

УДК. 622. 333. 044

*Джолдошева Т.Дж.**к.т.н., доц. Ошского технологического универ. им. М.М. Адышева, Кыргызская Республика**Эрмекова З.К.**к.т.н., доц. Кыргызско-Узбекского Межд. универ. им. Б.Сыдыкова, Кыргызская Республика**Абдымомун у.С.**преп. Ошского технологического универ. им. М.М. Адышева, Кыргызская Республика*

ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫН САПАТЫН МАТЕМАТИКАЛЫК ПЛАНДОО МЕНЕН БААЛОО

Бул жумушта теплоэлектроцентральдарда өндүрүлгөн электр энергиясынын сапаты изилдөөнүн предмети болуп саналат. Изилдөөнүн максаты: чыңалуунун төмөндөшүнүн жана жыштыктын өзгөрүшүнүн электр энергиясынын сапатына тийгизген таасирин аныктоо. Эксперимент пландаштыруунун математикалык ыкмасы колдонулган. Алардын негизинде электр энергиясынын сапатынын факторлоруна: чыңалуунун төмөндөшүнүн жана жыштыктын өзгөрүшүнүн таасирине көз карандылыгы үчүн регрессиялык теңдеме алынган. Чыңалуунун жана жыштыктын четтөөлөрүнүн жупташкан өз ара аракетинде электр энергиясынын сапаты биринчи кезекте жыштык параметрине көз каранды экени аныкталган. Алынган натыйжалар керектөөчүлөрдүн талаптары боюнча электр энергиясынын сапатын жакшыртууга мүмкүндүк берет.

***Негизги сөздөр:** толук фактордук эксперимент; факторлор; электр энергиясынын сапаты; чыңалуунун түшүүсү; жыштыктын өзгөрүшү; регрессиялык теңдеме; адекваттуулук; жуптардын өз ара аракеттенүүсү.*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В данной работе предметом исследования является качество электрической энергии, производимой в тепловых электрических станциях. Проведены исследования с целью определения влияния падения напряжения и изменения частоты на качество электрической энергии. Использован математический метод планирования эксперимента. На их основе получено уравнение регрессии зависимости качества электрической энергии от факторов: влияние падения напряжения и изменения частоты. Выявлено, что качество электрической энергии при парном взаимодействии отклонений напряжения и частоты, в первую очередь зависит от параметра частоты. Полученные результаты позволяют улучшить качество электрической энергии по требованиям потребителей.

***Ключевые слова:** полный факторный эксперимент; факторы; качество электрической энергии; падение напряжения; изменение частоты; уравнение регрессии; адекватность; парное взаимодействие.*

ASSESSMENT OF ELECTRIC ENERGY QUALITY BY MATHEMATICAL PLANNING METHOD

In this work, the subject of research is the quality of electrical energy, produced in thermal power plants. Research has been carried out to determine the effect of voltage drop and frequency change on the quality of electrical energy. A mathematical method of experiment planning was used. Based on them, a regression equation was obtained for the dependence of the electrical energy quality on factors: the influence of voltage drop and frequency change. It has been revealed that the quality of electrical energy during the paired interaction of voltage and frequency deviations primarily depends on the frequency parameter. The results obtained make it possible to improve the quality of electrical energy, according to consumer requirements.

***Key words:** full factorial experiment; factors; quality of electrical energy; voltage drop; frequency change; regression equation; adequacy; pair interaction.*

Качество электрической энергии (ЭЭ) является ключевым аспектом надежного функционирования энергетических систем и удовлетворения потребностей потребителей. На

качество ЭЭ влияют множество факторов, среди которых наиболее значимыми являются падение напряжения и изменение частоты. Эти изменения могут приводить к отклонению от установленных стандартов, что негативно сказывается на работе электрических устройств и оборудования [1-3]. Для точной оценки воздействия таких факторов на качество ЭЭ целесообразно использовать статистические методы [4-5]. Эти методы позволяют систематически анализировать данные и определять выходной параметр, характеризующий качество электрической энергии, что в свою очередь, способствует разработке мер по его улучшению и поддержанию на высоком уровне.

Для изучения влияния определенных технических факторов на качество электроэнергии были проведены эксперименты в соответствии с полным факторным экспериментом типа 2^k , где k - количество факторов, а 2 - количество уровней их изменений. Каждый эксперимент был повторен три раза [6-7].

