
УДК 62.235

А. С. Кучик

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИВОДА РАБОЧЕГО ОРГАНА
ГОРНОПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА**

UDC 62.235

A. S. Kuchik

**EXPERIMENTAL STUDY ON FUNCTIONING CONDITIONS OF THE
OPERATING ELEMENT DRIVE IN MINING AND TUNNELING MACHINES**

Аннотация

Изложена методика определения нагруженности привода рабочего органа горнопроходческого комбайна по результатам эксперимента. Приведены графики реализуемой двигателем мощности, на основе которых получены вероятностные характеристики: корреляционная функция, спектральная плотность, гистограмма распределения мощности двигателя. Определен закон распределения плотности вероятности, вычислены коэффициенты приведения режима нагружения.

Ключевые слова:

привод рабочего органа машины, номинальная мощность, корреляционная функция, спектральная плотность, гистограмма распределения, плотность вероятности, коэффициент приведения режима нагружения.

Abstract

Methods to determine the drive load are given based on the results of the experiment. Diagrams of power realized by the engine are presented, on whose basis the probability characteristics have been obtained, namely the correlation function, the spectral density, and the histogram of engine power. The law of distribution of probability density was determined, and coefficients of load duty were calculated.

Key words:

drive of the operating element of the machine, rated capacity, correlation function, spectral density, distribution histogram, probability density, coefficient of load duty.

ОАО «Беларуськалий» является одним из крупнейших высокомеханизированных мировых предприятий по добыче калийной соли. Уровень механизации производства составляет 90...95 %. Процесс добычи осуществляется с помощью горнопроходческих комбайнов, оснащенных специальными рабочими органами, производящими разрушение горной породы. Для привода этих органов используются электрические двигатели как наиболее экологичные источники энергии в шахтных условиях. Энергия электродвигателя передаётся

рабочему органу посредством механического зубчатого редуктора, обеспечивающего необходимую скорость вращения рабочего органа.

На предприятии в основном используются комбайны зарубежной разработки, что существенно удорожает производство. Поэтому ставится задача импортозамещения. В связи с этим на предприятии с участием автора статьи разработан и изготовлен опытный образец комбайна отечественной конструкции. Отличительными особенностями этого комбайна являются кинематиче-

ская схема и конструкция привода рабочего органа. В качестве основного функционального элемента привода использована планетарная передача, позволившая существенно упростить конструкцию привода, уменьшить его габариты и массу.

Решение поставленной задачи потребовало проведения большого объема расчетно-исследовательских работ. Одной из проблем на начальном этапе проектирования было обоснование параметров нагрузочного режима редуктора привода. Анализ состояния этого вопроса показал, что в технической литературе мало информации о нагрузках в приводе рабочих органов комбайнов и достоверность её вызывает сомнение. Ошибки в оценке нагрузок могут привести к отрицательным последствиям из-за погрешностей при расчётах на прочность и ресурс создаваемой конструкции. При малом запасе прочности не обеспечивается приемлемая надежность, при большом запасе получается заведомо избыточная масса и энергоёмкость привода. Именно поэтому актуальна задача исследования нагрузочных характеристик привода в реальных условиях эксплуатации.

Исследования выполнялись на опытном образце комбайна в процессе испытаний, проводимых в шахтной выработке ОАО «Беларуськалий». Методика проведения испытаний заключалась в следующем. Режущая коронка (рабочий орган комбайна) внедряется в массив, после чего машинист комбайна посредством ручного управления перемещает стрелу рабочего органа по выработке с условием обеспечения максимальной производительности комбайна. При этом в режиме реального времени осуществляется непрерывная запись изменения силы тока электродвигателя привода режущей коронки в течение нескольких рабочих смен с фильтрацией экспериментальных данных. На их основе формируется выборка необходимого объёма для последующей стати-

стической обработки полученных результатов эксперимента. Дискретность записи изменения силы тока электродвигателя соответствовала временному интервалу, равному 1 с. Напряжение питания электродвигателя в процессе испытаний изменяется незначительно и составляет в среднем 1140 В.

