

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173>

УДК 621.019

Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций

Э. М. Фархадзаде¹⁾, А. З. Мурадалиев¹⁾, Т. К. Рафиева¹⁾, А. А. Рустамова¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Для энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе, срок службы которых превышает расчетный, при сравнении и ранжировании приходится учитывать не только показатели экономичности (например, удельный расход условного топлива), но и надежности и безопасности. На практике так и поступают. Однако учет этот интуитивный. Интуитивный подход решает данную проблему, но далеко не всегда достоверно. Казалось бы, существуют достаточно полно разработанный математический аппарат для регрессионного и корреляционного анализа, множество алгоритмов и программ расчета. Но есть одна особенность, неучет которой еще больше увеличивает риск ошибочного решения. Дело в том, что среднемесячные данные о технико-экономических показателях энергоблоков не относятся к выборкам из генеральной совокупности, соответствующим нормальному закону распределения, что является необходимым условием применения таких методов. Это неслучайная выборка из конечной совокупности многомерных данных. Естественно, методы классификации многомерных данных не просты, требуют разработки специальных программ расчета, рекомендуемых решения по техническому обслуживанию и ремонту, распределению нагрузок и др. В статье приводится лишь один, но очень важный вопрос проблемы – оценка достоверности предположения о линейной взаимосвязи технико-экономических показателей. Его решение одновременно покажет трудности в сопоставлении эффективности работы энергоблоков старшего типа. Отмечается, что известный и используемый на практике метод оценки достоверности уравнения линейной регрессии, основанный на построении «доверительного коридора» или «полосы неопределенности», не позволяет ответить на главный вопрос: соответствует ли взаимосвязь рассматриваемых технико-экономических показателей линейной? Предложен новый метод оценки этой взаимосвязи, основанный на построении фидуциальной области возможных реализаций линий регрессии. Показано, что для малых значений числа реализаций выборки значительная часть независимых выборок имеет коэффициент корреляции, превышающий 0,9.

Ключевые слова: энергоблок, технико-экономические показатели, взаимосвязь, линейная регрессия, достоверность, доверительная область, критерий

Для цитирования: Достоверность линейной взаимосвязи технико-экономических показателей энергоблоков 300 МВт тепловых электростанций / Э. М. Фархадзаде [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 2. С. 163–173. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173>

Адрес для переписки

Фархадзаде Эльмар Мехтиевич
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
просп. Г. Зардаби, 94,
Az1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99 4012 431-64-07
elmeh@rambler.ru

Address for correspondence

Farhadzadeh Elmar M.
Azerbaijan Scientific-Research and Design-
Prospecting Power Engineering Institute
94, G. Zardabi Ave.,
Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +99 4012 431-64-07
elmeh@rambler.ru

Certainty of Linear Interrelation of Technical and Economic Parameters of Power Units of 300 MWt Thermal Power Stations

E. M. Farhadzadeh¹⁾, A. Z. Muradaliyev¹⁾, T. K. Rafiyeva¹⁾, A. A. Rustamova¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. For 300 MWt gas-and-oil-burning power units which durability exceeds the estimated one, when comparing and ranking, it is necessary to take into account not only efficiency indicators (for example, the specific consumption of conventional fuel), but also indicators of reliability and safety. In practice, this is exactly what is being done. However, it is being done just by intuition. An intuitive approach solves this problem, but not always certainly. It would seem that there is a quite fully developed mathematical apparatus for regression and correlation analysis, a set of algorithms and calculation programs. But there is one specific feature that, if it is not taken into account, further increases the risk of an erroneous decision. The fact is that the average monthly data on the technical and economic indicators of power units do not belong to the samples from the general population that correspond to the normal distribution law, the latter being a necessary condition for using such methods. This is a non-random sample from a finite set of multidimensional data. Naturally, the methods of classification of multidimensional data are not simple; they require the development of special calculation programs that recommend solutions for maintenance and repair, load distribution, etc. The article presents only one, but very important issue of the problem, viz. the assessment of the reliability of the assumption about the linear relationship of technical and economic indicators. Its solution will simultaneously demonstrate difficulties in comparing the efficiency of aging power units. It is noted that the known and practically used method for assessing the reliability of the linear regression equation, based on the construction of a “confidence corridor” or “uncertainty band”, does not allow one to answer the main question, viz. whether the relationship of the considered technical and economic indicators corresponds to a linear one. A new method for evaluating this relationship is proposed, based on constructing a fiducial domain of possible regression line implementations. It is shown that for small values of the number of sample implementations, a significant part of independent samples has a correlation coefficient exceeding 0.9.

