

Научная статья

УДК 621.313.333: 621.867.2

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-14-20

Беляевский Роман Владимирович¹, Ахметгареев Альберт Риннатович¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: brv.egpp@kuzstu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ С НЕРАЦИОНАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**Информация о статье**

Поступила:

03 марта 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 апреля 2025 г.

Принята к печати:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

05 июня 2025 г.

Ключевые слова:

нерациональное электропотребление; энергоэффективность; энергетическое обследование; ранговый анализ; техноценоз; угольная промышленность

Аннотация.

В статье рассматривается актуальная проблема оптимизации энергопотребления в угольной промышленности Кузбасса, обеспечивающей около 50% российской добычи угля. Актуальность исследования обусловлена постоянным ростом энергопотребления на угольных разрезах, связанным с увеличением глубины разработки, объемов добычи и переработки, а также необходимостью соблюдения требований Федерального закона об энергосбережении. Цель работы – разработка методики выявления объектов с нерациональным электропотреблением на основе интервального оценивания параметрического рангового распределения. В исследовании применен метод рангового анализа данных энергопотребления, позволяющий идентифицировать аномалии без проведения дорогостоящих инструментальных замеров. Методика включает построение гауссовых доверительных интервалов для ранговых распределений электропотребления подстанций с последующим выделением «аномальных объектов». Апробация на данных 38 подстанций угольной компании за 4 года показала, что 18 объектов демонстрируют аномально высокое, а 9 – аномально низкое энергопотребление. Для анализа использован программный комплекс Mathcad 15, обеспечивающий расчет доверительных интервалов через обратную функцию Лапласа. Практическая значимость исследования заключается в сокращении затрат на энергоаудит за счет приоритизации обследования проблемных объектов. Разработанный подход соответствует требованиям законодательства в области энергосбережения и адаптируем для других энергоемких отраслей. Результаты могут быть использованы при формировании программ модернизации инфраструктуры угольных разрезов.

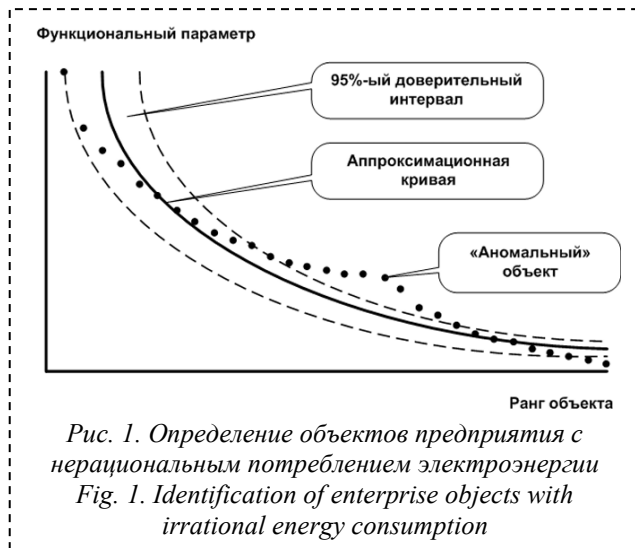
Для цитирования: Беляевский Р.В., Ахметгареев А.Р. Определение объектов инфраструктуры угольных разрезов с нерациональным электропотреблением // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3 (179). С. 14-20. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-14-20, EDN: LABUSH

Введение

Угольная добыча – одна из ключевых отраслей в России и в Кемеровской области. На Кузбасс приходится порядка 50% процентов добычи угля в России [1]. В свою очередь электроэнергия – один из основных энергоресурсов, применяемых в угольной промышленности, в частности на угольных разрезах. Потребление электроэнергии горнодобывающими предприятиями стабильно возрастает. Это связано с увеличением глубины разработки, объемов вскрыши и добычи, объемов переработки, ростом энергетической мощности производственных электротехнических систем, а также совершенствованием технологий добычи в условиях изменяющихся горно-геологических параметров как на

разрабатываемых, так и на вновь осваиваемых месторождениях [2]. Исходя из сложившейся экономической ситуации, особенно актуальным является максимальная экономия энергоресурсов при минимальных затратах. Ключевые факторы, влияющие на эффективное и рациональное использование электроэнергии, включают внедрение современных систем учета энергопотребления [3], разработку и анализ дифференцированных электробалансов [4, 5], обоснованное с технической точки зрения нормирование, анализ и планирование расхода электроэнергии [6–13]. Выявление наиболее нерационально потребляющих электроэнергию электроприемников предприятия и разработка перечня ме-

роприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности – основные цели энергоаудита в соответствии с Федеральным законом от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Феде-



рации». Для поиска электроприемников, длительное время нерационально потребляющих электроэнергию и, соответственно, требующих первоочередного анализа, может служить одна из важнейших аналитических процедур рангового анализа [14] – интервальное оценивание параметрического рангового распределения (Рис. 1) [15, 16].

