

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ AUTOMATION AND POWER ENGINEERING

УДК 621.314.26:622.647.2

doi: [10.31474/1999-981x-2018-2-91](https://doi.org/10.31474/1999-981x-2018-2-91)

А.К. Семенченко
Н.И. Стадник
П.В. Белицкий
Д.А. Семенченко

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ УГЛЕДОБЫЧЕ

Цель работы – повышение эффективности использования ленточных конвейеров в условиях интенсивной угледобычи и высокой неравномерности грузопотока путем выбора передаточного числа редуктора привода конвейера, обеспечивающего снижение энергопотребления.

Методика выполнения работы: теоретические исследования влияния скорости ленточного конвейера на энергопотребление при транспортировании груза на основе моделирования процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование с использованием характеристик грузопотока как случайного процесса; определение рациональной скорости ленты и соответствующего ей передаточного числа редуктора, обеспечивающего снижение энергопотребления на транспортирование груза ленточным конвейером графо-аналитическим методом.

Результаты: разработана математическая модель формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером, которая учитывает неравномерность шахтного грузопотока и параметры его распределения, а также технологические параметры процесса транспортирования груза и конструктивные параметры конвейера. Установлено существенное влияние скорости транспортирования груза, параметров ленточного конвейера, грузопотока и коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера на удельное энергопотребление при транспортировании груза. Предложена методика, позволяющая определить рациональное передаточное число редуктора ленточного конвейера по критерию удельного энергопотребления с учётом ограничений по установленной мощности привода, суммарному моменту приводных двигателей, приёмной способности конвейера и прочности ленты.

Научная новизна: установление влияния загрузки ленты, скорости транспортирования и коэффициента полезного действия привода конвейера на средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером с нерегулируемым приводом.

Практическая ценность: разработка методики определения рационального передаточного числа редуктора приводного блока конвейера графо-аналитическим способом.

Ключевые слова: средневзвешенные удельные энергозатраты; загрузка ленты; оптимальное передаточное число.

Введение.

Эффективное функционирование энергоёмкого производственного комплекса, которым является современное угольное предприятие интенсивной добычи, связано с внедрением энергосберегающих технологий, а также оптимизацией структуры и режимов работы технологического оборудования. Целью данной оптимизации является работа оборудования с наименьшими энергозатратами при обеспечении требуемой производительности структурных единиц предприятия [1].

Транспортное оборудование горных предприятий является важной составляющей технологического процесса. Внутришахтный транспорт горных предприятий интенсивной

угледобычи ориентирован на применение ленточных конвейеров в качестве основного транспортного средства в капитальных выработках и на уровне околоствольного двора. Одно из преимуществ ленточного конвейера – высокая производительность при транспортировании массового груза непрерывным потоком. Однако данному классу машин присущи высокие затраты на транспортирование груза. Удельный вес затрат на транспортирование груза ленточными конвейерами в себестоимости 1 т добытого угля составляет 20 % [2; 3].

Энергопотребление при транспортировании груза ленточным конвейером является одной из наиболее весомых статей расходов на транспортирование. Согласно эксперимен-

тальным исследованиям в представительных условиях [2], средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза горизонтальным ленточным конвейером длиной 0,73 км составили 3,88 кВт·ч/(т·км). При производственной мощности предприятия 7,5 тыс. т/сутки, уменьшение удельных энергозатрат на транспортирование груза на 1 % обеспечивает экономию электроэнергии 63,7 тыс. кВт·ч/год, что при стоимости электроэнергии 2,17 грн./ (кВт·ч) даст эффект 138 тыс. грн./год (на 1 конвейер). Следовательно, обоснование путей повышения энергоэффективности использования ленточных конвейеров является актуальной научной проблемой, имеющей важное практическое значение.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [2; 4], одним из факторов, оказывающих существенное влияние на величину энергозатрат на перемещение груза ленточным конвейером является высокая неравномерность входного грузопотока, который формирует загруженность ленты, отличающуюся от максимальной возможной. Загруженность ленты, в свою очередь, обуславливает средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза при соответствующей скорости, что необходимо учитывать при составлении математической модели процесса формирования удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером.

Один из способов снижения удельного энергопотребления при транспортировании груза ленточным конвейером связан с увеличением загруженности ленты. Это достигается следующими способами:

1. регулирование (ступенчатое, непрерывное) скорости ленты, которое приводит к усложнению структуры и конструкции привода ленточного конвейера, а в отдельных случаях – к снижению электрического коэффициента полезного действия привода конвейера при малых скоростях транспортирования [1; 3-14];

2. применение промежуточных бункерных емкостей и бункер-конвейеров, сглаживающих грузопоток, которое приводит к усложнению структуры и алгоритма функционирования конвейерной линии, а также сечения горных выработок и поперечных размеров транспортного комплекса в месте установки бункеров [3; 15];

3. поддержание требуемого значения скорости подачи очистных и проходческих машин, обеспечивающее равномерную по длине и близкую к приёмной способности ленту загруженность конвейера. Это делает возможными недогрузки и перегрузки привода горной машины и не решает вопроса поддержания требуемого грузопотока на конвейере при зарубке машины [3; 16];

4. изменение передаточного числа редуктора нерегулируемого привода ленточного конвейера, что обеспечивает снижение скорости с учётом ограничений на её значение и, как следствие, увеличение загруженности конвейера при неизменном грузопотоке.

В настоящее время в специальной литературе не освещён вопрос влияния на удельное энергопотребление при транспортировании груза ленточным конвейером передаточного числа механической части привода последнего в условиях интенсивной угледобычи, что указывает на актуальность обоснования данного способа снижения энергопотребления на шахтном конвейерном транспорте.

Таким образом, в настоящее время требуют дальнейшего изучения вопросы разработки математической модели процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером с учётом неравномерности грузопотока; установления влияния скорости ленты и коэффициента полезного действия привода конвейера на энергопотребление при транспортировании груза; определения передаточного числа механической части привода конвейера, обеспечивающего минимальное удельное

энергопотребление на транспортирование груза.

Цель и задачи исследования.

Цель – повышение эффективности использования ленточных конвейеров в условиях интенсивной угледобычи и высокой неравномерности грузопотока путем выбора передаточного числа редуктора привода конвейера, обеспечивающего снижение энергопотребления.

Для достижения цели следует решить задачи:

- разработать математическую модель процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером с учётом неравномерности входного грузопотока;

- на основе разработанной модели установить влияние скорости ленты на энергопотребление при транспортировании груза с постоянной скоростью;

- с учётом установленных закономерностей и ограничений на параметры проектирования, дать рекомендации по определению передаточного числа редуктора ленточного конвейера, обеспечивающего минимальное удельное энергопотребление на транспортирование груза.

Изложение материала и результаты исследований.

Для решения первой задачи устанавливаются параметры, влияющие на энергопотребление при транспортировании груза ленточным конвейером. Согласно [17-19], средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером в течение интервала времени T , с учётом неравномерности входного грузопотока, составят:

$$W_{\text{ср}}(T) = \frac{\int_0^T \{F_0 + k_m \cdot q(t)\} \cdot v(t) dt}{m_{\Sigma}(T) \cdot L}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км}), \quad (1)$$

где F_0 – окружное тяговое усилие холостого хода конвейера; k_m – приращение окружного тягового усилия на приводе

конвейера при увеличении погонной загрузки ленты; $q(t)$ – средняя погонная загрузка ленты в момент времени t ; $v(t)$ – текущая скорость транспортирования, м/с; $\eta(t)$ – общий коэффициент полезного действия привода ленточного конвейера в момент времени t ; $m_{\Sigma}(T)$ – суммарная масса груза, перемещённая конвейером за время функционирования T ; L – длина транспортирования груза конвейером, – является технологическим параметром процесса транспортирования.

Окружное тяговое усилие привода ленточного конвейера на холостом ходу, согласно общепринятой методике расчёта последнего, зависит от его конструктивных параметров, и определяется по формуле:

$$F_0 = gLk_{s1}(2q_0 + q_p' + q_p'')\omega' \cdot \cos \beta, \text{ Н}, \quad (2)$$

где k_{s1} – коэффициент, учитывающий местные сопротивления вдоль трассы конвейера, не зависящий от загрузки ленты; q_0 – погонная масса ленты, кг/м; q_p' – погонная масса вращающихся частей верхних роликов, кг/м; q_p'' – погонная масса вращающихся частей нижних роликов, кг/м; ω' – коэффициент сопротивления движению ленты; β – средний угол установки конвейера, град.