Keywords: power unit, technical and economic parameters, interrelation, linear regression, reliability, confidential area, criterion

For citation: Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Rustamova A. A. (2020) Certainty of Linear Interrelation of Technical and Economic Parameters of Power Units of 300 MWt Thermal Power Stations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (2) 163–173. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-163-173> (in Russian)

Введение

Оценка взаимосвязи между технико-экономическими показателями (ТЭП) энергоблоков тепловых электростанций относится к одному из важнейших условий объективного сравнения и ранжирования энергоблоков по эффективности работы [1, 2]. И если оперативное сравнение и ранжирование энергоблоков, срок службы которых не превышает расчетный, вполне достоверно при традиционном подходе, то в случае превышения расчетного срока службы все в большей степени приходится учитывать не только экономичность работы, но и надежность, и безопасность технического состояния. На практике так и поступают. Только учет этот интуитивный.

Особенно данная необходимость проявляется в условиях, когда уточнение энергетических характеристик энергоблоков становится экономически нецелесообразным [3, 4].

Интуитивный подход решает данную проблему, но далеко не всегда достоверно. Этому активно препятствуют систематический рост стоимости топлива, снижение квалификации персонала, трудности своевременного приобретения запасных узлов, необходимость учета огромного количества факторов, в том числе изменение самих ТЭП. Взаимосвязанные факторы удобны в эксплуатации, так как в определенной степени защищают от неточностей регистрации и расчета ТЭП. Но для количественной оценки интегрального показателя эффективности работы [5] они нежелательны, поскольку искажают оценку интегрального показателя. Казалось бы, в чем проблема? Для этого существует корреляционный и регрессионный анализ [6]. Но не тут-то было: предпосылки применения таких методов далеко не всегда учитывают особенности статистических данных оборудования и устройств (объектов) электроэнергетических систем. Так, среднемесячные значения ТЭП – это не выборка из генеральной совокупности случайных данных, соответствующая некоторому закону распределения. Это не случайная выборка из конечной совокупности многомерных данных, т. е. зависящих от большого числа факторов [7, 8]. Но трудности расчета взаимосвязи ТЭП в основном возникают вследствие супермалого объема многомерных данных. Напомним, что объем выборки менее 30 принято считать малым, а менее 10 – супермалым. И если классические методы оценки взаимосвязи ТЭП ориентированы преимущественно на анализ десятков реализаций случайных величин, то оперативные показатели надежности, экономичности и безопасности объектов электроэнергетической системы вычисляются обычно по единицам реализаций. Например, число среднемесячных значений ТЭП равно числу энергоблоков электростанций, которые для мощных электростанций не исчисляются десятками.

При оценке взаимосвязи ТЭП важнейшим вопросом является ее вид – она линейная или нелинейная, так как от этого зависят формулы расчета коэффициентов корреляции. Поскольку линейная корреляционная связь для выборок из генеральной совокупности изучена достаточно полно, обычно вопрос несколько конкретизируется: насколько правдоподобна линейная взаимосвязь между ТЭП?

