

УДК 621.314.26:622.647.2

В.П. Кондрахин (д-р техн. наук, проф.),**Н.И. Стадник** (д-р техн. наук, проф.),**П.В. Белицкий** (аспирант)

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Представлены результаты статистической обработки результатов измерения грузопотока и мощности привода ленточного конвейера 2ЛУ120 восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная» ООО ДТЭК «Свердловантрацит».

Ключевые слова: ленточный конвейер, период включения конвейера, период паузы, закон распределения грузопотока, статистическая зависимость мощности от грузопотока, корреляционная функция грузопотока.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В настоящее время актуальным является вопрос целесообразности регулирования скорости ленточных конвейеров при изменяющемся грузопотоке с целью уменьшения энергопотребления на шахтном транспорте. Основными проблемами при решении данного вопроса являются: ограниченная априорная информация об изменении коэффициента сопротивления движению ленты конвейера при изменении погонной нагрузки и скорости и недостаточный объем данных по статистическим характеристикам грузопотоков шахт, оборудованных современным очистным и проходческим оборудованием, а также высокопроизводительными ленточными конвейерами. Исследованию указанных проблем посвящена данная статья.

Анализ исследований и публикаций. Исследования зависимости затрат энергии на транспортирование груза ленточным конвейером от грузопотока как случайной функции времени $Q(t)$ проводились, начиная со второй половины 60-х г.г. XX века. Целью данных исследований являлся поиск путей снижения затрат энергии на конвейерном транспорте при оперировании переменными шахтными грузопотоками [1]. Расчеты базировались на использовании нормального или логарифмического нормального закона распределения грузопотока и корреляционной функции шахтного грузопотока следующего вида:

$$R_Q(\tau) = \sigma_Q^2 e^{-\alpha\tau}, \quad (1)$$

где τ – интервал времени, для которого определяется корреляционная функция, с; σ_Q^2 – дисперсия шахтного грузопотока, $(\text{кг/с})^2$; α – параметр корреляционной функции $(1/\text{с})$.

Кроме того, для исследований [2] использовались результаты хронометражных наблюдений за процессами погрузки угля в шахтные вагонетки магистрального транспорта, что несколько искажает картину непрерывного изменения грузопотока в реальном времени. Очевидно, что для данных целей следовало использовать результаты измерений грузопотока с помощью конвейерных весов или съемных измерительных устройств [3].

Исследование эксплуатационных режимов шахтных конвейеров [2] показали стационарный характер грузопотока как случайного процесса, распределение времени поступления груза на конвейер и его отсутствия по экспоненциальному закону. Однако для исследования выбирались очистные комбайны 1К-52Ш, МК-64, ЛГД-1, струговые установки УСБ-2М, которые в настоящее время сняты с производства. Данное обстоятельство требует дополнительного изучения статистических характеристик шахтного грузопотока, генерируемого современными высокопроизводительными очистными и проходческими комбайнами.

В работе [4] установлена зависимость коэффициента сопротивления движению ленты от величины погонной нагрузки, имеющая достаточно сложный характер. Эта зависимость играет принципиально важную роль при оценке затрат энергии на транспортирование груза конвейером с постоянной и регулируемой скоростью. Поэтому установленная зависимость нуждается в экспериментальной проверке в реальных шахтных условиях эксплуатации.

В 2012 г. производилось исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте шахты «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» [5]. В качестве закона распределения величины грузопотока, был принят нормальный, времени поступления грузопотока на конвейер – пуассоновский. В качестве функции, определяющей грузопоток, были взяты осциллограммы токов очистных комбайнов. Однако оценка грузопотока таким косвенным образом не исключает риск существенных искажений показаний грузопотока, поскольку одновременно с угольным массивом комбайн может отрабатывать породные пропластки или захватывать различные горные породы, залегающие в почве или кровле пласта. Кроме того, в этих исследованиях отсутствуют данные, касательно корреляционной

функции грузопотока, определяющей характер изменения во времени последнего как случайного процесса.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют в достаточном количестве данные статистического анализа грузопотоков и энергетических характеристик ленточных конвейеров современных шахт, оснащенных высокопроизводительными комплексами оборудования.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является статистический анализ результатов измерения институтом Донгипроуглемаш грузопотока и мощности привода ленточного конвейера современной шахты на примере конвейера 2ЛУ120 (№ 4) восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная» ООО ДТЭК «Свердловантрацит».