Приращение окружного тягового усилия на приводе конвейера при увеличении погонной загрузки ленты $q(t)$ на 1 кг/м:

$$k_m = gLk_s(\omega' \cdot \cos \beta + \sin \beta), \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{кг}. \quad (3)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий местные сопротивления вдоль трассы конвейера, и зависящий от загрузки ленты конвейера [20].

Средняя погонная загрузка рабочей ветви конвейера в момент времени t , в свою очередь, определится по зависимости:

$$q(t) = \frac{\int_0^{t + \frac{L}{v(t)}} Q(t') dt}{L}, \text{ кг}/\text{м}, \quad (4)$$

где: $Q(t')$ – входной грузопоток, – определяется родом груза (уголь, порода и пр.), технологическими характеристиками, средним и максимальным значением, т/ч.

Общий коэффициент полезного действия привода ленточного конвейера определится как произведение частных коэффициентов полезного действия элементов структуры привода, т.е.

$$\eta(t) = \eta_c(t) \cdot \eta_{np}(t) \cdot \eta_{де}(t) \cdot \eta_p \cdot \eta_{mp}(t), \quad (5)$$

где $\eta_c(t)$ – коэффициент полезного действия электрической сети, зависящий от параметров последней; $\eta_{np}(t)$ – коэффициент полезного действия регулятора режима функционирования ленточного конвейера, который зависит от параметров регулятора, а в отдельных случаях – от величины нагруженности окружным тяговым усилием $F(t)$ привода ленточного конвейера, функционирующего со скоростью $v(t)$, с учётом значений диаметра барабана D и передаточного числа редуктора u_p ; $\eta_{де}(t)$ – коэффициент полезного действия приводного электродвигателя конвейера, зависящий от параметров электродвигателя, величины нагруженности привода ленточного конвейера окружным тяговым усилием $F(t)$ и требуемой скорости транспортирования груза $v(t)$, с учётом значений диаметра барабана D и передаточного числа редуктора u_p ; η_p – коэффициент полезного действия редуктора привода ленточного конвейера, зависящий от параметров редуктора и принимаемый условно постоянным; $\eta_{mp}(t)$ – коэффициент полезного действия конвейера в соответствующем режиме функционирования, учитывающий влияние холостого хода на удельное энергопотребление на транспортирование груза [19]

$$\eta_{mp}(t) = \frac{k_m \cdot q(t)}{F_0 + k_m \cdot q(t)}. \quad (6)$$

Значения частных коэффициентов полезного действия обусловлены как технологическими параметрами режима транспортирования груза $m(t)$, $v(t)$, так и перечисленными выше конструктивными параметрами конвейера, к которым относятся также передаточное число редуктора u_p и электрические параметры привода P_e .

Суммарная масса груза m_Σ , перемещённая за время функционирования T :

$$m_\Sigma = \int_0^T Q(t) dt. \quad (7)$$

Формулы (1-7) используются для разработки математической модели процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером, с учётом влияния величины и неравномерности входного грузопотока на ленточном конвейере, а также прочих технологических и конструктивных параметров на величину энергопотребления в процессе транспортирования шахтных грузов конвейером.

Итак, на величину удельного энергопотребления при транспортировании сыпучего груза ленточным конвейером влияют следующие параметры:

1) Вектор технологических параметров транспортирования груза ленточным конвейером

$$P_T [Q(t), v(t), L, \beta],$$

где $Q(t)$ – входной грузопоток как случайный процесс, влияет на загрузенность ленты $m(t)$ и определяющий суммарную массу груза, перемещённую ленточным конвейером m_Σ за время его функционирования T ; $v(t)$ – скорость ленты, определяемая алгоритмом управления конвейером, - влияет на загрузенность ленты $m(t)$ и окружное тяговое усилие $F(t)$, а также на величину коэффициента полезного действия привода конвейера $\eta(t)$ в соответствующем режиме его функционирования; L – длина транспортирования, β – средний угол транспортирования, - влияют на величину загрузенности ленты массой $m(t)$, окружное тяговое усилие $F(t)$. Загрузенность ленты конвейера массой груза $m(t)$ определяется параметрами входного грузопотока $Q(t)$, скоростью транспортирования $v(t)$, длиной транспортирования L . Влияет на величину окружного тягового усилия на приводе конвейера $F(t)$ и коэффициента полезного действия привода конвейера $\eta(t)$ в

соответствующем режиме его функционирования;

2) Вектор конструктивных параметров ленточного конвейера

$$PK(q_0, q_p', q_p'', \omega', k_s, D, u_p, P_e),$$

где q_0 , q_p' , q_p'' - погонная масса конструктивных частей; ω' - коэффициент сопротивления движению ленты; k_s , k_{s1} - коэффициенты, учитывающие местные сопротивления вдоль трассы конвейера; D - диаметр приводного барабана; u_p - передаточное число редуктора, определяется требуемой скоростью ленты v ; P_e - вектор параметров электрической части привода (в первую очередь – электродвигателя, регулятора скорости), электрической сети и т.д., - влияют на величину окружного тягового усилия $F(t)$ и общего коэффициента полезного действия привода конвейера $\eta(t)$.

Очевидно, что следует выбирать скорость ленты (передаточное число редуктора конвейера), для которой (-го):

$$W_{cs}(T, P_K, P_T) = \frac{\int_0^T \{F_0(P_K) + k_m \cdot q(t, P_T)\} \cdot v(t, P_T) dt}{\eta(t, P_K, P_T)} \rightarrow \min(8)$$

$$m_2(T, P_T) \cdot L$$

Таким образом, удельные энергозатраты на транспортирование 1 т сыпучего груза на расстояние 1 км ленточным конвейером представляются как сложная функциональная зависимость от конструктивных параметров конвейера и технологических параметров транспортирования груза, среди которых следует особо выделить скорость транспортирования $v(t)$, грузопоток на конвейере $Q(t)$ и загруженность ленты $m(t)$. Влияние данных параметров учитывается в предложенной математической модели формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером.

Для решения второй задачи – оценки влияния параметров проектирования на величину средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером с нерегулируемым приводом были использованы результаты эксперимента в представительных условиях [21], который также является основой для

методики определения оптимальной скорости и корректировки передаточного числа редуктора привода ленточного конвейера по критерию энергопотребления.

Экспериментальные исследования шахтного сборного (2 очистных забоя, 1 подготовительный забой) грузопотока угля как случайного процесса, проведенные институтом «Донгипроуглемаш» в представительных условиях интенсивной (до 1500 т/ч) добычи антрацита показали, что указанных шахтный грузопоток удовлетворительно описывается логарифмическим нормальным законом распределения с математическим ожиданием 134 кг/с (483 т/ч) и средневзвешенным отклонением 66,4 кг/с (239 т/ч). Данный грузопоток полезного ископаемого характеризуется высокой неравномерностью (с коэффициентом вариации 0,5) и обеспечивает среднюю загруженность тягового органа, в 3 раза меньшую расчётной. Экспериментальные исследования института «Донгипроуглемаш» подтверждают результаты моделирования процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза конвейером [3-12; 21, 22].

Рассмотрим влияние составляющих коэффициента полезного действия привода на его величину.

На рисунке 1 приведены зависимости коэффициента полезного действия – функции загруженности ленты η_{mp} , определяющего общий коэффициент полезного действия привода ленточного конвейера η , от относительной загруженности q/q_{max} для различной скорости транспортирования v , изменяющейся в диапазоне от 1 м/с до 4 м/с. Величина загруженности ленты q нормируется по её максимальному значению q_{max} , которое для разных скоростей транспортирования различное.