Традиционный подход к контролю достоверности предположения о линейной взаимосвязи технико-экономических показателей

Известно, что если коэффициент линейной корреляции не превышает своего критического значения для малочисленных выборок ТЭП, это еще не означает, что взаимосвязь недостаточна [5]. Такое возможно при нелинейной корреляционной связи ТЭП. Поэтому столь важна возможность оценки точности регрессии, которая характеризуется доверительной областью по аналогии с доверительным интервалом. Эта область с вероят-

ностью $(1 - \alpha)$ накрывает истинную линию регрессии. Рассмотрим рекомендуемую последовательность ее расчета [9].

Для построения доверительной области линии регрессии прежде всего определяются коэффициенты данного уравнения. В иллюстративных целях определим эти коэффициенты для среднемесячных значений двух ТЭП: коэффициента полезного действия (КПД) нетто η_n и температуры воздуха после регенеративного воздухоподогревателя (РВП) T_B котельных установок энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе. Расчеты коэффициентов уравнения $\eta_n = (aT_B + b)$ проводим по формулам [7]:

$$a = \frac{\sum \eta_n \sum T_B - n_B \sum \eta_n T_B}{(\sum T_B)^2 - n_B \sum T_B^2}, \quad (1)$$

$$b = M^*(\eta_n) - aM^*(T_B), \quad (2)$$

где $M^*(\eta_n) = [\sum \eta_n] / n_B$; $M^*(T_B) = [\sum T_B] / n_B$.

Далее определяются:

– граничные значения доверительного интервала углового коэффициента a [7]:

$$\underline{a} = a - t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{n_B} + \frac{M^*(T_B)^2}{\sum [T_B - M^*(T_B)]^2}}; \quad (3)$$

$$\bar{a} = a + t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{n_B} + \frac{M^*(T_B)^2}{\sum [T_B - M^*(T_B)]^2}}, \quad (4)$$

где $t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)}$ – статистика Стьюдента; σ_0 – среднее квадратичное значение остаточного суммарного отклонения,

$$\sigma_0 = \frac{1}{n_B - 2} [\sum \eta_n^2 - a \sum T_B \eta_n - b \sum \eta_n]; \quad (5)$$

– граничные значения доверительного интервала для ТЭП η_n по (5):

$$\underline{\eta}_n = M^*(\eta_n) - t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \frac{\sigma \eta_n}{\sqrt{n_B}}; \quad (6)$$

$$\bar{\eta}_n = M^*(\eta_n) + t_{(1-\alpha/2), (n_d-2)} \frac{\sigma \eta_n}{\sqrt{n_B}}, \quad (7)$$

где $\sigma \eta_n = \frac{\sum [\eta_n - M^*(\eta_n)]^2}{n_B - 1}$.

Результаты расчетов по формулам (1)–(7) приведены в табл. 1, 2. Точность вычислений контролировалась применением онлайн-калькуляторов.

Таблица 1

Исходные данные и их преобразования

Source data and its transformations

№ пп	$\eta_{н,э}$	$T_{в,э}$	$\eta_{н,э} \cdot T_{в,э}$	$\eta_{н,э}^2$	$T_{в,э}^2$	$\frac{[T_{в,э} - M^*(T_{в,э})]^2}{M^*(T_{в,э})}$	$\frac{[\eta_{н,э} - M^*(\eta_{н,э})]^2}{M^*(\eta_{н,э})}$	$\eta_{н,р}$	$(\eta_{н,э} - \eta_{н,р})^2$
1	80,7	249,9	20166,93	6512,49	62450,01	262,4	5,29	81,3	0,36
2	83,0	268,9	22318,70	6889,00	72307,21	7,8	0	83,3	0,09
3	83,3	267,7	22299,41	6938,89	71663,29	2,6	0,09	83,2	0,01
4	84,0	267,7	22486,80	7056,00	71663,29	2,6	1,00	83,2	0,64
5	83,3	276,9	23065,77	6938,89	76673,61	116,6	0,09	84,2	0,81
6	83,5	266,6	22261,10	6972,25	71075,56	0,3	0,25	83,1	0,16
7	83,5	265,3	22152,55	6972,25	70384,09	0,6	0,25	83,0	0,25
Σ	581,3	1863	154751,26	48279,77	496217,06	392,9	6,97	581,3	2,32