Методика проведения исследования

Для более ясного понимания методологии интервального оценивания рангового параметрического распределения объектов техноценоза необходимо уточнить терминологию и основные принципы данной процедуры рангового анализа.

По общему определению интервальное оценивание – процедура оптимального управления ресурсами техноценоза, заключающаяся в определении точек эмпирического рангового параметрического распределения по исследуемому функциональному параметру, выходящих за пределы гауссового переменного доверительного интервала, построенного относительно аппроксимационной кривой распределения.

Доверительный интервал (гауссовый доверительный интервал рангового параметрического распределения техноценоза) – совокупность верхних и нижних доверительных границ, каждая из которых получается в результате статистической обработки выборки значений параметров, соответствующих данному объекту на протяжении определенного количества временных интервалов (априори принимается 95%). Аппроксимационная кривая – числовая функция рангового параметрического распределения, определенная на множестве ранговой топологической меры. «Аномальный объект» – точки, выходящие за пределы доверительного интервала, фиксируют объекты техноценоза, ано-

мально потребляющие ресурс [15]. На Рис. 1 точка, обозначенная как «Аномальный объект», находится выше доверительного интервала, следовательно, объект потребляет аномально много.

Ранговое параметрическое распределение разбивается на участки так, чтобы:

1. На каждом участке было не менее 10–12 точек.
2. Отклонения значений экспериментальных параметров от соответствующих теоретических значений, определяемых аппроксимационной кривой, были распределены внутри участка по нормальному закону.

При этом для каждого участка можно записать уравнение вида:

$$\frac{\Delta}{[\sigma(\Delta\theta)]} = \Phi^{-1}\left(\frac{p_d}{2}\right) \quad (1)$$

где Δ – ширина доверительного интервала в одну сторону от теоретической кривой; $\sigma(\sigma\theta)$ – среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от теоретической кривой (в расчетах принимается эмпирический стандарт); $\Phi^{-1}\left(\frac{p_d}{2}\right)$ – обратная

функция Лапласа $\Phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$; p_d – доверительная вероятность (принимается априори).

Решение уравнения (1) позволяет определить ширину доверительного интервала на каждом из участков разбиения. Данный способ определения объектов с нерациональным потреблением реализован с помощью программного комплекса Mathcad 15 на примере инфраструктуры угольной компании.

После сбора информации об электропотреблении объектов инфраструктуры компании создается электронная база данных, которая представляет собой неупорядоченную совокупность значений электропотребления. Данные формируются в виде двумерной таблицы, ее строки соответствуют временным интервалам, в течение которых исследовалась инфраструктура (месяцы), а столбцы – объектам инфраструктуры. В каждой ячейке таблицы содержится одно число, соответствующее электропотреблению (в кВт·ч) одного объекта на одном временном интервале.

Сформированная матрица V (Рис. 2) содержит информацию об исследуемом техноценозе – каждая строка соответствует определенному месяцу, а каждый столбец – объекту. Для иллюстрации в данной программе использовались собранные за 4 года данные по электропотреблению техноценоза (38 объектов (подстанций) угольной компании. В данной работе были рассмотрены подстанции, питающие разрезы, напряжением 220/110/10, 110/35/10, 110/35/6, 110/10/, 110/6, 35/6 кВ, обеспечивающие электрической энергией электроприемники первой, второй и третьей категорий.

Для упрощения дальнейшей работы в Mathcad матрицу можно транспонировать, чтобы ее колонки являлись векторами параметров: $W := V^T$.