Из анализа рисунка 1 следует: при увеличении скорости транспортирования груза v уменьшается коэффициент полезного действия – функция загруженности ленты η_{mp} , что приведёт к снижению общего коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера в соответствующем режиме транспортирования η , и как следствие – повышению величины средневзвешенных удельных энергозатрат

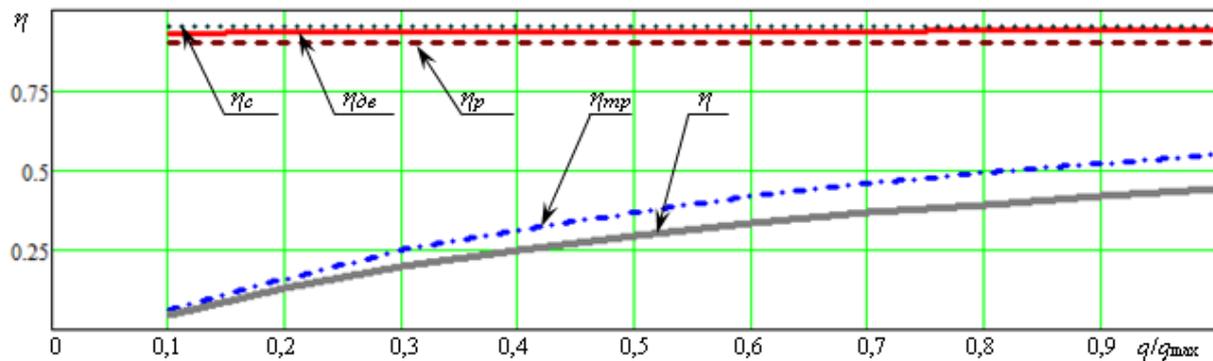


Рис. 1. Зависимости частного коэффициента полезного действия – функции загруженности ленты η_{mp} от относительной загруженности q/q_{max} для различных скоростей v

на транспортирование груза ленточным конвейером. При увеличении скорости транспортирования груза v от 1 м/с до 2 м/с, частный коэффициент полезного действия η_{mp} уменьшается от 0,7 до 0,55, т.е. на 21,4 %. При увеличении скорости v от 2 м/с до 3 м/с коэффициент η_{mp} уменьшается от 0,55 до 0,45, - на 18,2 %; при увеличении скорости v от 3 м/с до 4 м/с коэффициент η_{mp} уменьшается от 0,45 до 0,39, - на 13,3 %. Следовательно, по критерию снижения удельного энергопотребления,

целесообразно регулирование режима транспортирования груза при малых скоростях ленты.

Для нерегулируемого привода ленточного конвейера значение общего коэффициента полезного действия η будет определяться произведением коэффициентов

полезного действия электрической сети η_c , двигателя $\eta_{дв}$, редуктора η_r и частного коэффициента полезного действия – функции загруженности ленты η_{mp} , которые имеют различный характер зависимости от величины средней погонной загруженности q тягового органа конвейера. На рисунке 2 приведена зависимость составляющих коэффициента полезного действия и его общего значения от относительной загруженности ленты для скорости транспортирования груза $v=2$ м/с. Нормирование средней погонной загруженности ленты производится по её максимальному значению, которое для указанной скорости составит $q_{max}=173$ кг/м ($m_{max}=126$ т) [18].

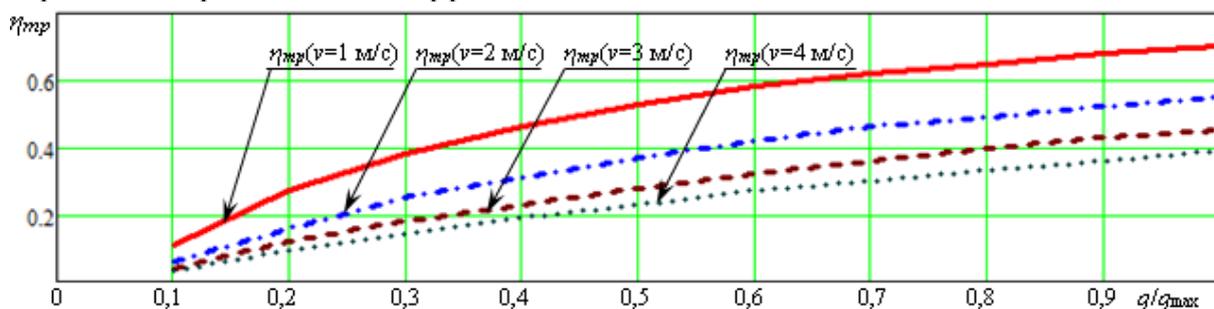


Рис. 2. Зависимость составляющей коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера – функции загруженности ленты от относительной величины загруженности для скорости транспортирования $v=2$ м/с

Из анализа рисунка 2 следует вывод, что величины частных коэффициентов полезного действия привода ленточного конвейера имеют различный характер зависимости от погонной загруженности ленты и по-разному влияют на значение общего коэффициента полезного действия

привода конвейера. Наиболее существенно загруженность ленты влияет на составляющую коэффициента полезного действия – функции загруженности ленты η_{mp} , которая учитывает влияние холостого хода конвейера на энергопотребление на транспортирование 1 т груза на расстояние 1

км. Значение последнего коэффициента полезного действия при скорости ленты 2 м/с изменяется в широком диапазоне – от 0 в режиме холостого хода конвейера до 0,55 в режиме полной его загрузки. Нелинейный характер зависимости данной составляющей коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера от погонной загрузки ленты определяет характер зависимости от таковой общего коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера, который изменяется в соответствующих режимах функционирования конвейера от 0 до 0,39.

Коэффициент полезного действия электродвигателя $\eta_{дв}$ в данных условиях влияет на общий коэффициент полезного действия привода ленточного конвейера незначительно. Вследствие высокой мощности холостого хода конвейера [21] значение $\eta_{дв}$ стабилизируется, изменяясь при варьировании загрузки ленты в диапазоне $(0,1 \dots 1,0)q_{max}$ на 1 %, - от 0,93 до 0,94. Остальные значения частных коэффициентов полезного действия привода конвейера принимаются условно постоянными.

Итак, наиболее существенное влияние на общий коэффициент полезного действия

привода ленточного конвейера оказывает частный коэффициент полезного действия – функция загрузки ленты η_{mp} , которая нелинейно зависит от загрузки ленты m и учитывает влияние холостого хода конвейера на энергопотребление при транспортировании груза.

Исходя из вышесказанного следует вывод: на величину коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера существенно влияют скорость транспортирования и загрузка ленты. Поэтому, для снижения удельного энергопотребления при транспортировании груза ленточным конвейером целесообразно регулирование скорости транспортирования в сторону её уменьшения для стабилизации величины загрузки ленты конвейера.

На рисунке 3 приведены зависимости коэффициента полезного действия η привода ленточного конвейера при максимальной по заданному грузопотоку загрузке ленты m_{max} , а также величины средней погонной загрузки конвейера q_{cp} и средневзвешенных удельных энергозатрат W_{ce} на транспортирование груза от скорости транспортирования v .

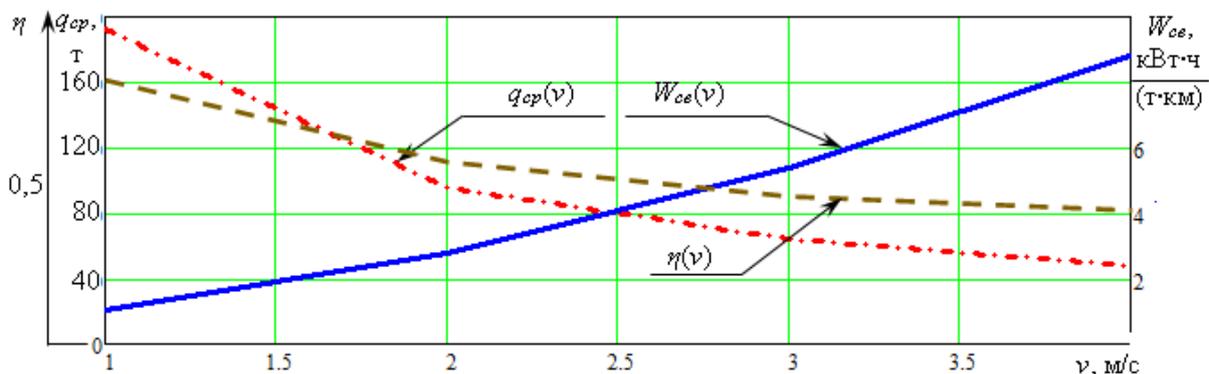


Рис. 3. Зависимости коэффициента полезного действия привода ленточного η конвейера при максимальной по заданному грузопотоку загрузке ленты, а также величины средней погонной загрузки конвейера q_{cp} и средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером W от скорости транспортирования v

Из анализа рисунка 3 следует, что причиной падения коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера при увеличении скорости транспортирования является гиперболическое снижение величины загрузки его тягового органа. При оценке загрузки ленты по её средней величине, при увеличении

скорости v от 1 м/с до 2 м/с загрузка q_{cp} уменьшается от 132 кг/м до 66 кг/м, - на 50,0 %; при увеличении скорости v от 2 м/с до 3 м/с загрузка q_{cp} уменьшается от 66 т до 49 т, - на 33,3 %; при увеличении скорости v от 3 м/с до 4 м/с загрузка q_{cp} уменьшается от 49 т до 33 т, - на 25,0 %.

