

УДК 621.314.26:622.647.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75936

*Об'єктом дослідження є процес транспортування гірничої маси стрічковим конвеєром при інтенсивному вуглеводобутку. Предмет дослідження — закономірності впливу нерівномірності вантажопотоку на енергетичні параметри транспортування і ресурс стрічкового конвеєра в умовах інтенсивного вуглеводобутку. Встановлено суттєву нерівномірність вантажопотоку, маси вантажу, що транспортується, та їх вплив на величину і характер нерівномірності навантаженості двигунів приводу, а також питомі енерговитрати на транспортування і ресурс конвеєра. Використання отриманих результатів сприятиме створенню шахтних стрічкових конвеєрів для високоефективного інтенсивного вуглеводобутку*

*Ключові слова: інтенсифікація вуглеводобутку, конвеєр, вантажопотік, маса вантажу, енерговитрати*

*Объектом исследования являются процессы транспортирования горной массы ленточным конвейером при интенсивной угледобыче. Предмет исследования — закономерности влияния неравномерности грузопотока на энергетические параметры транспортирования и ресурс ленточного конвейера в условиях интенсивной угледобычи. Установлена существенная неравномерность грузопотока, массы транспортируемого груза на ленте и их влияние на величину и характер неравномерности нагруженности двигателей привода, а также удельные энергозатраты на транспортирование и ресурс конвейера. Использование полученных результатов будет способствовать созданию шахтных конвейеров для высокоэффективной интенсивной угледобычи*

*Ключевые слова: интенсификация угледобычи, конвейер, грузопоток, масса груза, энергозатраты*

# ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЗАГРУЖЕННОСТИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА НА НАГРУЖЕННОСТЬ ПРИВОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОЗАТРАТЫ НА ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ

**А. К. Семенченко**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: aksemen@inbox.ru

**Н. И. Стадник**

Доктор технических наук, профессор

Кафедра электротехнических систем,  
технологий и автоматизации в АПК

Винницкий национальный аграрный университет  
ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008

E-mail: stadnik1948@gmail.com

**П. В. Белицкий**

Аспирант\*

E-mail: dcb80@mail.ru

**Д. А. Семенченко**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: sda190476@mail.ru

**Е. Ю. Степаненко**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: elena\_step85@mail.ru

\*Кафедра горных машин

и мехатронных системы машиностроения

Донецкий национальный технический университет  
пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, Украина, 85300

## 1. Введение

Одним из направлений развития современных угольных шахт является интенсификация угледобычи с целью повышения производительности труда и снижения себестоимости горного производства. Это обуславливает уменьшение количества и увеличение длины очистных забоев, повышение производительности и энерговооруженности машин. Огромную роль в интенсификации угледобычи играет внутришахтный транспорт, затраты на который могут превышать 40 % расходов на производство.

Поэтому повышение эффективности средств транспорта горного предприятия является актуальным [1].

В настоящее время ленточные конвейеры являются одним из важнейших звеньев транспортной системы угольных шахт. Ленточные конвейеры характеризуются универсальностью, высокой производительностью при большой длине и сравнительно небольшой мощности транспортирования, плавностью и бесшумностью хода, простотой автоматизации, возможностью создания конвейерных линий, в т. ч. разветвленных, низкой металлоемкостью, возможностью перевозки людей и пр. [2].

Таким образом, повышение эффективности и технического уровня ленточных конвейеров является важной составляющей интенсификации угледобычи на горных предприятиях.

Одним из направлений повышения эффективности конвейерного транспорта является снижение затрат на транспортирование горной массы [3]. Настоящая работа посвящена поиску путей снижения затрат энергии и повышению ресурса конвейера при переменном грузопотоке на основе установления закономерностей влияния неравномерности массы груза на эти параметры, а также получению исходных данных для проектирования высокоэффективного шахтного транспорта. Уменьшение энергозатрат и повышение ресурса конвейера обеспечивают снижение себестоимости добычи и является актуальным. Только лишь снижение себестоимости добываемого сырья на 5 %, при среднегодовой добыче 6 млн. т и себестоимости угля 1,5 тыс. грн./т, делает возможным достижение годового экономического эффекта в размере 450 млн. грн.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Наиболее универсальным показателем энергоэффективности работы транспортной установки является параметр удельных энергозатрат  $E$  — затрат энергии на транспортирование лентой 1 т груза на расстоянии 1 км, которые определяются по формуле:

$$E = \frac{N}{Q_{\text{ср}}L}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{т} \cdot \text{км}), \quad (1)$$

где  $N$  — потребляемая мощность, кВт;  $Q_{\text{ср}}$  — средний грузопоток, т/ч;  $L$  — длина конвейера, км.

В реальных условиях величина потребляемой мощности и среднего грузопотока, соответствующего текущему значению массы груза на конвейере, изменяются в процессе работы транспортной машины. Для корректной оценки удельных энергозатрат на транспортирование груза подземным ленточным конвейером рационально использовать данные, полученные в представительных условиях шахт с современными очистными и проходческими комплексами.

Исследования зависимости затрат энергии на транспортирование груза ленточным конвейером от грузопотока проводились, начиная со второй половины 60-х гг. [4]. Для исследований использовались результаты хронометражных наблюдений за процессами погрузки угля в шахтные вагонетки магистрального транспорта. В качестве источников грузопотока рассматривались очистные комбайны 1К-52Ш, МК-64, ЛГД-1, струговые установки УСБ-2М, которые в настоящее время сняты с производства. Это требует дополнительного изучения характеристик шахтного грузопотока, создаваемого современными высокопроизводительными очистными и проходческими комбайнами.

Следует отметить, что если для скребковых конвейеров обоснована необходимость регулирования скорости [5–9], то для ленточных конвейеров, обеспечивающих, как правило, транспортирование груза при интенсивной выемке угля из нескольких забоев, вопрос целесообразности и рационального алгоритма регулирования скорости

тягового органа до сих пор изучен недостаточно. Современные исследователи данной проблемы дают различный результат оценки энергоэффективности ленточных конвейеров с регулируемым приводом [10–13]. Проблемной является ситуация и с оценкой статистических характеристик грузопотока на шахтном конвейерном транспорте, от которых напрямую зависит результат расчета их энергоэффективности и ресурса, в том числе — и для шахтных ленточных конвейеров с регулируемым приводом [14].

В настоящее время отсутствуют в достаточном количестве экспериментальные данные энергетических характеристик ленточных конвейеров современных шахт, оснащенных высокопроизводительными выемочными комплексами. Получение и дальнейшее накопление данных экспериментальных исследований грузопотока и энергетических показателей работы конвейерного транспорта при использовании этих комплексов является одним из направлений повышения эффективности их использования и интенсификации добычи.

## 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является установление влияния загрузки ленточного конвейера на нагруженность его привода, затраты энергии и ресурс для создания высокоэффективного шахтного транспорта при интенсивной выемке.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- оценить динамичность нагружения двигателей привода, характеризующую ресурс ленточного конвейера;
- установить неравномерность грузопотока горной массы и ее влияние на нагруженность ленты, а также последней — на мощности, развиваемые двигателями привода ленточного конвейера, а также энергетические показатели в режиме холостого хода и транспортирования груза;
- экспериментально уточнить значение коэффициента сопротивления движению ленты, полученное в представительных условиях интенсивной выемки;
- на основании результатов экспериментальных исследований дать рекомендации по поддержанию постоянной загрузки ленты конвейера по длине и приемной способности.

