

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Овчаров С.В., к.т.н.

Михайленко Е.Ю., аспирант*

Таврический государственный агротехнологический университет

Телефон (0619) 42-32-63

Аннотация – предлагается исследование модели полного факторного эксперимента, в результате которого получены уравнения первого и второго порядка. Модели адекватны опытным данным. Поверхности и линии уровней функции откликов представлены на рисунках.

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

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

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

S – площадь лопасти, м^2

r – радиус ротора ВЭУ, м ;

φ – 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 выбраны:

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

- V_b - скорость ветра, $м/с$;
- ω - угловая скорость, $рад/с$;
- r - радиус ротора, $м$;
- φ - угол отклонения лопасти от горизонтального положения, $рад$.

Параметром оптимизации – M_6 – момент на валу, $Н·м$.

Каждый фактор варьирует на двух уровнях: верхнем (+) и нижнем (–), при этом кодирование производят по формуле (2) и результаты замеров заносят 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;
 Δ_i – интервал варьирования.

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Наименование факторов	Единица измерения	Уровни варьирования факторов				Обозначение
		-1	0	+1	Δ_i	
V_6	$м/с$	1	8	15	7	X_1
ω	$рад/с$	0,2	2,25	4,3	2,05	X_2
r	$м$	1	2	3	1	X_3
φ	$рад$	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:

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

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:

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

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:

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

В качестве основных факторов выбраны:

- V_b - скорость ветра, м/с;
- ω - угловая скорость, рад/с;
- φ - 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.

Реализовав алгоритм планирования второго порядка, мы получим уравнение поверхности второго порядка:

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

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

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

$$1,021 < 1,956$$

Таким образом, полученная нелинейная модель, адекватна опытным 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 семейство линий уровней представлены на рис. 1, 2, 3.

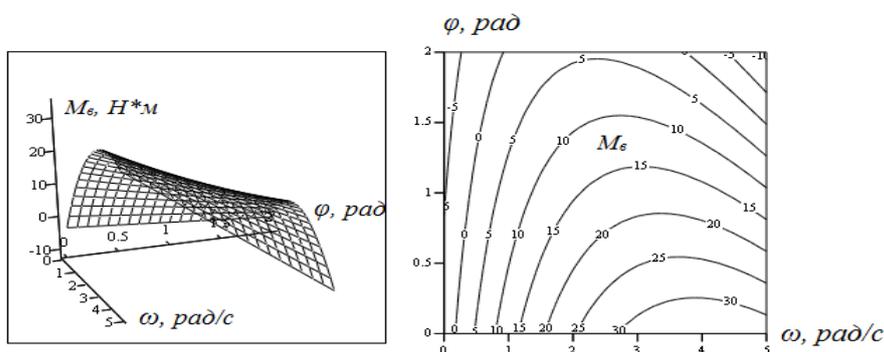


Рис. 1. Поверхность и линии уровней функции отклика при $V_\epsilon = 0$.

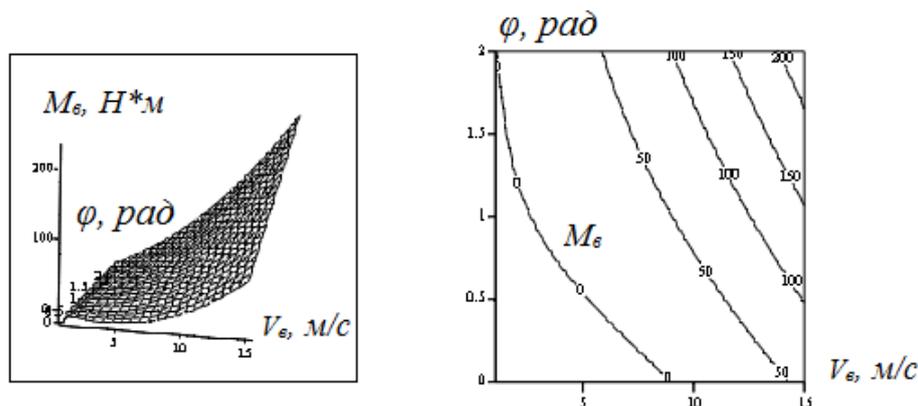


Рис. 2. Поверхность и линии уровней функции отклика при $\omega = 0$.

Поверхность отклика представляет собой седло или минимакс, вытянутый по оси ω .

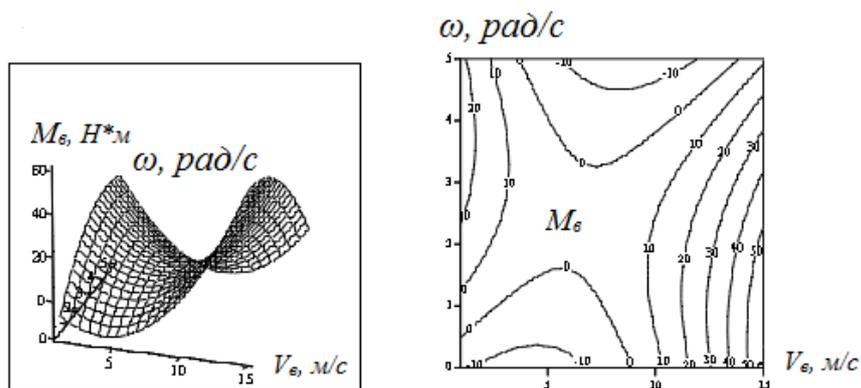


Рис. 3. Поверхность и линии уровней функции отклика при $\varphi=0$.

Выводы.

1. Используя, модель полного факторного эксперимента, получено уравнение регрессии первого порядка, 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. Поверхности и линии уровней функции откликов представлены на рисунках.

Литература:

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

EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETERS WINDMILLS WITH VERTICAL AXIS

L. Mikhailenko, S. Ovcharov

Summary

Proposed research model of full factorial experiment, which obtained the equations of the first and second order. Model adequately the experimental data. Surfaces and lines of levels of the response function are presented in the figures.