

УДК 621.314.26:622.647.2

**Семенченко А.К.**, д-р техн. наук, профессор  
(ДонНТУ, г. Покровск)

**Стадник Н.И.**, д-р техн. наук, профессор  
(Винницкий национальный аграрный университет)

**Белицкий П.В.**, магистр  
(ДонНТУ, г. Покровск)

**Семенченко Д.А.**, канд. техн. наук, доцент  
(ДонНТУ, г. Покровск)

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА**

**Семенченко А.К.**, д-р техн. наук, професор  
(ДонНТУ, м. Покровськ)

**Стаднік М.І.**, д-р техн. наук, професор  
(Вінницький національний аграрний університет)

**Белицкий П.В.**, магістр  
(ДонНТУ, м. Покровськ)

**Семенченко Д.А.**, канд. техн. наук, доцент  
(ДонНТУ, м. Покровськ)

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИВОДУ СТРИЧКОВОГО КОНВЕЄРА**

**Semenchenko A.K.**, D.Sc. (Tech.), Professor  
(DonNTU, Pokrovsk)

**Stadnik N.I.**, D.Sc. (Tech.), Professor  
(Vinnytsa National Agrarian University)

**Belitskiy P.V.**, M.S. (Tech.)  
(DonNTU, Pokrovsk)

**Semenchenko D.A.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(DonNTU, Pokrovsk)

## **MATHEMATICAL MODEL OF TARGET FUNCTION FOR OPTIMIZING MODES OF THE BELT-CONVEYOR DRIVE OPERATION**

**Аннотация.** Целью работы является разработка и обоснование целевой функции для оптимизации режимов работы ленточного конвейера по критерию энергоэффективности. Объект исследования: процесс энергопотребления при транспортировании сыпучего груза ленточным конвейером с регулируемым приводом. Предмет исследования: обоснование параметров (переменных проектирования), наиболее влияющих на энергопотребление и разработка математической модели целевой функции с учётом этих параметров. В статье приведена целевая функция оптимизации режимов работы регулируемого привода ленточного конвейера от параметров конструкции электрической и механической компонент конвейера, и технологии транспортирования груза.

Решена задача установления зависимости показателей удельного энергопотребления на ленточном конвейере от режима загрузки ленты по приёмной способности на примере функционирования ленточного конвейера при отсутствии внешнего регулирования скорости ленты. Результаты исследований будут полезны при выборе и разработке регулируемого привода для горной промышленности, создании теоретической базы для обоснования структуры, параметров и пространства проектирования регулируемых приводов ленточных конвейеров, для решения вопросов создания ленточных конвейеров повышенного технического уровня и повышения эффективности их эксплуатации.

**Ключевые слова:** удельные энергозатраты, целевая функция, загруженность ленты, нагруженность привода, коэффициент полезного действия, регулирование скорости.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Мировая тенденция развития угледобычи характеризуется созданием и использованием оборудования для интенсификации горных работ. Интенсификация обеспечивает снижение себестоимости добываемого угля и повышение эффективности горного производства в целом. Поэтому, развитие теоретической базы для создания оборудования, обеспечивающего интенсификацию горных работ, является актуальной проблемой [1].

Доля затрат на транспортирование добытого угля в его себестоимости весьма существенна, и может превышать 20 % [2]. Поэтому данная проблема весьма актуальна и для транспортных машин.

Возможным направлением решения вышеназванной проблемы является развитие теоретической базы создания высокоэффективных транспортных систем для интенсивной угледобычи, на базе регулируемых приводов, обеспечивающих оптимизацию режимов работы и энергосбережение.

Одним из эффективных путей повышения технического уровня транспортных машин горных предприятий является оптимизация их работы по критерию энергоэффективности.

В структуре задачи оптимизации ключевое место занимает целевая функция, поскольку она определяет как критерий оптимизации, так постоянные проектирования и параметры оптимизации. Таким образом, разработка целевой функции оптимизации режима работы привода ленточного конвейера по критерию энергопотребления является актуальной задачей.