Далее имеющиеся данные необходимо проранжировать, т. е. расположить в порядке уменьшения значения по электропотреблению. В Mathcad это можно реализовать с помощью функции *Zipf*:

V =

	1	2	3	4	5	6
1	$1.625 \cdot 10^3$	$1.541 \cdot 10^3$	$1.574 \cdot 10^3$	$1.331 \cdot 10^3$	$1.338 \cdot 10^3$	$1.077 \cdot 10^3$
2	677.074	528.392	684.883	$1.115 \cdot 10^3$	924.478	915.922
3	553.633	311.596	472.051	616.171	629.36	594.392
4	471.741	410.402	436.805	884.403	$1.703 \cdot 10^3$	$1.566 \cdot 10^3$
5	$4.086 \cdot 10^3$	$3.765 \cdot 10^3$	$4.19 \cdot 10^3$	$4.5 \cdot 10^3$	$6.265 \cdot 10^3$	$6.206 \cdot 10^3$
6	$3.471 \cdot 10^3$	$3.085 \cdot 10^3$	$3.28 \cdot 10^3$	$3.656 \cdot 10^3$	$3.466 \cdot 10^3$	$3.247 \cdot 10^3$
7	925.212	818.841	$1.022 \cdot 10^3$	$1.309 \cdot 10^3$	$1.434 \cdot 10^3$	$1.075 \cdot 10^3$
8	355.519	287.482	280.427	226.474	209.051	199.316
9	$2.006 \cdot 10^3$	$1.652 \cdot 10^3$	$1.797 \cdot 10^3$	$2.791 \cdot 10^3$	$2.66 \cdot 10^3$	$2.645 \cdot 10^3$
10	789.799	912.949	$1.276 \cdot 10^3$	$2.156 \cdot 10^3$	$1.756 \cdot 10^3$	$1.696 \cdot 10^3$
11	10.444	7.434	7.494	7.591	5.126	3.232
12	17.394	15.152	17.67	18.535	13.659	9.369
13	$1.091 \cdot 10^3$	878.927	$1.046 \cdot 10^3$	$2.846 \cdot 10^3$	$2.063 \cdot 10^3$	$1.788 \cdot 10^3$
14	729.697	507.633	478.024	387.349	312.96	252.233
15	756.1	611.732	598.097	503.451	413.053	326.271
16	$1.922 \cdot 10^3$	$1.499 \cdot 10^3$	$1.495 \cdot 10^3$	$1.921 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^3$	...

Рис. 2. Фрагмент таблицы электропотребления объектов инфраструктуры

Fig. 2. Fragment of the table of electricity consumption of infrastructure facilities

$$\text{Zipf}(Y) := \begin{cases} \text{for } i \in 1 \dots \text{cols}(Y) \\ \quad \begin{cases} c \leftarrow \text{sort}(Y^{(i)}) \\ b^{(i)} \leftarrow \text{reverse}(c) \end{cases} \\ b \end{cases}$$

С целью подготовки данных для дальнейшей работы программы определяется количество исследуемых объектов и формируется вектор рангов:

$$\begin{aligned} n &:= \text{length}(\text{Zipf}(W)^{(1)}) \\ n &= 38 \\ r &:= 1 \dots n \\ \text{Rr} &:= r \end{aligned}$$

Для оценки динамики движения объектов инфраструктуры АО «УК «Кузбассразрезуголь» по ранговой поверхности параметрического распределения необходима матрица рангов, которая реализуется при помощи функции *Rang*(W):

$$\text{Rang}(W) := \begin{cases} \text{for } j \in 1 \dots \text{cols}(W) \\ \quad \begin{cases} i \leftarrow 1 \\ a \leftarrow W^{(j)} \\ c \leftarrow \text{sort}(a) \\ b \leftarrow \text{reverse}(c) \\ \text{for } m \in 1 \dots \text{rows}(a) \\ \quad \begin{cases} \text{for } n \in 1 \dots \text{rows}(b) \\ \quad L_{i,j} \leftarrow n \text{ if } a_m = b_n \end{cases} \\ i \leftarrow i + 1 \end{cases} \\ L \end{cases}$$

$\text{Rang} := \text{Rang}(V)^T$

Для последующей статистической обработки данных большое значение имеет подбор аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей совокупность эмпирических точек. В качестве стандартной задается двухпараметрическая гиперболическая форма [17], выбор которой объясняется традиционно сложившимся подходом среди исследователей, занимающихся ранговым анализом. Достоинство данной формы состоит в том, что

она сводит задачу аппроксимации к определению всего двух параметров.

$$W(r) := \frac{w}{r^\beta},$$

Аппроксимация может осуществляться различными методами, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками. Например, метод наименьших квадратов. Суть метода заключается в отыскании параметров аналитической зависимости, которые минимизируют сумму квадратов отклонений эмпирических значений (реально полученных в ходе рангового анализа инфраструктуры угольных компаний) от значений, рассчитанных по аппроксимационной зависимости (Рис. 3) [17].

