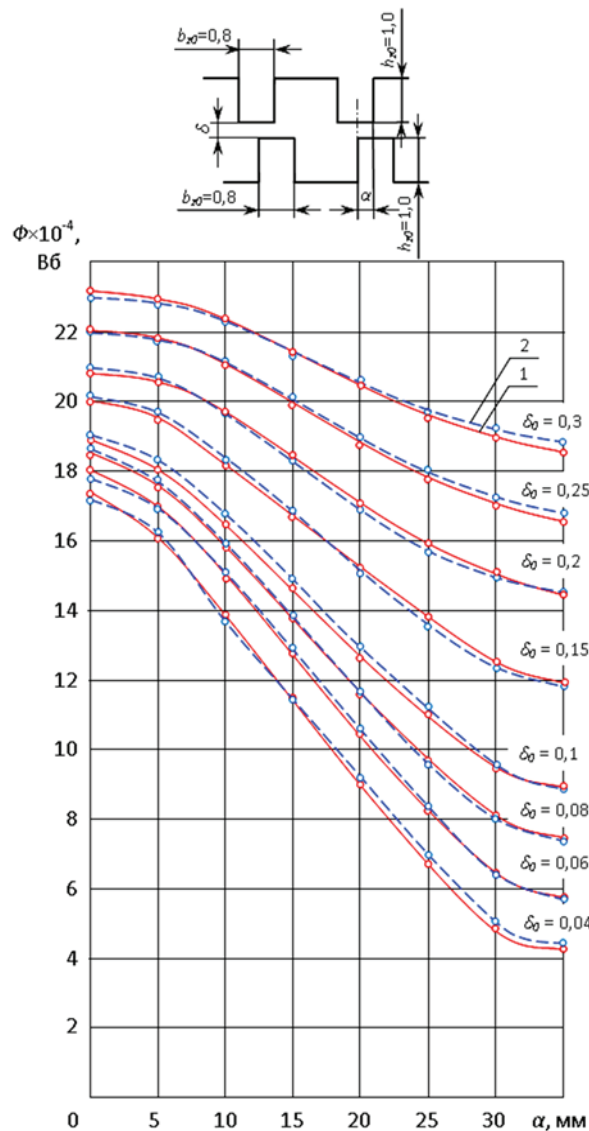
Рис. 1. Електромагнітний макет магнітної системи вітроелектромеханічного нагрівача

Повітряний прошарок між верхнім та нижнім пакетами можна було регулювати в діапазоні від 0 до 10,5 мм, що відповідає відносному значенню  $\delta_0$  у межах  $0 \dots 0,3$ . Дослідження здійснювалися для зубцевих зон, де співвідношення параметрів змінювалося в інтервалі:  $\delta_0 = \delta/\tau = 0,04 \dots 0,3$ .

Магнітний потік  $\Phi$  у досліджуваній зоні створювався за допомогою двох котушок, через які пропускався струм. Величину індукції у повітряному прошарку на відрітку зубцевої поділки  $2\tau$  визначали балістичним методом. Під час експериментів положення зубців змінювали дискретно в межах однієї поділки, а для кожного їх зміщення виконували відповідні вимірювання індукції.

На рис. 2 (крива 1) подано результати вимірювань залежності повного магнітного потоку  $\Phi$  зубцевої поділки  $\tau$  у прошарку  $\delta$  від зміщення  $a$  зубців якоря відносно зубців індуктора за різних значень ширини повітряного прошарку.

*Математична обробка результатів дослідження.* Виконаємо математичну обробку результатів вимірювання величини магнітного потоку у прошарку магнітопроводу індукційного перетворювача енергії вітру на теплову енергію за рахунок збудження вихрових струмів.



