

УДК 621.548

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Овчаров С.В., к.т.н.

Михайленко Е.Ю., аспирант\*

*Таврический государственный агротехнологический университет*

Тел. (0619) 42-32-63

**Аннотация** – предлагается расчет коэффициентов и исследование модели полного факторного эксперимента, в результате которого получены уравнения первого и второго порядка.

**Ключевые слова** – малая ветроэнергетика, аэродинамические характеристики, момент на валу, многофакторный эксперимент.

*Постановка проблемы.* Разработка нетрадиционных источников электрической энергии остается актуальной. В частности, необходимы разработки ветроэнергетических установок (ВЭУ) для крестьянских подворий и фермерских хозяйств.

*Анализ последних достижений.* Для малой ветроэнергетики в настоящее время разрабатываются ветроэнергетические установки с горизонтальным валом и ориентацией ветрового колеса на ветер. Разработок с вертикальным валом практически нет и поэтому требуется их исследование.

*Формулировка цели статьи.* Целью работы является исследование аэродинамических характеристик ветроэнергетической установки с вертикальной осью методом полного факторного эксперимента.

*Основная часть.* На работу ВЭУ с вертикальной осью влияют множество факторов. Было составлено уравнение момента, развиваемого на валу:

$$M_{\text{в}} = \frac{1}{2} \rho (v_{\text{в}} - \omega r \cdot \sin \varphi)^2 S \cdot r \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность набегающего воздушного потока,  $\text{кг/м}^3$ ;

$v$  – скорость ветра,  $\text{м/с}$ ;

$\omega$  – угловая скорость,  $\text{рад/с}$ ;

$S$  – площадь лопасти,  $\text{м}^2$

\* Научный руководитель – д.т.н., проф. Овчаров В.В.

© к.т.н. Овчаров С.В., аспирант Михайленко Е.Ю.

$r$  – радіус ротора ВЭУ, м;

$\varphi$  – угол отклонения лопасти от горизонтального положения, рад.

На основании, полученных экспериментальных данных, приводится алгоритм и результаты исследования с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ).

В качестве основных факторов определяются:

-  $V_b$  – скорость ветра, м/с;

-  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;

-  $r$  – радиус ротора, м;

-  $\varphi$  – угол отклонения лопасти от горизонтального положения, рад.

Параметром оптимизации –  $M_e$  – момент на валу, Н·м.

Каждый фактор варьирует на двух уровнях: верхнем (+) и нижнем (–), при этом кодирование производят по формуле (2) и результаты замеров заносятся в таблицу.

$$x_i = \frac{x'_i - x_{i0}}{\Delta_i}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора (1, -1, 0);

$x'_i$  – натуральное значение фактора на каком-либо уровне;

$x_{i0}$  – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

$\Delta_i$  – интервал варьирования.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Наименование факторов	Единица измерения	Уровни варьирования факторов				Обозначение
		-1	0	+1	$\Delta_i$	
$V_e$	м/с	1	8	15	7	$X_1$
$\omega$	рад/с	0,2	2,25	4,3	2,05	$X_2$
$r$	м	1	2	3	1	$X_3$
$\varphi$	рад	0,2	0,85	1,5	0,65	$X_4$

Для указанных факторов проверяются и анализируются три критерия:

а) Критерий Кохрена (проверка воспроизводимости опытов);

б) Критерий Стьюдента (проверка коэффициентов на значимость);

в) Критерий Фишера (проверка модели на адекватность).

Линейная модель имеет вид:

$$y_i = B_0 + B_1z_1 + B_2z_2 + B_3z_3 + B_{12}z_1z_2 + B_{13}z_1z_3 + B_{14}z_1z_4 + B_{23}z_2z_3 + B_{34}z_3z_4 + B_{24}z_2z_4 + B_{123}z_1z_2z_3 + B_{234}z_2z_3z_4 + B_{134}z_1z_3z_4 + B_{124}z_1z_2z_4 + B_{1234}z_1z_2z_3z_4$$

где  $y_i$  – расчетное значение функции отклика (параметр оптимизации);

$B_0, B_i, B_{ij}, B_{123}$  – коэффициенты модели;

$Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – кодированные факторы.