## 4. Материалы и методы исследований

### 4. 1. Схема экспериментальной установки

Оценка энергетических показателей работы конвейера производилась по результатам экспериментальных исследований грузопотока и мощности привода, проводимых институтом Донгипроуглемаш (Украина) для ленточного конвейера 2ЛУ120В (№ 4) восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная» ООО ДТЭК «Свердловантрацит» (г. Свердловск, Украина). На восточной конвейерной магистрали 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  $N_{\text{дв}} = 2 \cdot 250 = 500$  кВт, максимальная производительность  $Q_{\text{max}} = 1500$  т/ч, лента — 2РТЛЮ2500, угол транспортирования  $\beta = 3^\circ$ , транспортирование сверху вниз. Мощность,

развиваемая двигателями, измерялась на входных зажимах последних. Грузопоток оценивался по показаниям съемного тензоизмерительного устройства, размещаемого на верхней ветви разгрузочной стрелы конвейера. Конвейер оборудован жестким лебедочным натяжным устройством. Схема эксперимента приводится на рис. 1. Результаты обработки экспериментальных данных, полученные в 2013–2014 гг., представлены в [15, 16]. В результате, были получены массивы текущих значений масс груза на тензоизмерительной опоре  $Q$  и потребляемой мощности  $N$ . Длительность эксперимента составляет  $T = 17$  ч., интервал фиксации показаний  $\Delta t = 1$  с. Количество показаний  $k = 3600T/(\Delta t) = 61200$  с.

**4. 2. Методика и порядок исследования**

Масса груза, находящегося на конвейерной ленте в момент времени  $t$ :

$$M(t) = \int_{t'=t+t_1}^{t+t_1+t_2} Q(t')dt, \text{ т,} \tag{2}$$

где  $t_1, t_2$  — время прохождения груза от места взвешивания до разгрузки и от места загрузки до разгрузки, соответственно;  $Q(t')$  — текущее экспериментальное значение грузопотока.

Значение транспортируемой массы груза на конвейерной ленте в текущий момент времени составит:

$$M(t_i) = 0,001 \sum_{k=i+6}^{i+371} Q_k, \tag{3}$$

$i \in [4...((3600T/(\Delta t) - 365)], \text{ т,}$

где  $Q_k$  — значение массы груза на тензоизмерительной роликоопоре в момент времени  $t_k = k \cdot \Delta t$ , кг/с.

Характер изменения развиваемых приводными двигателями мощностей  $N_1$  и  $N_2$ , зафиксированных при экспериментальных исследованиях, и соответствующей им массы груза на конвейере  $M$ , определенной по зависимости (3), показан на рис. 2. Анализ приведенных кривых показывает существенное влияние массы транспортируемого груза на мощность, развиваемую приводными двигателями. В режимах холостого хода и транспортирования груза мощность одного приводного двигателя ленточного конвейера колеблется в пределах 70...180 кВт, и ее значения зависят от величины массы транспортируемого груза на конвейере. В период пусков мощность, развиваемая приводными двигателями, достигает 380 кВт.

С целью определения характера нагружения электродвигателей привода, а также зависимости развиваемой ими мощности от массы транспортируемого груза, развиваемая приводными двигателями мощность, зафиксированная при экспериментальных исследованиях, подвергалась регрессионному анализу. Для выбора рационального режима работы привода ленточного конвейера определялись удельные затраты энергии на транспортирование 1 т груза на расстояние 1 км при различной массе транспортируемого на ленте груза. Уточнялись данные для тягового расчета ленточного конвейера по общепринятой методике.

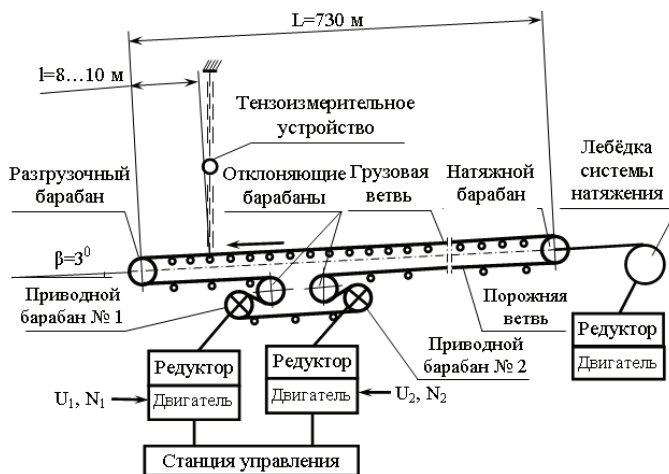


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований мощности, развиваемой приводными двигателями, на конвейере 2ЛУ120В (№ 4) восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная» ООО «ДТЭК «Свердловантрацит»:  $L$  — длина транспортирования,  $l$  — расстояние от оси разгрузочного барабана до места установки датчиков на разгрузочной консоли,  $Q$  — грузопоток,  $v$  — скорость ленты,  $U_1, U_2$  — напряжения, подаваемые на приводные двигатели Д1 и Д2,  $N_1, N_2$  — мощности, развиваемые приводными двигателями Д1 и Д2

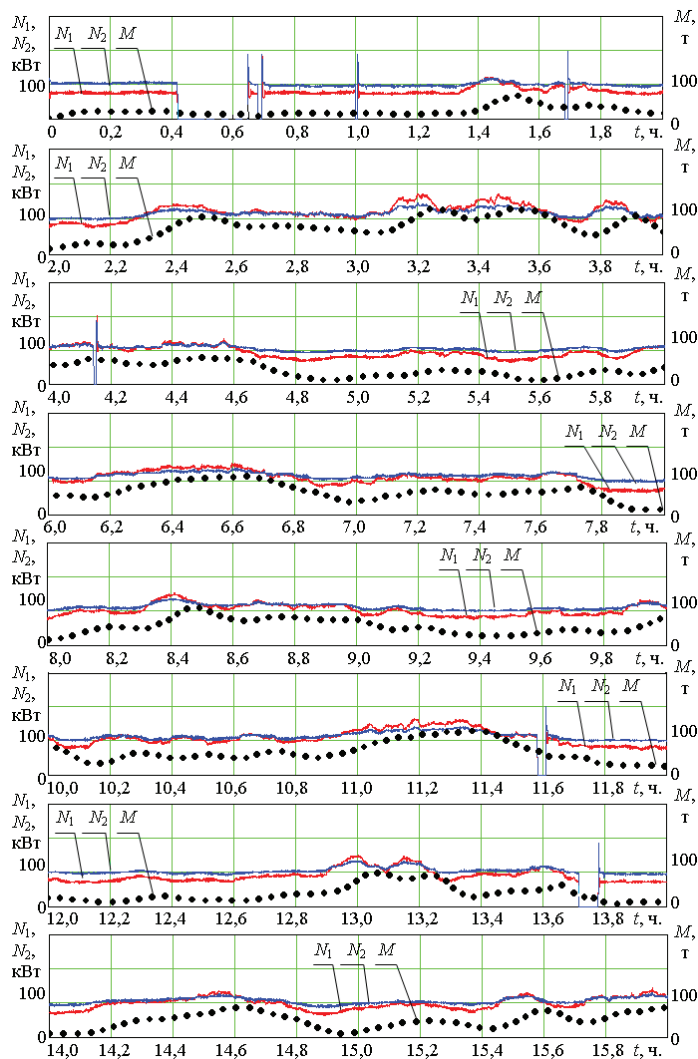


Рис. 2. Изменение мощности приводных двигателей  $N_1$  (красная линия),  $N_2$  (синяя линия), и массы груза на ленте  $M$  (черный маркер) при длительном функционировании ленточного конвейера 2ЛУ120В восточной конвейерной магистрали шахты «Должанская-Капитальная»

**5. Результаты эксперимента по установлению влияния неравномерности грузопотока и загруженности ленты на нагруженность привода**

Регрессионная зависимость мощности конвейерной установки от массы груза на ленте имеет вид [16]:

$$N_i = N_0 + \Delta N_M \cdot M_i, \text{ кВт}, \tag{4}$$

где  $N_0 = 160$  кВт — мощность холостого хода конвейера, кВт;  $\Delta N_M = 1,1$  кВт/т — приращение потребляемой мощности при увеличении массы груза на ленте на 1 т.