Фрагмент графика изменения силы тока во времени приведен на рис. 2. Результаты записи изменения тока $I_{эд}$ использовались для определения мощности нагрузки электродвигателя $P_{эд}$.

Мощность на валу электродвигателя $P_{эд}$ определяется по формуле [1]

$$P_{эд} = \sqrt{3} I_{эд} U_{ном} \eta \cos \varphi, \quad (1)$$

где $I_{эд}$ – потребляемый электродвигателем ток, А (значения регистрируются в процессе испытаний); $U_{ном}$ – номинальное напряжение электросети, $U_{ном} = 1140$ В; η – КПД электродвигателя; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя.

Параметры η и $\cos \varphi$ определяются по документации электродвигателя в зависимости от величины относительной нагрузки электродвигателя по мощности $P_{эд}/P_{ном}$, где $P_{ном}$ – номинальная мощность электродвигателя. Графики изменения параметров $I_{эд}$, η и $\cos \varphi$ в зависимости от отношения $P_{эд}/P_{ном}$ представлены на рис. 1.

Для определения значений КПД η и коэффициента нагрузки $\cos \varphi$ регистрируемая величина тока $I_{эд}$ в каждый момент времени сравнивается с величиной силы тока $I_{эд}$ на кривой графика. В результате находятся искомые значения η и $\cos \varphi$. Затем по формуле (1) вычисляются текущие значения мощности нагрузки электродвигателя $P_{эд}$ в процессе работы комбайна.