Расширенная матрица и матрица откликов имеют вид:

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 12.2 & 12.5 \\ 390.3 & 388.6 \\ 570.2 & 567.2 \\ 0.4 & 0.5 \\ 105.1 & 106.3 \\ 9.9 & 9.8 \\ 200.8 & 201.8 \\ 0.6 & 0.7 \\ 84.7 & 85.7 \\ 1.3 & 1.637 \\ 121.3 & 124.4 \\ 0.4 & 0.4 \\ 36.5 & 37.56 \\ 0.0 & 0.04 \\ 40.9 & 42.2 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix}$$

При выполнении условия:

$$G_p < G_m(\alpha = 0,05; f_1 = m - 1; f_2 = N) \quad (3)$$

гипотеза об однородности дисперсий принимается:  $0,288 < 0,679$  – воспроизводимость опытов хорошая.

По критерию Стьюдента  $t_p = 1,746$  – все коэффициенты значимы, т.е. присутствуют в модели.

Реализовав алгоритм расчета ПФЭ первого порядка, мы получили уравнение регрессии. Таким образом, линейная модель имеет вид:

$$\begin{aligned} y_i = & 98,576 + 48,259z_1 - 18,443z_2 + 49,032z_3 + 62,48z_4 - 68,322z_1z_2 + \\ & + 1,408z_1z_3 + 12,697z_1z_4 - 7,049z_2z_3 + 32,649z_3z_4 - 13,272z_2z_4 - \\ & - 54,686z_1z_2z_3 - 3,07z_2z_3z_4 - 14,576z_1z_3z_4 - 62,946z_1z_2z_4 - \\ & - 50,383z_1z_2z_3z_4 \end{aligned} \quad (4)$$

По критерию Фишера  $2,286 < 2,397$  полученная линейная модель, адекватна опытными данным, т.е. ее можно использовать для прогнозирования данных.

Раскодированная линейная модель имеет вид:

$$\begin{aligned}
 y_i = & -1,51 - 0,007x_1 + 7,25x_2 + 0,475x_3 + 7,11x_4 - \\
 & - 0,586x_1x_2 + 1,17x_1x_3 + 0,07x_1x_4 - 7,79x_2x_3 - \\
 & - 37,79x_2x_4 - 16,19x_3x_4 + 0,78x_1x_2x_3 + 4,05x_1x_2x_4 + \\
 & + 8,94x_1x_3x_4 + 40,91x_2x_3x_4 - 5,4x_1x_2x_3x_4
 \end{aligned} \quad (5)$$

Область оптимума описывается полиномами более высоких порядков, среди которых самые распространенные уравнения второго порядка вида:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2$$

Составляется план отсеивающего эксперимента на основе стандартной матрицы  $X$  и осуществляется её реализация, для математической модели вида:

$$\begin{aligned}
 y_i = & B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_2 + B_3 z_3 + B_{12} z_1 z_2 + B_{13} z_1 z_3 + B_{23} z_2 z_3 + \\
 & + B_{11} z_1^2 + B_{22} z_2^2 + B_{33} z_3^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве основных факторов выбраны:

- $V_b$  – скорость ветра, *м/с*;
- $\omega$  – угловая скорость, *рад/с*;
- $\varphi$  – угол отклонения лопасти от горизонтального положения, *рад*.

Параметром оптимизации –  $M_e$  – момент на валу, *Н·м*.

Матрицы планирования ( $X$ ) и матрица откликов ( $Y$ ) имеют вид:

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 & 0 \\ 1 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 \\ 1 & 0 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 \\ 1 & 0 & 0 & -1.215 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.476225 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 105.1 & 105 \\ 39.9 & 33 \\ 200.8 & 201 \\ 0.6 & 0.7 \\ 36.5 & 37 \\ 0.3 & 0.5 \\ 40.9 & 41.5 \\ 18.2 & 19.3 \\ 160.4 & 161 \\ 0.2 & 0.4 \\ 13 & 13.2 \\ 34.3 & 34.2 \\ 32.2 & 31.9 \\ 38.5 & 32.4 \\ 25.4 & 25.3 \end{pmatrix}$$

Определяются дисперсии воспроизводимости по критерию Кохрена:

$0,545 < 0,679$ , на основании которых можно сказать, что воспроизводимость опытов хорошая.