Неравномерность нагружения электродвигателей по мощности определяется коэффициентом соотношения мощностей приводных двигателей  $D1$  и  $D2$ , — соответственно,  $N_1$  и  $N_2$ , который изменяется во времени:

$$K_{Ni} = \frac{N_{1i}}{N_{2i}}. \tag{6}$$

На рис. 3 приведен характер изменения развиваемой мощности приводных двигателей  $N_1$  и  $N_2$  ленточного конвейера 2ЛУ120В. Графические зависимости вскрывают существенное влияние транспортируемой массы груза на характер нагружения приводных двигателей. При массе груза, транспортируемого конвейером, равной  $M = 70$  т, приводные двигатели конвейера нагружены равномерно,  $K_N = 1$ . При массе груза, транспортируемого конвейером,  $M < 70$  т, двигатель  $D2$  более нагружен, а при  $M > 70$  т — менее нагружен, чем двигатель  $D1$ . Для количественной оценки неравномерности приводятся взаимное расположение показаний мощностей  $N_1$  и  $N_2$  приводных двигателей от транспортируемой массы груза (рис. 4), а также облако точек и график, характеризующий линейную регрессионную зависимость коэффициента соотношения мощностей приводных двигателей  $K_N$  от относительной загрузки конвейера (рис. 5). Относительной загрузке конвейера  $M/M_{\text{тах}} = 1$  соответствует полная загрузка тягового органа машины по длине транспортирования и приемной способности, где значение  $M_{\text{тах}} = 126$  т указывает на максимальную возможную транспортируемую массу груза на конвейере 2ЛУ120В, функционирующем в представительных шахтных условиях, по длине и приемной способности.

По результатам статистической обработки зависимостей низкочастотной составляющей мощности, развиваемой приводными двигателями  $D_1, D_2$ , а также коэффициента соотношения их мощностей от массы транспортируемого груза на ленте, —  $N_1(M), N_2(M)$  и  $K_N(M)$ , соответственно, — были получены линейные уравнения регрессии следующего вида:

$$N_{ji} = N_{jxi} + \Delta N_{ji} \cdot M_i, \tag{7}$$

где  $N_{jxi}$  — мощность холостого хода  $j$ -го двигателя, кВт;  $\Delta N_{ji}$  — приращение мощности, потребляемой  $j$ -м двигателем, при увеличении массы груза на ленте на 1 т:

$$N_1 = 63 + 0,79M, \text{ кВт}, \tag{8}$$

$$N_2 = 91 + 0,37M, \text{ кВт}, \tag{9}$$

и для коэффициента соотношения мощностей приводных двигателей уравнение регрессии имеет вид:

$$K_{Ni} = K_{Nxi} + \Delta K_N \cdot M_i, \tag{10}$$

где  $K_{Nxi}$  — коэффициент соотношения мощностей приводных двигателей в режиме холостого хода конвейера;  $\Delta K_N$  — приращение коэффициента соотношения мощностей приводных двигателей при увеличении массы груза на ленте на 1 т:

$$K_N = 0,73 + 0,95 \cdot 10^{-3} \cdot M. \tag{11}$$

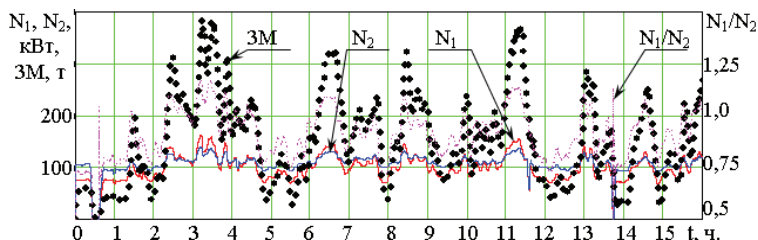


Рис. 3. Изменение развиваемой мощности приводных двигателей  $N_1$  (красная тонкая линия) и  $N_2$  (синяя тонкая линия), коэффициента соотношения мощностей (розовая точка) и массы транспортируемого груза (черный маркер) ленточного конвейера 2ЛУ120В

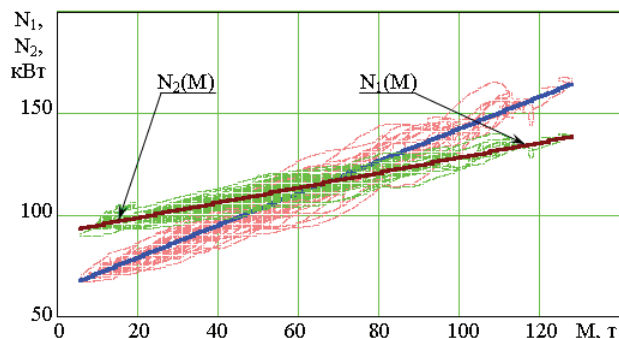


Рис. 4. Взаимное расположение показаний мощностей  $N_1$  (розовая точка) и  $N_2$  (зеленая точка) приводных двигателей, в зависимости от транспортируемой на ленте массы груза, а также графики их уравнений регрессии (соответственно, синяя и коричневая линии)

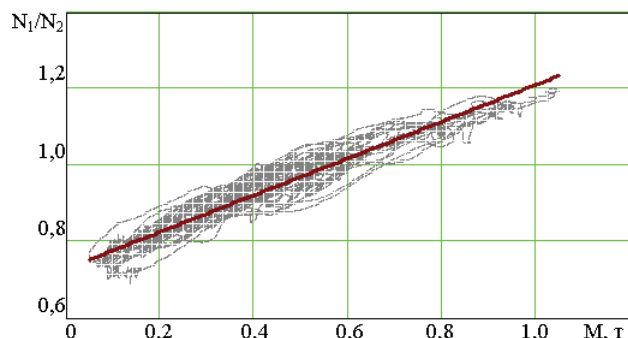


Рис. 5. Облако точек (серая точка) и график (коричневая линия), характеризующий линейную регрессионную зависимость коэффициента соотношения мощностей приводных двигателей от относительной загрузки конвейера

Коэффициенты корреляции для рассматриваемых выше  $N_1(M)$ ,  $N_2(M)$  и  $K_N(M)$ , соответственно, составляют:

$$\gamma_{N1,M} = 0,978; \gamma_{N2,M} = 0,956; \gamma_{KN,M} = 0,958.$$

Это подтверждает линейный характер зависимостей  $N_1(M)$ ,  $N_2(M)$  и  $K_N(M)$ , близкий к функциональному. Расчетные и табличные критерии Фишера для регрессионных зависимостей  $N_{1c}(M)$ ,  $N_{2c}(M)$  и  $K_{Nc}(M)$ , соответственно, для 60,6 тыс. замеров составляют:

$$F_{N1,M} = 0,77 < F_{0N1,M} = 1,0; F_{N2,M} = 0,88 < F_{0N2,M} = 1,0;$$

$$F_{KN,M} = 0,78 < F_{0KN,M} = 1,0.$$

Это подтверждает адекватность регрессионных моделей  $N_1(M)$ ,  $N_2(M)$  и  $K_N(M)$ .

