

Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 4 (44). С. 66-72

Vestnik Kurganskoy GSNA. 2022; (4-44): 66-72

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 62.253.15

Код ВАК 4.3.2

DOI: 10.52463/22274227\_2022\_44\_66

EDN: YLSJOQ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ АПК

Александр Андреевич Евдокимов<sup>1</sup>, Виктор Иванович Чарыков<sup>2</sup>✉, Роберт Радилевич Саттаров<sup>3</sup>, Игорь Иванович Копытин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

<sup>2,4</sup>Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева, Курган, Россия

<sup>3</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

<sup>1</sup>aleksandr-aae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-3351>

<sup>2</sup>viktor52-chimesh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6434-3825>

<sup>3</sup>sattar.rb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>

<sup>4</sup>docent\_ik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1295-1896>

**Аннотация.** Уральский федеральный округ характеризуется малыми значениями скорости ветрового потока от 1,5 до 5,5 м/с и разнообразной направленностью ветровых потоков. Разрабатываемый электрический генератор представляет собой синхронную машину с постоянными полюсовыми магнитами, обладает высоким КПД, низкими оборотами и скоростью вращения, надежностью и простотой изготовления конструкции. Применение электрического генератора в составе ветроэнергетических установок (ВЭУ) позволяет повысить эффективность электроснабжения потребителей. Исследования проведены с целью оптимизации конструктивных параметров электрического генератора малой мощности для ветроэнергетической установки с последующим использованием в составе ветроэлектрических станций. Произведено расчетное и экспериментальное определение конструктивных параметров электрического генератора. Разработана и изготовлена экспериментально-лабораторная установка электрического генератора малой мощности. Теоретическая ценность работы заключается в том, что произведен расчет магнитной системы электрического генератора малой мощности. Установлена прямо пропорциональная зависимость мощности от частоты вращения ротора генератора: при  $\omega = 40$  об/мин,  $P = 2,0$  кВт, а при  $\omega = 70$  об/мин, мощность увеличивается до  $P = 4,0$  кВт. На выходную мощность генератора влияет также длина статорной обмотки: при длине статорной обмотки  $l = 160$  мм, мощность  $P = 1,0$  кВт, при  $l = 250$  мм, мощность  $P = 1,5$  кВт. Результаты расчетов выходной мощности подтверждены на экспериментально-лабораторной установке. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании электрического генератора. Оптимизированы основные параметры электрического генератора малой мощности, учитывающие частоту вращения ротора, длину сегмента обмотки статора, длину магнитной системы – с последующим выходом на мощность ветроэнергетической установки.

**Ключевые слова:** оптимизация, генератор, ветроэнергетическая установка, магнитная система, обмотка, фактор, ротор, дисперсия.

**Для цитирования:** Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р., Копытин И.И. Определение конструктивных параметров ветроэнергетической установки для электроснабжения удаленных объектов АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 4 (44). С.66-72. [https://doi.org/10.52463/22274227\\_2022\\_44\\_66](https://doi.org/10.52463/22274227_2022_44_66)

### Scientific article

## DETERMINATION OF THE DESIGN PARAMETERS OF A WIND POWER PLANT FOR SUPPLYING ELECTRICITY TO REMOTE OBJECTS OF AIC

Alexander A. Evdokimov<sup>1</sup>, Viktor I. Charykov<sup>2</sup>✉, Robert R. Sattarov<sup>3</sup>, Igor I. Kopytin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Surgut State University, Surgut, Russia

<sup>2,4</sup>Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltsev, Kurgan, Russia

<sup>3</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

<sup>1</sup>aleksandr-aae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-3351>

<sup>2</sup>viktor52-chimesh@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6434-3825>

<sup>3</sup>sattar.rb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>

<sup>4</sup>docent\_ik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1295-1896>