Изложение материала и результаты. На восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная» транспортируется горная масса из двух очистных забоев, оборудованных комплексами МКД80 и МКД90, и одного подготовительного забоя. Длина конвейера $L=730$ м, скорость ленты $v=2$ м/с, номинальная мощность привода $N_0=500$ кВт, максимальная производительность $Q_{max}=1085$ т/ч. Методика получения случайной функции грузопотока с использованием показаний съемного тензоизмерительного устройства, установленного на вышеуказанном ленточном конвейере, описана в [3].

Уникальность полученного экспериментального материала заключается в том, что в течение двух суток с дискретностью 1 секунда записывались усилия, действующие на съемное тензоизмерительное устройство, и в течение четырех суток – фактическая мощность привода ленточного конвейера при переменном грузопотоке.

В результате 95,5 часов непрерывного измерения мощности, зарегистрированы 96 периодов работы конвейера (включая холостой ход) продолжительностью $t_p=1...44429$ с, а также 91 пауза (без учета времени ремонтной смены) продолжительностью $t_n=1...4442$ с. Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение величины t_p и t_n , соответственно, следующее: $m_{tp}=3425$ с; $\sigma_{tp}=6935$ с; $m_m=202$ с; $\sigma_m=538$ с.

Гистограммы распределения продолжительности времени работы конвейера и пауз за соответствующий период проведения измерений приведены на рисунке 1. Гипотеза об экспоненциальном законе распределения указанных интервалов времени не подтверждается, поскольку критерий согласия χ^2 Пирсона [6] при 20 периодах на гистограммах распределения данных величин и доверительной вероят-

ности $p=0,95$, для периодов работы и пауз, соответственно: $\chi^2_{tp}=26,9 > 9,39$; $\chi^2_{tn}=224 \gg 9,39$.

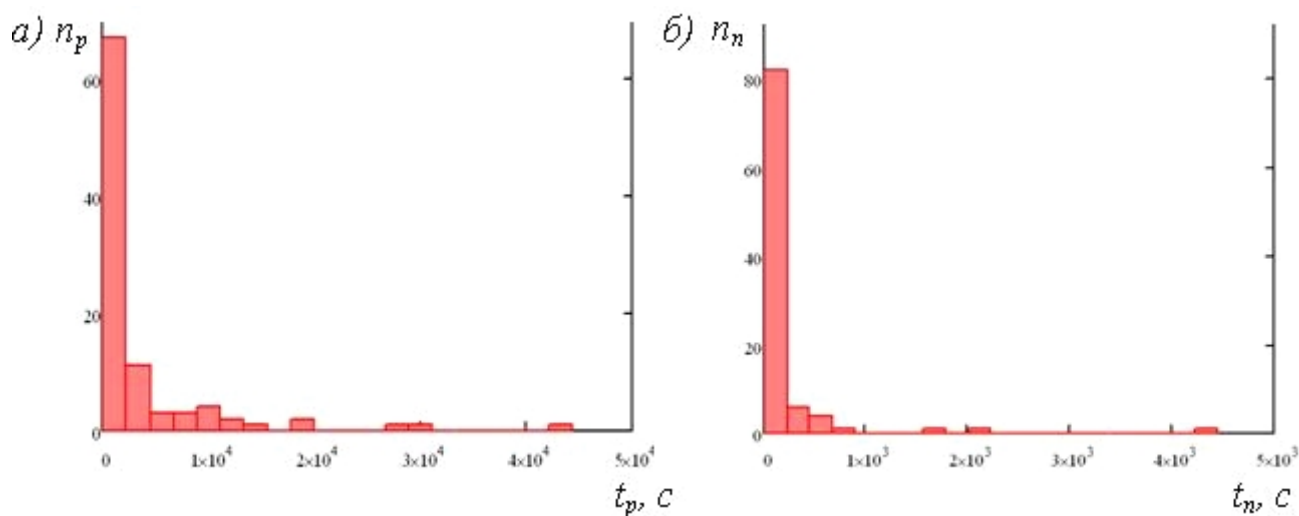


Рис. 1. Гистограмма распределения продолжительности работы привода t_p (а) и пауз t_n (б) для ленточного конвейера 2ЛУ120

Гистограмма распределения грузопотока как случайной величины представлено на рисунке 2а. Максимальное значение грузопотока составляет 533 кг/с. Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение грузопотока, соответственно, составляют: $m_Q=134$ кг/с; $\sigma_Q=66,4$ кг/с. Подтверждается гипотеза о логарифмическом нормальном законе распределения грузопотока, поскольку критерий согласия χ^2 Пирсона, при 50 интервалах гистограммы распределения и доверительной вероятности $p=0,95$, для последнего составляет $\chi^2_Q=19,3 < 31,5$.