Итак, в реальных условиях коэффициент соотношения мощностей приводных двигателей КН изменяется в пределах от 0,69 до 1,21 и его значение существенно зависит от транспортируемой массы груза на ленте конвейера. При значениях транспортируемой массы груза на ленте конвейера до 70 т мощность двигателя Д1 меньше, чем у двигателя Д2 на 0...31%. При значениях массы более 70 т мощность двигателя Д1 меньше, чем у двигателя Д2 на 0...21%. Неравномерность нагружения приводных электродвигателей отрицательно влияет на ресурс машины. Поэтому этот фактор неравномерности следует учитывать при создании регулируемого привода и интеллектуальной системы управления ленточным конвейером.

Во многом значение мощности, развиваемой двигателями привода ленточного конвейера, определяется распределенными и сосредоточенными силами сопротивления, имеющими место вдоль трассы конвейера. Для протяженных конвейеров наибольшее влияние на формирование мощности приводных двигателей оказывают распределенные силы сопротивления, учитываемые коэффициентом сопротивления движению ленты  $\omega'$ . Реальное значение коэффициента сопротивления движению ленты конвейера зависит от значения эксплуатационных параметров машины и может быть определено из экспериментальных данных. Согласно методике технологического расчета ленточного конвейера, мощность машины, транспортирующей груз вниз под углом  $\beta$ , определится следующим образом [2]:

$$N = gkv\eta^{-1}[(M + M_0 + M_p' + M_p'')\omega' \cos\beta - M \sin\beta], \text{ кВт}, \tag{12}$$

где  $M_0 = 64,9$  т — масса ленты конвейера;  $M_p' = 28,9$  т — масса вращающихся частей верхних роликов конвейера;  $M_p'' = 12,2$  т — масса вращающихся частей нижних роликов конвейера;  $k = 1,2$  — коэффициент, учитывающий местные сопротивления вдоль трассы ленточного конвейера;  $\eta = 0,7...0,8$  — коэффициент полезного действия электромеханической части привода.

Оценивая коэффициент  $\omega'$  по режиму холостого хода ( $M = 0$ ), получаем:

$$\omega' = \frac{N_0\eta}{gkv(M_0 + M_p' + M_p'')\cos\beta}. \tag{13}$$

Для условий эксперимента, коэффициент сопротивления движению ленты составит  $\omega' = 0,05$ , что выше коэффициента сопротивления движению ленты  $\omega'' = 0,035$ , рекомендуемого общепринятыми методиками расчета [2] на величину

$$\frac{\omega' - \omega''}{\omega'} \cdot 100\% = \frac{0,05 - 0,035}{0,05} \cdot 100\% = 30\%,$$

что указывает на дополнительную силу сопротивления движению ленты, возникающую в результате продолжительного функционирования ленточного конвейера. Одна из причин повышения коэффициента сопротивления движению ленты — заклинивание поддерживающих роликов става машины.

Таким образом, в условиях проведения эксперимента коэффициент сопротивления движению ленты конвейера на 30% выше расчетного, что также следует учитывать в тяговых и энергетических расчетах машины.

Для оценки неравномерности грузопотока  $Q(t)$  и ее влияния на характер и величину изменения транспортируемой массы груза  $M(t)$ , а также на мощность, развиваемую приводными двигателями конвейера  $N_1(t)$  и  $N_2(t)$ , был выполнен корреляционный и спектральный анализ указанных выше параметров функционирования конвейера, как случайных процессов.

Значение нормированной автокорреляционной функции для времени  $j$ -го шага смещения  $\tau_j = j \cdot \Delta t$  ( $j = (0...l)$ ,  $l$  — максимальное количество значений автокорреляционной функции), определялось по формуле:

$$K_R(\tau_j) = \frac{\sum_{i=0}^{m-j} (R_i - \bar{R})(R_{i+j} - \bar{R})}{D_R(m-j)}, \tag{14}$$

где  $R_i$  —  $i$ -е значение случайного процесса  $R(t)$ ;  $m$  — количество значений случайного процесса  $R(t)$  в его реализации;  $\bar{R}$ ,  $D_R$  — математическое ожидание и дисперсия случайного процесса  $R(t)$ .

Значения нормированной спектральной плотности случайного процесса  $R(t)$  определялись по формуле:

$$S_R(\omega_k) = \frac{\pi}{2} \sqrt{\left[ \sum_{j=0}^1 K_R(\tau_j) \cdot \cos(\omega_k \tau_j) \right]^2 + \left[ \sum_{j=0}^1 K_R(\tau_j) \cdot \sin(\omega_k \tau_j) \right]^2}, \tag{15}$$

где  $\omega_k$  — частоты гармоник случайного процесса  $R(t)$ .

В качестве минимальной  $\omega_{\min}$  была принята частота спектра, определяемая длиной реализации случайного процесса  $T$ , а именно,  $\omega_{\min} = 8\pi T^{-1}$ , в качестве максимальной  $\omega_{\max}$  — кратная шагу дискретизации фиксации показаний мощности приводных двигателей и тензодинамометров  $\Delta t = 1$  с, —  $\omega_{\max} = 20\pi(\Delta t)^{-1}$ .

Величина диапазона изменения значений  $R(t)$  оценивалась коэффициентом вариации

$$v_R = \frac{\sqrt{D_R}}{\bar{R}}. \tag{13}$$

Для корреляционного и спектрального анализа, а также оценки величины диапазона варьирования параметров, был выбран представительный участок реализации чистого

времени непрерывной регистрации показаний тензодинамометров и датчиков мощности длительностью  $T = 7,4 \text{ ч.} = 26,7 \cdot 10^3 \text{ с}$  непрерывной работы (длительностью  $T = 7,4 \text{ ч.} = 26,7 \cdot 10^3 \text{ с}$ ) ленточного конвейера с нерегулируемым приводом. Это соответствует периоду включения машины между 16:57 25.05.2011 г. и 00:22 26.05.2011 г. календарного времени.

Характер и величина изменения грузопотока и транспортируемой массы груза на ленте для выбранного участка приведен на рис. 6. Нормированные автокорреляционные функции грузопотока  $K_Q(\tau_j)$  и транспортируемой массы груза  $K_M(\tau_j)$ , а также соответствующие им спектральные плотности  $S_Q(\omega_k)$  и  $S_M(\omega_k)$ , рассчитанные по вышеприведенным формулам, показаны на рис. 7.

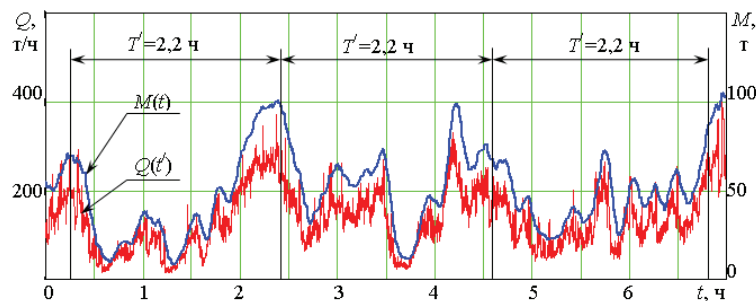


Рис. 6. Изменение во времени грузопотока  $Q(t')$ , красная линия, и транспортируемой массы груза на ленте  $M(t)$ , синяя линия, при работе конвейера от 16:57 25.05.2011 г. до 00:22 26.05.2011 г.