**Рис. 2. Залежність магнітного потоку  $\Phi$  у прошарку  $\delta_0$  під час переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора: 1 – дослід; 2 – розрахунок**

Нехай результати вивчення впливу одного фактору на інший, наприклад впливу величини повітряного прошарку у магнітній системі індукційного віт-роелектромеханічного нагрівача  $\delta$  на зміну магнітного потоку  $\Phi$ , представлено у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Форма представлення дослідних даних для математичної обробки

Фактор $\delta$	$\delta_0$	$\delta_1$	$\delta_2$	.....	$\delta_n$
Вихідна величина $\Phi$	$\Phi_0$	$\Phi_1$	$\Phi_2$	.....	$\Phi_n$

У більш складній ситуації, як у нашому випадку, вивчається вплив декількох факторів, наприклад вплив величини повітряного прошарку  $\delta$  і переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора  $\alpha$  у магнітній системі індукційного віт-роелектромеханічного нагрівача на зміну

магнітного потоку  $\Phi$ . У першому випадку рівняння регресії, що визначає залежність магнітного потоку  $\Phi$  від величини зазору  $\delta$ , може бути знайдено у вигляді одномірного многочлена або сплайнів. У другому випадку ці методи відсутні. Розроблення відповідних методик має практичний інтерес.

1. *Однофакторний дослід.* Нехай результати досліджень впливу деякого фактору  $x$  на вихідну величину  $y$  представлено у вигляді табл. 1. Рівняння регресії, що визначає залежність  $y$  від  $x$ , може бути отримано у вигляді багаточлена  $n$ -ї степені, до якого висувається одна з двох вимог:

- багаточлен повинен точно проходити через точки з координатами  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ ;
- багаточлен згладжує викиди окремих точок і повинен найбільш близько проходити на околиці точок  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ .

Другий випадок належить до задач апроксимації. Він використовується за відносно великих дослідних похибок. Рівняння регресії  $f(x)$  шукають у вигляді комбінації елементарних функцій із невідомими параметрами  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  або у вигляді багаточлена  $m$ -ї степені:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m. \tag{2}$$

Критерієм «близькості» може слугувати сума квадратів відхилень дослідних величин  $y_i$  від значень, що розраховані за допомогою рівняння регресії:

$$s = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2. \tag{3}$$

У ситуації, коли дослідні дані отримано з достатньо високою точністю, рівняння регресії зазвичай подають у вигляді багаточлена (3), а також за допомогою поліномів чи сплайнів. У даній роботі розглядається можливість використання полінома Лагранжа для опису рівняння регресії. При цьому координати вузлів полінома повинні відповідати парам значень, наведених у табл. 1. Поліном Лагранжа має вигляд:

$$P_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_k - x_j)} \tag{4}$$

або

$$P_n(x) = f(x_0) \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2) \dots (x_0 - x_n)} + f(x_1) \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_n)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2) \dots (x_1 - x_n)} + \dots + f(x_n) \frac{(x - x_0)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_0)(x_n - x_2) \dots (x_n - x_{n-1})}. \tag{5}$$

Розрахунок за формулою Лагранжа (4) за фіксованих вузлів інтерполяції легко програмувати. Для дослідження точності інтерполяції поліномом Лагранжа розроблена програма `Lagrange1(x)` на алгоритмічній мові C++. Тестування програми проводилося для експоненціальної функції  $e^x$ . У табл. 2 наведено результати тестування на відрізку  $[0; 1,667]$  для поліному п'ятого ступеня.

Таблиця 2

Результати апробації програми `Lagrange1(x)` із використанням полінома Лагранжа п'ятого порядку для експоненціальної функції  $e^x$

$x$	0,000	0,333	0,667	1,000	1,333	1,667
$e^x$	1,000000	1,395612	1,947734	2,718282	3,793668	5,294490
$P_5(x)$	1,000000	1,395679	1,947676	2,718338	3,793604	5,294571





Із табл. 2 видно, що похибка обчислень становить  $10^{-5}$ . За збільшення степені полінома до 30 відносна похибка зменшується до  $10^{-17}$ .

2. *Багатофакторний дослід.* У разі інтерполювання функції двох змінних  $f(x, y)$  поліном Лагранжа має такий вигляд:

$$L(x) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M f_{nm} l_{nm}(x, y), \quad l_{nm}(n, m) = 1, \quad l_{nm}(x, y) = 0 \text{ при } x \neq n \text{ і } y \neq m. \quad (6)$$

Базисні поліноми визначаються формулою:

$$l_{nm}(x, y) = \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq n}}^N \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq m}}^M \frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(x_n - x_i)(y_m - y_j)}. \quad (7)$$