Таблица 2

Результаты расчета интервальной полосы

Results of calculating the interval band

Показатель	$M^*(\eta_{н,э})$	$M^*(T_{в,э})$	n_b	v	a	b	$\sigma^*(\eta_{н,э})$	$\sigma^*(T_{в,э})$	$t_{0,05;v}$	$\sigma^*(\Delta\eta_{н,э})$	\underline{a}	\bar{a}	$\underline{\eta}_{н,э}$	$\bar{\eta}_{н,э}$	r
Оценка	83	266,1	7	5	0,108	54,3	1	7,5	2,57	0,69	0,019	0,2	83,45	88,44	0,811

Предполагается, что границы доверительной области также линейны, проходят через точки $[M^*(T_{в,э}); \underline{\eta}_{н,э}]$ и $[M^*(T_{в,э}); \bar{\eta}_{н,э}]$. Определим коэффициенты уравнения этих границ:

$$\underline{\eta}_{н,э} = \underline{a}M^*[T_{в,э}] + b; \quad 81,4 = 0,117 \cdot 266,1 + b; \quad b = 50,34;$$

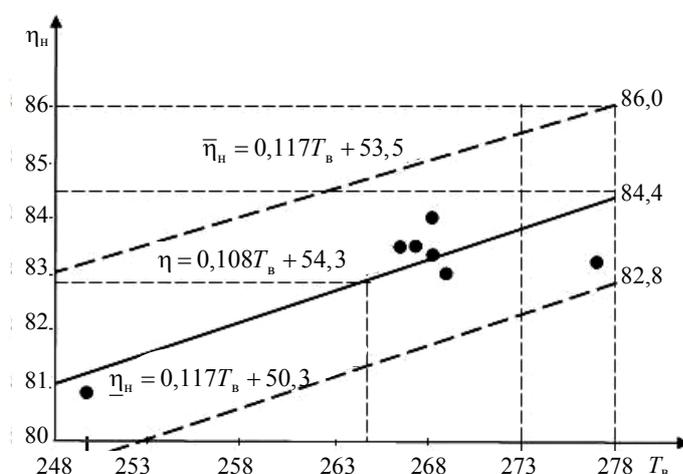
$$\bar{\eta}_{н,э} = \bar{a}M^*[T_{в,э}] + b; \quad 84,6 = 0,117 \cdot 266,1 + b; \quad b = 53,5.$$

Запишем данные уравнения в виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{\eta}_{н,э} &= 0,117T_{в,э} + 50,3; \\ \bar{\eta}_{н,э} &= 0,117T_{в,э} + 53,5. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для построения граничных значений доверительной области определим координаты еще одной точки, например для $T_{в,э} = 278$ °С, по уравнениям (8). Результаты расчетов: для нижней границы координаты второй точки [278; 82,8], для верхней границы [278; 86].

Графическая иллюстрация корреляционного поля $T_{в,э}$ и $\eta_{н,э}$, линия регрессии $\eta = 0,108T_{в,э} + 54,3$, нижняя и верхняя границы области для $\alpha = 0,05$ приведены на рис. 1.

Рис. 1. Иллюстрация взаимосвязи T_b и η_n Fig. 1. Illustration of the relationship between T_b and η_n

Следует отметить, что несоответствие граничных значений доверительной области уровню значимости α , в принципе, никто и не оспаривает, называя ее «доверительным коридором» или «полосой неопределенности». Более того, нет определенного ответа и на главный вопрос: соответствует ли взаимосвязь рассматриваемых ТЭП линейной?