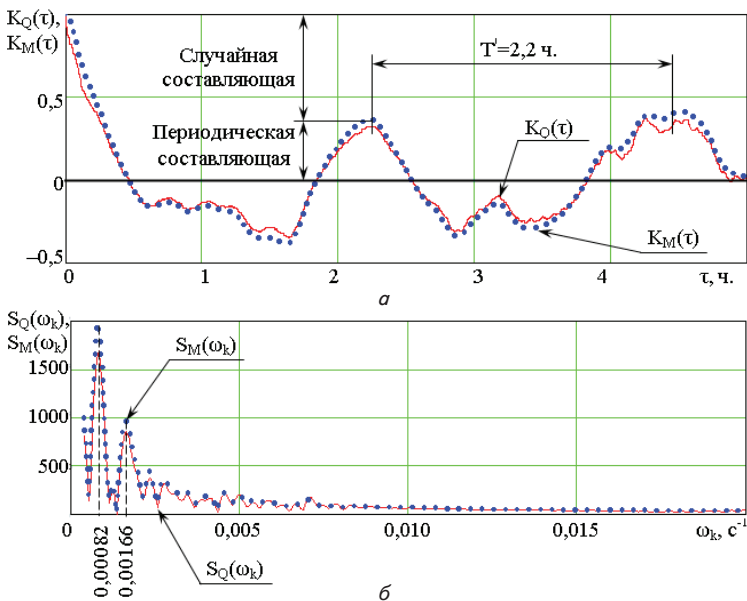


Рис. 7. Нормированные автокорреляционные функции грузопотока (красная линия) и транспортируемой массы груза (синий маркер), а также соответствующие им спектральные плотности: а — автокорреляционные функции грузопотока  $K_Q(\tau_j)$ , транспортируемой массы груза  $K_M(\tau_j)$ ; б — спектральные плотности грузопотока  $S_Q(\omega_k)$  и транспортируемой массы груза  $S_M(\omega_k)$

Анализ приведенных зависимостей (рис. 6) показывает высокую неравномерность грузопотока  $Q(t)$  и транспортируемой массы груза на ленте  $M(t)$  при отсутствии регулирования скорости транспортирования. Неравномерность грузопотока обусловлена технологическим циклом выемки угля в очистных и подготовительном забоях, а также производительностью ком-

байна. Значения коэффициентов вариации грузопотока и транспортируемой массы груза при постоянной скорости транспортирования груза близки, и составляют, соответственно,  $k_{vQ} = 0,52$  и  $k_{vM} = 0,48$ . Уменьшение коэффициента вариации транспортируемой массы груза на ленте  $k_{vM}$ , в сравнении с коэффициентом вариации грузопотока  $k_{vQ}$ , вызвано сглаживанием высоких частот грузопотока за время загрузки ленты по всей длине конвейера ( $t = 6 \text{ мин.}$ ) при формировании транспортируемой массы груза  $M(t)$  на ней. Эти частоты обусловлены неравномерностью скорости подачи очистных комбайнов, направлением их перемещения (при челноковой схеме выемки), а также работой забойного и транспортного технологического оборудования, предшествующего исследуемому конвейеру.

Сравнительный анализ нормированных автокорреляционных функций грузопотока  $K_Q(\tau_j)$  и транспортируемой массы груза на ленте  $K_M(\tau_j)$  — (рис. 7, а), показывает их практически полную идентичность. Эти процессы характеризуются наличием случайных (быстро затухающей) и периодической составляющих. При этом, среднеквадратические отклонения процессов  $\sqrt{D_R}$  составляют: для грузопотока,  $\sqrt{D_Q} = 72,7 \text{ т/ч}$ ; для транспортируемой массы груза,  $\sqrt{D_M} = 23,7 \text{ т}$ . Оцениваемая по автокорреляционным функциям, регистрируемым в результате эксперимента, периодическая составляющая соответствует временному интервалу  $T = 2,2 \text{ часа}$ , что, в свою очередь, соответствует среднему периоду возникновения максимального грузопотока в результате наложения циклов работы двух очистных и одного подготовительного забоев (рис. 6).

Анализ нормированных спектральных плотностей грузопотока,  $S_Q(\omega_k)$  и транспортируемой массы груза  $S_M(\omega_k)$  показывает, что основные дисперсии указанных случайных процессов приходится в основном на частоты  $\omega_1 = 0,00083 \text{ рад/с}$  и  $\omega_2 = 0,00166 \text{ рад/с}$ , что соответствует периодам колебаний  $T_1 = 2 \text{ ч.} 8 \text{ мин.}$  и  $T_2 = 1 \text{ ч.} 3 \text{ мин.}$  (рис. 7, б). Период  $T_1$  визуализируется в результате регистрации грузопотока в экспериментальных условиях и расчета соответствующей данному случайному процессу корреляционной функции; причина его возникновения описана выше. Период  $T_2$  соответствует технологическому циклу интенсивной выемки угля в очистном забое, и его численное значение будет существенно зависеть от технологии горных работ, принятой на предприятии. Из графиков (рис. 7) видно, что на указанные частоты приходится более 85 % дисперсии транспортируемой массы груза и более 75 % дисперсии грузопотока. Графики нормированных спектральных плотностей рассматриваемых процессов при постоянной скорости транспортирования, также как и автокорреляционных функций, практически идентичны, что свидетельствует о практически одинаковом распределении дисперсий процессов на соответствующих частотах.

Итак, грузопоток горной массы при интенсивной выемке угля в двух очистных и одном подготовительном забоях характеризуется высокой неравномерностью (коэффициент вариации  $k_{vQ}=0,52$ ), которая в значительной степени определяет характер и неравномерность массы груза, находящейся на ленте (коэффициент вариации  $k_{vM}=0,48$ ), при нерегулируемой скорости конвейера. Неравномерность грузопотока обусловлена технологическим циклом выемки угля в очистном и подготовительном забоях, направлением и скоростью движения комбайнов (при челноковой схеме выемки), а также работой забойных и транспортных конвейеров, предшествующих исследуемому. Основная дисперсия грузопотока (75 %) и транспортируемой массы груза (85 %) приходится на низкие частоты, соответствующие периодам  $T_1 = 2$  ч. 8 мин. и  $T_2 = 1$  ч. 3 мин., обусловленные технологией выемки и транспортирования горной массы.

Нормированные автокорреляционные функции мощностей первого  $K_{N1}(\tau_j)$ , и второго  $K_{N2}(\tau_j)$  двигателей, а также соответствующие им спектральные плотности  $S_{N1}(\omega_k)$  и  $S_{N2}(\omega_k)$ , приведены на рис. 8.