Реализуется алгоритм планирования второго порядка. Нелинейное уравнение поверхности второго порядка имеет вид:

$$y_i = 32,078 + 47,71z_1 - 9,911z_2 + 22,079z_3 - 14,719z_1z_2 + 26,256z_1z_3 - 4,656z_2z_3 + 31,306z_1^2 - 7,188z_2^2 \quad (7)$$

По критерию Стьюдента  $t_p = 1,753$ . Таким образом, коэффициент  $B_{33}$  незначим и в модели не присутствует.

Для определения адекватности модели, сравнивается критическое и расчетное значения критерия Фишера:

$$1,021 < 1,956$$

Таким образом, полученная нелинейная модель, адекватна опытными данным, т.е. ее можно использовать при построении области оптимума и определения координат оптимума.

Раскодированная нелинейная модель имеет вид:

$$y_i = 5,89 - 6x_1 + 14,037x_2 - 4,34x_3 - 1,03x_1x_2 + 5,77x_1x_3 - 3,499x_2x_3 + 0,64x_1^2 - 1,71x_2^2 \quad (8)$$

Рассматриваются возможные двумерные сечения, характеризующее каждый фактор. Условный экстремум, соответствующий максимуму выхода, находится посредством приравнивания к нулю одной из переменных и нахождения условий, соответствующих оптимуму функции выхода по двум другим переменным [2].

Графики и линии уровней представлены на рис. 1, 2, 3.

Поверхность отклика представляет собой седло или минимакс, вытянутый по оси  $\omega$ .

*Выводы.*

1. В результате исследования, получено уравнение регрессии первого порядка, где все коэффициенты значимы, модель адекватна опытными данным.

2. Получена нелинейная модель второго порядка, коэффициент  $B_{33}$  незначим и в модели не присутствует. Модель адекватна опытными данным.

3. Получены координаты точек оптимума, а также значение функции отклика.

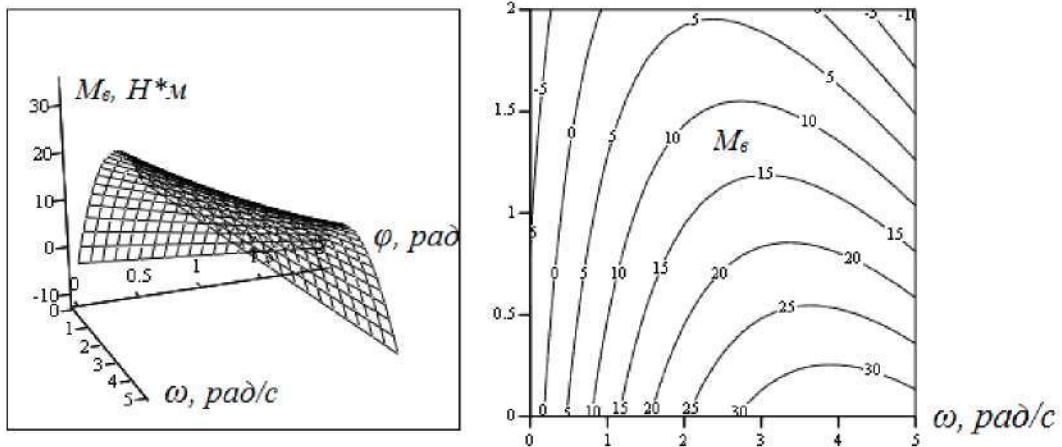


Рис. 1. Поверхность и линии уровней функции отклика при  $V_e=0$ .

