

Ю.И. Казанцев, доц., канд. техн. наук, Ю.Б. Рей, магистр
Кировоградский национальный технический университет

Исследование электропотребления и электрических нагрузок в системе электроснабжения Ингульской шахты

В статье показан вывод энергетических характеристик шахты и на её основе предложен метод расчёта электрических нагрузок для предприятий данной отрасли промышленности с массовым выпуском продукции.

энергетические характеристики, методы расчёта, электрические нагрузки

Рост электровооруженности промышленности предъявляет новые требования к точности и обоснованности решений различных технико-экономических и оптимизационных задач, решаемых в энергетике и связанных, в конечном итоге, с рациональным использованием электроэнергии.

Исследования в этой области заложены в работах Авилова-Карнаухова Б.Н., Гофмана И.В., Ястребова П.П., Волобринского С.Д., Каялова Г.М., и др.

Целью данной статьи является вывод энергетической характеристики шахты, являющейся основой нормирования электропотребления и рационального его использования, а также разработка на её основе метода определения расчетных нагрузок по удельному расходу электроэнергии с использованием нестационарной модели графиков электрических нагрузок.

На основе статистических исследований электропотребления Ингульской шахты можно построить зависимость между электропотреблением и производительностью. Такая связь становится более явной, если потребление электроэнергии и производительность предприятия выразить в относительных единицах.

Иллюстрацией этих предложений может служить вывод методами математической статистики расчётно-опытных связей между основными электроэнергетическими характеристиками и производительностью предприятия с массовым выпуском продукции.

Опытные данные, по суточному электропотреблению и производительности шахты были собраны за 88 суток.

Начальная обработка опытных данных заключается в вычислении удельного потребления электроэнергии, удельной установленной мощности, отношение первой из этих величины ко второй, а также выпуска продукции в относительных единицах.

Результаты вычислений были сгруппированы и расположены в форме так называемой двойной корреляционной таблицы, которая является основой для вывода расчётно-опытной связи между электропотреблением и производительностью методом математической статистики.

После изучения электроэнергетических показателей шахты и их анализа было установлено, что отношение удельного потребления электроэнергии Ω к удельной установленной мощности p_y находится в реальной корреляционной связи с производительностью шахты, выраженной в относительных единицах α , т.е.

$$\left(\frac{\omega}{p_y} \right) = f(\alpha) \quad (1)$$

где $\omega = \frac{W}{A}$; $\alpha = \frac{A}{A_0}$; $p_y = \frac{P_y}{A_0}$;

W - потребление энергии шахтой, кВт·ч/сутки;

A - производительность шахты, т/сутки;

A_0 - проектная производительность шахты, т/сутки;

P_y - установленная мощность электроприемников, кВт.

Эта связь названа основной энергетической характеристикой [2].

Из основной энергетической характеристики легко получить производные характеристики:

$$\omega = f_1(\alpha, p_y), \quad K_u = f_2(\alpha),$$

где K_u - коэффициент использования установленной мощности электроприемников шахты.

Связь (1) может быть выведена как аналитически, так и по опытным данным. В общем случае эта связь выражается многочленом

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_px^p. \quad (2)$$

Здесь

$$y = \left(\frac{\omega}{p_y} \right); \quad x = \frac{1}{\alpha} \quad \text{или} \quad x = \frac{1}{\sqrt{\alpha}},$$

$a_0, a_1, a_2 \dots a_p$ - постоянные коэффициенты.

Выведем связь вида (2) как статистическую. Для этого в соответствии с теорией корреляционного анализа определяется реальность ее существования и форма по методу, изложенному, например, в [1,2]. Исходные опытные данные приведены в двойной корреляционной таблице 1.

Для определения реальности существования и формы связи (2) находим показатели статистической связи по методике указанной в [1].