**Abstract.** The Ural Federal District is characterized by low wind flow speeds from 1.5 to 5.5 m/s and a variety of wind directions. The electrical generator under development is a synchronous machine with permanent striped magnets, with high efficiency, low speed and rotation, it is reliable and easy to construction. Application of electric generator as a part of wind power plants (WPP) can improve the efficiency of power supply to consumers. Research objective – optimization of design parameters of low-power electric generator for wind turbine with subsequent use in

wind power plants. Calculation and experimental determination of design parameters of electric generator. Development and manufacturing of the experimental-laboratory setup of low-power electric generator. The theoretical value of the work lies in the fact that the calculation of the magnetic system of the electric generator of low power was carried out. A directly proportional dependence of power on generator rotor speed has been established: at  $\omega = 40$  rpm,  $P = 2.0$  kW, and at  $\omega = 70$  rpm, the power increases to  $P = 4, 0$  kW. The output power of the generator is also affected by the length of the stator winding: if the stator winding length is  $l = 160$  mm – power  $P = 1.0$  kW, if  $l = 250$  mm – power  $P = 1.5$  kW. Results of calculations of output power are confirmed on experimental-laboratory unit. The results can be used at designing of the electrical generator. We have optimized the main parameters of the electric generator of small power, taking into account: the rotor speed, the length of the stator winding segment, the length of the magnetic system – with subsequent output of the wind turbine power plant.

**Keywords:** optimization, generator, wind turbine, magnetic system, winding, factor, rotor, dispersion.

**For citation:** Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Kopytin I.I. Determination of the design parameters of a wind power plant for supplying electricity to remote objects of AIC. Vestnik Kurganskoy GSHA. 2022; (4-44): 66-72. [https://doi.org/10.52463/22274227\\_2022\\_44\\_66](https://doi.org/10.52463/22274227_2022_44_66). (In Russ).

**Введение.** Применение возобновляемых источников энергии для электроснабжения энергоресурсами удаленных и труднодоступных районов входящих в агропромышленную зону, а также специфических потребителей: охотхозяйств, рыболовных кордонов, локальных объектов строительства дорого и малоэтажных домов, временных вагон-городков, позволяют решить проблемы: загрязнения окружающей среды, путем снижения выбросов продуктов сгорания; истощения и удорожания традиционных энергоресурсов; отсутствие газификация районов или традиционных способы логистики энергоресурсов [1-3].

В современном мире практические возможности возобновляемых источников энергии составляют 10-15 % от мирового потребления энергии [4], что позволяет сформировать площадку для решения энергетических проблем. Перспективным направлением является применение ветровой энергии, позволяющие превращать потоки механической энергии ветра, в электрическую [5]. За долгие десятилетия ветровая энергетика сформировалась как устойчивая отрасль, которая служит зачастую единственным вариантом для точечного электроснабжения удаленных от единой энергетической системы сельскохозяйственных и специфических потребителей. На территории Курганской области [6] потенциал энергии ветра оценивается в среднем 5 м/с, согласно наблюдениям, что позволяет применять ветросиловые установки малой мощности [7].

Внедрение электрического генератора в системы электроснабжения, позволяет обеспечить удаленные и труднодоступные районы – электроэнергией, снизив затраты на себестоимость [8].

На основе ранее представленных результатов исследований принято решение о разработке электрического генератора [9] малой мощности для использования в системе электроснабжения удаленных потребителей [10].

**Материалы и методы.** Проведя ряд теоретических исследований по определению и выявлению основных факторов, влияющих на оптимальные и рациональные параметры электрического генератора, а также результатов проведенных натурных экспериментов, выявили три основных фактора влияющие на функцию оптимизации, приведенных в таблице 1.

Для реализации трехфакторного планирования применим матрицу равномер-плана второго порядка, имеющую вид [13-16]:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 3} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq 3} b_{ij} x_{ij} + \sum_{1 \leq i \leq 3} b_{ii} x_i^2 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (1)$$

где  $b_0 \dots b_3$  – коэффициенты регрессии;

$x_i$  – кодированные значения фактора (таблица 1).

Для реализации полиномиальной модели применим симметричный композиционный ротатабельный равномер-план как наиболее подходящий для проведения наших исследований. Он обеспечивает простоту в вычислениях параметров полиномиальной модели (1) и проведение статических анализов экспериментов. Кодирование факторов и уровней производится для удобства расчетов (таблица 1) [11-12].