Оценка фидуциальной области возможных реализаций линий регрессии

Если фидуциальный интервал показателей эффективности работы – это множество их возможных реализаций [10], то фидуциальную область представим как множество возможных линий регрессии. Тогда, снова же по аналогии с фидуциальным интервалом, размещение экспериментальных линий регрессии в данной области будет свидетельствовать о ее принадлежности к множеству линий регрессии независимых выборок. Иначе говоря, взаимосвязь ТЭП может быть представлена линейной, но отражающей взаимосвязь независимых случайных величин, т. е. ТЭП независимы, и наоборот. Кажущаяся сложность формулировок обманчива, поскольку вероятность больших по абсолютной величине коэффициентов корреляции при малых объемах выборок n_b высока.

В качестве примера на рис. 2 приведено фидуциальное распределение коэффициентов линейной корреляции Пирсона для $n_b = 3$. Как следует из рисунка, 40 % возможных реализаций коэффициента корреляции превышают 0,80; 30 % – 0,90, а 20 % превышают 0,95. Представляют интерес критические значения коэффициента корреляции K_k : при $\alpha = 0,05$ $K_k = 0,987$, при $\alpha = 0,025$ $K_k = 0,997$, при $\alpha = 0,005$ $K_k = 0,9999$. Заметим, что традиционно к регрессионному анализу рекомендуется переходить при экспериментальном значении $K_3 > 0,9$.

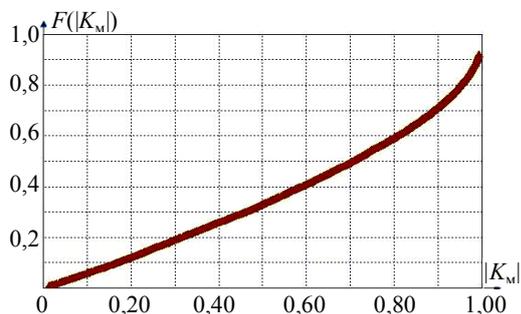


Рис. 2. Фидуциальное распределение абсолютной величины коэффициента корреляции Пирсона при $\eta_b = 3$

Fig. 2. Fiducial distribution of the absolute value of the Pearson correlation coefficient when $\eta_b = 3$

Построение фидуциальной области проводится следующим образом.

1. Моделируются две независимые выборки (v) случайных величин ξ с равномерным распределением объема η_b в интервале $[0; 1]$. Обозначим их через ξ_1, ξ_2 . Независимость их обеспечивается последовательным моделированием подпрограммой RANDU.

2. Вычисляются коэффициенты линейного уравнения регрессии $\xi_1 = (a\xi_2 + b)$ между реализациями ξ_1 и ξ_2 .

3. Пункты 1 и 2 повторяются N раз, где N – число возможных реализаций уравнений регрессии независимых выборок, N в зависимости от η_b исчисляется в десятках тысяч.

4. Проводится ранжирование пар коэффициентов a и b в порядке повышения углового коэффициента a . Эти данные позволяют заключить:

4.1. Имеет место симметрия распределения $F^*(a)$. В иллюстративных целях на рис. 3 приведена статистическая функция распределения $F^*(a)$ для $\eta_b = 3$. Эта особенность позволяет упростить представление критических значений данного коэффициента путем перехода к его абсолютным значениям.

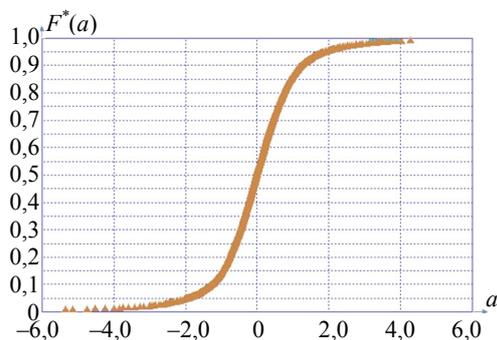


Рис. 3. Статистическая функция распределения углового коэффициента линий регрессии независимых выборок случайных величин

Fig. 3. Statistical function of distribution of the angular coefficient of regression lines of independent samples of random variables