Для текущего значения мощности привода конвейера, гистограмма распределения которой представлена на рисунке 2 б, также подтверждается гипотеза о логнормальном законе распределения, поскольку критерий согласия χ^2 Пирсона, при 50 интервалах гистограммы распределения и доверительной вероятности $p=0,95$, для последнего составляет $\chi^2_N=6,95 < 31,5$. Максимальное значение потребляемой мощности за указанный период составляет 411 кВт, математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение данной величины, соответственно, составит: $m_N=211$ кВт; $\sigma_N=27,2$ кВт.

Для выяснения характера зависимости мощности привода и коэффициента сопротивления движению от значений грузопотока требуется определить массу груза $M(t)$ на конвейере в момент времени, соответствующую текущему значению мощности привода:

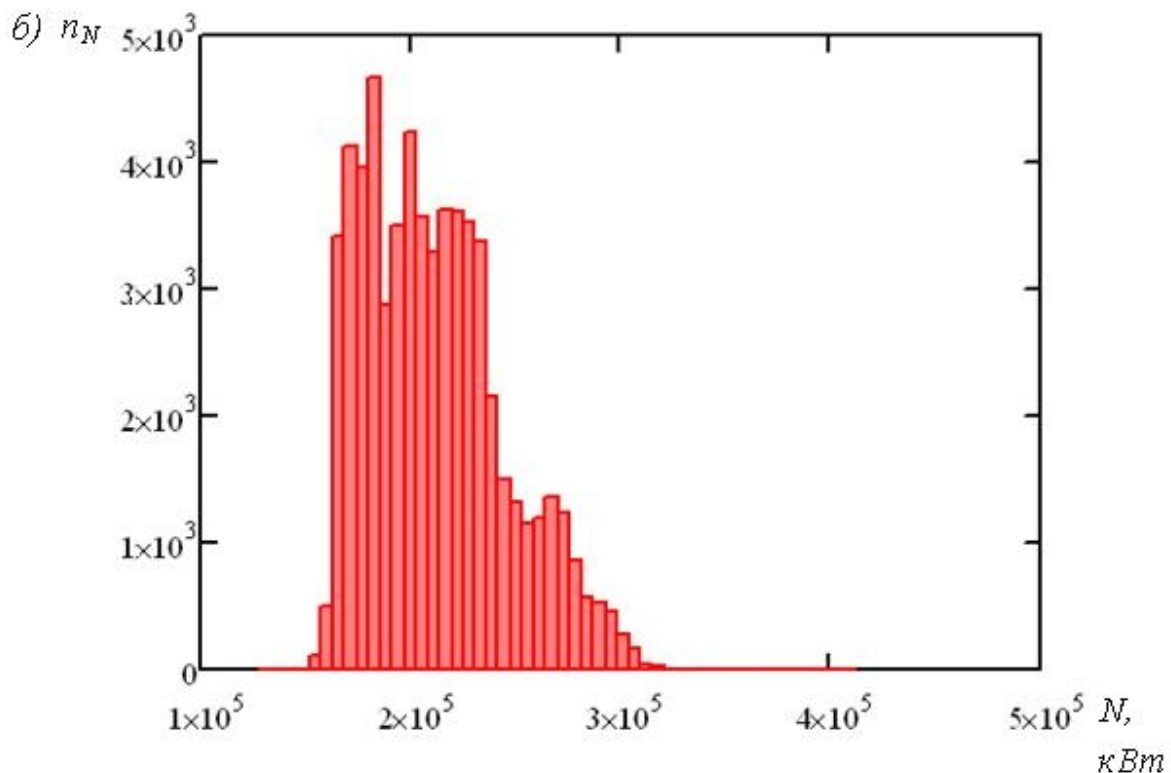
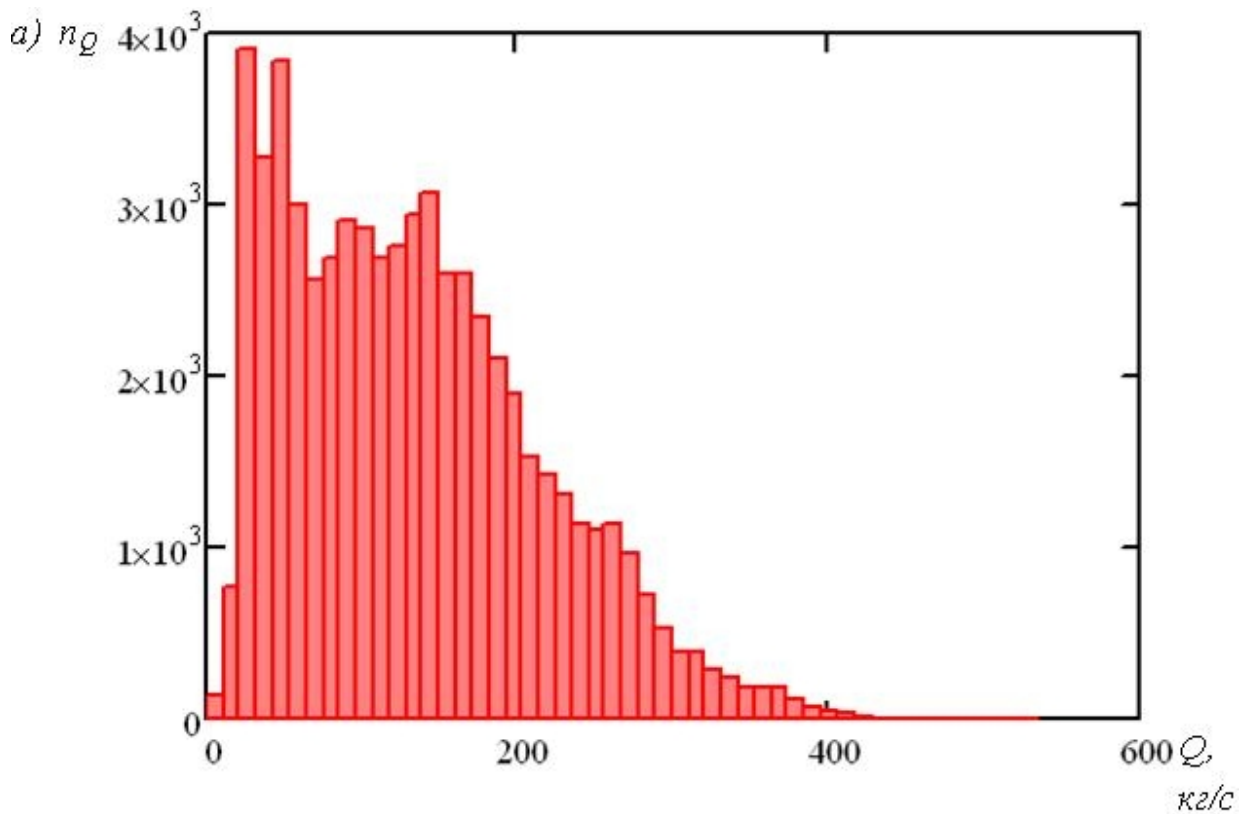