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	$\omega$ – частота вращения ротора, об/мин	$l$ – длина сегмента обмотки статора, мм	$l_1$ – длина магнитной системы, мм
Верхний уровень ( $x_i = +1$ )	50	210	200
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	10	120	100
Основной уровень ( $x_i = 0$ )	30	165	150
Звездная точка $+\alpha$ ( $x_i = +1,68$ )	64	241	234
Звездная точка $-\alpha$ ( $x_i = -1,68$ )	4	89	66
Интервал варьирования ( $\Delta x_i$ )	20	45	50

Для отображения достоверной информации реализуется симметричный композиционный ротатабельный равномер-план второго порядка (таблица 2) [13-14].

Таблица 2 – Симметричный композиционный ротатбельный равномер-план второго порядка

№ опыта	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	Рез-ты опытов	Примечание
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$Y_1$	Полный факторный эксперимент $2^3$
2	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	$Y_2$	
3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	$Y_3$	
4	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	$Y_4$	
5	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	$Y_5$	
6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	$Y_6$	
7	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	$Y_7$	
8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	$Y_8$	
9	+	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	$Y_9$	Звездные точки
10	+	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	$Y_{10}$	
11	+	0	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	$Y_{11}$	
12	+	0	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	$Y_{12}$	
13	+	0	0	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	$Y_{13}$	
14	+	0	0	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	$Y_{14}$	
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{15}$	Опыт в центре плана
16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{16}$	
17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{17}$	
18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{18}$	
19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{19}$	
20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$Y_{20}$	

После обработки данных и получения полиномиальной математической модели строятся трехмерные поверхности с различными сочетаниями факторов.

В результате анализа идентифицируются оптимальные значения параметров электрического генератора.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Прежде чем были проведены эксперименты, выявили нулевые значения факторов: частоты вращения ротора, длины сегмента обмотки статора, длины магнитной системы, которые влияют на функцию оптимизации.

Вначале произведен полный факторный эксперимент  $2^3$ , который состоит из 8 опытов (таблица 2, опыты 1...8). Опыты не повторяются, но для оценки дисперсии опыты в центре плана основного уровня повторили 6 раз (таблица 2, опыты 15...20). С учетом возможного перехода к планированию второго порядка выбрали число дублей центрального опыта для построения полиномиальной модели (1) [13-14]. Как только была построена модель второго поряд-

ка, производим опыты в звездных точках. Звездное плечо в плане  $\alpha = \pm 1,682$  (таблица 2).

По результатам опытов на основном уровне (таблица 2, опыты 15...20) оценили дисперсию опыта. Оказалось, что  $S_y^2 = 4,667$  среднеквадратичная ошибка опытов  $S_y = 2,160$  при  $f_1 = 5$  [14].

По результатам опытов плана  $2^3$  рассчитали следующие коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 120,375; \quad b_1 = 99,625; \quad b_2 = 15,375; \quad b_3 = 9,625; \\ b_{12} = 7,125; \quad b_{13} = 0,375; \quad b_{23} = 2,125; \quad b_{123} = -2,125.$$

После исключения из уравнения регрессии статически незначимые коэффициенты, получили адекватную полиномиальную математическую модель функции.

На основании полученных коэффициентов  $b_i$  строится полиномиальная математическая модель второго порядка вида (2), которая служит для нахождения  $Y_{теор.i}$  [14].

Определили дисперсию в определении этих коэффициентов  $S_b^2 = 0,583$ , соответственно сред-

неквадратичные ошибки этих коэффициентов  $S_{b_i} = 0,764$ . При выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и степени свободы  $f_1 = 5$  табличное значение критерия Стьюдента  $t_{0,05;5} = 2,57$ , поэтому определили доверительный интервал  $\Delta_{b_i} = 2,57 \times 0,764 = 1,963$ . Абсолютные значения коэффициентов сравниваем со значением доверительного интервала. По результатам сравнения статистически незначимым является коэффициент:  $b_{123}$  [13-14].