4.2. Критические значения коэффициентов $b_{\alpha/2}$ и $b_{(1-\alpha/2)}$ не соответствуют критическим значениям коэффициентов $a_{\alpha/2}$ и $a_{(1-\alpha/2)}$. Иначе говоря, в уравнении регрессии с угловым коэффициентом, равным, например $a_{(1-\alpha/2)}$, коэффициент b не равен $b_{(1-\alpha/2)}$. Именно влиянием коэффициента b обуславливается неопределенность доверительной области, созданной уравнениями регрессии $\bar{\xi}_1 = a_{\alpha/2,i}\xi_2 + b_i$ и $\bar{\xi}_1 = a_{(1-\alpha/2),j}\xi_2 + b_j$ (где $i = 1, N; j = 1, N; i \neq j$), изображенными на рис. 4 для ряда α .

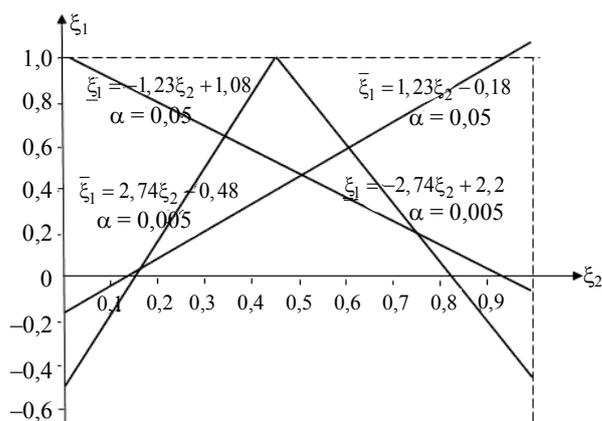


Рис. 4. Граничные значения уравнений линейной регрессии для $\eta_b = 6$, $\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,005$

Fig. 4. Boundary values of linear regression equations for $\eta_b = 6$, $\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.005$

С учетом вышеизложенного п. 4 несколько изменяется и имеет следующее содержание.

5. Проводятся ранжировка коэффициентов линейной корреляции и оценка их граничных значений для ряда α . Например, для $\alpha = 0,05$ порядковый номер граничных значений определяется как $[(1 - \alpha/2)N]$ полученного вариационного ряда реализации величины a . Результаты расчета доверительных областей уравнений регрессии независимых выборок для случая, когда $b = 0$, приведены на рис. 5.

Эти результаты позволяют провести классификацию возможных реализаций линии регрессии по величине углового коэффициента a , т. е. по скорости изменения функции ξ_1 при изменении аргумента ξ_2 .

Критерий проверки предположения H_1 о линейной взаимосвязи между двумя произвольными ТЭП Π_i^a и Π_j^a , где $i = 1, m_{\Pi}$; $j = 1, m_{\Pi}$; $i \neq j$, будет иметь вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } |a^a|_{n_b} \leq \overline{a_{(1-\alpha)n_b}^M}, \text{ то } H \Rightarrow H_1, \\ \text{иначе } H \Rightarrow H_2, \end{array} \right\} \quad (9)$$

где \Rightarrow – индекс, обозначающий соответствие; H_2 – предположение о нелинейной взаимосвязи между ТЭП; «э», «м» – индексы, обозначающие соответственно эксплуатационные данные и данные компьютерного моделирования независимых выборок.

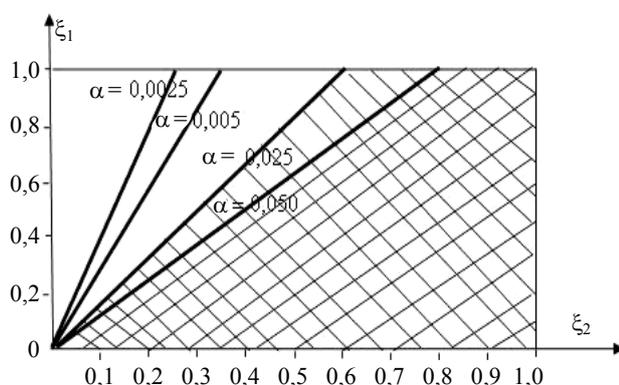


Рис. 5. Доверительные области линий регрессии для $n_b = 6$ и ряда α
 Fig. 5. Confidence regions of regression lines for $n_b = 6$ and series of α