Кроме того, на рисунке 3 видно, что зависимость максимального коэффициента полезного действия привода конвейера и средней загрузки ленты от скорости транспортирования носит нелинейный характер. Это определяет нелинейный характер зависимости и средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером. При увеличении скорости v от 1 м/с до 2 м/с средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза $W_{св}$ увеличиваются от 1,05 кВт·ч/(т·км) до 2,78 кВт·ч/(т·км), - в 1,65 раз; при увеличении скорости v от 2 м/с до 3 м/с энергозатраты $W_{св}$ увеличиваются от 2,78 кВт·ч/(т·км) до 5,36 кВт·ч/(т·км), - на 93 %; при увеличении скорости v от 3 м/с до 4 м/с энергозатраты $W_{св}$ увеличиваются от 5,36 кВт·ч/(т·км) до 8,78 кВт·ч/(т·км), - на 64 %.

Итак, на величину средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером наиболее существенно влияют скорость транспортирования (прямая зависимость), а также коэффициент полезного действия привода конвейера и загрузка ленты (обратная зависимость), которые обусловлены как скоростью транспортирования, так и входным грузопотоком на конвейере. С целью снижения энергопотребления при транспортировании груза ленточным конвейером целесообразно максимальное снижение скорости ленты, с учётом возможных ограничений на параметры проектирования привода ленточного конвейера.

Для решения третьей задачи определим рациональное передаточное число редуктора привода ленточного конвейера в условиях горного предприятия интенсивной угледобычи при неравномерном грузопотоке на конвейере. При разработке методики решения данной задачи были приняты следующие допущения: загрузка ленты $q(t)$, окружное тяговое усилие $F_o+k_m \cdot q(t)$ и первоначальное натяжение ленты S_H создают изменяемое во времени и по координате точки контура гибкого тягового органа натяжение, которое не может быть больше максимального допустимого натяжения ленты, применяемой на конвейере;

рассматриваются шахтные ленточные конвейеры обычного исполнения с резиновосовой лентой, функционирующие при углах транспортирования $-16^0 \leq \beta \leq 18^0$; мощность, потребляемая электродвигателем из сети $P(t)$, в частности – ток в статоре $I(t)$, напряжение сети U_c и частота вращения ротора $\omega(t)$ обусловлены исключительно электромеханической характеристикой двигателя; предполагается равномерное распределение нагрузки между приводными двигателями ленточного конвейера; рассматривается зависимость удельного энергопотребления при транспортировании груза от параметров проектирования, с учётом указанных выше ограничений, с использованием формул расчёта и проектирования шахтного ленточного конвейера по общепринятой методике.

Предлагается следующая методика определения пространства проектирования нерегулируемого привода и рационального передаточного числа редуктора последнего с учётом ограничений на параметры проектирования.

1 Вводятся конструктивные параметры ленточного конвейера с нерегулируемым приводом, а также технологические параметры транспортирования груза конвейером - скорость ленты v_k и реализация входного грузопотока Q_i .

2 Определяется величина средней погонной загрузки ленты по формуле (6).

3 Производится статистическая обработка полученной погонной загрузки ленты q_i , определяются значения вероятностей последней p_j [3; 18-20].

4 Определяются средневзвешенные удельные энергозатраты $W_{св}(T, P_k, P_T)$ на транспортирование груза ленточным конвейером по (1)–(7) для различных скоростей v_k .

5 Строится номограмма определения оптимальной скорости транспортирования v_{onm} (оптимального передаточного числа u_{onm}). На общем поле, - рисунок 4, - строятся:

а) график зависимости средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза $W_{св.k}$ от скорости ленты v_k (см. рисунок 3);

б) график зависимости тепловой мощности привода от скорости ленты v_k :

$$P_k = (F_0 + k_m \cdot q_{cp,k}) (\eta_p \eta_{\delta\sigma})^{-1} v_k, \text{ кВт}, \quad (9)$$

$$q_{cp,k} = \frac{m_{jk}}{L}, \text{ кг/м}; \quad (10)$$

где $q_{cp,k}$ – средняя погонная загрузка ленты при k -й скорости транспортирования,

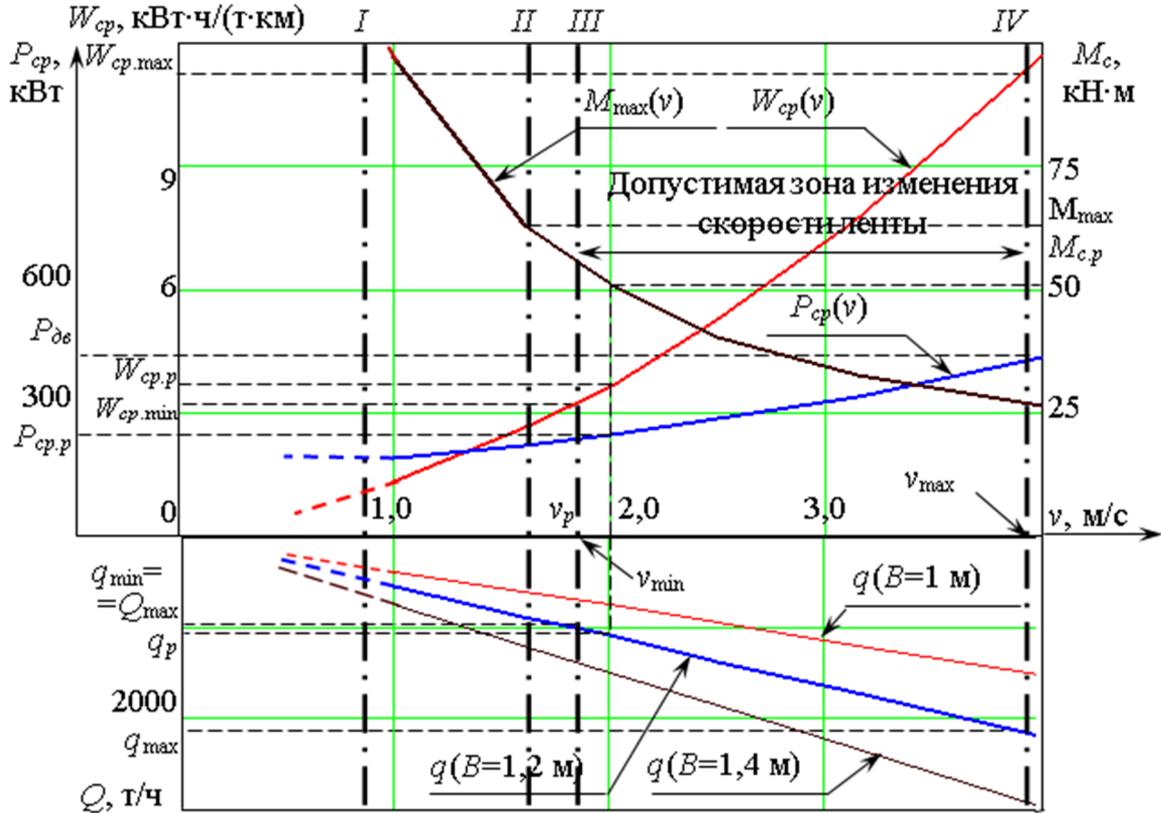


Рис. 4. Номограмма определения рационального передаточного числа редуктора привода ленточного конвейера по критерию энергопотребления, исходя из следующих ограничений:

I – прочность ленты, для соблюдения которой должно выполняться условие $S_{max} > S_{np}$, где S_{max} – максимальное натяжение ленты при функционировании конвейера, S_{np} – максимальное допустимое натяжение по условию прочности ленты; **II** – устойчивый момент двигателя, - должно выполняться условие $M_c(u_p \eta_p)^{-1} > M_{max}$, где M_c – момент сопротивления на приводном барабане конвейера, u_p – передаточное число редуктора, η_p – коэффициент полезного действия редуктора, M_{max} – номинальный момент на валу ротора двигателя (-ей); **III** – приёмная способность ленты, - условие $q < Q_{max}$, где q – приёмная способность ленты, обусловленная теоретической производительностью конвейера, Q_{max} – максимальный грузопоток за время функционирования конвейера; **IV** – максимальная средневзвешенная мощность двигателей, - условие $P_{cp} > P$, где $P_{cp} = W_{cb} q L$ – мощность двигателя, соответствующая средневзвешенным удельным энергозатратам на транспортирование груза W_{cb} , L – длина транспортирования, P – паспортная мощность двигателя (-ей)

в) график зависимости максимального момента M_{max} , развиваемого двигателями конвейера, от погонной загрузки ленты при соответствующей скорости v_k :

$$M_{max,k} = M_{c0} + gL(k_s \omega' \cos \beta \pm \sin \beta) \times \eta_p^{-1} \cdot \max\{q\}_k, \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad (11)$$

где $M_{c0} = 2F_0 D^{-1}$ – момент сопротивления, соответствующий холостому ходу конвейера; $\max\{q\}_k = f(v_k)^{-1}$ –

максимальная погонная загрузка ленты при k -й скорости транспортирования;

г) график зависимости теоретической производительности Q_k от скорости ленты v_k :

$$Q_k = 3600 c B^2 \rho v_k, \quad (12)$$

где $c = (350 \dots 550)$ – коэффициент производительности, зависящий от рода транспортируемого груза и формы поперечного сечения грузовой ветви ленты; B – ширина ленты, м; ρ – насыпная плотность транспортируемой горной массы, т/м³.

6 Вводятся ограничения на значения скорости транспортирования v_k (передаточного числа u_k) [22]. Определяются:

а) максимальная допустимая скорость ленты из условия обеспечения тепловой мощности приводного двигателя:

$$v_{k.I}^{(\max)} = \frac{n_{\text{дв}} N_{\text{дв}} \eta_p \eta_{\text{дв}}}{F_0 + k_m \cdot q_{\text{сп.к}}}, \text{ м/с}, \quad (13)$$

где $n_{\text{дв}}$ – количество приводных двигателей; $N_{\text{дв}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

Значение максимальной допустимой скорости ленты из условия обеспечения тепловой мощности приводного двигателя является первым ограничивающим фактором и запрещает назначение скорости ленты, больше данного значения. Прямая, параллельная оси ординат и пересекающая точку $v_{k.I}^{(\max)}$ на графике $P_k(v)$, воспроизводится на поле номограммы;

б) минимальная допустимая скорость ленты из условия её приёмной способности:

$$v_{k.II}^{(\min)} = \frac{1,6Q_{\max}}{cB^2\rho}, \text{ м/с}, \quad (14)$$

где Q_{\max} – максимальный грузопоток на конвейере из условий эксперимента или гистограммы распределения, т/с.

Значение минимальной скорости ленты из условия её приёмной способности является вторым ограничивающим фактором и запрещает назначение скорости ленты меньше данного значения. Прямая, параллельная оси ординат и пересекающая точку $v_{k.II}^{(\min)}$ на графике $Q_k(v)$, воспроизводится на поле номограммы;

в) минимальная допустимая скорость ленты из условия отсутствия превышения максимального момента двигателя:

$$v_{k.III}^{(\min)} = \frac{n_{\text{дв}} M_{\text{дв}} \omega \eta_p}{F_0 + k_m \cdot q_{\max}}, \text{ м/с}, \quad (15)$$

где $M_{\text{дв}}$ – номинальный момент электродвигателя, Н·м; ω – номинальная частота вращения ротора двигателя.

Значение минимальной допустимой скорости ленты из условия обеспечения максимального момента двигателя является третьим ограничивающим фактором и запрещает скорости ленты меньше этого

значения. Прямая, параллельная оси ординат и пересекающая точку $v_{k.III}^{(\min)}$ на графике $M_{ck}(v)$, воспроизводится на поле номограммы;

г) минимальная допустимая скорость ленты из условия прочности ленты:

$$v_{k.IV}^{(\min)} = \frac{Q_{\max} L k_m m_3}{3600 [1000 k_z B - m_3 (S_0 - F_0)]}, \text{ м/с}, \quad (16)$$

где k_z – удельная разрывная прочность каркаса ленты, Н/мм; $m_3 = (7 \dots 10)$ – запас прочности ленты, требуемый нормативно-техническими документами на эксплуатацию конвейера.

Значение минимальной допустимой скорости ленты из условия её прочности является четвёртым ограничивающим фактором и запрещает назначение скорости ленты меньше данного значения. Прямая, параллельная оси ординат и пересекающая точку $v_{k.IV}^{(\min)}$ на оси абсцисс, воспроизводится на поле номограммы.

7 Определяется рациональная скорость v_p . Области допустимых значений скорости транспортирования груза и передаточного числа редуктора привода конвейера ограничены. Допустимая скорость транспортирования находится в диапазоне её значений $[\max\{v_{k.I}^{(\min)}; v_{k.II}^{(\min)}; v_{k.III}^{(\min)}\}; v_{k.IV}^{(\max)}]$. Конвейер может эксплуатироваться, если $v_{k.IV}^{(\max)} \geq \max\{v_{k.I}^{(\min)}; v_{k.II}^{(\min)}; v_{k.III}^{(\min)}\}$. Рациональная скорость: $v_p \geq \max\{v_{k.I}^{(\min)}; v_{k.II}^{(\min)}; v_{k.III}^{(\min)}\}$.

8 Определяется рациональное передаточное число редуктора u_p . Рациональным передаточным числом редуктора будет такое, для которого выполняется условие:

$$u_p = \frac{D\omega}{2 \cdot \max\{v_{k.I}^{(\min)}; v_{k.II}^{(\min)}; v_{k.III}^{(\min)}\}}, \quad (17)$$

поскольку для него $W_k \rightarrow \min$.

Номограмма для определения оптимальной скорости (оптимального передаточного числа редуктора) ленточного конвейера с нерегулируемым приводом приведена на рисунке 4.

Из анализа рисунка 4 можно сделать следующие выводы:

1) Увеличение передаточного числа механической части привода ленточного конвейера, работающего в условиях эксперимента, приводит к гиперболическому

уменьшению значения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза. При значении передаточного числа привода конвейера $u=20$ (скорость транспортирования $v=3,5$ м/с) средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование рассматриваемым ленточным конвейером угля, грузопоток которого подчиняется логарифмическому нормальному закону [25], достигают $W=9,5$ кВт·ч/(т·км), тогда как при $u=30$ ($v=2,4$ м/с) средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование уменьшаются до $W=5,0$ кВт·ч/(т·км), т.е. на 90 %, а при $u=40$ ($v=1,8$ м/с) – до $W=3,2$ кВт·ч/(т·км), - в 3,0 раза. Это подтверждает проведенные ранее исследования влияния скорости на средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза. Следовательно, для уменьшения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование следует максимально увеличивать передаточное число редуктора, с учётом ограничивающих факторов.

2) Увеличение передаточного числа механической части привода ленточного конвейера, работающего в условиях эксперимента, приводит к гиперболическому уменьшению значения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза. При значении передаточного числа привода конвейера $u=20$ средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование рассматриваемым ленточным конвейером угля, грузопоток которого подчиняется логарифмическому нормальному закону [25], достигают $W=9,5$ кВт·ч/(т·км), тогда как при $u=30$ средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование уменьшаются до $W=5,0$ кВт·ч/(т·км), т.е. на 90 %, а при $u=40$ – до $W=3,2$ кВт·ч/(т·км), - в 3,0 раза. Следовательно, для уменьшения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование следует максимально увеличивать передаточное число редуктора с учётом ограничивающих факторов.

3) Передаточное число редукторов механической части двухдвигательного

привода рассматриваемого ленточного конвейера составляет 31,5. При увеличении передаточного числа редуктора на 12,6 %, - с 31,5 до 35,5, - то есть, при использовании второго ряда стандартных передаточных чисел, ожидается снижение средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза на 11,5 %, - с 3,90 кВт·ч/(т·км) до 3,45 кВт·ч/(т·км). Использование нестандартных передаточных чисел позволяет повысить передаточное число редуктора привода ленточного конвейера на 17,4 %, - до 37, - и добиться ожидаемого снижения удельного энергопотребления на транспортирование груза на 17,9 %, - до 3,20 кВт·ч/(т·км). Основным ограничивающим фактором, в условиях описанного эксперимента, является приёмная способность ленты.