Рис. 2. Гистограммы распределения величин грузопотока (а) и мощности привода (б); n_Q , n_N – количество мгновенных значений грузопотока и мощности, попадающих в соответствующий интервал случайных величин

$$M(t) = \int_{t-4}^{t+361} Q(t) dt, \text{ кг}, \quad (2)$$

где $t-4$, $t+361$ – пределы интегрирования, соответствующие моментам времени разгрузки и погрузки взвешиваемой порции груза, с.

Указанные пределы получены следующим образом: при скорости ленты $v=2$ м/с и размещении измерительной роликоопоры в $l=8$ метрах от оси разгрузочного барабана [3], выгрузка порции груза, находящейся на измерительной роликоопоре, произойдет через $t_1=l/v=8/2=4$ с после взвешивания. Аналогично, загружаемая в хвосте конвейера порция груза попадет на измерительную роликоопору через $t_2=(L-l)/v=(730-8)/2=361$ с.

Гистограмма распределения мгновенных значений массы груза на конвейере представлена на рисунке 3.

Облако точек зависимости $N(t)=f[M(t)]$ приведено на рисунке 4. Для рассматриваемых случайных величин коэффициент корреляции составляет $r=0,933$, что указывает на наличие тесной линейной корреляционной связи между ними. Линейный характер данной зависимости принят также, исходя из следующих соображений. Очевидно, что масса груза на ленте является линейной функцией погонной нагрузки. Зависимость потребной мощности N от окружного тягового усилия на приводе W_0 также является линейной. В свою очередь, при постоянном коэффициенте сопротивления движения, W_0 линейно зависит от погонной нагрузки. Таким образом,

$$N(t)=N_{xx}+n_l M(t). \quad (3)$$

В результате статистической обработки полученного за 1 сутки работы конвейера экспериментального материала определены коэффициенты уравнения регрессии N_{xx} и n_l :

$$N(t)=160+1,11M(t), \text{ кВт}, \quad (4)$$

где $N_{xx}=160$ кВт – мощность холостого хода конвейера по данным эксперимента; $n_l=1,11$ кВт/т – приращение потребляемой мощности при увеличении массы груза на конвейере $M(t)$ на 1 тонну.

Адекватность приведенной математической модели оценивалась по критерию Фишера. При этом остаточная дисперсия адекватности оценивается по отклонению текущих значений мощности при различных измеренных значениях грузопотока Q , согласно данным уравнения регрессии, - $N(t)_i$, относительно соответствующих измеренных значений потребляемой мощности N_i в $z=61128$ моментов времени, то есть,

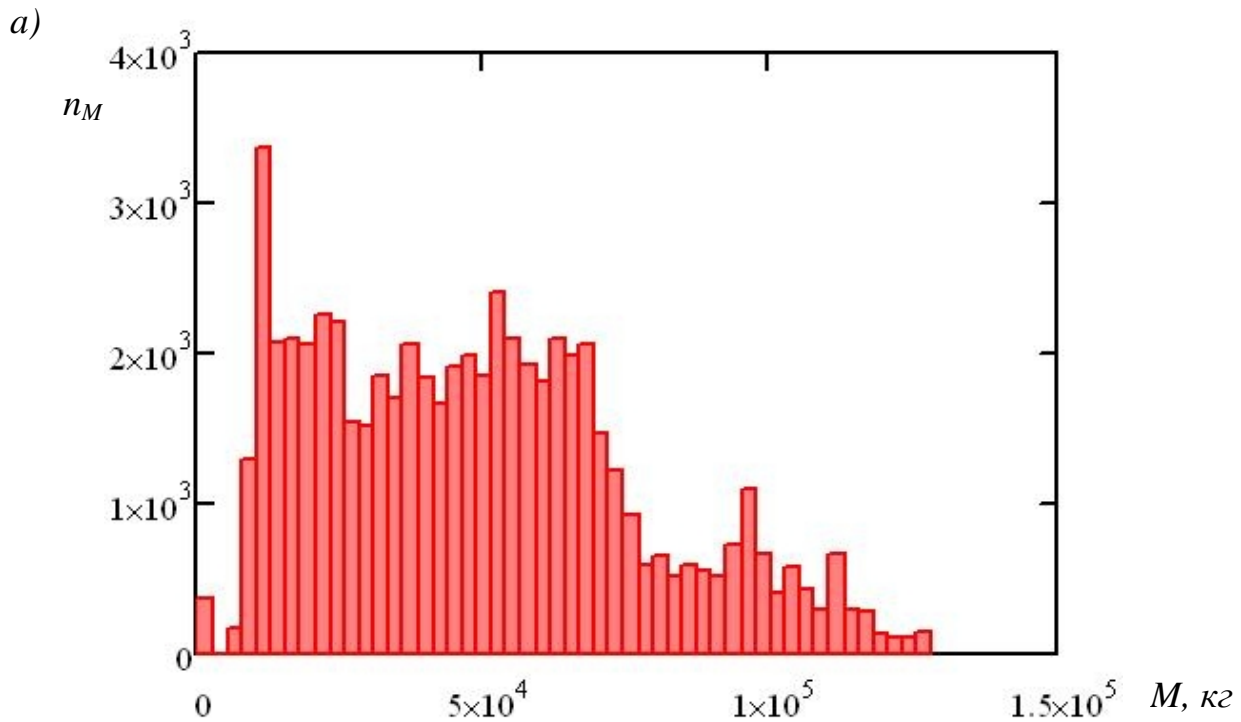


Рис. 3. Гистограмма распределения массы груза на конвейере;
 n_M – количество мгновенных значений массы груза, попадающих
в соответствующий интервал случайной величины