В качестве исходных данных используются [18]: *r* – вектор рангов объектов; *M* – матрица упорядоченных данных электропотребления, кВт·ч; *Rang* –

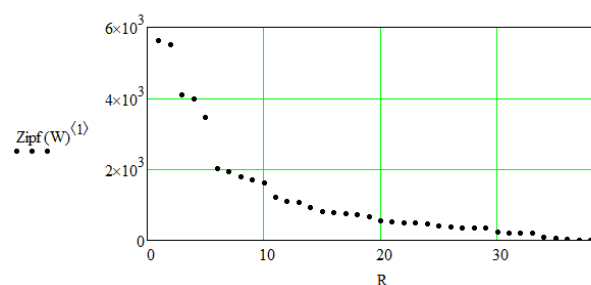


Рис. 3. Ранговое параметрическое распределение техноценоза (по состоянию на ноябрь 2024 года): абсцисса – ранг объекта; ордината – электропотребление, кВт·ч

Fig. 3. Rank parametric distribution of technocoenosis (as of November 2024): abscissa – object rank; ordinate – electricity consumption, kW·h

матрица рангов; $\text{coef} := H(T)^T$ – матрица коэффициентов регрессии, где *T*:

$$\begin{aligned} T(W, r) &:= \begin{cases} n \leftarrow \text{length}(W) \\ \beta \leftarrow \frac{\sum_{i=1}^n \ln(W_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(r_i) - n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(W_i) \cdot \ln(r_i))}{\left(\sum_{i=1}^n \ln(r_i) \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(r_i))^2} \\ W1 \leftarrow \exp \left[\frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \ln(W_i) + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \ln(r_i) \right) \right] \\ WW \leftarrow \text{stack}(\beta, W1) \\ WW \end{cases} \end{aligned}$$

а *H*:

$$H(Z) := \begin{cases} j \leftarrow 1 \\ \text{while } j < \text{cols}(V) + 1 \\ \quad \begin{cases} X^{(j)} \leftarrow Z(V^{(j)}, R) \end{cases} \\ j \leftarrow j + 1 \end{cases}$$

X

Определяем количество объектов *n*, задаем расматриваемый временной интервал *Time* (01.2021-05.2024) и вектор электропотребления *Y*, кВт·ч:

$$n := \text{rows}(M) \quad n = 38 \quad i := 1 \dots n \quad \text{Time} := 41 \quad Y := M^{(Time)}$$

Линеаризуем и логарифмируем вектора эмпирических данных Y и рангов r . Создаем вектор единиц p и объединяем его с вектором $r1$:

$$r1 := \ln(r) \quad Y1 := \ln(Y) \quad p_i := 1 \quad X := \text{augment}(p, r1)$$

Считываем коэффициенты регрессии, вычисленные методом наименьших квадратов для Y :

$$\beta := \text{coef}_{\text{Time}, 1} \quad \beta = 1.763 \quad W1 := \text{coef}_{\text{Time}, 2} \quad W1 = 6.378 \times 10^4$$

и получаем уравнение аппроксимационной кривой [1, 22]:

$$ym := \frac{W1}{r^\beta}$$

Для определения доверительного интервала вычислим остаточное среднее квадратическое отклонение и коэффициент Стьюдента [17, 19, 20]:

$$S := \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_i (Y1_i - \ln(ym_i))^2} \quad S = 1.113$$

$$t := \text{qt}(0.95, n-3) \quad t = 1.69$$

Рассчитаем ковариационную матрицу K для линеаризованной модели:

$$C := (X^T \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 0.456 & -0.205 \\ -0.205 & 0.107 \end{pmatrix} \quad D := X \cdot C \quad K := D \cdot X^T$$

С помощью подпрограммы извлечем диагональные элементы из квадратной матрицы:

$$D(M) := \begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(M) \\ \text{for } i \in 1.. \text{rows}(M) \\ \quad \text{for } j \in 1.. \text{rows}(M) \\ \quad \quad W_i \leftarrow M_{i,j} \text{ if } i = j \\ \quad W \end{cases} \quad V := D(K) \quad V1 := V^T$$

Построим доверительные границы для расчетных данных:

$$V := \sqrt{V1^T} \quad d := t \cdot S \cdot V \quad YL := \ln(ym) \\ yd12 := YL + d \quad yd11 := YL - d$$