Многие факторы могут влиять на качество ЭЭ.

Были выбраны следующие факторы и уровни их варьирования, влияющие на качество ЭЭ:

C_1 – установившееся отклонение напряжения (В), $C_1^- = 198$, $C_1^+ = 242$;

C_2 – отклонение частоты (Гц), $C_2^- = 47$, $C_2^+ = 51$;

Выходной параметр – качество $P_{ЭЭ}$.

Надо отметить, что эти уровни их варьирования факторов были отобраны в результате экспериментов, а остальные факторы оставались неизменными, менялся только один фактор [6-7].

Мощность тока в данном эксперименте тоже считаем постоянным.

Значения напряжения и частоты тока за 10 замеров получены следующие данные таблица 1.

Таблица 1. - Экспериментальные данные тока и напряжения

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	198,1	209,2	199,3	197,5	231,1	242	209,1	220,2	199,74	210,2
f, Гц	48,6	47,1	49,8	49,8	47,4	49,1	47,65	48,24	50,0	50,1

Была поставлена задача построить уравнение регрессии: зависимость качества ЭЭ от таких параметров, как взаимодействующих совместно на выходной параметр ЭЭ, т.е. качество ЭЭ. Затем, проверить полученное уравнение регрессии, в виде модели на адекватность. Выбран параметр из 10 экспериментов. В таблица 2 приведены результаты опытов для 2 факторов выходных параметров.

Таблица 2.- Первоначальная матрица планирования ПФЭ 2^2 , данные экспериментов тока и напряжения ТЭ

№ эксперимента	Исследуемые факторы		Результаты опытов			
	C_1	C_2	P_1 , В	В, % от 220	P_2 , Гц	Гц, % от 49,5
1	+	+	198	10,0	48,5	2,02
2	-	+	209	5,0	47,0	5,05
3	+	-	199	9,54	49,7	0,41
4	-	-	198,5	9,77	50,0	1,01
5	+	+	231	5,0	47,5	4,04

6	-	+	209,7	4,68	49,0	1,01
7	+	-	220	0,0	47,75	3,53
8	-	-	242	10,0	48,25	0,62
9	+	+	199,75	9,2	51,0	3,03
10	-	+	210	4,55	50,51	2,021

Полный факторный эксперимент 2^2 и его оптимизация был проведен в следующем порядке [8-9]:

- 1) преобразование переменных с помощью кодирования;
- 2) расширение матрицы планирования с использованием закодированных переменных с учетом взаимодействий между ними и добавление столбца средних значений качества ЭЭ;
- 3) определение коэффициентов уравнения регрессии;
- 4) проверка вычисленных коэффициентов на статистическую значимость с предварительным определением дисперсии воспроизводимости и вывод уравнения регрессии в кодированных переменных;
- 5) оценка адекватности уравнения регрессии;
- 6) интерпретация полученной модели, т.е. уравнение регрессии для оценки ЭЭ;
- 7) уравнение регрессии представленное в исходных единицах:

1. Преобразование переменных с помощью кодирования. Находится оптимальное значение отклонения напряжения и частоты ЭЭ на электрических станциях для каждого фактора, а затем определяется центр их отклонения от стандартных величин. В таблице 3 устанавливается зависимость их от закодированных значений.

Таблица 3. - Оптимальная связь кода факторов от интеграла их варьирования

Факторы	Верхний уровень C_1^+	Нижний уровень C_2^+	Центр C_i^0	Интервал варьирования λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
C1	242,0	198,0	220,0	22,0	$X1 = \frac{C_1 - 220}{22}$
C2	50,0	47,0	49,50	1,50	$X2 = \frac{C_2 - 49,5}{1,5}$

2. Расширение матрицы планирования с использованием закодированных переменных с учетом взаимодействий между ними и добавлением столбца средних значений качества ЭЭ. Вычисляется среднее значение для каждого эксперимента [6-8] и составляется матрица планирования, учитывая все взаимодействия и средние значения качества ЭЭ в таблице 4.