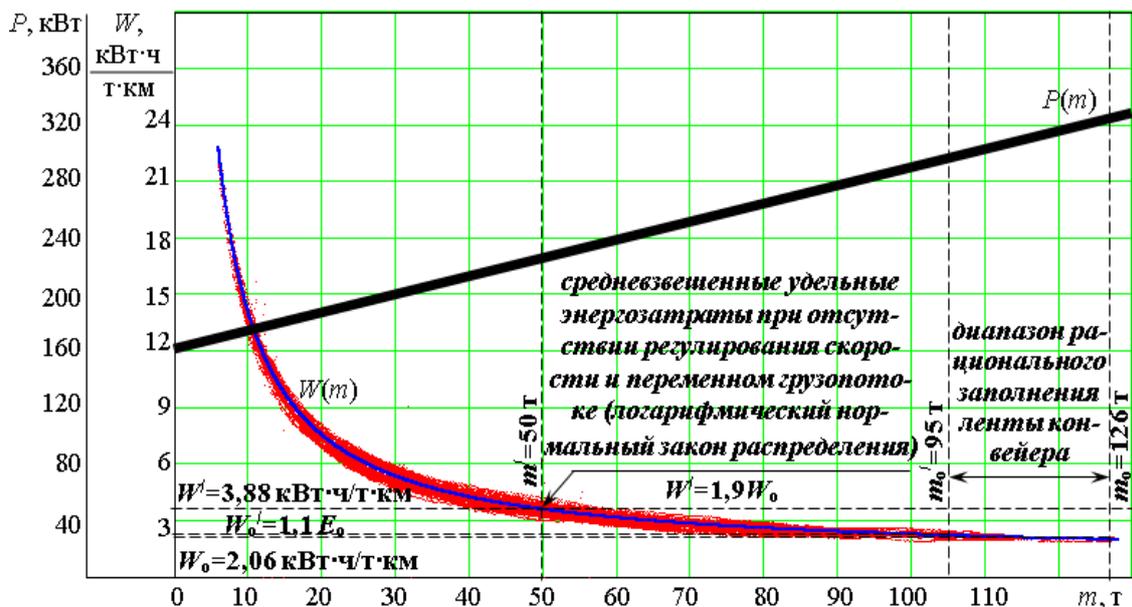
**Анализ исследований и публикаций.** В качестве вариантов решения задачи оптимизации режима работы привода ленточного конвейера с целью снижения затрат энергии на транспортирование груза традиционно предлагаются оптимальные алгоритмы частотного регулирования скорости ленты. Однако в настоящее время отсутствует единый критерий оценки энергоэффективности ленточного конвейера с регулируемым приводом [4; 5].

Предложенные целевые функции, которые позволяют оптимизировать режимы работы регулируемого привода по критерию энергоэффективности, не учитывают в достаточной мере влияние фактического закона распределения грузопотока на конвейере, технологические и конструктивные параметры конвейера и его привода на единый показатель энергоэффективности транспортирования. Следовательно, требуются исследования уточняющие

влияние указанных параметров конвейера на энергопотребление при транспортировании груза.

Для определения характера влияния грузопотока и загрузки ленты на величину средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером при отсутствии внешнего источника регулирования скорости ленты (условно  $v=\text{const}$ ) был проведен эксперимент в представительных условиях. Оценка энергетических показателей работы конвейера с нерегулируемым приводом производилась по результатам экспериментальных исследований грузопотока и мощности привода, проводимых институтом Донгипроуглемаш (Украина) для ленточного конвейера 2ЛУ120В. Условия эксперимента и схема измерения указанных технологических параметров транспортирования сыпучего груза указаны в [4]. Результаты статистической обработки эксперимента приведены в [5].

На рисунке 1 представлена зависимость мощности  $P(m)$  и удельных энергозатрат на транспортирование 1 т горной массы на расстояние 1 км  $W(m)$  конвейером от загрузки ленты  $m$ .



$m_0$  – оптимальная загрузка ленты, равная максимально возможному значению массы груза на ленте по приемной способности конвейера;  $W_0$  – оптимальное (минимальное) значение удельных энергозатрат на транспортирование груза, соответствующее загрузке ленты  $m_0$ ;  $m'_0$  – нижняя граница диапазона рациональных значений загрузки ленты, соответствующая  $0,75m_0$ ;  $W'_0$  – значение удельных энергозатрат на транспортирование груза, соответствующее загрузке ленты  $m'_0$ ;  $W'$  – значение средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза;  $m'$  – значение загрузки ленты, соответствующее  $W'$

Рисунок 1 – Зависимость мощности  $P$ , потребляемой приводом из сети, а также удельных энергозатрат на транспортирование груза  $W$  от загрузки ленты  $m$  при отсутствии внешнего регулирования скорости

Рациональным заполнением конвейера принят диапазон, который соответствует режиму заполнения  $m=(0,75\dots 1)m_{\max}$ , где  $m_{\max}$  – максимальная возможная загруженность ленты, обусловленная приёмной способностью конвейера. Этот режим работы обеспечивает незначительное (до 10 %) увеличение удельных энергозатрат в сравнении с их рациональным значением.