Доверительный интервал для линеаризованного рангового параметрического распределения техноценоза (фрагмент) представлен на Рис. 4, где абсцисса – логарифм ранга объекта; ордината – логарифм электропотребления (кВт·ч); точки – эмпирические данные ($Y1$); сплошные линии – аппроксимационная прямая (YL), верхняя ($yd12$) и нижняя ($yd11$) доверительные границы:

Доверительный интервал для нелинейной модели представлен на Рис. 5, где ось абсцисс – ранг объекта; ордината – электропотребление (кВт·ч); точки – эмпирические данные (Y); сплошные линии – аппроксимационная кривая (ym), верхняя ($yd2$) и нижняя ($yd1$) доверительные границы:

Для выявления объектов с аномальным уровнем электропотребления определим количество точек, находящихся выше и ниже доверительного интервала, а также попавших в него:

$$I_i := \text{if}(Y_i > yd2_i, 1, \text{if}(Y_i < yd1_i, -1, 0))$$

$$IN := \sum_i (I_i = 0)$$

$$\sum_i [I_i \cdot (I_i > 0)] = 18$$

$$IN = 11$$

$$\sum_i [I_i \cdot (I_i < 0)] = -9$$

График, иллюстрирующий попадание точек в доверительный интервал, представлен на Рис. 6, где абсцисса – ранг объекта; ордината – индикатор, который принимает значение 0, 1 или -1, если точки, соответственно, лежат внутри, выше или ниже доверительного интервала:

Чтобы получить список очередности проведения энергоаудита, определим относительную величину отклонения точек от границ доверительного

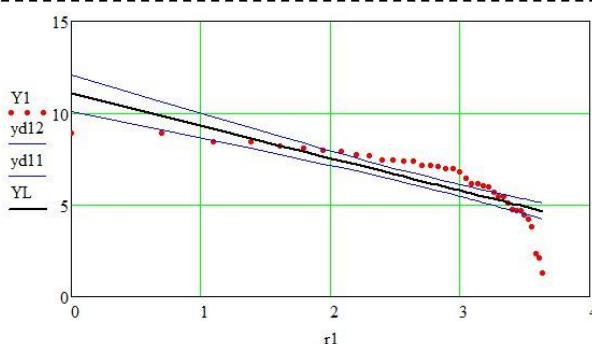


Рис. 4. Доверительный интервал для линеаризованного рангового параметрического распределения техноценоза (фрагмент). Нелинейные верхняя ($yd2$) и нижняя ($yd1$) границы интервала:

$$yd2 := \exp(yd12) \quad yd1 := \exp(yd11)$$

Fig. 4. Confidence interval for the linearized rank parametric distribution of the technocenosis (fragment). Nonlinear upper ($yd2$) and lower ($yd1$) boundaries of the interval:

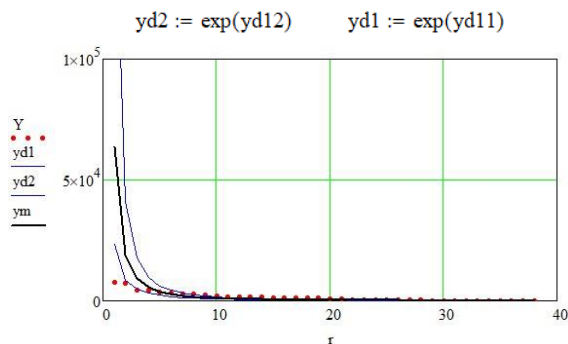


Рис. 5. Доверительный интервал для полного рангового параметрического распределения в линейных осях

Fig. 5. Confidence interval for the full rank parametric distribution in linear axes

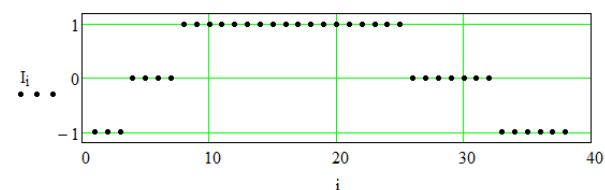


Рис. 6. График, иллюстрирующий попадание точек в доверительный интервал

Fig. 6. Graph illustrating the points falling within the confidence interval

интервала, а затем проранжируем объекты по данному параметру:

$z := Y - y_m$

$Q_i := \text{if}(Y_i > yd2_i, Y_i - yd2_i, \text{if}(Y_i < yd1_i, Y_i - yd1_i, 0))$

$OTN := \overrightarrow{(Q \cdot y_m^{-1})} \quad OTNM := \overrightarrow{|OTN|}$