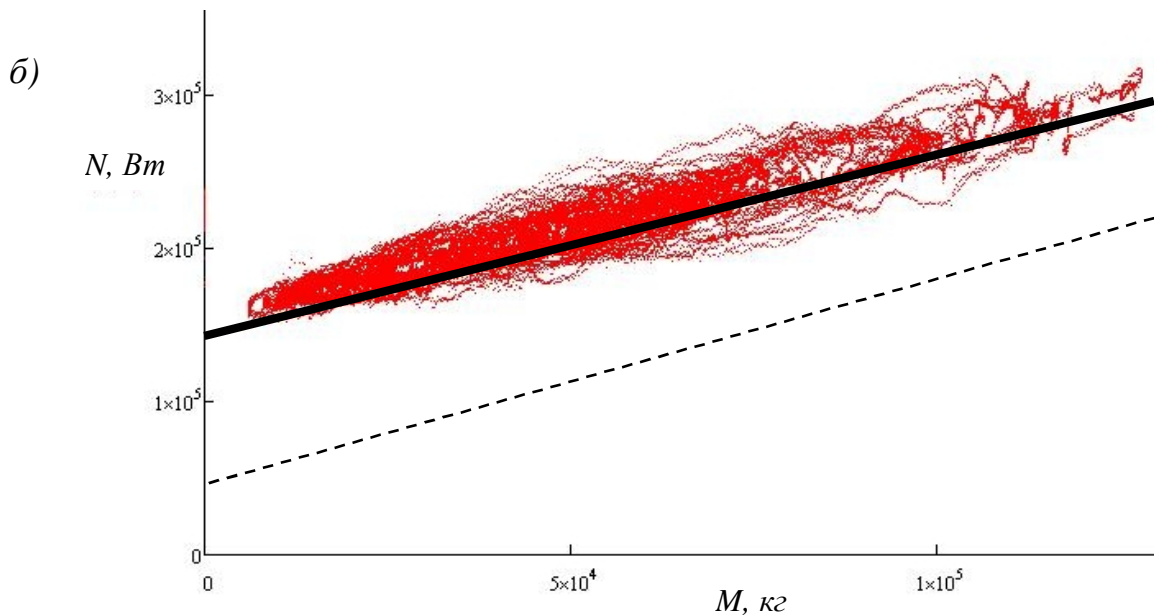


Рис. 4. Облако точек и прямая, характеризующая регрессионную
зависимость $N(t)=f[M(t)]$, - сплошная линия, и аналогичная, полу-
ченная по данным технологического расчета, - пунктирная линия

$$\sigma_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^z [N_i - N(t)_i]^2}{z - k}, \text{ кВт}^2, \quad (5)$$

где $k=2$ – количество коэффициентов в уравнении регрессии.

Дисперсия воспроизводимости определяется путем обработки 9 периодов холостого хода машины из выражения:

$$\sigma_e^2 = \left(\frac{N_{\max} - N_{\min}}{6} \right)^2, \text{ кВт}^2, \quad (6)$$

где N_{\max} , N_{\min} – соответственно, максимальное и минимальные значения мощности, потребляемой в режиме холостого хода, кВт. Поскольку $N_{\max}=187$ кВт, $N_{\min}=152$ кВт, то $\sigma_e^2=34,0$ кВт².

Расчетное значение критерия Фишера при значениях дисперсий адекватности и воспроизводимости, соответственно, $\sigma_a^2=104$ кВт² и $\sigma_e^2=34,0$ кВт², составляет

$$F = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_e^2} = \frac{104}{34,0} = 3,06. \quad (7)$$

Поскольку табличное значение критерия Фишера, $F_T=3,2 > F=3,06$, то предложенная математическая модель является адекватной.

Следует обратить внимание, что мощность холостого хода для штрекового конвейера с длиной транспортирования $L=730$ м, согласно результатам эксперимента, - $N_{xx}=160$ кВт. Это значение примерно в 3 раза больше, чем расчетное значение мощности холостого хода $N_x=55$ кВт, полученное по общепринятой методике [7]. Такая разница обусловлена, по-видимому, неудовлетворительным состоянием роликоопор на рассматриваемом шахтном конвейере, трением ленты об элементы конструкции става, наличием местных сопротивлений движению ленты в местах перегиба профиля трассы конвейера и другими факторами, мало зависящими от величины грузопотока.

Линейный характер регрессионной модели свидетельствует о том, что коэффициент сопротивления движению ленты ω' в рассматриваемых режимах не зависит от величины грузопотока.