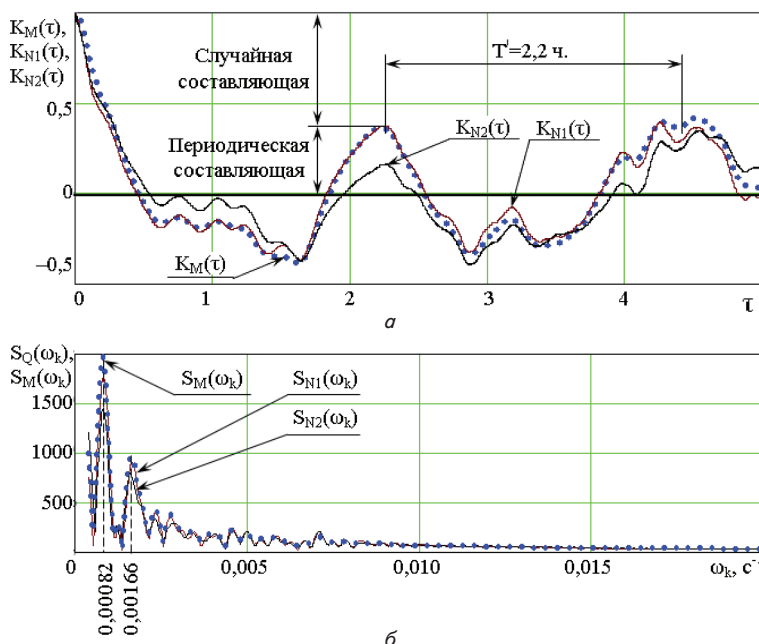


Рис. 8. Нормированные автокорреляционные функции транспортируемой массы груза (синий маркер), а также мощностей, развиваемых двигателями,  $N_1$  (коричневая линия) и  $N_2$  (черная линия), и соответствующие им спектральные плотности: а — автокорреляционные функции мощностей первого  $K_{N1}(\tau_j)$ , и второго  $K_{N2}(\tau_j)$  двигателей; б — спектральные плотности мощностей первого  $S_{N1}(\omega_k)$  и второго  $S_{N2}(\omega_k)$  двигателей

Анализ приведенных зависимостей (рис. 3) показывает снижение неравномерности мощностей, развиваемых приводными двигателями. Значения коэффициентов вариации мощностей, соответственно, первого и второго приводных двигателей составляют  $k_{vN1}=0,19$  и  $k_{vN2}=0,09$ , что объясняется высокой мощностью холостого хода ленточного конвейера и перераспределением суммарной развиваемой мощности машины между приводными двигателями. Коэффициент вариации для мощности второго приводного двигателя в 2,1 раза ниже, чем для первого. Следовательно, влияние неравномерности распределения транспортируемой массы груза на ленте  $M(t)$  на мощность, развиваемую первым приводным

двигателем,  $N_1(t)$ , более существенно, чем на мощность, развиваемую вторым приводным двигателем,  $N_2(t)$ .

Действительно, коэффициенты вариации для мощностей приводных двигателей  $N_1$  и  $N_2$ , согласно (12) определяются по формулам:

$$v_{N1} = \frac{\sqrt{D_{N1}}}{N_{1x} + \bar{N}_1}, \quad v_{N2} = \frac{\sqrt{D_{N2}}}{N_{2x} + \bar{N}_2}, \quad (16)$$

где  $\sqrt{D_{N1}}, \sqrt{D_{N2}}$  — среднеквадратические отклонения значений мощности, развиваемые первым и вторым приводными двигателями, соответственно;  $N_{1x}, N_{2x}$  — мощности холостого хода первого и второго приводных двигателей, соответственно, полученные из уравнений регрессии (8) и (9);  $N_{1x} = 63$  кВт,  $N_{2x} = 91$  кВт;  $\bar{N}_1, \bar{N}_2$  — средние значения приращений мощностей, развиваемых двигателями в процессе транспортирования груза конвейером. Из результатов эксперимента для рассматриваемого участка реализации,  $\bar{N}_1 = 40$  кВт,  $\bar{N}_2 = 20$  кВт.

Среднеквадратические отклонения мощностей, развиваемых двигателями  $N_1$  и  $N_2$ , соответственно, составляют  $\sqrt{D_{N1}} = 20$  кВт,  $\sqrt{D_{N2}} = 10$  кВт. Значит,  $v_{N1} = 20 / (63 + 40) = 0,19$ ,  $v_{N2} = 10 / (91 + 20) = 0,09$ . Без учета мощностей холостого хода, значения коэффициентов вариации приращений указанных мощностей составляют значение, порядка  $v_1 \approx v_2 \approx 0,5$ , что соответствует коэффициента вариации значений грузопотока и транспортируемой массы груза.

Корреляционный и спектральный анализ мощностей, развиваемых приводными двигателями, подтверждает влияние на данные мощности дисперсий низкочастотных составляющих указанных случайных процессов, связанных с технологией добычи полезного ископаемого, применяемой на горном предприятии. Графики нормированных автокорреляционных функций (рис. 8, а) и спектральных плотностей (рис. 8, б) рассматриваемых процессов, — соответственно,  $K_{N1}(\tau_j)$  и  $K_{N2}(\tau_j)$ , а также  $S_{N1}(\omega_k)$  и  $S_{N2}(\omega_k)$ , — также практически идентичны. Кроме того, при постоянной скорости ленты отмечается влияние дисперсий указанных процессов на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , соответствующих таковым на графиках нормированных автокорреляционных функций и спектральных плотностей грузопотока  $Q(t)$  и транспортируемой массы груза на ленте  $M(t)$ . На указанные частоты приходится более 80 % дисперсии мощности привода  $N_1$  и более 70 % мощности привода  $N_2$ . Следовательно, повышая технический уровень ленточного конвейера для интенсивной угледобычи, в первую очередь следует провести оптимизацию технологии горных работ на предприятии. Влияние времени заполнения конвейера на мощности приводных двигателей при постоянной скорости ленты несущественно, поскольку время заполнения конвейера ( $t = 6$  мин.) намного меньше периодов, связанных с технологическими процессами горного производства на рассматриваемом предприятии, измеряемых часами ( $T_1 \approx 2,2$  ч.,  $T_2 \approx 1$  ч.).

Итак, корреляционный и спектральный анализ мощностей, развиваемых приводными двигателями, показал

существенное влияние характера изменения грузопотока и транспортируемой массы груза на ленте на мощности, развиваемые приводными двигателями. При нерегулируемом приводе ленточного конвейера неравномерность мощности приводных первого и второго приводных двигателей (коэффициенты вариации, соответственно,  $k_{vN1} = 0,19$  и  $k_{vN2} = 0,09$ ) менее существенна, в сравнении с неравномерностью грузопотоком и транспортируемой массой груза, вследствие высокой мощности холостого хода двигателей привода исследуемого конвейера. Влияние неравномерности транспортируемой массы груза на двигатель, расположенный в месте сбегания ленты с привода, менее существенно, чем на двигатель, расположенный в месте набегания ленты на привод конвейера. Основная дисперсия мощности первого (85 %) и второго (75 %) приводных двигателей также, как и основная дисперсия грузопотока и транспортируемой массы груза на ленте, приходится на низкие частоты, соответствующие периодам  $T_1 = 2$  ч. 8 мин. и  $T_2 = 1$  ч. 3 мин., обусловленные технологией выемки и транспортирования горной массы.

Следовательно, для повышения технического уровня горных транспортных машин для интенсивной угледобычи на современных шахтах, с целью создания постоянного грузопотока, целесообразно создание очистных комбайнов с постоянной производительностью выемки угля (породы). Для поддержания постоянной массы груза на ленте, при включении в работу или остановке одного из забоев, горная масса которых поступает на сборный ленточный конвейер, целесообразно регулирование скорости ленты конвейера в комплексе с регулированием производительности основного технологического оборудования. Кроме того, целесообразно применение иных способов выравнивания грузопотока, например — использование механизированных бункеров. Уменьшение амплитуд нагружения электрической и механической части ленточного конвейера, достижение которого ожидается вследствие указанных выше мероприятий, положительно скажется на энергопотреблении и ресурсе ленточного конвейера.