Таким образом, формулы (1–17) используются для методики определения передаточного числа редуктора, для которого средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза ленточным конвейером будут минимальными.

Обсуждение результатов.

Основным результатом исследования является разработка методики выбора оптимального передаточного числа редуктора привода ленточного конвейера, работающего в условиях высокой неравномерности входного грузопотока, по критерию минимальных средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза с учётом ограничений на значения скорости ленты.

Недостатком исследования является использование допущений, исключающих зависимость коэффициента сопротивления движению ленты от скорости транспортирования. Данный недостаток не уменьшает ценности полученных результатов для ленточных конвейеров с резиноватросовой лентой без регулирования скорости в режимах транспортирования груза вследствие малого удельного веса переходных процессов во времени функционирования конвейера в представительных условиях.

Полученные данные могут быть использованы в таких исследованиях:

– концептуальная разработка высокоэффективных ресурсосберегающих транспортных машин и транспортных систем для интенсивной угледобычи;

– разработка практических рекомендаций по уменьшению расхода электроэнергии на транспортирование груза на предприятии.

Направлениями дальнейших исследований являются:

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

– обоснование пространства и параметров проектирования ленточного конвейера с регулируемым приводом и конвейерных линий, как мехатронных систем.

Выводы.

Таким образом, решена задача повышения эффективности использования шахтного ленточного конвейера путём выбора передаточного числа редуктора его нерегулируемого привода в условиях интенсивной угледобычи и высокой неравномерности грузопотока, для которого удельное энергопотребление на транспортирование груза является минимальным, а именно:

1) Разработанная математическая модель процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером позволяет объективно оценить величину и характер энергопотребления при транспортировании сыпучего груза с учётом неравномерности входного грузопотока, скорости ленты и коэффициента полезного действия привода конвейера;

2) Установлено существенное влияние скорости транспортирования груза, параметров ленточного конвейера и грузопотока на удельное энергопотребление при транспортировании груза ленточным конвейером:

– наиболее существенно нагруженность ленты конвейера влияет на составляющую коэффициента полезного действия – функции загрузки ленты (от 0 в режиме холостого хода конвейера до 0,55 в режиме полной его загрузки);

– при увеличении скорости транспортирования груза уменьшается коэффициент полезного действия – функция загрузки, что приводит к снижению общего коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера и повышению средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером (при увеличении скорости от 1 м/с до 4 м/с, коэффициент полезного действия – функция загрузки уменьшается от 0,7 до 0,39);

– причиной падения коэффициента полезного действия привода ленточного конвейера при увеличении скорости транспортирования является снижение величины загрузки его тягового органа (при увеличении скорости от 1 м/с до 2 м/с средняя загрузка ленты уменьшается от 96 т до 24 т);

– зависимость средневзвешенных удельных энергозатрат от скорости транспортирования носит нелинейный характер. При увеличении скорости от 1 м/с до 4 м/с средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза увеличиваются от 1,05 кВт·ч/(т·км) до 8,78 кВт·ч/(т·км), - в 8,5 раз;

3) На основе разработанной математической модели предложена методика, позволяющая выбрать передаточное число редуктора ленточного конвейера с нерегулируемым приводом, для которого характерно минимальное удельное энергопотребление на транспортирование груза. Методика учитывает закон распределения грузопотока и его параметры. Установлено:

– увеличение передаточного числа механической части привода ленточного конвейера, работающего в условиях эксперимента, приводит к уменьшению значения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза. При значении передаточного числа привода конвейера $u_p=20$ средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование рассматриваемым ленточным конвейером угля, грузопоток которого подчиняется логарифмическому нормальному закону, достигают 9,5 кВт·ч/(т·км), тогда как при передаточном числе $u_p=30$ средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование уменьшаются до 5,0 кВт·ч/(т·км), - на 90 %, а при

передаточном числе $u_p=40$ – до 3,2 кВт·ч/(т·км), - в 3,0 раза. Для уменьшения средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза следует максимально увеличивать передаточное число редуктора, с учётом ограничивающих факторов;

- при увеличении передаточного числа редуктора на 12,6 %, - с $u_p=31,5$ до $u_p=35,5$, - при использовании второго ряда стандартных передаточных чисел, -

Список литературы

1. Крутков Г.В. Экономическая оценка эффективности инвестиций в энергосберегающие регулируемые электроприводы конвейеров горно-обогатительных комбинатов / Крутков Г.В., Савицкий А.И. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.metaljournal.com.ua/Economic-evaluation-of-the-effectiveness-of-investments-in-energy-saving-electric-adjustable-conveyors-mining-and-processing/>

2. Семенченко А.К. Математическая модель целевой функции оптимизации режимов работы привода ленточного конвейера [Текст] / Семенченко А.К., Стадник Н.И., Белицкий П.В., Семенченко Д.А. // Геотехнічна механіка, вип. 134. Дніпро, 2017. с.190-205.

3. Рухлов, А.В. Энергетические характеристики магистрального конвейерного транспорта угольных шахт / Рухлов А.В., Герман Е.Д. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: <http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/84/7.pdf>. Загл. с экрана.

4. A.Semenchenko. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation / A.Semenchenko, M.Stadnik, P.Belitsky [and others] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий - т. 4 № 1 (82) (2016). с. 42-51.

5. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточных конвейеров / Л.Г.Шахмейстер, В.Г.Дмитриев, А.К.Лобачёва. М.: Недра, 1972. 173 с.

6. Лобачёва А.К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью / Транспорт шахт и карьеров. Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А.О.Спиваковского. М., 1971. с. 158-163.

7. Пономаренко В.А. Технология, организация и экономика подземного транспорта / В.А.Пономаренко, Е.В.Макарова, Е.Л. Креймер и др. ; под общ. ред. В.А.Пономаренко. М. : Недра, 1977. 221с.

8. 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 // Гірничя електромеханіка, № 88. Днепропетровск, 2012. с. 107-111.

9. Прокуда В.М. Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта угольных

ождается снижение средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза на 11,5 %, - с 3,90 кВт·ч/(т·км) до 3,45 кВт·ч/(т·км). Использование нестандартных передаточных чисел позволяет повысить передаточное число редуктора привода ленточного конвейера на 17,4 %, - до $u_p=37$, - и добиться ожидаемого снижения удельного энергопотребления на транспортирование груза на 17,9 %, - до 3,20 кВт·ч/(т·км). шахт с учётом динамики грузопотоков // Дисс. канд. техн. наук, спец. 05.05.06 «Горные машины». Днепропетровск, 2015. 140 с.

10. Стадник Н.И. Частотно регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей [Текст] // Оптимізація виробничих процесів, 2013 № 14. с. 22-26.

11. Разумный Ю.Т. Анализ влияния регулирования скорости конвейерной ленты на энергоэффективность транспортных систем / Разумный Ю.Т., Прокуда В.М. // Уголь Украины, № 12. 2014. с. 43-46.

12. Заклика М. Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью / Заклика М., Колек М., Тытко С. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/for-conveyance.pdf>. Загл. с экрана.

13. Лаухофф Х. Действительно ли регулирование скорости ленточных конвейеров способствует экономии энергии? // Глюкауф, № 1 (март) 2006. Эссен-М., 2006. с. 9-16.

14. Реутов А.А. Имитационное моделирование ступенчатого регулирования скорости конвейера // Проблемы недропользования, № 2. 2017. с. 26-32.

15. Ставицкий В.Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера // Наукові праці ДонНТУ. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація, № 23 (201) 2012. с. 49-53.

16. Киктев Н.А. Методика построения системы отображения процесса автоматизации участкового конвейерного транспорта. Киктев Н.А., Савицкая Я.А., Чичикало Н.И. // Наукові праці ДонНТУ. Энергетика і автоматика, № 1. 2014. с. 65-74.

17. Стадник Н.И. Мехатронный подход при анализе движущихся горных комплексов // Нафтогазова енергетика, № 1 (19). 2013. – с. 91-98.