В результате экспериментальных исследований установлено, что загруженность ленты существенно влияет на значение удельных энергозатрат на транспортирование сыпучего груза конвейером. Зависимость  $W(m)$  имеет гиперболический характер, и минимальное значение удельных энергозатрат на транспортирование груза соответствует максимальной загруженности ленты, возможной по приёмной способности конвейера. Анализ графической зависимости удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером от загруженности ленты показывает, что в представительных условиях конвейер работает недостаточно эффективно, поскольку математическое ожидание удельных энергозатрат в 1,9 раза выше минимального значения последних, соответствующих режиму полной загруженности конвейера. Математическое ожидание удельных энергозатрат на транспортирование груза конвейером соответствует транспортируемой массе груза  $m'=50$  т, что в 2,5 раза меньше, чем в режиме рациональной загруженности конвейера.

Итак, на величину удельных энергозатрат на транспортирование груза существенно влияет величина загруженности ленты  $m$ , которая формируется в результате поступления на конвейер грузопотока  $Q(t)$ , изменение которого в течение времени транспортирования  $T$  носит случайный характер. Характер изменения загруженности ленты  $m(t)$  определяется законом распределения грузопотока как случайной величины [4; 5]. Следовательно, целевая функция для оптимизации структуры и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности должна учитывать фактор загруженности ленты по приёмной способности конвейера.

При определении средневзвешенных удельных энергозатрат следует учитывать и конструктивные параметры механической части конвейера, приводных двигателей и регуляторов скорости ленты. Таким образом, значение целевой функции должно определяться указанными выше технологическими и конструктивными параметрами конвейера.

Параметр оптимизации структуры и режима работы привода ленточного конвейера, скорость ленты  $v(t)$  определяется способом регулирования последней. Регулирование скорости ленты конвейера может осуществляться электрическим и механическим способом. Наиболее перспективными способами регулирования скорости ленты конвейера в настоящее время следует считать частотное регулирование или применение двухскоростного двигателя в приводе конвейера. Регулирование скорости ленты  $v(t)$  производится по двум параметрам: основным является текущее значение грузопотока  $Q(t)$  на конвейере (или производительности транспортного и технологического оборудования, предшествующего рассматриваемому конвейеру),

вспомогательным – загруженность ленты  $m(t)$ . Использование вспомогательного параметра целесообразно при ступенчатом регулировании скорости ленты для уменьшения количества переключений привода конвейера в единицу времени. Алгоритмы регулирования также будут оказывать влияние на величину удельного энергопотребления при транспортировании груза.

При изменении загруженности ленты и скорости транспортирования также изменяется коэффициент полезного действия привода конвейера  $\eta(t)$ , что в данный момент не учитывается в достаточной степени.

Следовательно, в настоящее время актуальна задача: обоснование критерия энергоэффективности функционирования конвейера, установление влияния на значение данного критерия параметров ленточного конвейера, его привода и режима работы, а также разработки математической модели целевой функции оптимизации структуры и режима работы регулируемого привода ленточного конвейера по этому критерию, чему и посвящена данная работа.

### **Постановка задачи.**

**Целью работы** является разработка и обоснование целевой функции для оптимизации структуры привода и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

а) Обосновать количественную оценку критерия энергопотребления с учётом реального характера грузопотока на конвейере; обосновать переменные и постоянные проектирования (факторы и параметры, наиболее существенно влияющие на энергопотребление) и допустимые их значения, с учётом ограничений на их величину и функциональную взаимозависимость, на основе теоретических и экспериментальных исследований ленточного конвейера;

б) Разработать целевую функцию как зависимость количественной оценки критерия энергоэффективности транспортирования сыпучего груза ленточным конвейером с регулируемым.

в) С учётом результатов натурального и вычислительного экспериментов определить рациональный режим работы привода ленточного конвейера без внешнего источника регулирования скорости ленты.