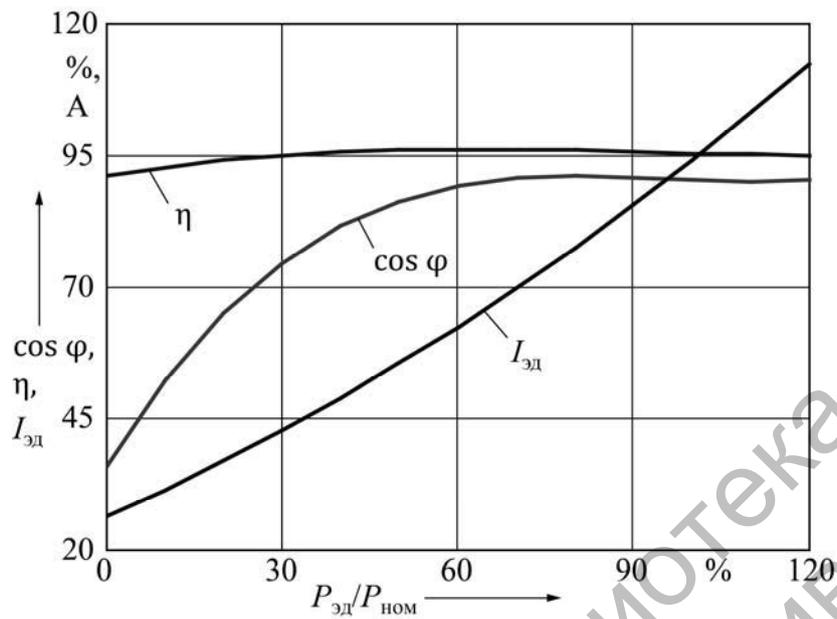


Рис. 1. Нагрузочные характеристики электродвигателя

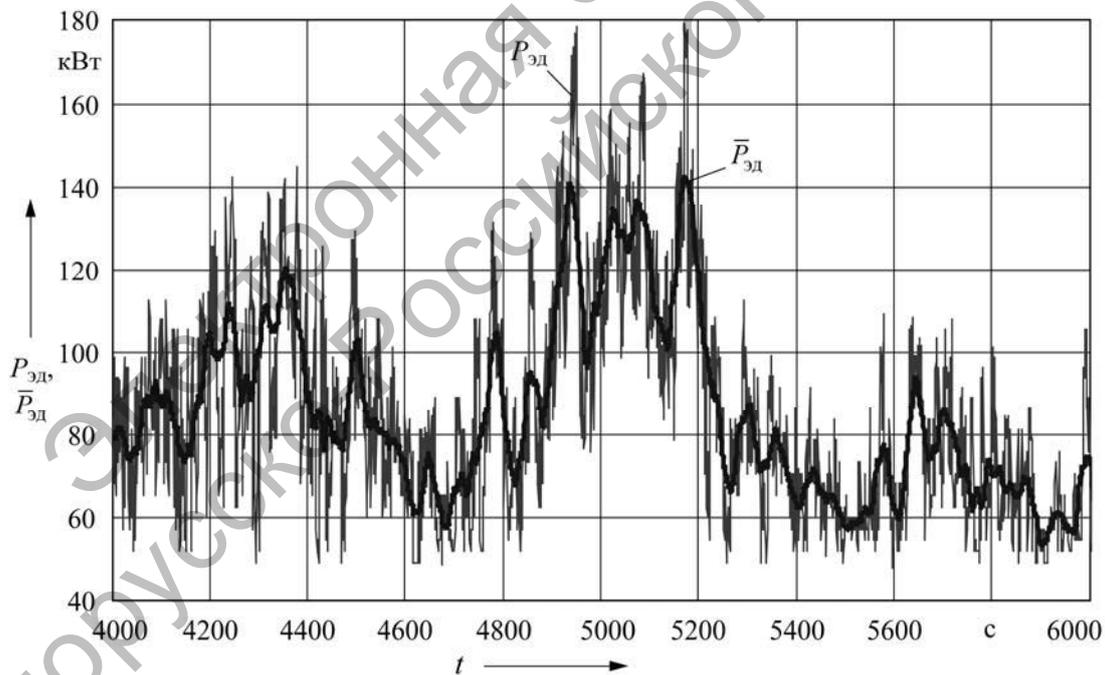


Рис. 2. График изменения реализуемой электродвигателем мощности

График изменения мощности электродвигателя $P_{\text{ед}}$ привода рабочего органа комбайна представлен на рис. 2. Для большей наглядности приведен не

полный объем графика, а выборка из 2000 значений, соответствующая времени работы привода в течение 2000 с.

Для вычисления статистических

оценок реализованного процесса необходимо определиться с шагом дискретизации и объемом выборки.

В качестве шага дискретизации примем интервал записи данных в регистрирующем блоке – 1 с. Для получения необходимой точности статистических оценок примем полный объем выборки 10^4 точек.

Процесс, представленный на рис. 2, нестационарный. Это обусловлено тем, что порода имеет разброс по сопротивляемости резанию. Поэтому для последующего анализа необходимо произвести фильтрацию полученной реализации, заключающуюся в определении текущего среднего процесса и его центрировании согласно методике [2].

В общем виде случайный процесс описывается следующей функцией:

$$x(t) = \bar{x}(t) + \overset{\circ}{x}(t), \quad (2)$$

где $\bar{x}(t)$ – текущее значение математического ожидания; $\overset{\circ}{x}(t)$ – центрированная составляющая случайного процесса.

Для выделения $\bar{x}(t)$ использован фильтр В. С. Пугачева, имеющий следующую прямоугольную характеристику [2]:

$$h(n_i) = \begin{cases} 1 & \text{при } |n_i| \leq 0,5n_\Phi; \\ 0 & \text{при } |n_i| > 0,5n_\Phi, \end{cases} \quad (3)$$

где n_Φ – количество ординат случайного процесса, используемых для вычисления j -го значения $\bar{x}_j(t)$; n_i – порядковые номера текущих ординат в интервале от $-0,5n_\Phi$ до $+0,5n_\Phi$, покрываемых фильтром.

Значение текущего среднего $\bar{x}_j(t)$ определяется по формуле

$$\bar{x}_j(t) = \frac{1}{n_\Phi + 1} \sum_{i=-0,5n_\Phi}^{0,5n_\Phi} h(n_i) x_{j+1}; \quad j = \overline{1, N}, \quad (4)$$

где N – объем выборки.

Центрирование ординат осуществляется по выражению

$$\overset{\circ}{x}(t) = x(t) - \bar{x}(t). \quad (5)$$

На рис. 2 жирной линией представлен график, иллюстрирующий выделение текущего среднего значения реализуемой двигателем мощности $\bar{P}_{эд}$, а на рис. 3 – ее центрированная составляющая $\overset{\circ}{P}(t)$.