1. Полные средние $\bar{\alpha} = 0,9966$; $\left(\frac{\bar{\omega}}{p_y} \right) = 11,875$;

2. Стандарты $\sigma_\alpha = 0,1352$; $\sigma_{\left(\frac{\omega}{p_y} \right)} = 1,4127$;

3. Ковариация $\mu_{II} = -0,17439$;

4. Коэффициент корреляции $r = 0,9131$

Значимость и реальность существования связи (2) оценивается по соотношению $|r| \cdot \sqrt{n-1} = 0,9131 \sqrt{88-1} = 8,52 > 3$;

5. Корреляционное отношение $\eta = 0,9154$;

6. Критерий $T_\eta = 2,34$;

7. Степени свободы $\kappa_1 = s - 2 = 5$; $\kappa_2 = n - s = 81$

Здесь s - число строк корреляционной таблицы;

n - объем выборки;

8. По таблице F - распределения при 5% пределе по значениям κ_1 и κ_2

находим значение $T_{табл} = 2,21$.

Таблица 1 – Двойная корреляционная таблица к выводу связи $\frac{\omega}{p_y} = f(\alpha)$

$\alpha_h \backslash \left(\frac{\omega}{p_y}\right)_i$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	n_i
9,0					1	2	2	5
10				1	2	6	1	10
11			1	2	12			15
12		1	2	30				34
13		2	10	1				13
14	1	5	1					7
15	3	1						4
n_h	4	9	14	34	16	8	3	88
$\left(\frac{\bar{\omega}}{p_y}\right)_h$	14,750	13,667	12,7857	11,9118	10,8125	9,75	9,3333	

Так как $T_\eta > T_{табл}$, то это указывает на то, что различие между η и r имеет существенное значение, что указывает на нелинейную корреляционную связь между $\left(\frac{\omega}{p_y}\right)$ и α .

Для вывода связи вида (2) введем значения

$$Y = \left(\frac{\bar{\omega}}{p_y}\right); \quad x = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = \alpha^{-\frac{1}{2}}.$$

Пусть для шахты основная энергетическая характеристика может быть выражена уравнением второй степени

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2. \quad (3)$$

Для нахождения коэффициентов a_0, a_1, a_2 методом наименьших квадратов составляем систему уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} na_0 + a_1 \sum n_x x + a_2 \sum n_x x^2 &= \sum n_x \bar{Y}_h \\ a_0 \sum n_x x + a_1 \sum n_x x^2 + a_2 \sum n_x x^3 &= \sum n_x x \bar{Y}_h \\ a_0 \sum n_x x^2 + a_1 \sum n_x x^3 + a_2 \sum n_x x^4 &= \sum n_x x^2 \bar{Y}_h \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решая эту систему методом Гаусса с выбором главного элемента находим коэффициенты:

$$a_0 = -18,372; \quad a_1 = 41,805; \quad a_2 = -11,663.$$

(Вспомогательные расчеты значений входящих в уравнение (4) не показаны)

Таким образом, уравнение вида (3) имеет вид

$$Y = -18,372 + 41,805\alpha^{-\frac{1}{2}} - 11,663\alpha^{-1}. \quad (5)$$

Среднеквадратическая погрешность этого уровня определяется по формуле:

$$\sigma\% = \sqrt{\frac{1}{n-c} \sum \left[\frac{Y - \bar{Y}_h}{Y} \cdot 100 \right]^2} \cdot n_h = 1,036.$$

График, изображающий уравнение (5) представлен на рис. 1.