### **Изложение материала и результаты**

Для решения задачи обоснования количественной оценки критерия энергопотребления был произведен анализ основных факторов, влияющих на величину затрат энергии при транспортировании сыпучего груза ленточным конвейером с регулируемым приводом в условиях горного производства. Затраты энергии  $E(T)$  на транспортирование груза ленточным конвейером за

время его функционирования  $T = \int_{t_1}^{t_2} dt = t_2 - t_1$ , где  $t_2$ ,  $t_1$  – время начала и

окончания функционирования конвейера по транспортированию груза, являются функцией переменных загруженности  $m(t)$  и скорости  $v(t)$  ленты, а также зависят от характера изменения грузопотока  $Q(t)$ . Величина загруженности ленты  $m(t)$  определяется грузопотоком  $Q(t)$  на конвейере [6],

который характеризуется высокой неравномерностью и носит случайный характер. Скорость ленты  $v(t)$  определяется грузопотоком на конвейере  $Q(t)$ , а в отдельных случаях – и загруженностью ленты  $m(t)$ . На величину затрат энергии при транспортировании груза конвейером существенное влияние оказывает холостой ход конвейера.

Поэтому, в качестве количественной оценки критерия оптимизации структуры и режимов работы регулируемого привода ленточного конвейера, исходя из вышесказанного, в целях снижения затрат энергии на транспортирование, которые характеризуются высоким удельным весом в себестоимости угля, а также содействия энергетической безопасности государства, выбираются средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование 1 т груза на расстояние 1 км [6]:

$$W \rightarrow \min, \text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{км}). \quad (1)$$

Для решения задачи обоснования факторов и параметров, влияющих на численное значение критерия энергоэффективности транспортирования груза ленточным конвейером, а также области проектирования, была разработана структурная модель процесса транспортирования груза ленточным конвейером с регулируемым приводом, представленная на рисунке 2. На рисунке указана структура регулируемого привода ленточного конвейера для различных способов регулирования скорости: частотное регулирование, ступенчатое регулирование с применением двухскоростных электродвигателей.

Из рисунка 2 следует, что на энергопотребление при транспортировании груза ленточным конвейером существенно влияют ряд перечисленных выше внешних факторов и параметров системы регулируемого привода и механической компоненты ленточного конвейера. В условиях данной задачи, постоянными проектирования являются конструктивные и технологические параметры механической компоненты ленточного конвейера, технологии транспортирования груза, переменными проектирования – структура и параметры регулируемого привода, а также способ и алгоритм регулирования скорости ленты  $v(t)$ . Последняя является и параметром оптимизации.

Для обоснования пространства проектирования приняты следующие ограничения на величины постоянных и переменных проектирования, их взаимозависимости, а также допущения:

а) загруженность ленты  $m(t)$ , окружное тяговое усилие  $W_o(t)$  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;

б) рассматриваются шахтные ленточные конвейеры с обычной лентой, то есть функционирующие при углах транспортирования  $-16^0 \leq \beta \leq 18^0$ ;

в) мощность, потребляемая электродвигателем из сети  $P(t)$ , ток в статоре  $I(t)$ , напряжение сети  $U_c$  и частота вращения ротора  $\omega_2(t)$  обусловлены исключительно электромеханической характеристикой двигателя;



г) 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.

Целевая функция для оптимизации структуры привода и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности представляет собой зависимость средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером от значений постоянных и переменных проектирования в указанном пространстве проектирования.

Средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование сыпучего груза ленточным конвейером в течение времени  $T$  определяются следующим образом:

$$W(T)_k = \sum_{j=1}^r W_{jk} p_j, \quad (2)$$

где  $W_j$  – удельные энергозатраты, соответствующие области функции распределения загруженности вблизи значения  $m_j$ ;  $p_j$  – вероятность функционирования ленточного конвейера с  $j$ -ми удельными энергозатравами;  $k$  – индекс скорости транспортирования.

Удельные энергозатраты  $W_{jk}$ , соответствующие загруженности ленты  $m_j$ :

$$W_{jk} = \frac{g \cdot T}{2u_p \cdot D_{\delta} \cdot m_{\Sigma}(T) \cdot L} \cdot \frac{M_{cj} \cdot v_k \cdot p_j}{\eta_j(v_k, M_{cj})}, \quad (3)$$

где  $M_{cj}$  – момент сопротивления на валу ротора электродвигателя

$$M_{cj} = M_{c0} + M_{cq.j}; \quad (4)$$

$M_{c0}$  – момент сопротивления на холостом ходу конвейера, обусловленный сопротивлением перемещению его конструктивных элементов

$$M_{c0} = \frac{gLD_{\delta}q_K k_s \omega' \cos \beta}{2u_p \eta_p}; \quad (5)$$