На основе сформированной реализации мощности электродвигателя $\bar{P}_{эд}$ осуществлялось определение её статистических характеристик.

Оценка математического ожидания определяется как выборочное среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (6)$$

где x_i – принятое обозначение при статистическом анализе исследуемой случайной величины – мощности электродвигателя $P_{эди}$.

Оценка дисперсии D_x характеризует разброс значений случайной величины относительно математического ожидания:

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2. \quad (7)$$

Среднее квадратическое отклонение σ_x , называемое стандартом случайной величины, характеризует значение вариации случайной величины:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (8)$$

Коэффициент вариации V_x , %, характеризует относительную меру рассеивания:

$$V_x = 100 \frac{\sigma_x}{\bar{x}}. \quad (9)$$

Полученные значения числовых

статистических оценок приведены в табл. 1.

Для оценки связи между случайными значениями нагрузки проведем

корреляционный анализ, заключающийся в построении корреляционной функции $R_x(\tau)$, согласно методике [2].

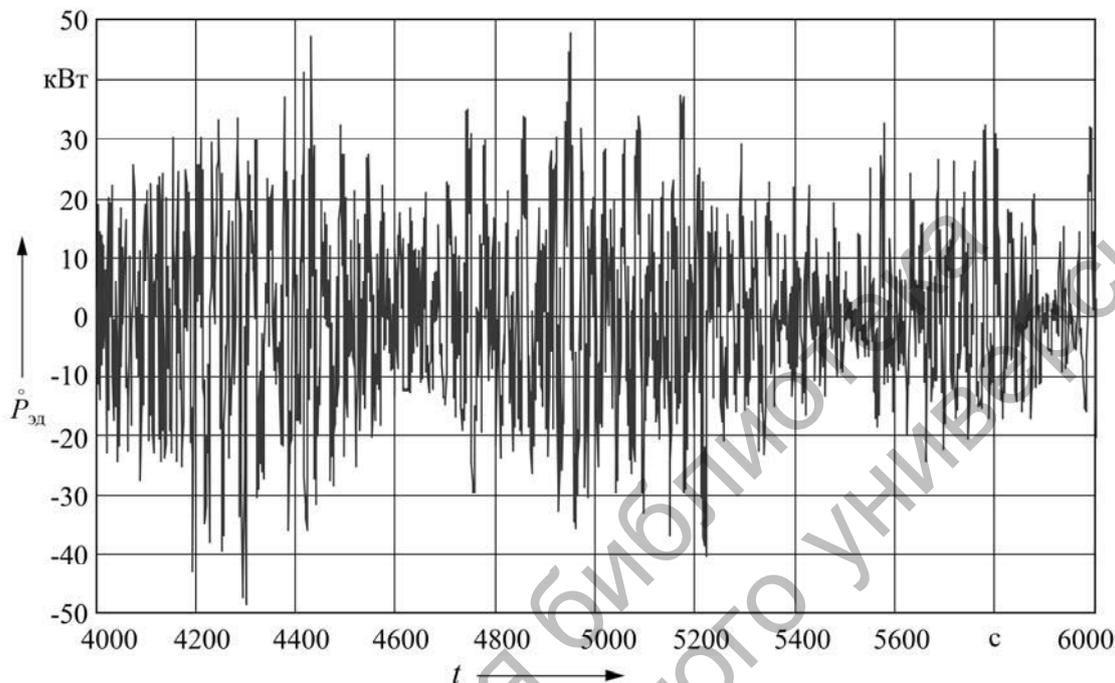


Рис. 3. График изменения центрированной составляющей мощности двигателя

Табл. 1. Числовые значения статистических оценок

\bar{x} , кВт	D_x , кВт ²	σ_x , кВт	V_x , %
81,2	280,8	16,8	20,6

Корреляционная функция вычисляется по формуле

$$R_x(\tau) = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} x_i x_{i+n}, \quad (10)$$

где x_{i+n} – центрированная ордината случайного процесса в момент времени $t_i + \tau$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – число, определяющее величину сдвига по оси абсцисс, причём $n = \tau/\Delta t$; Δt – шаг дискретизации случайного процесса во временной области (в данном случае $\Delta t = 1$ с).