Проверили адекватность линейной части полученного уравнения по  $t$ -критерию, оценив значимость различия между  $b_0$  и средним результатом опыта в центре плана. В данном случае  $\bar{y}_0 = 217,333$ ;  $b_0 = 120,375$ ;  $S_y = 2,160$ ;  $N = 8$ .

Поэтому рассчитали

$$t_{расч} = \frac{(120,375 - 217,333) \times \sqrt{8}}{2,160} = 127,033,$$

что больше табличного при 5%-м уровне значимости. Полиномиальная модель неадекватна. В этой связи была построена полиномиальная модель второго порядка, в результате чего был предопределен переход к центральному композиционному ротатбельному равномер-плану второго порядка (таблица 2) [15-16].

В итоге получили полиномиальную модель второго порядка в виде:

$$Y = 216,832 + 81,140x_1 + 15,164x_2 + 14,642x_3 + 7,125x_1x_2 + 2,125x_1x_3 - 39,548x_1^2 - 33,357x_2^2 - 28,935x_3^2. \quad (2)$$

Построенная полиномиальная модель (2) включает семь коэффициентов, поэтому по формуле  $f_2 = N - k' - 1$  определили число степеней свободы.  $k'$  – число оставленных коэффициентов уравнения (включая  $b_0$ ).

$$S_{неад}^2 = \frac{6,225}{10} = 0,6225. \quad (3)$$

Табличное значение  $F$ -критерия выбрали из таблицы [13-16] при числе степеней свободы в знаменателе  $f_1 = 5$  и числителе  $f_2 = 10$  для уровня значимости  $\alpha = 0,05$ . Расчетное значение по критерию Фишера  $F^{расч} = 0,6225 / 0,15 = 4,15$ , что меньше табличного ( $F_{0,05;10;5}^{табл} = 10,05$ ) и свидетельствует об адекватности полученной полиномиальной модели.

Далее переходим от кодированных значений к реальным [14-16]:

$$x_1 = \frac{\omega - 30}{20}; \quad x_2 = \frac{l - 165}{45}; \quad x_3 = \frac{l_1 - 150}{50}. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (2) значения,  $x_1, x_2, x_3$ , определяемые по формуле (4), получим значение мощности  $P$  (кВт), выраженной через параметры  $\omega, l, l_1$ , получим [14]:

$$P = 216,832 + 81,140 \times \frac{\omega - 30}{20} + 15,164 \times \frac{l - 165}{45} + 14,642 \times \frac{l_1 - 150}{50} + 7,125 \times \frac{\omega - 30}{20} \times \frac{l - 165}{45} + 2,125 \times \frac{l - 165}{45} \times \frac{l_1 - 150}{50} - 39,548 \times \left(\frac{\omega - 30}{20}\right)^2 - 33,357 \times \left(\frac{l - 165}{45}\right)^2 - 28,935 \times \left(\frac{l_1 - 150}{50}\right)^2. \quad (5)$$

После решения уравнения получим:

$$P = 739,706 + 8,683 \times \omega + 5,394 \times l + 3,609 \times x_1 + 0,0079 \times \omega \times l + 0,000944 \times l \times l_1 - 0,0988 \times \omega^2 - 0,0165 \times l^2 - 0,01157 \times l_1^2. \quad (6)$$

Для получения и построения трехмерных моделей поверхностей откликов расчеты реализовали в программном комплексе «STATISTICA».

На рисунках 1-3 представлены поверхности взаимодействия уровней [17] В ( $x_1$  – частота вращения ротора,  $x_2$  – длина сегмента обмотки статора), В ( $x_1$  – частота вращения ротора,  $x_3$  – длина магнитной системы), В ( $x_2$  – длина сегмента обмотки статора,  $x_3$  – длина магнитной системы).

По результатам построения поверхности откликов (рисунок 1), влияния мощности электрического генератора при: ( $x_3 = 0$ ), от частоты вращения ротора и длины статорной обмотки показывают, что максимальное значение мощность реализуется при частоте вращения ротора в интервале,  $\omega = 40-60$  об/мин, и длины сегмента статорной обмотки в диапазоне  $l = 170-220$  мм.