$D_{\delta}$  – диаметр приводного барабана с учётом толщины его футеровки, м;  $u_p$  – передаточное число редуктора;  $\eta_p$  – коэффициент полезного действия передачи «двигатель – барабан», определяемого рассеиванием энергии в редукторе, соединительных и предохранительных муфтах (принимается условно постоянным,  $\eta_p \approx 0,9 \dots 0,95$ );  $k_s$  – коэффициент, учитывающий местные сопротивления движению ленты ( $k_s = 1, 2 \dots 1,3$ );  $q_K$  – суммарная погонная масса движущихся и вращающихся элементов линейной части конвейера

$$q_K = 2q_0 + q_p' + q_p'', \text{ кг/м,}; \quad (6)$$

$q_0$  – погонная масса ленты, кг/м;  $q_p'$ ,  $q_p''$  – погонная масса вращающихся частей верхних и нижних роlikоопор конвейера

$$q_p' = \frac{m_p'}{l_p'}, \text{ кг/м} \quad (7)$$

$$q_p'' = \frac{m_p''}{l_p''}, \text{ кг/м}; \quad (8)$$

$m_p', m_p''$  – масса вращающихся частей верхних и нижних роlikоопор конвейера, соответственно, кг;  $l_p', l_p''$  – шаг верхних и нижних роlikоопор, соответственно, м;  $\omega'$  – коэффициент сопротивления движению ленты, определяемый согласно рекомендациям общепринятой методики расчёта или экспериментально;  $\beta$  – средний угол установки конвейера, согласно условиям эксперимента;  $M_{cq,i}$  – составляющая момента сопротивления от грузопотока; учитывая ранее установленную зависимость загруженности ленты  $m_i$  от грузопотока  $Q_t$  ( $i \in t$ ) [6; 8], можно полагать:

$$M_{cq,j} = \frac{gD_\sigma m_j \cdot (k_s \omega' \cos \beta \pm \sin \beta)}{2u_p \eta_p} = m(t) \cdot k_{MC} \cdot D_\sigma; \quad (9)$$

$m(t)$  – загруженность ленты конвейера, кг, – случайная величина с параметрами закона распределения, связанного с законом распределения грузопотока  $Q(t)$  на конвейере. При нахождении измерительного устройства в хвосте конвейера, определяется по формуле:

$$m_j = \sum_{i=j}^{j + \text{floor}\left(\frac{L}{v_{cp}}\right)} Q_i; \quad (10)$$

$t_z$  – время загрузки конвейера, с;  $t'' = \frac{L}{v_{cp}}$  – время нахождения груза на ленте, с;

$v_{cp}$  – средняя скорость ленты за время нахождения груза на конвейере, определяемая принимаемым для привода конвейера способом и алгоритмом регулирования,

$$v_{cp} = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} dv(t''); \quad (11)$$

$v_{\min}$  – минимальная скорость ленты, определяемая электромеханической характеристикой электродвигателя и (или) алгоритмом регулирования;  $v_{\max}$  – максимальная скорость ленты,  $v_{\max} = (1,0 \dots 1,1)v_H$ , где  $v_H$  – номинальная скорость ленты, м/с;

$$k_{MC} = \frac{g(k_s \omega' \cos \beta \pm \sin \beta)}{2u_p \eta_p}.$$

Значение массы транспортируемого за время функционирования конвейера  $T$  груза, в случае измерения последнего с дискретностью  $\Delta t = 1$  с, определится:

$$\Sigma m = \sum_{t=0}^{n_t} Q_t, \text{ кг}, \quad (12)$$

где  $n_t = T(\Delta t)^{-1}$  – количество интервалов измерения грузопотока в течение времени функционирования конвейера  $T$ .

Таким образом, формулы (2)-(12) и определяют функциональную зависимость критерия (1) от технологических параметров процесса транспортирования, а также конструктивных параметров электрической и механической части ленточного конвейера. Значение целевой функции энергоэффективности конвейера можно представить как зависимость от следующих параметров, описанных в математической модели (2)-(12):

$$W = \psi \left[ \overline{(P_1)}, \overline{(P_2)} \right] \rightarrow \min ,$$

где  $\overline{(Q, m, p_i, L, \beta)} = \overline{P_1}$  – технологические параметры транспортирования;  $\overline{(D_{\delta}, q_0, m'_p, m''_p, l'_p, l''_p, u_p, \omega, \eta)} = \overline{P_2}$  – конструктивные параметры ленточного конвейера;

Коэффициент полезного действия привода ленточного конвейера в соответствующем режиме функционирования:

$$\eta(t) = \eta_{mp}(t) \cdot \eta_1(t) \cdot \eta_{pez}(t) \cdot \eta_c, \quad (13)$$

где  $\eta_{mp}(t) = \frac{M_c(t) - M_{c0}}{M_c(t)}$  – коэффициент полезного действия привода в

соответствующем режиме транспортирования груза, учитывающий влияние мощности холостого хода на средневзвешенные удельные энергозатраты;  $\eta_1(t)$  – коэффициент полезного действия приводного (-ых) электродвигателя (-ей) при изменении момента на валу ротора и его угловой скорости;  $\eta_{pez}$  – коэффициент полезного действия режима регулирования частоты вращения двигателя. Зависит от конструкции регулятора, момента сопротивления на приводе и т.д.;  $\eta_c$  – коэффициент полезного действия электрической сети.