Действительно, согласно принятой методике расчета ленточных конвейеров [7]:

$$N = (AM + B)\omega' \quad (8)$$

где A , B – постоянные величины, определяющие параметры технологического расчета конвейера, не зависящие от величины грузопотока.

Очевидно, что экспериментально установленный линейный характер зависимости (8) возможен только в том случае, если ω' не зависит от массы груза на конвейере. Таким образом, экспериментальные данные, полученные в представительных производственных условиях, не подтверждают наличие существенной зависимости коэффициента сопротивления движению ленты от величины погонной нагрузки.

Нормированная автокорреляционная функция грузопотока как случайного процесса [8] имеет вид:

$$R_Q(\tau) = \frac{m [\check{Q}(t)\check{Q}(t')]}{\sigma_Q^2}, \quad (9)$$

где $m[\check{Q}(t)\check{Q}(t')]$ – математическое ожидание произведений централизованных значений грузопотока, отстоящих на величину $\tau=t'-t$; σ_Q^2 – дисперсия грузопотока как случайного процесса, $(\text{кг/с})^2$.

Оценка нормированной автокорреляционной функции грузопотока для случая, когда происходит транспортирование горной массы из одной лавы, представлена на рисунке 5.

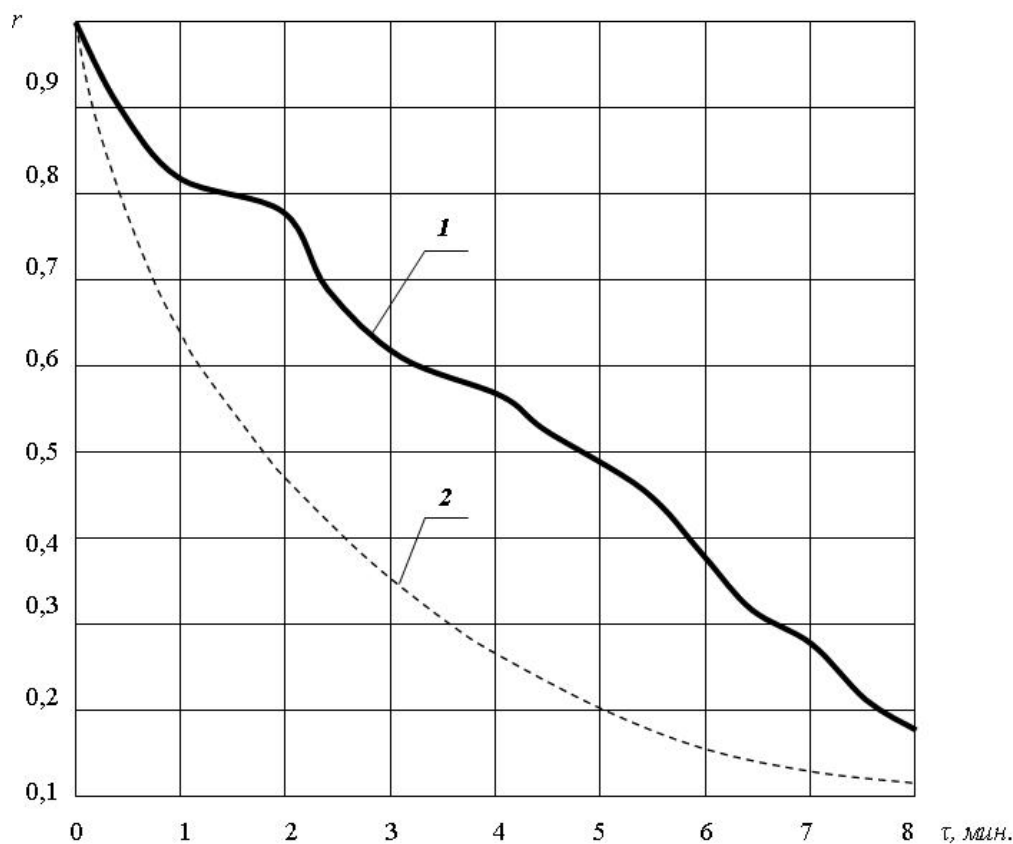


Рис. 5. Нормированная автокорреляционная функция шахтного грузопотока на шахте «Должанская-Капитальная» (кривая 1) и на шахтах треста «Рутченковоуголь» в начале 70-х г.г. [2] (кривая 2)

График указанной корреляционной функции грузопотока совмещен с аналогичным графиком, полученным в начале 70-х г.г. XX в. [2] в результате обработки измерений грузопотоков очистного забоя, оборудованного комплексом КМ-87Т. Из рисунка 5 видно, что корреляционная функция грузопотока очистного забоя современной шахты довольно существенно отличается от подобной функции, полученной 40 лет назад для забоев, оснащенных устаревшей техникой.