По результатам построения поверхности откликов (рисунок 2), влияния мощности электрического генератора при: ( $x_2 = 0$ ), от частоты вращения ротора и длины магнитной системы, показывают, что максимальное значение мощность реализуется при частоте вращения ротора в интервале,  $\omega = 40-60$  об/мин, и длины полосовой магнитной системы  $l_1 = 140-160$  мм.

**Заключение.** При условии обеспечения максимальной индукции в воздушном зазоре получены зависимости изменения мощности от частоты вращения ротора. При частоте вращения 60 об/мин – 4 кВт, при частоте вращения 40 об/мин – 2 кВт. Выходная мощность электрического генератора находится в зависимости от длины магнитной системы. При длине  $l_1 = 160$  мм – 1,1 кВт, при длине  $l_1 = 200$  мм – 1,75 кВт. Результаты расчетов параметров подтверждены экспериментом и используются при определении мощности ветроэнергетической установки. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электрических генераторов для ВИЭ.

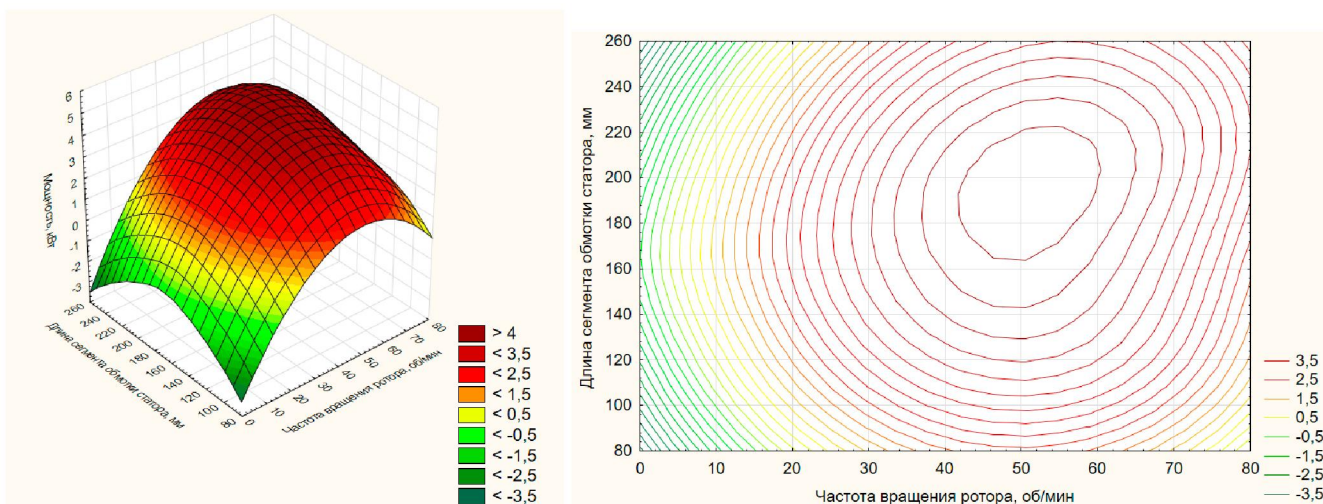


Рисунок 1 – Поверхности откликов, характеризующие значение мощности в зависимости от частоты вращения ротора и длины статорной обмотки