Следовательно, целевая функция для оптимизации структуры привода конвейера по критерию энергоэффективности при использовании гистограмм распределения грузопотока (загруженности ленты) как случайных величин запишется следующим образом:

$$W(T)_k = \frac{gT}{2u_p \eta_p \eta_c \cdot m_{\Sigma}(T) \cdot L} \sum_{k=1}^r \frac{[M_{c0} + k_{MC} \cdot m_j] \cdot v_k \cdot P_j}{\eta_{mp,j} \cdot \eta_{1,j} \cdot \eta_{pez,j}} \rightarrow \min . \quad (14)$$

На рисунке 3 представлены полигоны и гистограммы распределения загруженности ленты при скоростях транспортирования 2 м/с и 4 м/с для одного и того же конвейера, полученные путём интегрирования грузопотока с параметрами логарифмического нормального распределения,

соответствующими условиям эксперимента [6]. Для моделирования также принимаются параметры ленточного конвейера и его привода, соответствующие реальной транспортной машине, функционирующей в представительных условиях.

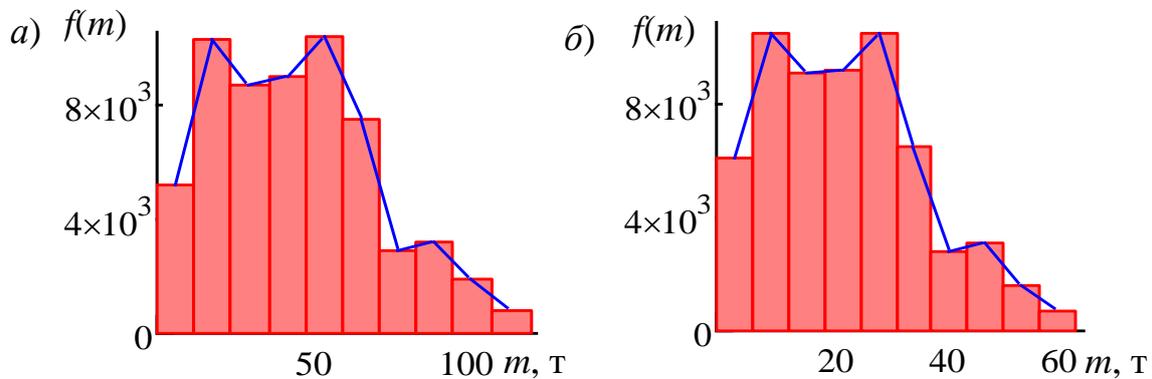


Рисунок 3 – Полигоны и гистограммы распределения загрузки ленты  $m$  при скоростях транспортирования 2 м/с (а) и 4 м/с (б)

Из рисунка 3 следует, что увеличение скорости ленты при неизменном законе распределения грузопотока приводит к частичной трансформации закона распределения загрузки конвейера, а также уменьшению максимальной величины загрузки в сторону уменьшения. При этом, будет наблюдаться влияние момента холостого хода конвейера на величину средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование.

На рисунке 4 приведены результаты математического моделирования целевой функции для оптимизации структуры привода и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности – зависимости относительных значений момента сопротивления на приводе, удельных энергозатрат на транспортирование груза и коэффициента полезного действия режима функционирования конвейера от загрузки ленты при скорости ленты 2 м/с и 4 м/с, с указанием вероятностей  $p_i$ , соответствующих закону распределения загрузки ленты на данной скорости транспортирования. Средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза ленточным конвейером определяются согласно формуле (26), с учётом вероятностей функционирования ленточного конвейера с  $j$ -ми удельными энергозатратами.