Таблица 4. - Результаты опытов по матрице планирования

№ опыта	Интерпретация факторов		Парные взаимодействия факторов		Итоги опытов		Средние итоги опытов \bar{P}_j [11]
	X ₁	X ₂	X ₁ · X ₂	X ₂ · X ₁	P ₁ %	P ₂ %	
1	+	+	+	+	10,0	2,02	6,01
2	-	+	-	+	5,0	5,05	5,025
3	+	-	-	-	9,54	0,41	4,975
4	-	-	+	-	9,77	1,01	5,39
5	+	+	+	-	5,0	4,04	4,52
6	-	+	-	-	4,68	1,01	2,845
7	+	-	-	+	0,0	3,53	1,765
8	-	-	+	+	10,0	0,62	5,265
9	+	+	-	-	9,2	3,03	6,115
10	-	+	-	-	4,55	2,02	3,285

3. Определение коэффициентов уравнения регрессии: коэффициенты уравнения регрессии определяются по следующим формулам [8]:

$$b_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \bar{P}_j; \quad b_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n \bar{X}_{ji} \cdot \bar{P}_j; \quad i = \overline{L, k} \quad (1)$$

$$b_0 = \frac{1}{10} \sum_j^n \bar{P}_j = \frac{1}{10} (6,1 + 5,025 + 4,975 + 5,39 + 4,52 + 2,845 + 1,765 + 5,265 + 6,115 + 3,285) \approx 4,53;$$

$$b_1 = \frac{1}{10} \sum_j^n \bar{P}_j = \frac{1}{10} (6,1 - 5,025 + 4,975 - 5,39 + 4,52 - 2,845 + 1,765 - 5,265 + 6,115 - 3,285) \approx +0,17;$$

$$b_2 = \frac{1}{10} \sum_j^n \bar{P}_j = \frac{1}{10} (6,1 + 5,025 - 4,975 - 5,39 + 4,52 + 2,845 - 1,765 - 5,265 + 6,115 + 3,285) \approx +1,05;$$

$$b_{1,2} = \frac{1}{10} \sum_j^n \bar{P}_j = \frac{1}{10} (6,1 - 5,025 - 4,975 + 5,39 + 4,52 - 2,845 - 1,765 + 5,265 + 6,115 - 3,285) \approx +0,95;$$

$$b_{2,1} = \frac{1}{10} \sum_j^n \bar{P}_j = \frac{1}{10} (6,1 + 5,025 - 4,975 - 5,39 - 4,52 - 2,845 + 1,765 + 5,265 + 6,115 + 3,285) \approx +0,98.$$

Вычисленные коэффициенты уравнения регрессии [8] приведены в таблице 5:

Таблица 5. – Коэффициенты уравнения регрессии

b_0	b_1	b_2	$b_{1,2}$	$b_{2,1}$
4,53	+0,17	+1,05	+0,95	+0,98

Зависимость качества ЭЭ от двух параметров: установившееся отклонение напряжения и отклонение частоты описывается в виде уравнения регрессии:

$$P = 4,53 + 0,17 \cdot X_1 + 1,05 \cdot X_2 + 0,95 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,98 \cdot X_2 \cdot X_1 \quad (2)$$

4. Проверка вычисленных коэффициентов на статистическую значимость с предварительным определением дисперсии воспроизводимости и вывод уравнения регрессии в кодированных переменных [3]:

находим дисперсию воспроизводимости $- S_{\{P\}}^2$

$$S_{\{P\}}^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (P_{ji} - \bar{P}_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (3)$$

Для удобства расчеты оформляется в виде таблицы 6:

Таблица 6. - Расчеты выборочных дисперсий

j	P ₁	P ₂	\bar{P}_j	$(P_{j1} - \bar{P}_j)^2$	$(P_{j2} - \bar{P}_j)^2$	S_j^2
1	10,0	2,02	6,01	15,9201	15,9201	15,9201
2	5,0	5,05	5,025	0,0006	0,00063	0,00061
3	9,54	0,41	4,975	20,839	20,840	20,8395
4	9,77	1,01	5,39	19,1844	19,1844	19,1844
5	5,0	4,04	4,52	0,2304	0,2304	0,2304
6	4,68	1,01	2,845	3,3672	3,3672	3,3672
7	0,0	3,53	1,765	3,1152	3,1152	3,1152
8	10,0	0,62	5,265	22,4202	21,5760	21,9981
9	9,2	3,03	6,115	9,5172	9,5172	9,5172
10	4,55	2,02	3,285	1,6002	1,6002	1,6002
						$\sum_{i=1}^{10} S_i^2 = 95,772$