При использовании критерия (9) необходимо соблюдать шкалу изменения коэффициента a . Ведь для реальных ТЭП, например η_n и T_b , величина a имеет шкалу, которая намного отличается от шкалы изменения ξ_1 и ξ_2 . Такое преобразование шкалы, например для η_n и T_b , проводится путем перевода реализации η_n и T_b в относительные единицы по формулам:

$$\delta\eta_{n,c} = \frac{\eta_{n,\max} - \eta_{n,i}}{\eta_{n,\max} - \eta_{n,\min}}; \quad (10)$$

$$\delta T_{nb,i} = \frac{T_{b,\max} - T_{b,i}}{T_{b,\max} - T_{b,\min}}, \quad (11)$$

где $\eta_{n,\max}$, $T_{b,\max}$, $\eta_{n,\min}$, $T_{b,\min}$ – наибольшие и наименьшие значения из n_b реализаций.

Результаты расчета углового коэффициента a для $\delta\eta_n$ и δT_b приведены в табл. 3. Если оценка углового коэффициента a для фактических значений η_n и T_b в соответствии с табл. 2 была равна 0,108, то для относительных значений $\delta\eta_n$ и δT_b в соответствии с табл. 3 она существенно возросла и стала равной 0,890.

Нетрудно заметить (табл. 3), что для $\alpha > 0,05$ оказывается справедливым $H \Rightarrow H_1$, т. е. взаимосвязь между η_n и T_b линейна, а при $\alpha \leq 0,05$ справедливо предположение H_2 . И это, наверное, естественно, так как столь же неопределенна значимость их коэффициента корреляции, равного 0,81. Ну, а что же делать? Ответ на этот вопрос мы дадим в следующей статье. Одно можно утверждать точно: аппарат доверительных интервалов здесь бесполезен. И небольшая подсказка: на основе фидуциальных вероятностей мы оценим ошибку второго рода и перейдем к стратегии минимума риска ошибочного решения.

Таблица 3

Результаты расчета коэффициента корреляции и коэффициентов линейной регрессии
Results of calculating the correlation coefficient and linear regression coefficients

№ пп	$\delta\eta_n$	δT_b	$\delta\eta_n\delta T_b$	$\delta\eta_n^2$	δT_b^2	Результаты расчета регрессии
1	1	1	1	1	1	$M^*(\delta T_b) = 0,40;$ $M^*(\delta\eta_n) = 0,286$
2	0,299	0,296	0,088504	0,089401	0,087616	$b = -0,07; a = 0,89$
3	0,212	0,341	0,072292	0,044944	0,116300	$Y = 0,8916x - 0,06951$
4	0	0,341	0	0	0,116300	$r = 0,815$
5	0,201	0	0	0,040400	0	
6	0,147	0,381	0,056007	0,021609	0,145200	
7	0,141	0,430	0,060630	0,019881	0,184900	
Σ	2	2,789	1,27740	1,216200	1,650200	

ВЫВОДЫ

1. Достоверность традиционного подхода к контролю соответствия наблюдаемой корреляционной связи линейной зависимости неопределенна, а доверительные области («коридоры») не предназначены для решения этой задачи.

2. Фидуциальные распределения углового коэффициента линий регрессии a свидетельствуют о полной симметрии относительно $a = 0$, что уже при объеме выборки, равном трем, позволяет перейти к фидуциальным распределениям его абсолютной величины.

3. Предлагается классифицировать линии регрессии на основе критических значений угловых коэффициентов множества линий регрессии с угловым коэффициентом, меньше критического, что позволяет установить принадлежность линии регрессии, построенной по эксплуатационным данным, этому множеству.