Умножив обе части уравнения (5) на α , получим

$$24K_u = -18,372\alpha + 41,805\alpha^{\frac{1}{2}} - 11,663. \quad (6)$$

Из формулы (5) весьма просто определить удельное потребление электроэнергии

$$\omega = (-18,372 + 41,805\alpha^{-\frac{1}{2}} - 11,663\alpha^{-1}) \cdot p_y. \quad (7)$$

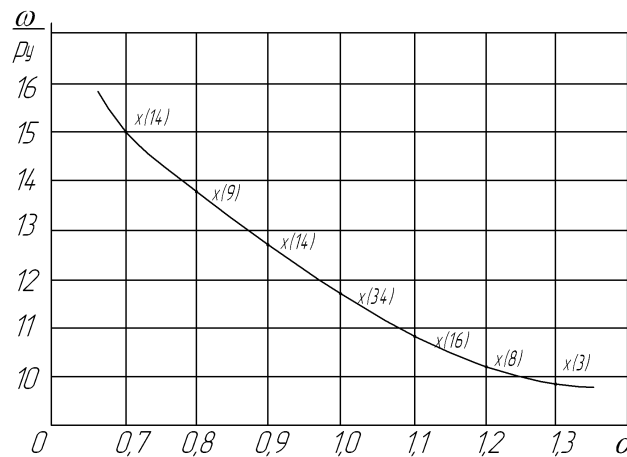


Рисунок 1 – Основная энергетическая характеристика шахты х(14) - показаны опытные точки и их число

В ряде исследований показано [1,2], что электрические нагрузки промышленных предприятий носят стохастический характер. В этом случае важным является определение закона их распределения и соответствие эмпирического закона теоретическому, например, Гауссовскому. Для этого был собран статистический материал среднесуточных активных нагрузок по Ингульской шахте за 41 сутки.

Результаты расчетов соответствия эмпирического распределения теоретическому Гауссовскому по критерию Колмогорова приведены в таблице 2.

Далее среди чисел графы 8 таблицы 2 находится наибольшее число $D_0 = 0,0571$. Вычисляем произведение

$$\lambda = D_0 \sqrt{n} = 0,0571 \cdot \sqrt{41} \approx 0,4.$$

По приложению 6 [6] находим значение функции $P(\lambda) = 0,9972$. Так как $P(\lambda) = 0,9972 > 0,05$, то делается заключение, что расхождение между эмпирическим и теоретическим распределением носят случайный характер. В данном случае эти распределения можно считать согласующимися.

Таблица 2 – Расчет соответствия эмпирического распределения теоретическому по критерию Колмогорова

Интервалы (P_1, P_2) кВт	m	$m(P_2)$	$F_n(P_2) = \frac{m(P_2)}{n}$	$t_2 = \frac{P_2 - \bar{P}}{\sigma}$	$\Phi(t_2)$	$F(P_2) = \frac{1}{2}[\Phi(t_2) + 1]$	$F_n(P_2) - F(P_2)$
1	2	3	4	5	6	7	8
400-530	1	1	0,0243	-2,42	-0,9845	0,0072	0,166
530-660	1	2	0,0487	-1,98	-0,9523	0,0238	0,0249
660-790	2	4	0,0975	-1,53	-0,874	0,0630	0,0345
790-920	2	6	0,1463	-1,09	-0,7243	0,1378	0,0085
920-1050	4	10	0,2439	-0,64	-0,4778	0,2611	0,0172
1050-1180	5	15	0,3658	-0,20	-0,1585	0,4207	0,0549
1180-1310	6	21	0,5121	0,24	0,1897	0,5948	0,0827
1310-1440	8	29	0,7073	0,69	0,5098	0,7549	0,0476
1440-1570	8	37	0,9024	1,13	0,7415	0,8707	0,0317
1570-1700	4	41	1,0	1,58	0,8859	0,9429	0,0571
Σ	41						

На рисунке 2 приведены эмпирическая $F_n(P)$ и теоретическая $F(P)$ интегральные функции распределения среднесуточных активных нагрузок шахты.