Дисперсия воспроизводимости равна:

$$S_{\{P\}}^2 = \sum_{i=1}^{10} S_i^2 = \frac{1}{10} \cdot 95,772 = 9,56$$

Затем, вычисляется среднеквадратичное отклонение коэффициентов

$$S_{(P)}^2 = \sqrt{\frac{S_{\{P\}}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{9,56}{10 \cdot 2}} = \sqrt{0,478} \approx 0,69 \approx 0,7. \quad (4)$$

Из таблицы распределения Стьюдента получается значение $t_{кр}=3,169$. $t_{кр}$ - это критическая точка распределения для числа степеней свободы $n(m-1)=10 \times 2=20$ при уровне значимости 0,01 [8].

Далее находится, $t_{кр} \cdot S_{коэф} \approx 3,169 \cdot 0,7 \approx 2,2183$

При сравнении значения 0,7 с коэффициентами уравнения регрессии (таблица 5), можно заметить, что все коэффициенты, кроме b_1 , превышают по абсолютной величине 0,7. Все эти коэффициенты, за исключением b_1 , являются статистически значимыми. Если предположить, что b_1 - не значимый коэффициент, то получится уравнение регрессии в закодированных переменных [6-7]:

$$P = 4,53 + 1,05 \cdot X_2 + 0,95 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,98 \cdot X_2 \cdot X_1 \quad (5)$$

5. Оценка адекватности уравнения регрессии из (5). Далее, с помощью коэффициента Фишера проверяется на адекватность найденное уравнение регрессии из уравнения (5) [8]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_p^2} \quad (6)$$

Затем, пользуясь данными показателей качества ЭЭ на ТЭЦ, а также пользуясь коэффициентами, найденными из уравнения регрессии, вычисляем остаточную дисперсию для дальнейших выводов [8].

$$\tilde{P}_1 = 4,53 + 1,05 + 0,95 + 0,98 = 7,51;$$

$$\tilde{P}_2 = 4,53 - 1,05 + 0,95 - 0,98 = 3,45;$$

$$\tilde{P}_3 = 4,53 + 1,05 - 0,95 - 0,98 = 3,65;$$

$$\tilde{P}_4 = 4,53 - 1,05 - 0,95 - 0,98 = 1,55;$$

$$\tilde{P}_5 = 4,53 - 1,05 + 0,95 - 0,98 = 3,45;$$

$$\tilde{P}_6 = 4,53 - 1,05 + 0,95 + 0,98 = 5,41;$$

$$\tilde{P}_7 = 4,53 - 1,05 - 0,95 + 0,98 = 3,51;$$

$$\tilde{P}_8 = 4,53 + 1,05 + 0,95 - 0,98 = 5,55;$$

$$\tilde{P}_9 = 4,53 - 1,05 - 0,95 - 0,98 = 1,55;$$

$$\tilde{P}_{10} = 4,53 + 1,05 + 0,95 + 0,98 = 7,51$$

На основании формулы (2) вычисляется остаточная дисперсия:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{10}{2} \sum_{j=1}^{10} (\tilde{p}_j - \bar{P}_j)^2 = 4,53 \cdot [(7,51 - 6,01)^2 + (3,45 - 5,025)^2 + (3,65 - 4,975)^2$$

$$+ (1,55 - 5,39)^2 + (3,45 - 4,52)^2 + (5,41 - 2,845)^2 + (3,51 - 1,765)^2 + (5,55 - 5,265)^2$$

$$+ (1,55 - 6,115)^2 + (7,51 - 3,285)^2] = 4,53 \cdot 70,776 = 320,62$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\{P\}}^2} = \frac{320,62}{0,7} = 46,6$$

Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 99,34$ [8].

Согласно критерию адекватности уравнений, значение расчётной статистики F ($F_{\text{расч}}$) составляет 46,6; а табличное значение ($F_{\text{табл}}$) - 99,34. Это означает, что уравнение регрессии (5) является адекватным.