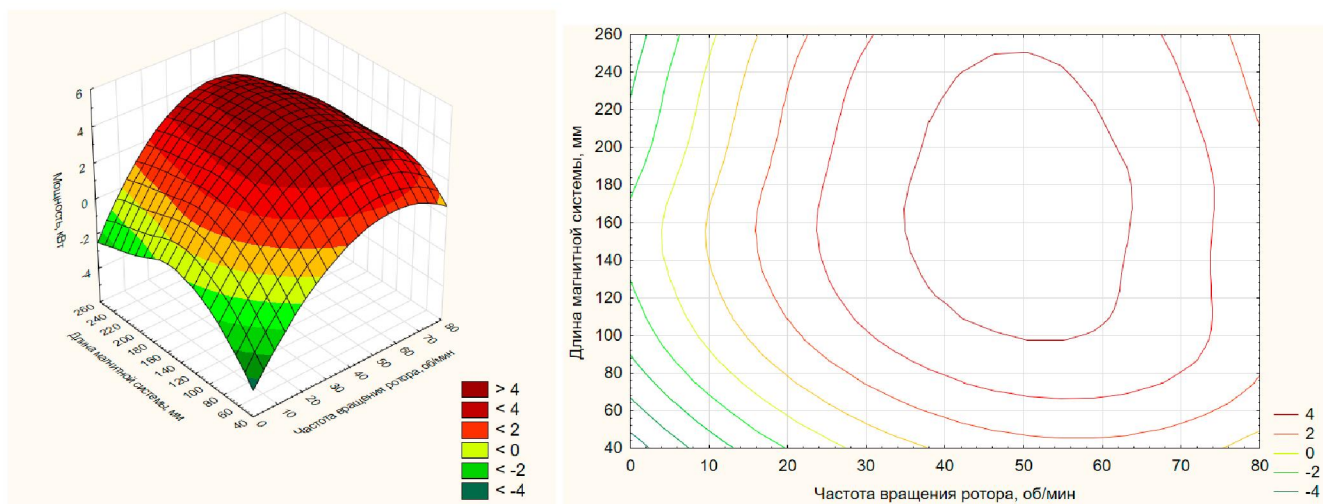


Рисунок 2 – Поверхности откликов, характеризующие значение мощности в зависимости от частоты вращения ротора и длины магнитной системы

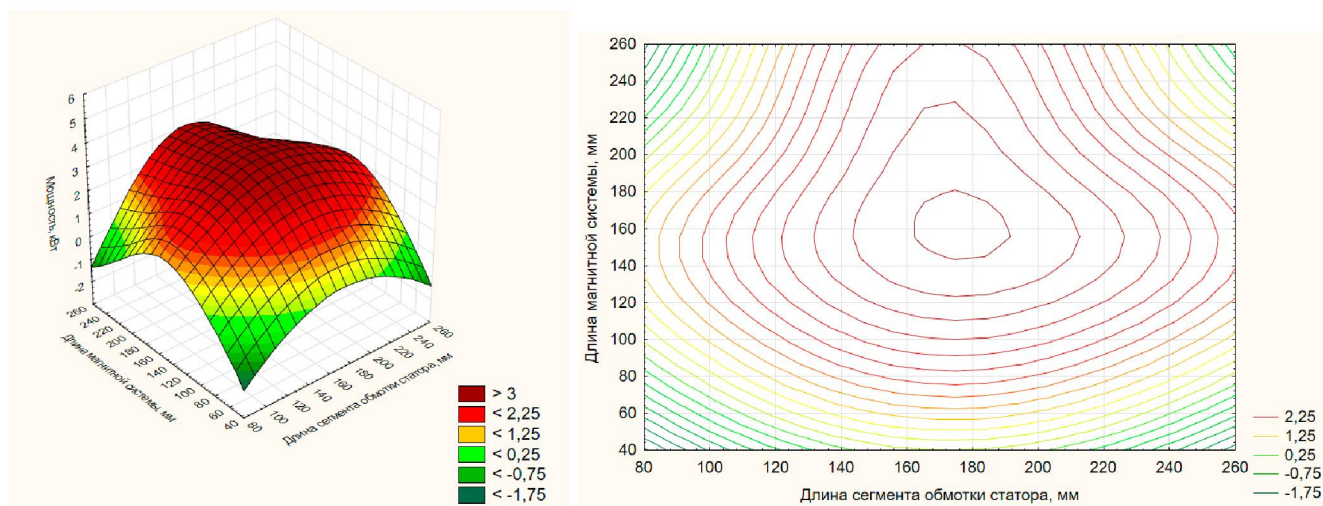


Рисунок 3 – Поверхности откликов, характеризующие значение мощности в зависимости от длины статорной обмотки и длины магнитной системы

**Список источников**

1. Возобновляемая энергия в России: от возможности к реализации. М.: Международное энергетическое агентство, 2004. 120 с.