На рис. 4 представлен график нормированной корреляционной функции $\rho_x(\tau)$, представляющей собой отношение корреляционной функции $R_x(\tau)$ к дисперсии случайного процесса D_x .

$$\rho_x(\tau) = R_x(\tau)/D_x. \quad (11)$$

Из приведенного графика следует, что время корреляции τ_0 составляет 6 с, следовательно, ординаты исследуемого случайного процесса изменения мощности электродвигателя привода рабочего органа комбайна слабо коррелированные.

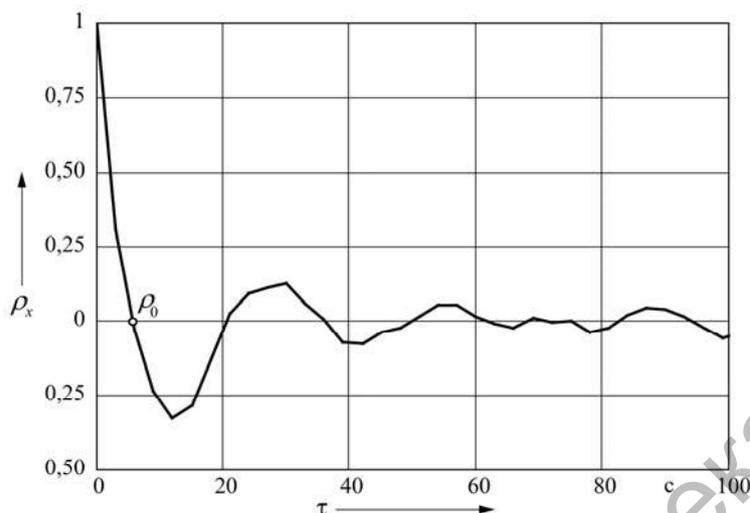


Рис. 4. Нормированная корреляционная функция реализуемой двигателем мощности

Важной характеристикой случайного процесса является его спектральная плотность, характеризующая распределение дисперсии по частоте. Спектральная плотность – величина положительная во всем диапазоне. Для определения спектральной плотности реализуем метод, основанный на преобразовании корреляционной функции. При этом необходимо иметь в виду, что с увеличением абсциссы корреляционной функции τ возрастает ошибка вычисления её значения, что приводит к погрешности вычисления спектральной плотности.

Для снижения погрешности используется сглаживание корреляционной функции посредством корреляционного окна. Сглаживание представляет собой такую же фильтрацию ординат функции $R_x(\tau)$, как и фильтрация ординат реализации случайного процесса $x(t)$ низкочастотным фильтром $h(n_i)$. Существует несколько функций сглаживания корреляционной функции [2]. В данной работе использована функция Бартлета, имеющая следующий вид:

$$h(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/\tau_{\max} & \text{при } |\tau| \leq \tau_{\max}; \\ 0 & \text{при } |\tau| > \tau_{\max}. \end{cases} \quad (12)$$

Для дискретных случайных процессов $x(t)$ спектральная плотность $G_x(\omega)$ вычисляется по выражению

$$G_x(\omega) = G_x(j\Delta\omega) = \frac{\Delta\tau}{\pi} [R_x(0) + 2 \sum_{i=1}^{n_{\max}} R_x(i\Delta\tau)h(i\Delta\tau) \times \cos(j\Delta\tau)i\Delta\tau], \quad (13)$$

где $\Delta\omega$ – шаг дискретизации аргумента ω спектральной плотности; j – номер точки дискретного аргумента $\omega_j = j\Delta\omega$; $j = 0, 1, 2, 3, \dots, k$; n_{\max} – максимальное число используемых точек корреляционной функции.