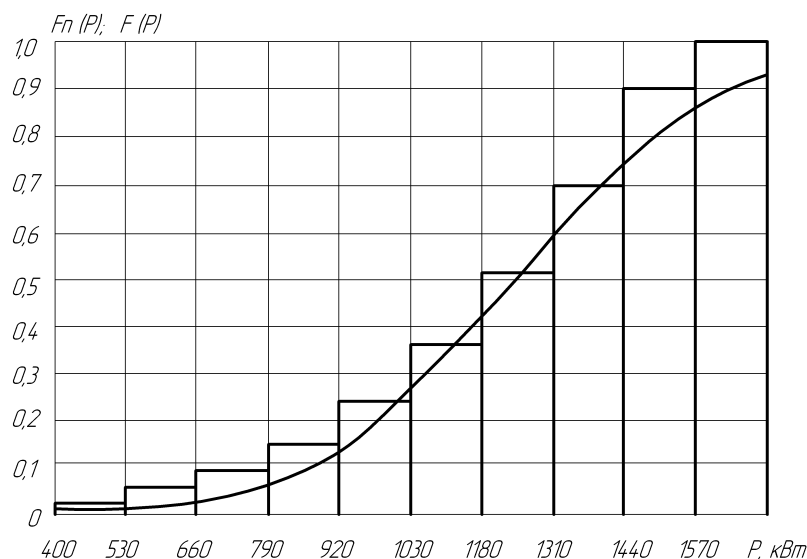


Рисунок 2 – Эмпирическая $F_n(P)$ и теоретическая $F(P)$ интегральные функции распределения среднесуточных активных нагрузок шахты.

Также были проведены расчеты по критериям согласия Пирсона $P(\chi^2) = 0,7 > 0,05$, Романовского $|x^2 - \kappa| : \sqrt{2\kappa} = |3,3904| : \sqrt{2 \cdot 5} \approx 0,51 < 3$ и Ястремского $j = |c - n| : \sqrt{2n + 4\theta} = |3,8758 - 8| : \sqrt{2 \cdot 8 + 4 \cdot 0,6} = 0,9615 < 3$, что также подтверждает согласие эмпирического распределения теоретическому.

Прогнозирование и расчет электропотребления целесообразно вести по проектной производительности и удельным нормам расхода электроэнергии. Удельные нормы, конечно, изменяются при изменении энергоемкости технологического процесса, но эти изменения также поддаются учету и планированию.

Существующий ныне метод расчета электрических нагрузок (метод упорядоченных диаграмм) имеет существенную погрешность до 10% и более и в "Указаниях по расчету электрических нагрузок" рекомендуется, если возможно, определение расчетных нагрузок проводить по удельной плотности нагрузки (кВт/м²) или удельному расходу электроэнергии ((кВт·ч)/ед.)

В данной работе предлагается метод расчета электрических нагрузок предприятий, для которых получены научно обоснованные удельные нормы расхода электроэнергии [1,2].

Располагая удельными нормами вида (7) можно производить оценку расхода электрической энергии или средней мощности за расчетный период.

На шахте были проведены замеры электрических нагрузок на получасовом интервале в течении двух месяцев. Всего получено 2880 отчетов.

Как показали исследования этих нагрузок, процесс их изменения на суточных и тем более на месячных интервалах времени является нестационарным.

Для определения расчетной нагрузки по пику перегрева нет необходимости учитывать свойства нагрузок в отдельные моменты времени, а достаточно лишь выявить результат суммарного воздействия нагрузок на электрическую сеть (например, максимальный нагрев проводников) за расчетный цикл времени. В связи с этим для решения поставленной задачи целесообразно ввести некоторые средние по времени на расчетном интервале T характеристики нестационарных случайных процессов изменения нагрузок [5]:

1. Среднее на интервале T значение нагрузки (аналог оценки математического ожидания для стационарных процессов)

$$m_{\text{PT}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (8)$$

где $P(t)$ - реализация нестационарного случайного процесса изменения активной мощности за время T .