$R(a, r) := \begin{cases} c \leftarrow \text{sort}(a) \\ b \leftarrow \text{reverse}(c) \\ \text{for } m \in 1 \dots \text{rows}(a) \\ \quad \text{for } n \in 1 \dots \text{rows}(b) \\ \quad \quad L_n \leftarrow r_m \text{ if } a_m = b_n \\ L \end{cases} \quad \begin{matrix} SPR := R(OTNM, r) \\ ns := n - IN \end{matrix} \quad ns = 27$

$SPRANG := \text{submatrix}(SPR, 1, ns, 1, 1)$

$Ran := (Rang^T)^{Time}$

$SPRANG^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 1 & 19 & 20 & 18 & 17 & 14 & 16 & 15 & 13 & 21 & \dots \end{bmatrix}$

Используя приведенную ниже подпрограмму, определим номер объекта (столбца) в начальной базе данных по электропотреблению (созданная ранее матрица V). В итоге получаем список очередности аудита на объектах инфраструктуры угольной компании (в результирующем векторе указан их номер):

$Unrang(a, b) := \begin{cases} L \leftarrow 0 \\ i \leftarrow 1 \\ \text{for } m \in 1 \dots \text{rows}(a) \\ \quad \text{for } n \in 1 \dots \text{rows}(b) \\ \quad \quad L_i \leftarrow n \text{ if } a_m = b_n \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ L \end{cases}$

$SPISOK := Unrang(SPRANG, Ran)$

$SPISOK^T = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ 1 & 10 & 7 & 16 & 1 & 13 & 37 & 17 & 33 & 18 & 35 & 11 & 24 & 12 & 3 & 4 & 26 & 28 & 27 & 15 & \dots \end{bmatrix}$

Результаты исследования

Результатом данной работы стало нахождение объектов, потребляющих электроэнергию нормально – 11, «аномально» много – 18, «аномально» мало – 9. В соответствии с методикой интервального оценивания параметрического рангового распределения была определена последовательность объектов для энергоаудита в соответствии с величиной «аномального» потребления электроэнергии.

Обсуждение результатов

Результаты реализации методики интервального оценивания параметрического рангового распределения убедительно подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии объектов с нерациональным потреблением электроэнергии в структуре угольной компании. Анализ выявил статистически значимую группу объектов, демонстрирующих аномальные показатели электропотребления, что свидетельствует о существенных отклонениях от нормативных значений. Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанный подход позволяет сократить затраты на проведение энергоаудита за счет приоритетного выделения объектов с аномальным потреблением. При этом для выявления таких объектов требуется лишь анализ данных об электропотреблении без проведения

дорогостоящих инструментальных замеров. Полученные результаты особенно актуальны в условиях роста тарифов на электроэнергию и необходимости оптимизации производственных издержек.

Основные результаты и выводы

Результаты проведенного исследования демонстрируют высокую эффективность разработанной методики интервального оценивания параметрического рангового распределения для выявления объектов с нерациональным энергопотреблением в структуре угольной компании. Анализ данных позволил классифицировать обследованные объекты на три категории: с нормальным (11 объектов), аномально высоким (18 объектов) и аномально низким (9 объектов) потреблением электроэнергии. Особое значение имеет выявление наиболее проблемных объектов, требующих первоочередного энергетического обследования – трех ведущих подстанций, что позволит максимально эффективно распределить ресурсы на энергосберегающие мероприятия.

Разработанный подход полностью соответствует поставленной цели исследования, подтверждая свою практическую ценность. Методика не только успешно идентифицирует объекты с отклонениями в энергопотреблении, но и обеспечивает значительную экономию средств за счет исключения необходимости проведения массовых инструментальных замеров. Достаточно проведения анализа существующих данных об электропотреблении, что существенно упрощает процесс энергоаудита.

Практическая значимость исследования проявляется в нескольких аспектах. Во-первых, методика позволяет системно снижать энергопотребление предприятия, начиная с наиболее проблемных объектов. Во-вторых, ее регулярное применение создает механизм постоянного мониторинга и улучшения энергоэффективности. В-третьих, универсальность подхода дает возможность для его использования в других энергоемких отраслях. Особенно актуально внедрение данной методики в условиях постоянного роста тарифов на электроэнергию.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что последовательное применение разработанного метода в течение нескольких лет позволит создать эффективную систему управления энергопотреблением компании. Такой подход обеспечит не только экономию финансовых ресурсов, но и будет способствовать устойчивому развитию предприятия в долгосрочной перспективе, соответствуя современным требованиям к энергосбережению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленность Кузбасса [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vvk-kuzbass.ru/industries/ugolnaya-promyshlennost/>.
2. Кузнецов Н. М., Щуцкий В. И. Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. Апатиты : КНЦ РАН, 1997. 211 с.
3. Никифоров Г. В., Олейников В. К., Заславец Б. И., Шеметов А. Н. Управление режимами энергопотребления промышленного предприятия с использованием современных информационных технологий // Электро-

оборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 2. С. 12–21.