18. Белицкий П.В. Повышение эффективности ленточного конвейера при интенсивном ведении горных работ. Вісті Донецького гірничого інституту, № 2 (41) 2017. Покровськ, 2017. с. 160-168.

19. Тарасов В.И. Оценка совершенства ленточного конвейера по энергетическому показателю. Розробка родовищ: Зб. наук. пр. Дніпропетровськ, 2015. Т. 9. с. 155-161.

20. Шахмейстер Л.Г. Теория и расчёт ленточных конвейеров [Текст] / Л.Г.Шахмейстер, В.Г.Дмитриев. М., 1987. 336 с.

21. Кондрахин В.П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съёмного тензоизмерительного устройства с учётом натяжения

ленты. В.П.Кондрахин, Н.И.Стадник, П.В.Белицкий // Наукові праці ДонНТУ, серія електромеханічна, № 1 (25) 2013. Донецьк, 2013. с. 79-87.

22. Кондрахин В.П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера. / В.П.Кондрахин, Н.И.Стадник, П.В.Белицкий // Наукові праці ДонНТУ / Серія електромеханічна, № 2 (26) 2013. Донецьк, 2013. с. 140-150.

References

1. Krutikov G.V., Savitsky A.I. (Krutkov, G.V. & Saviczkiy, A.I.) (2015). Economic evaluation of the effectiveness by investments in energy-saving adjustable electric drives for ore mining and processing plants [E'konomicheskaya ocenka e'ffektivnosti investitsij v e'nergoberegayushhie reguliruemye e'lektroprivody konvejerov gorno-obogatitel'ny'x kombinatov]. *Metal Journal: politnicheskij zhurnal*. Retrieved from <http://www.metaljournal.com.ua/Economic-evaluation-of-the-effectiveness-of-investments-in-energy-saving-electric-adjustable-conveyors-mining-and-processing/>. (in Russian).

2. Semenchenko A.K., Stadnik N.I., Belitsky P.V., Semenchenko D.A. (Semenchenko, A.K., Stadnik, N.I., Beliczkiy, P.V. & Semenchenko, D.A.) (2017). Mathematical model of the objective function in optimization of the belt conveyor drive operating modes [Matematicheskaya model' celevoj funktsii optimizatsii rezhimov raboty' privoda lentochnogo konvejera]. *Geotechnical mechanics (Geotexnichna mexanika)*, вип. 134, 190-205. (in Russian).

3. Rookhlov A.V., German E.D. (Ruxlov, A.V., & German, E.D.) (2010). Energy characteristics of the main conveyor transport in coal mines [E'nergeticheskie xarakteristiki magistral'nogo konvejernogo transporta ugol'ny'x shaxt]. *Mining Electrician & Automatics (Girnichia elektromexanika i avtomatika)*, 1 (84), 45-50. Retrieved from <http://vde.nmu.org.ua/science/ntz/archive/84/7.pdf>. (in Russian).

4. A.Semenchenko, M.Stadnik, P.Belitsky [and others] (Semenchenko, A.K., Stadnik, M.I., Belitsky, P.V., & et al.) (2016). The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation [The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation]. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies (Vostochno-Evropskij zhurnal peredovy'x tehnologij)*, t. 4 - № 1 (82), 42-51.

5. Shahmeyster L., Dmitriev V., Lobacheva A. (Shaxmejster, L.G., Dmitriev, V.G., & Lobachyova, A.K.) (1972). The dynamics of traffic and speed control of conveyor belts [Dinamika gruzopotokov i regulirovanie skorosti lentochny'x konvejerov]. Moscow (Moskva: Nedra). (in Russian).

6. Lobachyova, A.K. (1971). Energy performance of conveyor transport and irregular with adjustable-speed [E'nergeticheskie pokazateli konvejernogo transporta s reguliruemoj i nereguliruemoj skorost'yu]. *Mining and quarrying transport (Transport shaxt i kar'erov)*, 158-163. (in Russian).

7. Ponomarenko V.A., Makarova E.V., Kreemer E.L. etc. (Ponomarenko, V.A., Makarova, E.V., & Krejmer, E.L. & et al.) (1977). Technology, organization

and economy of underground transport [Tehnologiya, organizatsiya i e'konomika podzemnogo transporta]. Moscow (Moskva: Nedra). (in Russian).

8. Prokuda V., Mishansky Yu., Protsenko S. (Prokuda, V.M., Mishanskiy Yu., A., & Procenko, S.N.) (2012). Research and evaluation of freight traffic on the main conveyor transport the CAP "Mine "Pavlogradskaya" Public company DTEK "Pavlogradugol" [Issledovanie i ocenka gruzopotokov na magistral'nom konvejernom transporte PSP «Shaxta «Pavlogradskaya» PAO DTEK «Pavlogradugol'»]. *Mining electrician (Girnichia elektromexanika)*, 88, 107-111. (in Russian).

9. Prokuda V.N. (Prokuda, V.N.) (2015). Energy efficiency of the main conveyor transport of coal mines taking into account the dynamics of cargo flows [E'nergoe'ffektivnost' magistral'nogo konvejernogo transporta ugol'ny'x shaxt s uchytom dinamiki gruzopotokov]. Abstract. Diss. PhD (tech. sciences), special 05.05.06 "Mining mashines" (Master's thesis). Dnepropetrovsk, Dnepropetrovsk. (in Russian).

10. Stadnik N.I. (Stadnik, N.I.) (2013). Frequently adjustable electric drive of belt conveyors on the basis of self-ventilated engines [Chastotno reguliruemyy' e'lektroprivod lentochny'x konvejerov na baze samoventiliruemyy'x dvigatelej]. *Optimization of production processes (Optimizatsiya virobnichix procesiv)*, 14, 22-26. (in Russian).

11. Razoomny Y.T., Prokuda V.N. (Razumny'j, Y.T., & Prokuda, V.N.) (2014). Analysis of the effect in the belt conveyor speed control on the energy efficiency of transport systems [Analiz vliyaniya regulirovaniya skorosti konvejernoj lenty' na e'nergoe'ffektivnost' transportny'x sistem]. *Coal of Ukraine (Ugol' Ukrainy')*, № 12, 43-46. (in Russian).

12. Zaklika M., Kolek M., Tytko S. (Zaklika, M., Kolek, M., & Tytko, S.) (2010). Belt conveyors with adjustable speed [Lentochny'e konvejery' s reguliruemoj skorost'yu]. BARTEC Group (*Gruppa BARTEC*. 22.09.2010 Web. 24.10.2018). Retrieved from: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/for-conveyance.pdf>. (in Russian).

13. Lauhoff H. (Lauhoff, X.) (2006). Is the speed of belt conveyors regulation contributes to energy savings? [Dejstvitel'no li regulirovanie skorosti lentochny'x konvejerov sposobstvuet e'konomii e'nergii?]. *Glyukauf*, 1, 9-16. (in Russian).

14. Reutov A.A. (Reutov, A.A.) (2017). Imitation modeling of step-by-step control of conveyor speed [Imitacionnoe modelirovanie stupenchatogo regulirovaniya skorosti konvejera]. *Problems of subsoil use (Problemy' nedropol'zovaniya)*, 2, 26-32. (in Russian).

15. Stavitsky V.N. (Staviczkiy, V.N.) (2012). Dynamics of loading in the regulated drive of the belt conveyor [Dinamika nagruzki reguliruemogo privoda lentochnogo konvejera]. DonNTU scientific works, Series: Computer Engineering and Automation (*Naukovi praczi DonNTU. Seriya: obchislyval'na texnika ta avtomatizatsiya*), 23 (201), 49-53. (in Russian).

16. Kiktev N.A., Savitskaya Y.A., Chichikalo N.I. (Kiktev, N.A., Saviczskaya, Y.A., & Chichikalo, N.I.) (2014). Technique for constructing a mapping the process of automation of local conveyor transport system [Metodika postroeniya sistemy' otobrazheniya processa avtomatizatsii uchastkovogo konvejernogo transporta]. DonNTU scientific works, Energy and automation (*Naukovi praczi DonNTU / Energetika i avtomatika*), 1, 65-74. (in Russian).

17. Stadnik N.I. (Stadnik, N.I.) (2013). Mechatronic approach in the analysis of moving mountain complexes [Mechatronny'j podxod pri analize dvizhushhixsya gornyx kompleksov]. Oil and Gas Power Engineering (Naftogazova energetika), 1, 91-98. (in Russian).