Максимальний ступінь полінома  $L(x, y)$  не перевищує  $n \times m$ . За означенням у вузлових точках виконується рівність  $L(x_n, y_m) = f(x_n, y_m)$ . Припускається, що значення функції  $f(x_n, y_m)$  у вузлових точках  $x_n, y_m$  відомі. Індексацію координат  $x_n, y_m$  у межах  $0 \leq m \leq M, 0 \leq n \leq N$  наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Система індексування координат вузлових точок у двовимірному поліномі Лагранжа (6)

Лівий індекс відноситься до фактору $x$ , правий – до фактору $y$				
0, 0	0, 1	0, 2	.....	0, $N$
1, 0	1, 1	1, 2	.....	1, $N$
2, 0	2, 1	2, 2	.....	2, $N$
.....	.....	.....	.....	.....
$M, 0$	$M, 1$	$M, 2$	.....	$M, N$

Створення програми для побудови поліному (4) не є особливо складним завданням. Однак питання про побудову поліному, що належить до числа факторів більше ніж 2, лишається відкритим. Сформулюємо рішення цієї задачі так: розробити програму, яка з використанням поліному Лагранжа з однією змінною (4) дає змогу розрахувати значення функції декількох змінних у будь-якій точці факторного простору. Передбачуваний спосіб реалізовано у вигляді програм  $Lagrange1(x)$ ,  $Lagrange2(x, y)$  на мові C++.

За допомогою програми  $Lagrange1(x)$  можна виконати розрахунок значень одномірної функції відповідно до формули (4). Її тестування представлено у пункті 1 «Однофакторний дослід».

Програма  $Lagrange2(x, y)$  використовується для обчислення значення двовимірної функції  $f(x, y)$  у довільній точці факторного простору  $(x_u, y_u)$ . Принцип роботи алгоритму полягає у такому. Припустимо, що вузлові точки розташовано в інтервалах  $x_m \leq x_u \leq x_{m+1}, y_n \leq y_u \leq y_{n+1}$ . Спершу застосовується програма  $Lagrange1(x)$  для побудови  $M$  одномірних поліномів Лагранжа:  $L_0(x), L_1(x), L_2(x), \dots, L_M(x)$ . Перший із них  $L_0(x)$  визначається за умови фіксованого  $y_0$ , другий – за  $y_1$  і т. д., аж до  $L_M(x)$ , побудованого за  $y_M$ . Далі обчислюються значення цих поліномів у точці  $x = x_u$ . На основі отриманих значень формується одномірний поліном  $L(y)$  для вузлових точок  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_M$ , де значення функції  $f(x_u, y_u)$  дорівнюють відповідно  $L_0(x_u), L_1(x_u), L_2(x_u), \dots, L_M(x_u)$ . Для побудови  $L(y)$  знову використовується програма  $Lagrange1(x)$ . Знаходження значення  $L(y)$  у точці  $y_u$  дає результат функції  $f(x_u, y_u)$ .

У разі розрахунку функції з більшою кількістю факторів алгоритм дещо ускладнюється. Наприклад, потрібно визначити значення  $f(x, y, z)$  у будь-якій точці  $(x_u, y_u, z_u)$ , де  $x_m \leq x_u \leq x_{m+1}, y_n \leq y_u \leq y_{n+1}, z_k \leq z_u \leq z_{k+1}$ . Уважається, що  $k$  змінюється у межах  $0 \leq k \leq K$ , а значення функції відомі в усіх вузлових точках. Тоді за допомогою програми  $Lagrange2(x, y)$  спочатку будується  $K+1$  поверхонь для кожного фіксованого значення  $z_0, z_1, z_2, \dots, z_K$ . Після цього за допомогою про-

грами Lagrange1( $z$ ) формується одномірний поліном  $L(z)$  і обчислюється його значення в точці  $z_u$ . Отриманий результат відповідає шуканому значенню функції  $f(x_u, y_u, z_u)$ .

Аналогічним чином створюються програми з більшим числом змінних.

3. Результати обробки експериментальних даних дослідження магнітної системи вітроелектромеханічного нагрівача.