Из рисунка 4 следует, что при повышении скорости транспортирования уменьшается момент сопротивления на приводе за счёт уменьшения составляющей последнего, соответствующей величине загрузки ленты. Нарушается соотношение  $M_{ci}M_{c0}^{-1}$ . Это означает, что с увеличением скорости будет расти составляющая момента сопротивления на приводе ленточного конвейера, соответствующая его холостому ходу, а значит, будет наблюдаться

снижение коэффициента полезного действия конвейера, функционирующего в соответствующем режиме работы.

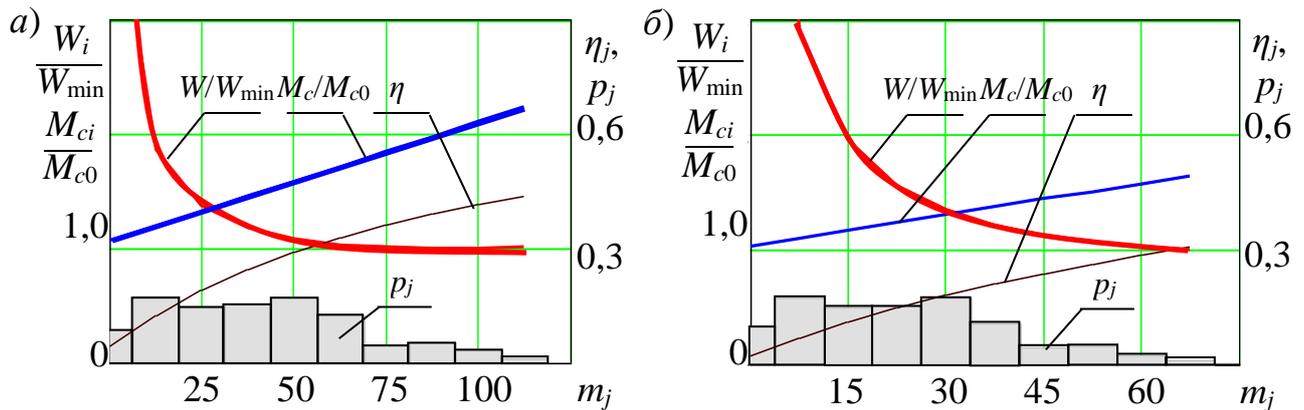


Рисунок 4 – Зависимости относительных значений момента сопротивления на приводе  $M_c/M_{c0}$ , удельных энергозатрат на транспортирование груза  $W/W_{min}$  и коэффициента полезного действия режима функционирования конвейера  $\eta$  от загрузки ленты  $m$  при скорости ленты  $v=2$  м/с (а) и  $v=4$  м/с (б)

На рисунке 5 приведена зависимость средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза конвейером в рабочем режиме последнего от скорости ленты, с учётом ограничивающих факторов.

Ограничивающими факторами являются прочность ленты, номинальный момент приводного двигателя конвейера, приёмная способность ленты (в условиях данной задачи – основной ограничивающий фактор) и мощность двигателя.

Указаны параметры номинального рабочего режима функционирования конвейера, а также диапазон допустимых скоростей, при условии отсутствия их

внешнего регулирования за время функционирования конвейера  $T$ .

Из рисунка 5 следует, что абсолютное значение средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза для режима транспортирования со скоростью 2 м/с составляет 3,69 кВт·ч/(т·км), со скоростью 4 м/с – 11,7 кВт·ч/(т·км).

Увеличение скорости транспортирования в 2

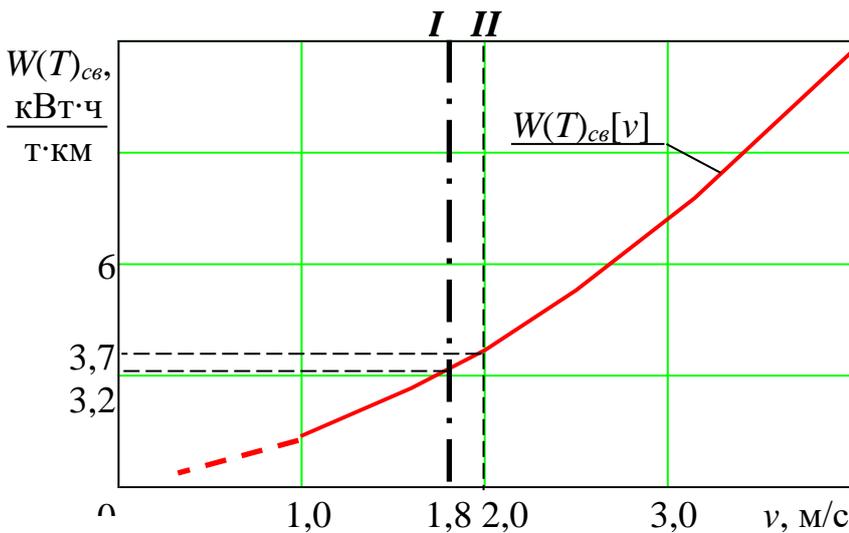


Рисунок 5 – Зависимость средневзвешенных удельных энергозатрат  $W(T)_{cs}$  на транспортирование груза ленточным конвейером от скорости ленты  $v$ : I – рациональный режим работы с минимальной скоростью ленты, допустимой по приёмной способности конвейера; II – номинальный режим работы конвейера