6. Интерпретация полученной модели, т.е. уравнения регрессии для оценки ЭЭ: из уравнения (5) следует, что наибольшее воздействие на качество ЭЭ оказывает переменная

x_2 - отклонение частоты, так как её коэффициент имеет наибольшую абсолютную величину. За ним, по мере значимости воздействия на качество электроэнергии, следует парное взаимодействие: $x_{2,1}$ – установившееся отклонение напряжения, $x_{1,2}$ и парное взаимодействие сочетание отклонения частоты и установившееся отклонение напряжения.

7. Уравнение регрессии, представленное в исходных единицах: рассчитанное в уравнении регрессии (5) вместо переменной x_i можем заменить их натуральными переменными из таблицы 3.

$$P = 4,53 + 1,05 \cdot \left(\frac{C_2-49,5}{1,5}\right) + 0,95 \cdot \left(\frac{C_1-220}{22}\right) \cdot \left(\frac{C_2-49,5}{1,5}\right) + 0,98 \cdot \left(\frac{C_2-49,5}{1,5}\right) \cdot \left(\frac{C_1-220}{22}\right)$$

После преобразования получается уравнение регрессии в виде натуральных переменных:

$$P = 4,53 + 0,7 \cdot C_2 + 0,06 \cdot C_1 \cdot C_2 - 2,9 \cdot C_1 - 12,86 \cdot C_2 + 602,25 \quad (6)$$

Выводы:

1. Выявлено, что методом математического планирования эксперимента по качеству электрической энергии получено уравнение регрессии:

$$P = 4,53 + 0,95 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,98 \cdot X_2 \cdot X_1;$$

2. Определено, что качество электрической энергии - $P_{ЭЭ}$ при парном взаимодействии факторов отклонений напряжения и частоты, в первую очередь зависит от параметра частоты.

Список литературы:

1. **Масалов, Е.И.** Отраслевая экономика: организация, планирование и управление энергетическим производством [Текст] / Е.И.Масалов, Д.В.Ермолаев. - Курск: Универ. книга, 2024. - 142 с.
2. **Баранников, А.И.** Управление качеством и стандартизация [Текст]: практ.для студ. / А.И. Баранников, Т.Ф. Манцерова. - Минск: БНТУ, 2012. – 35 с.
3. **Мясникова, О.Ю.** Качество на предприятиях энергетики [Текст] / О.Ю. Мясникова // Саратовский социально-эконом. инст. (филиал) РЭУ им. Г.В. Плеханова. - Саратов, 2019. - №3 (59). - С. 48 - 57.
4. **Джолдошева, Т.Дж.** Качество на энергетических предприятиях [Текст] / Т.Дж.Джолдошева, С.Абдымомун у., Н.Т.Мойдунов // «Research Focus». <https://doi.org/10.5281/zenodo.10631713>.
5. **Исманжанов, А.И.** Количественная оценка влияния факторов на потребительские показатели угольных брикетов [Текст] / А.И.Исманжанов, Т.Дж.Джолдошева, Ч.А.Адылов // Наука. Образование. Техника. - Ош: КУУ, 2018. - №1(61). - С. 28 - 34.
6. **Исманжанов, А.И.** Оптимизация технологии брикетирования углей с продуктами переработки биомассы методом математического планирования эксперимента [Текст] / А.И.Исманжанов, Т.Дж.Джолдошева // Наука. Образование. Техника. - Ош: КУУ, 2016. - №1(61). - С. 5 - 10.
7. **Гмурман, В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике [Текст]: учеб. пособ. / В.Е.Гмурман. - М.: Высшая школа, 2003. – 405 с.

Поступила в редакцию: 25. 09. 2024 г.

УДК 620.9:681.5

Оморов Т.Т.

д.т.н., член-корр. НАН Кыргызской Республики

Иманакунова Ж.С.

к.т.н., доцент Кырг. гос. техн. университета им. И. Раззакова, Кыргызская Республика

Осмонова Р.Ч.

к.т.н., доцент Кырг. гос. техн. университета им. И. Раззакова, Кыргызская Республика

Жолдошов Т.М.

к.т.н., доцент Ошского государственного университета, Кыргызская Республика

Асиев А.А.

к.т.н., доцент Кырг. гос. техн. университета им. И. Раззакова, Кыргызская Республика