4. Кузнецов, Н. М. Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 1(4). С. 128–135.

5. Грибкова О. С., Дьячков Н. Б., Пичуев А. В. Энергетические балансы технологических процессов горного производства // Материалы III Международной научно-практической конференции «Trends in the World of Science». Смоленск, 2019. С. 28–31.

6. Ставцев В. А., Бабокин Г. И. Технические средства и методы энергосбережения. Энергоаудит предприятий. Тула : Гриф и К, 2003. 237 с.

7. Сальников А. Х., Шевченко Л. А. Нормирование потребления и экономии топливно-энергетических ресурсов. М. : Энергоатомиздат, 1986. 240 с.

8. Копцев Л. А. Обоснованное нормирование потребления энергоресурсов – инструмент повышения экономической эффективности работы промышленного предприятия // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 1. С. 19–24.

9. Олейников В. К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях. М. : Недра, 1983. 192 с.

10. Кудрин Б. И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения // Промышленная энергетика. 2000. № 6. С. 33–36.

11. Кудрин Б. И., Жилин Б. В., Лагуткин О. Е., Ошурков М. Г. Ценологическое определение параметров электропотребления многономенклатурных производств. Тула : Приок. кн. изд-во, 1994. 122 с.

12. Гнатюк В. И., Лагуткин О. Е. Ранговый анализ техноценозов. Калининград : БНЦ РАЕН – КВИ ФПС РФ, 2000. 86 с.

13. Фуфаев В. В. Ценологическое определение параметров электропотребления, надежности, монтажа и ремонта электрооборудования предприятий региона. М. : Центр системных исследований, 2000. 320 с.

14. Кудрин Б. И. Введение в технетику. Томск : Издание ТГУ, 1993. 552 с.

15. Гнатюк В. И. Закон оптимального построения техноценозов. М. : Изд-во ТГУ – Центр системных исследований, 2005. 384 с.

16. Гнатюк В. И. Ранговый анализ техноценозов // Электрика. 2001. № 8. С. 14–22.

17. Королук В. С., Портенко Н. И. [и др.] Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М. : Наука, 1985. 640 с.

18. Кирьянов Д. В. MathCAD 13. СПб. : БХИ-Петербург, 2006. 608 с.

19. Дьяконов В. П. MATHCAD 8/2000: Специальный справочник. СПб. : Питер, 2001. 592 с.

20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1978. 832 с.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Беляевский Роман Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, brv.egpp@kuzstu.ru

Ахметгареев Альберт Риннатович, соискатель

Заявленный вклад авторов:

Беляевский Роман Владимирович – научный менеджмент, подбор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы, вычитка и корректировка текста.

Ахметгареев Альберт Риннатович – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, математическое и компьютерное моделирование, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-14-20

Roman V. Belyaevsky¹, Albert R. Ahmetgareev

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: brv.egpp@kuzstu.ru

IDENTIFICATION OF COAL MINE INFRASTRUCTURE FACILITIES WITH INEFFICIENT POWER CONSUMPTION



Article info

Received:

05 March 2025

Abstract.

This article addresses the pressing issue of optimizing energy consumption in the coal industry of Kuzbass, which accounts for about 50% of Russia's coal production. The relevance of this study stems from the continuous increase in energy consumption at open-pit coal mines due to deeper mining operations, higher production and processing volumes, and the need to comply with the Federal Energy Saving Law. The aim of this work is to develop a methodology for identifying facilities with inefficient power consumption using interval estimation of parametric rank distribution. The

Accepted for publication:
30 April 2025

Accepted:
20 June 2025

Published:
26 June 2025

Keywords: inefficient power consumption; energy efficiency; energy audit; rank analysis; technocenosis; coal industry.

study applies a rank analysis method of energy consumption data that allows detection of anomalies without costly instrumental measurements. The methodology includes constructing Gaussian confidence intervals for the rank distributions of substation energy consumption, followed by the identification of "anomalous facilities." A test on data from 38 substations of a coal company over four years revealed 18 facilities with abnormally high and 9 with abnormally low energy consumption. The analysis was conducted using Mathcad 15, which allows the calculation of confidence intervals via the inverse Laplace function. The practical significance of this research lies in reducing energy audit costs by prioritizing inspections of problematic facilities. The proposed approach complies with energy saving legislation and is adaptable to other energy-intensive industries. The results may be used in forming modernization programs for coal mine infrastructure.