Удельные энергозатраты на транспортирование 1 т горной массы на расстояние 1 км на ленточном конвейере составят [2]:

$$E(M_i) = \frac{N_i}{3,6vM_i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км}). \quad (17)$$

Массе груза на ленте  $M_i$  соответствует среднее значение грузопотока  $Q_{cp,i}$ , равное

$$Q_{cp,i} = \frac{3,6M_i v}{L}, \text{ т/ч}. \quad (18)$$

На рис. 9 представлена зависимость коэффициента относительного увеличения энергопотребления  $K_Э$  на транспортирование груза конвейером от коэффициента загрузки ленты по длине и его приемной способности  $K_З$ .

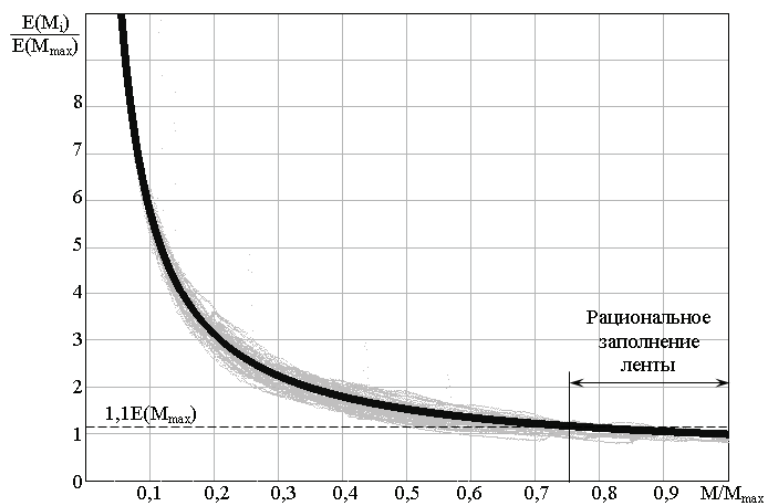


Рис. 9. Зависимость относительного увеличения энергопотребления на транспортирование груза от коэффициента нагружения по длине и приемной способности ленточного конвейера: экспериментальные данные — черная точка, а также график, соответствующий формуле (17)

Указанные выше коэффициенты определяются по зависимостям:

$$K_З = \frac{M_i}{M_{max}}, \quad (19)$$

$$K_Э = \frac{E(M_i)}{E(M_{max})}, \quad (20)$$

где  $M_{max}$  — транспортируемая масса груза на ленте, соответствующая максимальной загрузке конвейера по приемной способности;  $E(M_{max})$  — затраты энергии на на транспортирование 1 т горной массы на расстояние 1 км, соответствующие массе груза  $M_{max}$ ;  $E(M_i)$  — затраты энергии на на транспортирование 1 т горной массы на расстояние 1 км, соответствующие массе груза  $M_i$ .

Анализ зависимости удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером показывает, что при значении коэффициента загруженности конвейера по длине и приемной способности  $K_З = 0,75 \dots 1,0$ , коэффициент относительного увеличения энергопотребления не превышает  $K_Э = 1,1$ , а значит, потери энергии на транспортирование груза не будут превышать 10 % от оптимального значения энергозатрат. При значении коэффициента загруженности конвейера  $K_З = 0,5$ , коэффициент относительного увеличения энергопотребления составляет  $K_Э = 1,5$ ; при  $K_З = 0,25$ ,  $K_Э = 2,6$ ; при  $K_З = 0,1$ ,  $K_Э = 7,75$ . Следовательно, при  $K_З < 0,75$  целесообразно регулирование скорости ленты конвейера с целью уменьшения затрат энергии на транспортирование, — при условии возможности снижения скорости по условию приемной способности конвейера при переменном грузопотоке.

## 6. Обсуждение результатов эксперимента

Основное достоинство проведенных исследований — установление в представительных условиях интенсивной добычи угля (в двух очистных и одном подготовительном забоях):

— определяющего влияния характера и величины грузопотока на неравномерность загруженности ленты при нерегулируемом приводе конвейера;



— существенного влияния неравномерности загрузки ленты на характер и неравномерность нагружения двигателей, определяющих ресурс конвейера, и затраты энергии.

Недостатком исследования является большой шаг дискретизации (1 с), не позволяющий в процессе эксперимента фиксировать высокочастотную составляющую нагруженности приводных двигателей, возникающую в стационарных и переходных режимах работы ленточного конвейера.

Полученные данные могут быть использованы при:

— концептуальной разработке инновационных структур, а также высокоэффективных ресурсосберегающих транспортных машин повышенного технического уровня и мехатронных транспортных систем для интенсивной угледобычи;

— в системах САПР конвейерного транспорта горных предприятий с интенсивной добычей полезных ископаемых.

Направлениями дальнейших исследований являются:

— проведение комплекса исследований по установлению влияния неравномерности грузопотока и распределения массы груза на ленте конвейера на динамическую нагруженность и ресурс элементов его конструкции;

— обоснование структуры, параметров и алгоритма адаптивного управления функционированием ленточного конвейера как мехатронного объекта и конвейерных линий, содержащих устройства стабилизации грузопотоков;

— обоснование пространства и параметров проектирования, критериев оптимизации и разработка целевой функции оптимизации ленточного конвейера с регулируемым приводом и конвейерных линий, как мехатронных систем;

— разработка для САПР математического программного обеспечения, с учетом установленных экспериментальными исследованиями закономерностей;

— адекватных математических моделей рабочего процесса функционирования ленточного конвейера для интенсивной добычи как мехатронного объекта с адаптивной системой управления приводом;

— математической модели оптимизации, обоснование структуры, параметров регулируемого привода и алгоритма адаптивной системы управления ленточным конвейером для современной горной промышленности.

Решение данных задач будет способствовать решению проблемы интенсификации угледобычи в плане создания надежных и эффективных ленточных конвейеров нового технического уровня для горной промышленности. Для данных ленточных конвейеров, наряду с диагностикой и контролем оборудования без отключения от сети, будет обеспечиваться оптимизация затрат энергии на транспортирование и ресурса составных элементов конвейерных линий, содержащих устройства стабилизации грузопотоков, как мехатронной системы горного производства.

## 7. Выводы

1. Экспериментально установлено, что в условиях интенсивной угледобычи грузопоток горной массы из нескольких забоев и формируемая им загруженность ленты двухприводного конвейера 2ЛУ120В оказывает существенное влияние на нагруженность приводных двигателей и энергозатраты на транспортирование груза. Суммарная мощность, развиваемая приводом ленточного конвейера в режимах холостого хода (при массе груза на ленте конвейера 2...3 % от максимально возможной — 122 т), составляет 150...170 кВт, в период запусков кон-

вейера — достигает 380 кВт. В режиме транспортирования груза мощности, развиваемые каждым приводным двигателем, изменяются в пределах от 70 до 180 кВт, и их соотношение существенно зависит от величины массы транспортируемого груза на конвейере. Коэффициент соотношения мощностей приводных двигателей конвейера, характеризующий динамичность нагружения и определяющий ресурс его элементов, изменяется в пределах от 0,69 до 1,21. При значениях транспортируемой массы груза на ленте конвейера до 70 т мощность приводного двигателя в месте набегания ленты на привод меньше, чем у двигателя в месте сбегания, на 0...31 %. При значениях транспортируемой массы груза более 70 т, мощность двигателя в месте набегания меньше, чем у двигателя в месте сбегания, на 0...21 %.