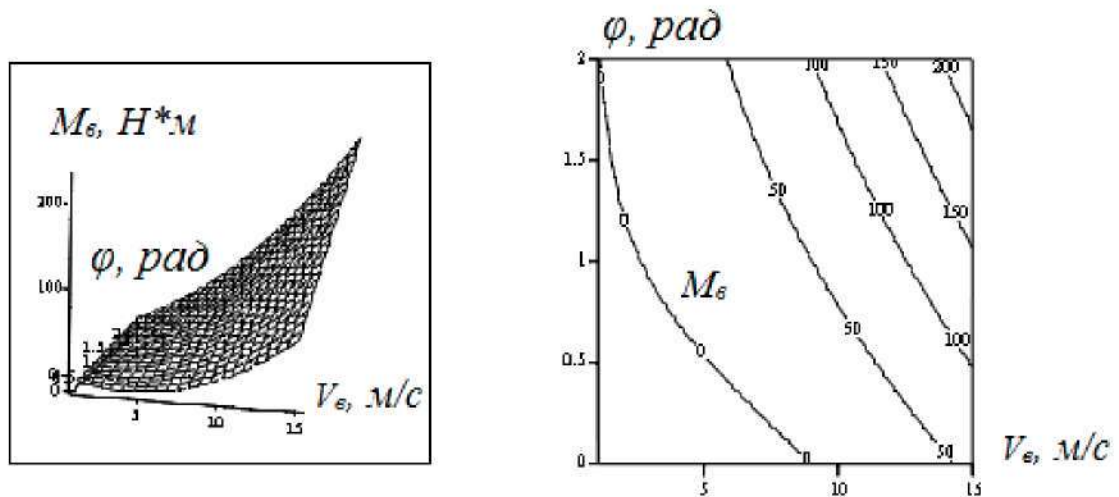


Рис. 2. Поверхность и линии уровней функции отклика при  $\omega=0$ .

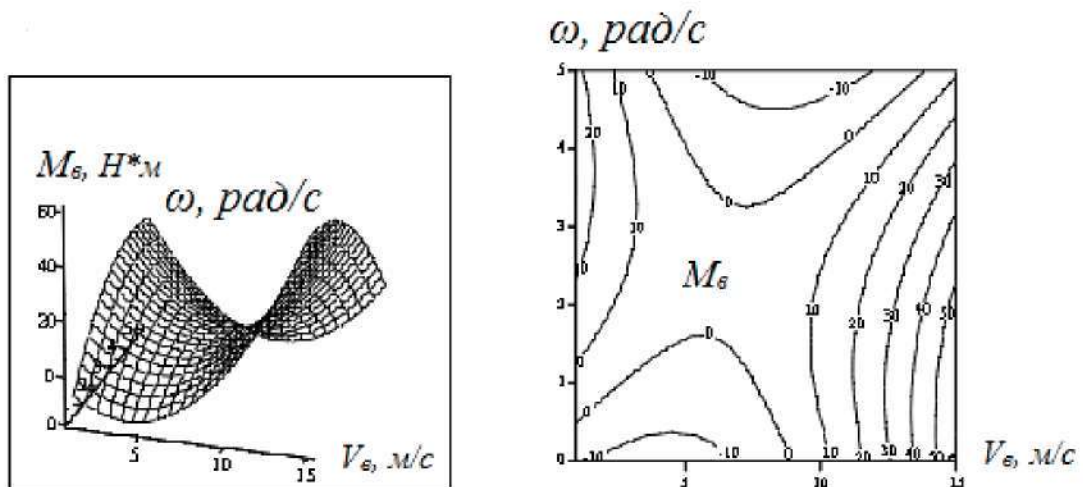


Рис. 3. Поверхность и линии уровней функции отклика при  $\varphi=0$ .

## Литература:

- 1 *Бондарь А.Г.* Планирование эксперимента в химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев, "Вища школа", 1976. – 180 с.
2. *Чкалова О.Н.* Основы научных исследований / О.Н. Чкалова. – Киев: "Вища школа", 1978. – 117 с.
3. *Мхитарян Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы: [Монография] / Н.М. Мхитарян. – К.: Наукова думка, 1999. – 317с.
4. *Твайдел Дж.* Возобновляемые источники энергии: [Пер. с англ.] / Дж. Твайдел, А. Уайер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 391с.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ

Овчаров С.В., Михайленко О.Ю.

### *Анотація*

Пропонується розрахунок коефіцієнтів і дослідження моделі повного факторного експерименту, у результаті якого отримані рівняння першого й другого порядку.

## EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETERS WINDMILLS WITH VERTICAL AXIS

S. Ovcharov, L. Mikhailenko

### *Summary*

Proposed to calculate the coefficients and study models of full factorial experiment, which obtained the equations of the first and second order.