Среднее значение нагрузки за период T в условиях эксплуатации определяется по показаниям счетчиков электроэнергии; в условиях же проектирования или прогнозирования – по удельным нормам и планируемой производительности (выпуску продукции);

2. Средняя на интервале T дисперсия графика нагрузки (аналог зависимой от времени дисперсии стационарного процесса)

$$D_{\text{PT}} = \frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt - m_{\text{PT}}^2; \quad (9)$$

3. Осредненная на интервале T одномерная плотность распределения или гистограмма графика нагрузки

$$f_T(P) = \frac{1}{T} \int_0^T f(P, t) dt, \quad (10)$$

где $f_T(P, t)$ - одномерная плотность распределения, зависящая для нестационарных процессов от параметра t .

Необходимо отметить, что указанные характеристики нестационарных процессов изменения нагрузок определяются по одной реализации, поэтому они зависят от T и являются случайными величинами (D_{PT} , m_{PT}) или случайными функциями $f_T(P)$.

В этом случае важным является вопрос о соответствии этих, определенных по одной реализации, характеристик истинным характеристикам, определенных по ансамблю реализаций, т.е. вопрос об эргодических свойствах нестационарных процессов изменения нагрузок.

Для решения этого вопроса можно использовать эргодические теоремы Н.А. Железнова [5], сформулированные и доказанные для одного класса нестационарных процессов.

Сущность теорем состоит в том, что при выполнении некоторых условий, налагающих ограничения на свойства изучаемых нестационарных процессов, средние по времени характеристики (8), (9) при больших T сходятся с вероятностью единица к соответствующим характеристикам нагрузки, т.е. к неслучайным величинам. Первое условие, необходимое для существования этих эргодических теорем, заключается в ограниченности дисперсии и непрерывности в среднемквадратичном рассматриваемых случайных процессов, что всегда выполняется для графиков электрических нагрузок. Второе условие относится к затуханию корреляционных связей во времени и состоит в том, что в период осреднения T должен значительно превышать интервал корреляции, т.е. интервал существенного ослабления корреляционных связей.

Исследования показали, что в корреляционных функциях графиков нагрузки помимо затухающей аperiодической имеются периодические слагающие, обусловленные суточной, недельной и сезонной цикличностью электропотребления. Поэтому для эффективного использования эргодических теорем Н.А. Железнова при анализе нагрузок дополнительно к условию $T > (\tau_0)$ (τ_0 – интервал затухания аperiодической слагающей) необходимо выполнение кратности интервала T периодам периодических слагаемых.

Таким образом, можно считать, что для данного потребителя месячный интервал удовлетворяет необходимым условиям эргодических теорем.

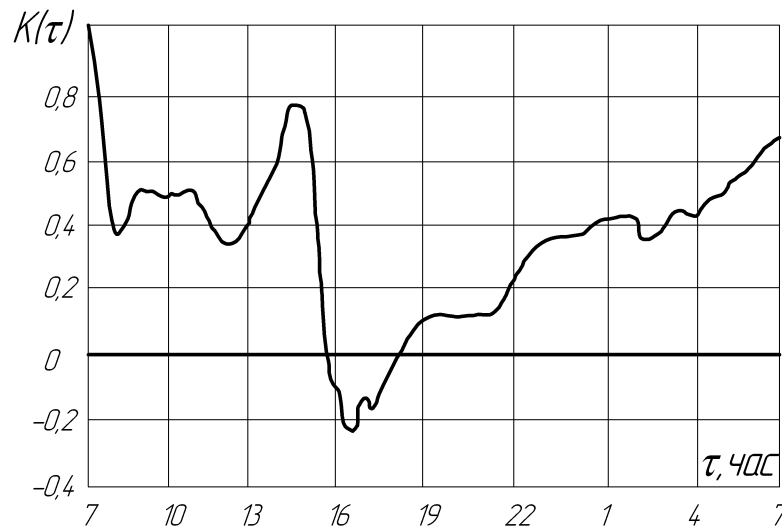


Рисунок 3 – Корреляционная функция изменения получасовых нагрузок шахты

Полученные с помощью теорем Н.А. Железнова выводы об эргодических свойствах нестационарных процессов изменения нагрузок относительно характеристик (8) и (9) распространяемы, очевидно, и на характеристику (10). Действительно, если период T удовлетворяет вышеуказанным условиям и все возможные свойства формирования нагрузок проявились за этот период неоднократно, то можно ожидать, что всегда найдется такой T , для которого гистограмма графика нагрузки при дальнейшем увеличении T изменится незначительно. Другими словами,