На рис. 2 (криві 1) наведено знайдені дослідним шляхом залежності магнітного потоку  $\Phi$  у прошарку індукційного вітроелектромеханічного нагрівача від переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора  $\alpha$  і величини прошарку  $\delta_0$ . Побудуємо функцію залежності  $f(\alpha, \delta_0)$  з використанням програми Lagrange2( $\alpha, \delta_0$ ). Як вузлові точки приймаємо значення переміщень із кроком, рівним 5 мм:  $\alpha_0 = 0$ ,  $\alpha_1 = 5$  мм,  $\alpha_2 = 10$  мм, ...  $\alpha_7 = 30$  мм і величини прошарку  $\delta_{00} = 0,04$  мм,  $\delta_{01} = 0,06$  мм,  $\delta_{02} = 0,08$ ,  $\delta_{03} = 0,1$  мм,  $\delta_{04} = 0,15$  мм,  $\delta_{05} = 0,2$  мм,  $\delta_{06} = 0,25$  мм,  $\delta_{07} = 0,3$  мм. Значення функції у вузлових точках ( $\alpha_m, \alpha_n$ ) беремо з рис. 2, криві 1. Результати розрахунків наведено на рис. 2 (криві 2).

Результати співставлення дослідних та розрахункових даних (рис. 2) зміни магнітного потоку  $\Phi$  від величини прошарку  $\delta_0$  і переміщення зубців якоря відносно зубців індуктора  $\alpha$  показали високу кореляцію між собою. Тому запропонований спосіб побудови багатомірної поверхні з використанням поліному Лагранжа від однієї змінної можна використовувати для розрахунку зубчатих магнітних систем невеликих вітроелектромеханічних нагрівачів різної потужності.

**Висновки.** Проведені дослідження дали змогу сформулювати такі висновки:

1. Розроблено спосіб побудови багатовимірної поверхні на основі застосування полінома Лагранжа з однією змінною.

2. Засобами алгоритмічної мови C++ створено програми Lagrange1( $x$ ) та Lagrange2( $x, y$ ), які дають змогу визначати значення функцій з однією або двома змінними у довільній точці багатofакторного простору. Програма Lagrange1( $x$ ) реалізує обчислення для функцій однієї змінної відповідно до формули (4), тоді як Lagrange2( $x, y$ ) забезпечує розрахунок значень функції двох змінних  $f(x, y)$ .

3. Проведено математичний аналіз дослідів, у яких досліджувалася залежність магнітного потоку  $\Phi$  від зсуву зубців якоря  $\alpha$  та величини повітряного зазору  $\delta_0$  в індукційному вітроелектромеханічному нагрівачі. Отримані експериментальні дані зіставлено з теоретичними розрахунками, що продемонструвало високий рівень кореляції. Середня похибка становить  $10^{-5}$ , а за підвищення степені полінома до 30 відносна похибка зменшується до  $10^{-17}$ .

4. У перспективі розроблений спосіб рекомендується використовувати під час побудови поверхонь відгуку у багатofакторних задачах із числом факторів більше двох, що спрощує вирішення таких задач і підвищує їх точність.

#### Список використаних джерел

1. Gan L.K., Echenique Subiabre, E.J.P. A realistic laboratory development of an isolated wind-battery system. *Renewable Energy*. 2019. 136. 645–656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.024>.

2. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44.

3. Merizalde Y., Hernández-Callejo L., Duque-Perez O., Alonso-Gómez V. Maintenance models applied to wind turbines. A comprehensive overview. *Energies*. 2019. 12(2). 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12020225>.

4. Галько С.В., Жарков В.Я., Жарков А.В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств : монографія. Мелітополь : Люкс, 2019. 215 с.