4. Рекомендуются новый критерий контроля соответствия наблюдаемой корреляционной связи, основанный на сравнении фактического значения углового коэффициента линейной регрессии с критическим значением. Применение этого критерия требует перевода абсолютных значений реализации технико-экономических показателей в относительные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фархадзаде Э. М. Метод и алгоритм ранжирования котельных установок блочных электростанций по критерию надежности и экономичности работы / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Теплоэнергетика. 2015. Т. 62, № 10. С. 22–29.
2. Совершенствование методов анализа технико-экономических показателей блочных электростанций. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Междунар. сем. имени Ю. Н. Руденко. С. 376–382.
3. Дуэль, М. А. Автоматизация определения энергетических характеристик энергооборудования / М. А. Дуэль, Г. И. Каниук, Т. Н. Фурова // Энергоснабжение, энергетика, энергоаудит. 2013. № 2. С. 13–19.
4. Фархадзаде, Э. М. Оценка качества восстановления износа энергоблоков ТЭС / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, Ю. З. Фарзалиев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 14–24.
5. Сравнение и ранжирование паротурбинных установок энергоблоков ТЭС по эффективности работы / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 41–49.

6. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. М.: Изд-во «Экзамен», 2006. С. 672.
7. Метод и алгоритмы расчета показателей надежности по многомерным данным / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.
8. Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимости статистических связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 193–206. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-193-206>.
9. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. М.: Физматгиз, 2006. 816 с.
10. Фархадзаде, Э. М. Фидуциальный подход при сравнении однотипных объектов / Э. М. Фархадзаде, А. З. Мурадалиев, С. А. Абдуллаева // Электронное моделирование. 2019. Т. 41, № 1. С. 55–66.

Поступила 15.03.2019 Подписана в печать 17.06.2019 Опубликована онлайн 31.03.2020

REFERENCES

1. Farkhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2015) Method and Algorithm of Ranking Boiler Plants at Block Electric Power Stations by the Criterion of Operation Reliability and Profitability. *Thermal Engineering*, 62 (10), 708–715. <https://doi.org/10.1134/s0040601515080017>.
2. Farkhadzade E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Ismailova S. M., Abdullaeva S. A. (2015) Improving Methods for Analyzing Technical and Economic Indicators of Block Power Plants. *Methodological Issues of Studying the Reliability of Large Power Systems. Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara imeni Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue. 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar name after Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 376–382 (in Russian).
3. Duel' M. A., Kanyuk G. I., Furova T. N. (2013) Automation of Determining Energy Characteristics of Power Equipment. *Energosnabzhenie, Energetika, Ergoaudit* [Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit], (2), 13–19 (in Russian).
4. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z. (2016) Quality Evaluation of the TPP Power Generating Units Wear Reconditioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (1), 14–24 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-1-14-24>.
5. Farkhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Abdullaeva S. A. (2018) Comparison and Ranking of Steam-Turbine Installations of Thermal Power-Stations' Power-Generating Units by Working Efficiency. *Thermal Engineering*, 65 (10), 708–715. <https://doi.org/10.1134/s0040601518100026>.
6. Orlov A. I. (2006) *Applied Statistics*. Moscow, Ekzamen Publ. 672 (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2017) Method and Algorithms of Calculation of Parameters of Reliability in Accordance with Multivariate Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 16–29 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.
8. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2018) Minimization of Risk of the Erroneous Decision in the Assessment of the Importance of Statistical Relations of Technical and Economic Indicators of the Objects of Electric Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 193–206 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-193-206>.
9. Kobzar' A. I. (2006) *Applied Mathematical Statistics*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 816 (in Russian).
10. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A. (2019) Fiducial Approach when Comparing Similar Objects. *Elektronnoe Modelirovanie*, 41 (1), 55–66 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/emodel.41.01.055>.

Received: 15 March 2019

Accepted: 17 June 2019

Published online: 31 March 2020