Согласно [2], рекомендуется принимать максимальное число точек

$$n_{\max} = 0,1N. \quad (14)$$

Для удобства сравнения результатов экспериментальных исследований используют нормированную спектральную плотность $g_x(\omega)$ (безразмерная

функция), вычисляемую из соотношения

$$g_x(\omega) = \frac{G_x(\omega)}{D_x}. \quad (15)$$

На рис. 5 приведен график нормированной спектральной плотности реализуемой электродвигателем мощности. Отметим, что в формуле (13) частота ω выражается в радианах в секунду, а на графике частота $\nu = \omega/(2\pi)$ – в герцах.

На графике ярко выражены два значительных пика, соответствующие частотам 6 и 18,7 Гц, где дисперсия максимальна, а также три небольших пика, соответствующих частотам 0,6;

12 и 25 Гц со средним значением дисперсии.

Для оценки плотности вероятности произведем группировку данных эксперимента, разбив весь спектр на 10 интервалов, подсчитаем число результатов, попадающих в заданные интервалы, далее построим гистограмму.

На рис. 6 представлена гистограмма распределения мощности двигателя. Функция $\hat{f}(P_{эд})$ представляет собой оценку плотности вероятности использования мощности $f(P_{эд})$.

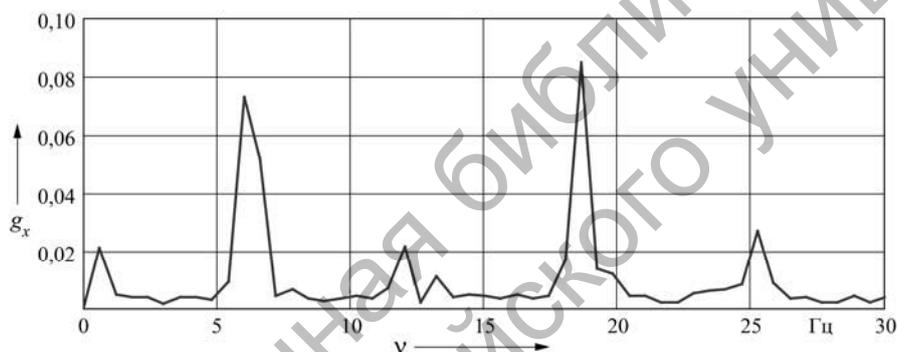


Рис. 5. Нормированная спектральная плотность мощности электродвигателя привода рабочего органа комбайна

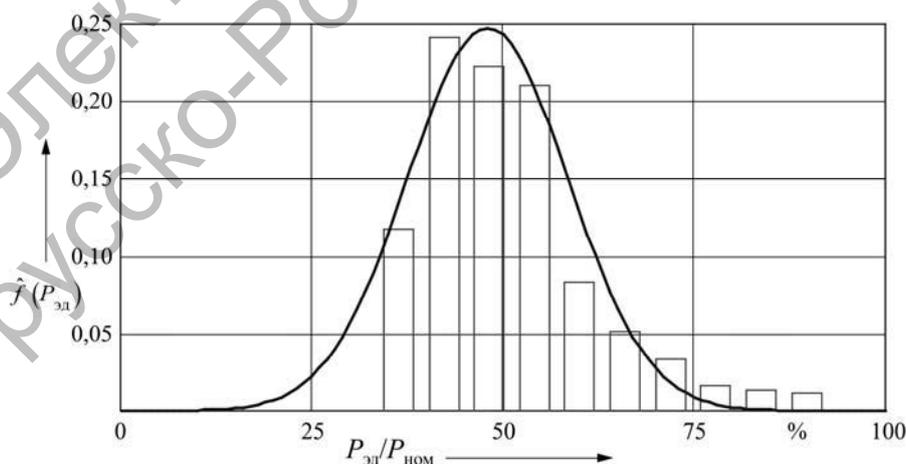


Рис. 6. Гистограмма распределения мощности двигателя

Анализируя полученную гистограмму, можно отметить, что величина

реализуемой электродвигателем мощности находится в основном в пределах

40...55 %, что соответствует 64...88 кВт. Следовательно, перегрузки двигателя в процессе функционирования комбайна не наблюдается. Форма гистограммы близка к нормальному закону распределения. Для того чтобы убедиться в близости её к нормальному закону, произведено вычисление χ^2 критерия Пирсона согласно методике [3]. При этом расчетное значение критерия сравнивается с табличным с учетом числа степеней свободы и уровня значимости.