5. Fu Y., Hu W., Xu F. Clean Heating Scheduling Optimization with Wind Power in Northern China. *Journal of Energy Engineering*. 2017. 143(6). 28–35. 04017056. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000483).
6. Siniscalchi-Minna S., Bianchi F.D., De-Prada-Gil M. A wind farm control strategy for power reserve maximization. *Renewable Energy*. 2019. 131. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.112>.
7. Peng G., Wei J., Shi Y., Shao Z., Jian L. A novel transverse flux permanent magnet disk wind power generator with H-shaped stator cores. *Energies*. 2018. 11(4). 58–69. 810. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040810>.
8. Пат. 4421967 USA. Wind-thermal installation. Windmill driven endy current heater. Birgel Warren J., Hajec Chester; опубл. 20.12.83.
9. Boubzizi S., Abid H., El hajjaji A., Chaabane M. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2018. 3(1). 21. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0096-y>.
10. Cetrini A., Cianetti F., Corradini M., Ippoliti G., Orlando G. On line fatigue alleviation for wind turbines by a robust control approach. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2019. 1(9). 384–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.011>.
11. Жарков А.В. Автономна вітротеплонасосна установка для приватного домогосподарства. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2016. Вип. 175. С. 25–26.
12. Жарков А.В., Жарков В.Я. Когенераційні технології використання ВДЕ в АПК. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2017. № 7(1). С. 109–117.
13. Juangsa F.B., Budiman B.A., Aziz M., Soelaiman T.A.F. Design of an airborne vertical axis wind turbine for low electrical power demands. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017. № 8(4). 293–301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0247-3>.
14. Njiri J.G., Beganovic N., Do M.H., Söffker D. Consideration of lifetime and fatigue load in wind turbine control. *Renewable Energy*. 2019. № 131. P. 818–828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.109>.
15. Галько С.В. Розрахунок малопотужного вітроелектрогенератора для домогосподарств. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. № 10(1). DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-29>.
16. Галько С.В., Вершков О.О., Леженкін О.М. Експериментальне дослідження магнітної системи проточного вітроелектромеханічного нагрівача. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2020. № 20(3). С. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2020-20-3-88-98>.
17. Галько С.В., Трунова І.М., Мірошник О.О. Розроблення системи енергозабезпечення домогосподарств на основі малопотужного вітроелектрогенератора. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2023. № 13(2). DOI: <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-36>.
18. Єремєєв В.С., Ракович Г.М. Теорія планування та обробки експерименту : навчальний посібник. Мелітополь : МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2012. 92 с.
19. Статюха Г.О., Складанний Д.М., Бонаренко О.С. Вступ до планування оптимального експерименту : навчальний посібник. Київ : Політехніка, 2011. 117 с.
20. Капаціла Ю.Б., Марущак П.О., Савків В.Б. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : навчальний посібник. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.
21. Аль-Амморі А.Н., Дехтяр М.М., Абдусалам Х.І.С. Комп'ютерні та інформаційні технології планування експериментів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. № 70(4). С. 51–56.
22. Вазинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень : навчальний посібник. Суми : СумДПУ ім. А.С.Макаренка, 2016. 260 с.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 14.10.2025

Статтю опубліковано 25.11.2025





**S. Halko, T. Halko, D. Zelenkov***Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University***MATHEMATICAL PROCESSING OF MAGNETIC FIELD PARAMETERS  
OF INDUCTION WIND ELECTROMECHANICAL HEATERS*****Summary***

For the direct conversion of wind energy into heat, a flow-through induction wind-electromechanical heater has been developed and patented. The operating principle and experimental studies have been published by the authors previously. The heater is recommended for use in hot water supply systems of small private households in order to save energy from traditional energy sources.

To substantiate the parameters of the magnetic system of the heater, a model of a toothed magnetic system was developed and the results of experimental studies of electromagnetic quantities in the air layer of the system were presented. The results of experimental studies were mathematically processed. A method for constructing multidimensional surfaces using a Lagrange polynomial with one variable is proposed for calculating electromagnetic quantities in the air gap of similar toothed magnetic systems, as well as for constructing response surfaces in multifactor experiments.

The programs  $Lagrange1(x)$  and  $Lagrange2(x, y)$  were developed in the algorithmic language C++ to calculate the values of a function of one or two variables at any point in a multivariate space. The program  $Lagrange1(x)$  implements calculations in the case of one variable. The program  $Lagrange2(x, y)$  is designed to calculate the values of a function of two variables  $f(x, y)$ .

A mathematical analysis of experiments was carried out, where the dependence of the magnetic flux  $F$  on the movement of the armature teeth  $a$  and the size of the gap  $\delta_0$  in an induction wind-electromechanical heater was investigated. Comparison of experimental and calculated data has a high correlation. The calculation error is  $10^{-5}$ . With an increase in the degree of the polynomial to 10–30, the relative error decreases to  $10^{-17}$ . The presented experimental and calculated data showed a high correlation between themselves.

**Keywords:** wind energy, energy conversion, induction converters, heating, numerical analysis, computer languages, polynomials.