2. Чарыков В.И., Городских А.А. Концепция использования ветроэнергетических установок в Курганской области // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2018. С. 152-156.

3. Закиров Д.З., Евдокимов А.А., Ермакова Е.Н. Электрический генератор малой мощности для системы энергоснабжения удаленных потребителей // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России: сборник материалов I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. Сургут-М.: Знание-М, 2022. С. 229-234.

4. Соломин Е.В., Сироткин Е.А. Состояние развития мировой ветроиндустрии // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 5 (145). С. 20-25.

5. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.

6. Чарыков В.И., Новикова В.А., Городских А.А. Экспертная оценка ветроэнергетического потенциала Курганской области на основе многолетних наблюдений // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2018. С. 80-87.

7. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.

8. Расчет механических колебаний в технических системах агробизнеса / И.П. Попов [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. 2021. № 4. С. 59-66.

9. Тихоходный электрический генератор на постоянных магнитах: пат. 2602802 Рос. Федерация. № 2013124190/07 / С.Г. Игнатьев, А.А. Евдокимов; заявл. 07.07.2015; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32. 7 с.

10. Буторин В.А., Чарыков В.И., Мошкин В.И. Энергосбережение: теория, практика. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2019. 146 с.

11. Новик Ф.С. Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение: Техника, 1980. 304 с.

12. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1969. 253 с.

13. Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Копытин И.И. Инновационные решения при конструировании электромагнитных сепараторов. Курган: Изд-во Курганского Государственного университета, 2015. 182 с.

14. Евдокимов А.А. Разработка электромагнитного сепаратора для очистки технологических жидкостей металлообрабатывающих станков ремонтных предприятий АПК: дис...канд. техн. наук: 05.20.02: утв. 24.03.2017. Троицк, 2017. 174 с.

15. Фоминых А.В., Шарипов А.Г., Овчинников Д.Н. Обеспечение устойчиво работы фильтрующих центрифуг. Курган: Изд-во Курганской ГСХА, 2012. 129 с.

16. Шарипов А.Г. Повышение эффективности процесса разделения соевой суспензии путем обоснования параметров и режимов работы фильтрующей центрифуги: дис...канд. техн. наук: 05.20.01: утв. 17.05.2005. Челябинск, 2005. 177 с.

17. Расчет магнитной системы магнитоэлектрических генераторов мощностью до 10 кВ для ветроэнергетических установок / А.А. Евдокимов [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. № 1. С. 27-34.

**References**

1. *Vozobnovlyаемая энергия v Rossii: ot vozmozhnosti k realizatsii* [Renewable energy in Russia: from possibility to implementation]. М.: Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo; 2004: 120. (In Russ).

2. Charykov V.I., Gorodskih A.A. Kontseptsiya ispol'zovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok v Kurganskoi oblasti [The concept of using wind power plants in the Kurgan region]. Collection of articles based on the materials of the II All-Russian (national) scientific and practical conference «Priority directions for the development of energy in the agro-industrial complex». Kurgan: Kurganskaya GSKhA; 2018: 152-156. (In Russ).

3. Zakirov D.Z., Evdokimov A.A., Ermakova E.N. Elektricheskii generator maloi moshchnosti dlya sistemy energosnabzheniya udalennykh potrebitelei [A low-power electric generator for the power supply system of remote consumers]. Collection of materials of the I All-Russian scientific and practical conference with international participation «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia». Surgut-M.: Znanie-M; 2022: 229-234. (In Russ).

4. Solomin E.V., Sirotkin E.A. Sostoyanie razvitiya mirovoi vetroindustrii [The state of development of

the global wind industry]. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2014; (5-145): 20-25. (In Russ).

5. Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Power supply systems with wind and solar power plants]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet; 2015: 128. (In Russ).

6. Charykov V.I., Novikova V.A., Gorodskih A.A. *Ekspertnaya otsenka vetroenergeticheskogo potentsiala Kurganskoi oblasti na osnove mnogoletnikh nablyudenii* [Expert assessment of the wind energy potential of the Kurgan region based on long-term observations]. Collection of articles based on the materials of the II All-Russian (national) scientific and practical conference «Priority directions for the development of energy in the agro-industrial complex». Kurgan: Kurganskaya GSKhA; 2018: 80-87. (In Russ).