Критерий χ^2 вычисляется согласно выражению

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - Np_i)^2}{np_i}, \quad (16)$$

где l – число интервалов группирования ординат; m_i – число результатов эксперимента, попавших в данный интервал; N – объем выборки; p_i – вероятность попадания результатов эксперимента в данный интервал при нормальном законе распределения.

Значение p_i вычисляется по формуле

$$p_i = \frac{nh}{\sigma_x} \varphi(x), \quad (17)$$

где h – ширина интервала; $\varphi(x)$ – плотность вероятности нормального закона распределения,

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right]. \quad (18)$$

Число степеней свободы для нормального распределения вычисляется по выражению

$$k = l - 3. \quad (19)$$

При уровне значимости 0,05, числе степеней свободы $k = 7$ табличное значение критерия $\chi^2 = 14,1$, а значение критерия, вычисленное по выражению (16), составляет 12,6. Следовательно, гипотеза о нормальном распределении мощно-

сти двигателя подтверждается.

Полученная гистограмма приводится к постоянной расчетной нагрузке методом эквивалентных моментов [4]. Согласно этому методу, эквивалентные моменты для расчета контактных T_{HE} и изгибных T_{FE} напряжений определяются по следующим зависимостям:

$$T_{HE} = T_{\max} \mu_H; \quad (20)$$

$$T_{FE} = T_{\max} \mu_F, \quad (21)$$

где T_{\max} – максимальный вращающий момент в приводе рабочего органа комбайна, Н·м; μ_H – коэффициент приведения режима с переменной нагрузкой к постоянному по контактным напряжениям; μ_F – то же по изгибным напряжениям.

Значения μ_H и μ_F находятся по формулам:

$$\mu_H = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^K \left(\frac{P_i}{P_{эдi}}\right)^3 \hat{f}(P_{эд})}; \quad (22)$$

$$\mu_F = \sqrt[q_F]{\sum_{i=1}^K \left(\frac{P_i}{P_{эдi}}\right)^{q_F} \hat{f}(P_{эд})}, \quad (23)$$

где q_F – показатель степени кривой усталости при расчете на изгиб; K – число столбцов диаграммы.

Применительно к данной диаграмме $\mu_H = 0,532$, $\mu_F = 0,576$. Следовательно, согласно [4], исследуемый процесс можно считать средним нормальным.

Выводы

При выполнении горнопроходческим комбайном рабочего процесса в реальных условиях эксплуатации токовая нагрузка электродвигателя привода рабочего органа носит случайный характер. В результате изменение его мощности во времени представляет собой вероятностный процесс.

Распределение мощности двигателя подчиняется нормальному закону с параметрами: $\bar{x} = 81,2$ кВт, $\sigma_x = 16,8$ кВт. Коэффициент вариации нагрузки $V_x = 20,6$ %.

Величина реализуемой электродвигателем мощности находится в основном в пределах 40...55 %, что соответствует 64...88 кВт.

Время корреляции результатов эксперимента $\rho_0 = 6$ с, следовательно, процесс изменения мощности слабо коррелированный.

Спектральная плотность мощности двигателя имеет значительные пики при

частотах 6,0 и 18,7 Гц, а также небольшие пики на частотах 0,6; 12 и 25 Гц.

Коэффициенты приведения исследуемого режима с переменной нагрузкой к постоянному режиму составляют для контактного напряжения $\mu_H = 0,532$, для изгибного $\mu_F = 0,576$.

Полученные результаты экспериментальных исследований использованы при выполнении расчетов, обосновании и выборе основных конструктивных параметров системы привода рабочего органа созданного опытного образца горнопроходческого комбайна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. **Тарасик, В. П.** Математическое моделирование технических систем : учебник / В. П. Тарасик. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2016. – 592 с.
3. **Румшицкий, Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 191 с.
4. **ГОСТ 21354–87.** Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 128 с.

Статья сдана в редакцию 30 декабря 2016 года

Александр Сергеевич Кучик, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-778-22-57.

Aleksandr Sergeyevich Kuchik, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0297-78-22-57.