последовательность случайных функций $f_T(P)$, которая имеет место для разных значений T , сходится с вероятностью единица к пределу $\bar{f}(P)$, т.е. для любых $\varepsilon > 0$ и $\delta > 0$ всегда найдется такое T , что при любых t вероятность совместного осуществления K неравенств

$$\left| f_{T+t_k}(P) - \bar{f}(P) \right| < \varepsilon; \quad t_\varepsilon = t_1, t_2, \dots, t_\varepsilon$$

будет больше, чем $1 - \delta$. При этом

$$\lim_{T \rightarrow \infty} f_T(P) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(P, t) dt = \bar{f}(P).$$

С помощью осредненных по времени статистических характеристик (8), (9), (10), вычисляемых по одной реализации, нестационарные электрические нагрузки можно сопоставить с эквивалентными в среднем однородными по времени стационарными случайными величинами, статистические характеристики и законы и законы распределения которых имеют смысл осредненных по времени характеристик нестационарных случайных процессов. Зная эти характеристики и законы распределения, отнесенные к периоду времени (месячному, годовому), нетрудно определит расчетную максимальную нагрузку с оценкой её доверительной вероятности. Очевидно, при этом главным является отыскание осредненных на интервале T одномерных законов распределения графиков нагрузки (10).

Если полученная гистограмма аппроксимируется кривой $f_T(P)$, то на основании полученного закона распределения можно вычислить максимальную 30 – минутную расчетную нагрузку P_p при заданной доверительной вероятности, которая обычно принимается равной 0,95.

С использованием (10) для шахты можно вычислить коэффициент расчетного максимума

$$K_{pm} = \frac{P_m}{m_{mp}}.$$

Тогда расчетная нагрузка может быть определена по формуле

$$P_p = K_{pm} \cdot P_{cp}, \text{ кВт.} \quad (11)$$

Средняя нагрузка в формуле (11) определяется через удельный расход электроэнергии, полученной с помощью выведенной здесь энергетической характеристики (7).

$$P_{cp} = \frac{\omega \cdot A_0}{24}, \text{ кВт.} \quad (12)$$

Выводы

1. Доказаны значимость и реальность существования связи между основными электроэнергетическими показателями и выпускаемой продукцией.
2. Полученная энергетическая характеристика с погрешностью, не превышающей 1,5%, может быть положена в основу практических расчетов по нормированию электропотребления на шахте и его рационального использования.
3. Предложен метод расчета электрических нагрузок на предприятиях данной отрасли промышленности по удельному расходу электроэнергии с использованием нестационарной модели графиков электрических нагрузок.

Список литературы

1. Ю.И. Казанцев. Основная энергетическая характеристика промышленных предприятий с массовым выпуском однородной продукции. Известия СО АН СССР, №3.- 1970.
2. Б.Н. Авилов–Карнаухов. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт.- М.: «Недра», 1969.
3. В.И. Романовский. Математическая статистика, кн.2. Издательство АН СССР, 1961.
4. Г.А. Соколов, И.М. Гладких. Математическая статистика. Издательство «Экзамен», М.: 2007.
5. Н.А. Железнов. Некоторые вопросы теории информационных электрических систем. ЛКВВИА им. Можайского, 1960.
6. С.Н. Лозинский. Сборник задач по теории вероятности и математической статистике. –М.: «Статистика», 1967.

В статье показан вывод энергетической характеристики и метод расчета электрических нагрузок.

In the article the conclusion of power description and method of computation of the electric loading are shown.