7. Haritonov V.P. *Avtonomnye vetroelektricheskie ustanovki* [Autonomous wind turbines]. M.: GNU VIESKh; 2006: 280. (In Russ).

8. Popov I.P. et al. *Raschet mekhanicheskikh kolebaniy v tekhnicheskikh sistemakh agrobiznesa* [Calculation of mechanical oscillations in agribusiness technical systems]. *Vestnik Kurganskoj GSXA*. 2021; (4): 59-66. (In Russ).

9. Low-speed electric generator with permanent magnets: pat. 2602802 Russian Federation. No. 2013124190/07 / Ignatiev S.G., Evdokimov A.A.; statement 07 July 2015; publ. November 20, 2016, Bull. No. 32. P. 7. (In Russ).

10. Butorin V.A., Charykov V.I., Moshkin V.I. *Energoberezhenie: teoriya, praktika* [Energy saving: theory, practice]. Kurgan: Kurganskii gosudarstvennyi universitet; 2019: 146. (In Russ).

11. Novik F.S. Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Optimization of metal technology processes by methods of planning experiments]. M.: Mashinostroenie: Tekhnika; 1980: 304. (In Russ).

12. Adler Yu.P. *Vvedenie v planirovanie eksperimenta* [Introduction to Experiment Design]. M.: Metallurgiya; 1969: 253. (In Russ).

13. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Kopytin I.I. *Innovative solutions in the design of electromagnetic separators*. Kurgan: Publishing House of Kurgan State University; 2015: 182. (In Russ).

14. Evdokimov A.A. *Razrabotka elektromagnitnogo separatora dlya ochistki tekhnologicheskikh zhidkostei metalloobrabatyvayushchikh stankov remontnykh predpriyatii APK* [Development of an electro-

magnetic separator for cleaning process fluids of metalworking machines of agricultural repair enterprises] [Dissertation]. Troitsk; 2017. (In Russ).

15. Fomin A.V., Sharipov A.G., Ovchinnikov D.N. *Obespechenie ustoichivo raboty fil'truyushchikh tseftrifug* [Ensuring stable operation of filter centrifuges]. Kurgan: Kurganskaya GSKhA; 2012: 129. (In Russ).

16. Sharipov A.G. *Povyshenie effektivnosti protsessy razdeleniya soevoi suspenzii putem obosnovaniya parametrov i rezhimov raboty fil'truyushchei tseftrifugi* [Improving the efficiency of the soy suspension separation process by substantiating the parameters and operating modes of the filter centrifuge] [Dissertation]. Chelyabinsk; 2005: 177. (In Russ).

17. Evdokimov A.A. et al. *Raschet magnitnoi sistemy magnitoelektricheskikh generatorov moshchnost'yu do 10 kVA dlya vetroenergeticheskikh ustanovok* [Calculation of the magnetic system of magnetoelectric generators with a power of up to 10 kV for wind power plants]. *Electrical and information complexes and systems*. 2018; (1): 27-34. (In Russ).

#### Информация об авторах

A.A. Евдокимов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 849453.

V.I. Чарыков – доктор технических наук, профессор; AuthorID 778355.

P.P. Саттаров – доктор технических наук, доцент; AuthorID 430230.

I.I. Копытин – кандидат технических наук; AuthorID 841114.

#### Information about the author

A.A. Evdokimov – Candidate of Technical Sciences, associate professor; AuthorID 849453.

V.I. Charykov – Doctor of Technical Sciences, professor; AuthorID 778355.

R.R. Sattarov – Doctor of Technical Sciences, associate professor; AuthorID 430230.

I.I. Kopytin – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 841114.

Статья поступила в редакцию 27.08.2022; одобрена после рецензирования 27.10.2022; принята к публикации 16.11.2022.

The article was submitted 27.08.2022; approved after reviewing 27.10.2022; accepted for publication 16.11.2022.