18. Belitsky P.V. (Beliczkiy, P.V.) (2017). Improvement of the efficiency of the conveyor belt under intensive mining operations [Povy'shenie e'fektivnosti lentochnogo konvejera pri intensivnom vedenii gornyx rabot]. Journal of the Donetsk Mining Institute (Visti Donecz'kogo girnichogo institutu), 2 (41), 160-168. (in Russian).

19. Tarasov V.I. (Tarasov, V.I.) (2015). Evaluation of belt conveyor perfection by energy index [Ocenka sovershenstva lentochnogo konvejera po e'nergeticheskomu pokazatelyu]. Development of Deposits (Rozrobka rodovishh: Zb. nauk. pr.), T. 9, 155-161. (in Russian).

20. Shahmeyster L., Dmitriev V. (Shaxmejster, L.G., & Dmitriev, V.G.) (1987). Theory and calculation of belt

conveyors [Teoriya i raschyot lentochny'x konvejerov]. Moscow (Moskva: Mashinostroenie). (in Russian).

21. V.Kondrakhin, N.Stadnik, P.Belitskii (Kondraxin, V.P., Stadnik, N.I., & Beliczkiy, P.V.) (2013). Traffic measurement on the belt conveyor through removable tensor device with belt tension accounting [Izmerenie gruzopotoka na lentochnom konvejere s pomoshh'yu s'yomnogo tenzoizmeritel'nogo ustrojstva s uchytom natyazheniya lenty']. DonNTU scientific works, electromechanical series (Naukovi praczi DonNTU, seriya elektromexanichna), 1 (25), 79-87. (in Russian).

22. V.Kondrakhin, N.Stadnik, P.Belitskii (Kondraxin, V.P., Stadnik, N.I., & Beliczkiy, P.V.) (2013). Operating parameters statistical analysis for the belt conveyor in mine [Statisticheskij analiz e'kspluatacionny'x parametrov shaxtnogo lentochnogo konvejera]. DonNTU scientific works, electromechanical series (Naukovi praczi DonNTU, seriya elektromexanichna), 2 (26), 140-150. (in Russian).

Надійшла до редакції 07.11.2018

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Л.Ф. Калафатова.

Семенченко Анатолий Кириллович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования добычных и перерабатывающих комплексов, Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Украина, 85300).

E-mail: a.k.semenchenko@gmail.com

Стадник Николай Иванович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехнических систем, технологий и автоматизации в АПК, Винницкий национальный аграрный университет, (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008).

E-mail: stadnik1948@gmail.com

Белицкий Павел Владимирович – старший преподаватель кафедры добычных и перерабатывающих комплексов, Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Украина, 85300).

E-mail: pabel30.04.1980@gmail.com

Семенченко Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры добычных и перерабатывающих комплексов, Государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет», (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Украина, 85300).

E-mail: semencenko.da@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ПРИ ІНТЕНСИВНОМУ ВУГЛЕВИДОБУТКУ

Мета роботи - підвищення ефективності використання стрічкових конвеєрів в умовах інтенсивного вуглевидобутку і високої нерівномірності вантажопотоку шляхом оптимізації передаточного числа редуктора приводу конвеєра за критерієм енергоспоживання.

Методика виконання роботи: теоретичні дослідження впливу швидкості стрічкового конвеєра на енергоспоживання транспортування вантажу на основі моделювання процесу формування середньозважених питомих енерговитрат на транспортування з використанням характеристик вантажопотоку як випадкового процесу; визначення раціональної швидкості стрічки і відповідного їй передаточного числа редуктора, що забезпечує зниження енергоспоживання на транспортування вантажу стрічковим конвеєром графо-аналітичним методом.

Результати. Розроблено математичну модель формування середньозважених питомих енерговитрат на транспортування сипкого вантажу стрічковим конвеєром, яка враховує нерівномірність шахтного вантажопотоку і параметри його розподілення, а також технологічні параметри процесу транспортування вантажу й конструктивні параметри конвеєра. Встановлено суттєвий вплив швидкості транспортування вантажу, параметрів стрічкового конвеєра, вантажопотоку і коефіцієнта корисної дії приводу стрічкового конвеєра на питомих енергоспоживання при транспортуванні вантажу. Запропоновано методику, що дозволяє визначити раціональне передаточне число редуктора стрічкового конвеєра за критерієм питомого енергоспоживання з урахуванням обмежень за встановленою потужністю приводу, сумарним моментом приводних двигунів, прийнятною здатністю конвеєра і міцністю стрічки.

Наукова новизна: встановлення впливу завантаженості стрічки, швидкості транспортування й коефіцієнту корисної дії приводу конвеєра на середньозважені питомі енерговитрати на транспортування сипкого вантажу стрічковим конвеєром з нерегульованим приводом.

Практична цінність: розробка методики визначення раціонального передаточного числа редуктора приводного блоку конвеєра графо-аналітичним способом.

Ключові слова: середньозважені питомі енерговитрати; завантаженість стрічки; оптимальне передавальне число.

Семенченко Анатолій Кирилович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри видобувних і переробних комплексів, Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Україна, 85300).

E-mail: a.k.semenchenko@gmail.com

Стаднік Микола Іванович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри електротехнічних систем, технологій і автоматизації в АПК, Вінницький національний аграрний університет, (вул. Соляна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008).

E-mail: stadnik1948@gmail.com

Белицький Павло Володимирович – старший викладач кафедри видобувних і переробних комплексів, Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Україна, 85300).

E-mail: pabel30.04.1980@gmail.com

Семенченко Дмитро Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри видобувних і переробних комплексів, Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Україна, 85300).

E-mail: semencenko.da@gmail.com

THE INCREASE OF THE BELT CONVEYORS ENERGY EFFICIENCY IN INTENSIVE MINING CONDITIONS

The aim of the article is increasing the efficiency of using belt conveyors in conditions of intensive coal mining and high unevenness of coal traffic by optimizing the gear ratio in conveyor drive gear according to the criterion of energy consumption.

Methods of performing: theoretical studies of the effect by the belt conveyor speed on the energy consumption in transportation based on modeling the formation of the weighted average specific energy consumption for transportation with using the characteristics of the cargo flow as a random process; determination of the rational speed of the belt and the corresponding gear ratio of the gearbox, which ensures reduction of energy consumption for the transportation by belt conveyor with graph-analytical method using. A mathematical model of the formation of weighted average specific energy consumption for the transportation of bulk cargo by a belt conveyor has been developed; model takes into account the unevenness of the cargo flow and its distribution parameters, the technological parameters of the cargo transportation process and design parameters of the conveyor. The significant influence the speed of transportation, the parameters of the belt conveyor, the traffic and the efficiency of the belt conveyor drive on the specific energy consumption during the transportation of cargo has been established.

Proposed: technique to determine the rational gear ratio of the belt conveyor by the criterion of specific energy consumption, taking into account the limitations on the installed drive power, the total torque of the drive motors, the receiving capacity of conveyor and the strength of belt.

Scientific novelty: determination the impact of the tape load, transportation speed and efficiency of the conveyor drive on the weighted average specific energy consumption for transportation of bulk cargo in uncontrolled drive belt conveyor.

Practical value: the development of methods for determining the rational conveyor drive gear ratio in a graph-analytical manner.

Keywords: weighted average specific energy consumption; tape load; optimal gear ratio.

Semenchenko Anatoly – doctor of technical sciences, professor, professor of mining and processing complexes department, Donetsk national technical university, (2 Shybankova sq., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

e-mail: a.k.semenchenko@gmail.com

Stadnik Mykola – doctor of technical sciences, assistant professor, professor of electrical systems and automation technology in the agricultural sector department, (Innytsia National Agricultural University, 3 Sun (Sonyachna) str., (Vinnitsa, Ukraine, 21008).

e-mail: stadnik1948@gmail.com

Belitsky Pavlo – teacher of mining and processing complexes department, Donetsk national technical university, (2 Shybankova sq., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

e-mail: pabel30.04.1980@gmail.com

Semenchenko Dmytro – PhD, assistant professor, assistant professor of mining and processing complexes department, Donetsk national technical university, (2 Shybankova sq., Pokrovsk, Ukraine, 85300).

e-mail: semencenko.da@gmail.com