Полученные статистические характеристики необходимы для корректного моделирования грузопотоков и оценки энергопотребления современных шахтных ленточных конвейеров.

Выводы и направления дальнейших исследований. Приведенные результаты статистической обработки результатов длительных (в течение 4 суток) измерений с дискретностью 1 с грузопотока и мощности привода магистрального ленточного конвейера, работающего на шахте «Должанская» ООО ДТЭК «Свердловантрацит», свидетельствуют о том, что случайные величины грузопотока на конвейерном транспорте современной шахты и мощности привода конвейера подчиняются логарифмическому нормальному закону распределения. Однако экспериментальные данные не подтверждают гипотезу об экспоненциальном законе распределения продолжительности периодов работы конвейера и пауз.

На основе уникальных экспериментальных данных впервые доказана адекватность линейной регрессионной зависимости мощности привода от массы материала на конвейере, что подтверждает отсутствие зависимости коэффициента сопротивления движению ленты от погонной массы груза на ленте при работе в представительных шахтных условиях.

Полученные данные необходимы для корректного моделирования грузопотоков на конвейерном транспорте современной шахты и оценки энергопотребления при транспортировании горной массы на современных шахтных ленточных конвейерах.

Список литературы

1. Лобачева А.К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью / А.К. Лобачева // Транспорт шахт и карьеров; под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А.О.Спиваковского. – М., 1971. – С. 158-163.
2. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г.Дмитриев, А.К.Лобачева. – М.: Недра, 1972. – 173 с.
3. Кондрахин В.П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съемного тензоизмерительного устройства с учетом натяжения ленты / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник, П.В. Белицкий // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – 2013. – № 1(25). – С. 79-87.

4. Лаухофф Х. Действительно ли регулирование скорости ленточных конвейеров способствует экономии энергии? / Х. Лаухофф // Глюкауф. – 2006 – №1. – С. 9-15.
5. Прокуда В.М. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» / В.М. Прокуда, Ю.А. Мишанский, С.Н.Проценко // Гірнича електромеханіка. – 2012. – № 88. – С. 107-111.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С.Вентцель, Л.А. Овчаров. – М., 1988. – 480 с.
7. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В.В.Ададунов, В.В.Ариненков, В.А.Будишевский и др.; под ред. В.А.Будишевского, А.А.Сулимы. – Донецк, 1999. – 216 с.
8. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С.Вентцель, Л.А. Овчаров. – М., 1991. – 383 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2013

В.П. Кондрахін, М.І. Стаднік, П.В. Белицький. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Статистичний аналіз експлуатаційних параметрів шахтного стрічкового конвеєра

Наведені результати статистичної обробки результатів вимірювання вантажопотоку і потужності привода стрічкового конвеєра 2ЛВ120 східної конвеєрної магістралі шахти «Должанська-Капітальна» ТОВ ДТЕК «Свердлова-нтрацит».

Ключові слова: стрічковий конвеєр, період вмикання, період паузи, закон розподілення вантажопотоку, статистична залежність потужності від вантажопотоку, кореляційна функція вантажопотоку.

V. Kondrakhin, N. Stadnik, P. Belitsky. Donetsk National Technical University

Statistical Analysis of Mine Belt Conveyor Operating Parameters

The statistical analysis results of long-term (4 days) measurements of traffic and drive power for the belt conveyor 2LV120 in Dolzhanska mine is given. The hypothesis of log-normal distribution law for traffic and drive power is confirmed. However the hypothesis of exponential distribution law for put-on-time and put-off time periods was not confirmed by previous studies. The adequacy of the linear regression dependence of drive power on the mass of material on the conveyor, based on the unique experimental data, is proved for the first time. It confirms the lack of dependence of belt movement resistance on the linear load when the conveyor operates in mine conditions. The obtained data are needed for modeling traffic flows on conveyor transport and for assessment of energy consumption by modern belt conveyors.

Keywords: belt conveyor, put-on-time period, put-off-time period, traffic distribution law, statistical dependence of drive power on traffic, traffic correlation function.