2. Грузопоток горной массы при интенсивной выемке угля в двух очистных и одном подготовительном забоях характеризуется высокой неравномерностью (коэффициент вариации  $v_Q = 0,52$ ), которая в значительной степени определяет характер и неравномерность массы груза, находящейся на ленте (коэффициент вариации  $v_M = 0,48$ ), при нерегулируемой скорости конвейера. Неравномерность грузопотока обусловлена технологическим циклом выемки угля в очистном и подготовительном забоях, направлением и скоростью движения комбайнов (при челноковой схеме выемки), а также работой забойных и транспортных конвейеров, предшествующих исследуемому. Основная дисперсия грузопотока (75 %) и транспортируемой массы груза (85 %) приходится на низкие частоты, соответствующие периодам  $T_1 = 2$  ч. 8 мин. и  $T_2 = 1$  ч. 3 мин., обусловленные технологией выемки и транспортирования горной массы. При нерегулируемом приводе ленточного конвейера неравномерность мощности приводных первого и второго приводных двигателей (коэффициенты вариации, соответственно,  $v_{N1} = 0,19$  и  $v_{N2} = 0,09$ ) менее существенна, в сравнении с неравномерностью грузопотоком и транспортируемой массой груза, вследствие высокой мощности холостого хода двигателей привода исследуемого конвейера. Влияние неравномерности транспортируемой массы груза на мощность, развиваемую двигателем, расположенным в месте сбегания ленты с привода, менее существенно, чем на мощность, развиваемую двигателем, расположенным в месте набегания ленты на привод конвейера. Основная дисперсия мощности первого (85 %) и второго (75 %) приводных двигателей также, как и основная дисперсия грузопотока и транспортируемой массы груза на ленте, приходится на низкие частоты, соответствующие периодам  $T_1 = 2$  ч. 8 мин. и  $T_2 = 1$  ч. 3 мин., обусловленные технологией выемки и транспортирования горной массы. Потери энергии в режиме холостого хода зависят от его длительности, и составляют 160 кВт·ч/час. Минимальное значение энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером соответствует его работе в режиме полной загруженности ленты по длине и приемной способности, и составляет 0,34 кВт·ч/(т·км). Уменьшение значения коэффициента загруженности по длине и приемной способности приводит к гиперболическому увеличению энергозатрат на транспортирование. При коэффициенте загруженности конвейера 0,75 энергозатрат на транспортирование увеличиваются на 10 %, при 0,5 — на 50 %, при 0,25 — на 160 % и при 0,1 — на 675 %.

3. Значение коэффициента сопротивления движению ленты конвейера, полученное в представительных

условиях интенсивной выемки, составляет 0,05, что на 30 % выше рекомендуемого общепринятой методикой расчета.

4. Одним из направлений повышения эффективности ленточных конвейеров для интенсификации угледобычи является поддержание загрузки ленты конвейера по длине и приемной способности в заданном диапазоне, обеспечивающим максимальное снижение затрат энергии на транспортирование горной массы. Это достигается путем обеспечения равномерности поступления груза на ленту по длине и приемной способности последней, а также регулированием скорости тягового органа конвейера при неравномерном поступлении. Для повышения технического уровня транспортных машин для интенсивной угледобычи на современных шахтах, с целью создания по-

стоянного грузопотока, целесообразно создание очистных комбайнов с постоянной производительностью выемки угля (породы). Для поддержания постоянной массы груза на ленте, при включении в работу или остановке одного из забоев, горная масса которых поступает на сборный ленточный конвейер, целесообразно регулирование скорости ленты конвейера в комплексе с регулированием производительности основного технологического оборудования, а также стабилизация грузопотоков с помощью оборудования транспортных линий. Уменьшение амплитуд нагружения электрической и механической части ленточного конвейера, достижение которого ожидается вследствие указанных выше мероприятий, положительно скажется на энергопотреблении и ресурсе ленточного конвейера.

### Литература

1. Николайчук, В. Е. Транспортно-технологическая логистика энергоемких производств [Текст]: учеб. пос. / В. Е. Николайчук, В. А. Будишевский, В. О. Гутаревич и др.; под ред. В. А. Будишевского, А. А. Сулимы. — Донецк, 2003.
2. Ададуров, В. В. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств [Текст]: учеб. пос. / В. В. Ададуров, В. В. Ариненков, Ф. С. Воюш и др.; под ред. В. А. Будишевского, А. А. Сулимы. — Донецк, 1999. — 217 с.
3. Шахмейстер, Л. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточных конвейеров [Текст] / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачёва. — М.: Недра, 1972. — 173 с.
4. Лобачёва, А. К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью. Транспорт шахт и карьеров [Текст] / А. К. Лобачёва; под общ. ред. А. О. Спиваковского. — М.: 1971. — С. 158–163.
5. Бабокин, Г. И. Математическая модель двухдвигательного конвейера с регулируемым электроприводом [Текст]: тр. V Межд. (16 Всерос.) конф. / Г. И. Бабокин, Д. М. Шпрехер // Конференция по автоматизированному электроприводу, 2007. — С. 365–366.
6. Корнеев, С. В. Моделирование экстренных перегрузок забойных скребковых конвейеров с гидродинамическим приводом и гидравлическими натяжными устройствами [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. И. Сафонов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2012. — Вып. 36. — С. 35–43.
7. Осичев, А. В. Оценка влияния внутреннего вязкого трения тягового органа скребкового конвейера и сил сопротивления его перемещению на динамику электромеханической системы [Текст] / А. В. Осичев, А. А. Ткаченко // Вестник национального технического университета ХПИ. — 2008. — № 30. — С. 187–189.
8. Осичев, А. В. Разработка семейства компьютерных моделей для исследования динамических процессов в электроприводах скребковых конвейеров [Текст] / А. В. Осичев, А. А. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. — 2008. — Вып. 3(50), Ч. 2. — С. 154–157.
9. Осичев, А. В. Оценка динамических свойств электропривода скребкового конвейера CP72 при различных причинах заклинания его рабочего органа [Текст] / А. В. Осичев, А. А. Ткаченко. — Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика. — Львов: ЕКОінформ, 2009. — 516 с.
10. Заклика, М. Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью [Электронный ресурс] / М. Заклика, М. Колек, С. Тытко. — Режим доступа: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/for-conveyance.pdf>
11. Иванцов, В. В. Энергосберегающее устройство плавного пуска и регулирования скорости конвейера [Электронный ресурс] / В. В. Иванцов. — Режим доступа: <http://www.erasib.ru/articles/conveyor-eraton-fr>
12. Лаухофф, Х. Действительно ли регулирование скорости ленточных конвейеров способствует экономии энергии? [Текст] / Х. Лаухофф // Глюкауф. — 2006. — № 1. — С. 9–16.
13. Wheeler, C. A. Evolutionary Belt Conveyor Design — Optimizing Coasts [Text] / C. A. Wheeler. — Bulk Material Handling by Conveyor Belt. 7, Littleton, Colorado, 2008. — 108 p.
14. Прокуда, В. М. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» [Текст] / В. М. Прокуда, Ю. А. Мишанский, С. Н. Проценко // Гірнична електромеханіка. — 2012. — № 88. — С. 107–111.
15. Кондрахин, В. П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съемного тензоизмерительного устройства с учетом натяжения ленты [Текст] / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці ДонНТУ. Серія електромеханічна. — 2013. — № 1(25). — С. 79–87.
16. Кондрахин, В. П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера [Текст] / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці ДонНТУ. Серія електромеханічна. — 2013. — № 2(26). — С. 140–150.