For citation: Belyaevsky R.V., Ahmetgareev A.R. Identification of Coal Mine Infrastructure Facilities with Inefficient Power Consumption. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 3(179):14-20 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-14-20, EDN: LABUSH

REFERENCES

1. Kuzbass Industry [Electronic resource]. <https://vvk-kuzbass.ru/industries/ugolnaya-promyshlennost>.
2. Kuznetsov, N.M., Shchutsky, V.I. Rational Power Consumption at Mining and Mineral Processing Enterprises. Apatity: KSC RAS; 1997. 211 p.
3. Nikiforov G.V., Oleinikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. Managing Power Consumption Modes of Industrial Enterprises Using Modern Information Technologies. *Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2014; 2:12–21.
4. Kuznetsov N.M. Rational Power Consumption at Mining Enterprises. *Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2011; 1(4):128–135.
5. Gribkova O.S., Dyachkov N.B., Pichuev A.V. Energy Balances of Mining Production Processes. *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference "Trends in the World of Science"*. Smolensk, 2019. Pp. 28–31.
6. Stavtsev V.A., Babokin G.I. Technical Means and Methods of Energy Saving. Energy Audit of Enterprises. Tula: Grif i K, 2003. 237 p.
7. Salnikov A.Kh., Shevchenko L.A. Regulation of Consumption and Saving of Fuel and Energy Resources. Moscow: Energoatomizdat; 1986. 240 p.
8. Koptsev L.A. Justified Regulation of Energy Resource Consumption as a Tool for Enhancing Industrial Enterprise Efficiency. *Electrical Equipment: Operation and Repair*. 2012; 1:19–24.
9. Oleinikov V.K. Analysis and Planning of Electricity Consumption in Mining Enterprises. Moscow: Nedra; 1983. 192 p.
10. Kudrin B.I. On the Theoretical Foundations and Practice of Energy Standardization and Saving. *Industrial Power Engineering*. 2000; 6:33–36.
11. Kudrin B.I., Zhilin B.V., Lagutkin O.E., Oshurkov M.G. Cenological Determination of Power Consumption Parameters of Multi-product Production. Tula: Priokskoe Publishing House; 1994. 122 p.
12. Gnatyuk V.I., Lagutkin O.E. Rank Analysis of Technocenoses. Kaliningrad: BNC RAEN – KVI FPS RF; 2000. 86 p.
13. Fufayev V.V. Cenological Determination of Parameters of Power Consumption, Reliability, Installation, and Repair of Electrical Equipment of Regional Enterprises. Moscow: Center for System Studies; 2000. 320 p.
14. Kudrin B.I. Introduction to Technetics. Tomsk: TSU Publishing; 1993. 552 p.
15. Gnatyuk V.I. Law of Optimal Construction of Technocenoses. Moscow: TSU Publishing – Center for System Studies; 2005. 384 p.
16. Gnatyuk V.I. Rank analysis of technocenoses. *Elektrika*. 2001; 8:14–22.
17. Korolyuk V.S., Portenko N.I. [et al.] Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics. Moscow: Nauka; 1985. 640 p.
18. Kiryanov D.V. MathCAD 13. St. Petersburg: BKhI-Peterburg; 2006. 608 p.
19. Dyakonov V.P. MATHCAD 8/2000: Special Reference Book. St. Petersburg: Piter; 2001. 592 p.
20. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Moscow: Nauka; 1978. 832 p.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Roman V. Belyaevsky, C. Sc. in Engineering, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesenyaya St., Kemerovo, 650000, Russia, brv.egpp@kuzstu.ru
Albert R. Ahmetgareev, the applicant

Contribution of the authors:

Roman V. Belyaevsky – scientific management, selection of the relevant literature; conceptualization of research, drawing the conclusions, reading and correcting the text.

Albert R. Ahmetgareev – research problem statement; reviewing the relevant literature; mathematical and computer modelling; data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text. The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