раза ведёт к увеличению средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза в 3,2 раза.

Уменьшение скорости ленты до её минимального допустимого значения  $v=2,8$  м/с (основным ограничивающим фактором является приёмная способность конвейера), напротив, приведёт к уменьшению средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза на 13,5 %, - до 3,2 кВт·ч/(т·км). Следовательно, регулирование скорости ленты конвейера в сторону её уменьшения для увеличения величины загруженности ленты за счёт более рационального её заполнения технологически, а в большинстве случаев – и экономически, оправдано.

Итак, предложенная математическая модель целевой функции для оптимизации структуры привода и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности позволяет учесть влияние технологических параметров конвейера и режима транспортирования груза, конструктивных параметров механической и электрической компонент конвейера, а также способа регулирования скорости ленты на средневзвешенные удельные энергозатраты на транспортирование груза конвейером.

### **Выводы, дальнейшие направления исследований**

1. Величина средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза ленточным конвейером позволяет получить объективную количественную оценку его энергоэффективности, с учётом случайного характера грузопотока и величины загруженности ленты. Установлено существенное влияние на их величину следующих факторов: скорость транспортирования, грузопоток и загруженность ленты, их параметры, длина транспортирования, угол транспортирования, передаточное число редуктора, потери энергии в компонентах конвейера. Параметром оптимизации режима работы привода ленточного конвейера является скорость ленты.

2. Разработана математическая модель процесса формирования средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование, учитывающая влияние случайного характера загруженности ленты при заданном законе распределения грузопотока и его параметрах, а также коэффициента полезного действия приводных двигателей и режима регулирования скорости ленты на эффективность транспортирования груза конвейером.

3. Минимальное энергопотребление для исследуемого ленточного конвейера соответствует режиму полной загруженности ленты, и обеспечивает ожидаемое снижение энергопотребления минимум в 1,6 раза, в сравнении с таковыми при скорости ленты 2 м/с и логарифмическом нормальном законе распределения грузопотока на конвейере. Уменьшение скорости ленты до её минимального допустимого значения  $v=1,8$  м/с, в соответствии с основным ограничивающим фактором – приёмной способностью конвейера, приведёт к уменьшению средневзвешенных удельных энергозатрат на транспортирование груза на 13,5 %, - до 3,2 кВт·ч/(т·км).

Направления дальнейших исследований с применением разработанной математической модели целевой функции для оптимизации структуры привода и способов регулирования скорости ленты конвейера по критерию энергоэффективности: установление влияния закона распределения грузопотока и условий эксплуатации ленточного конвейера на удельное энергопотребление при транспортировании груза с различными способами регулирования скорости: использование двухскоростного двигателя с соотношением скоростей 1:2 и 1:3, частотное непрерывное и ступенчатое регулирование и т.д; уточнение рациональной области применения частотного регулирования скорости ленты и использования двухскоростных приводных электродвигателей; обоснование диапазона частотного регулирования скорости ленты; разработка алгоритма векторного управления частотно регулируемым приводом, работающим в рациональной зоне; [10] оптимизация структуры и параметров регулируемого привода ленточных конвейеров, работающих в различных условиях, по критерию энергоэффективности, формирование алгоритма управления с учетом работы добычного и транспортного оборудования.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Функциональная модель комбайна для повышенных темпов проведения выработок / А.К.Семенченко, О.Е.Шабаев, А.И.Хищенко, Е.Ю.Степаненко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-електромеханічна». - Донецьк, 2012. –Вип. 23/196. - с. 219-226.
2. Рухлов, А.В. Энергетические характеристики магистрального конвейерного транспорта угольных шахт / Рухлов А.В., Герман Е.Д. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \WWW/ URL: [http://www.nbuu.gov.ua/old\\_jrn/natural/Geta/2010\\_84/7.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/Geta/2010_84/7.pdf). – Загл. с экрана.
3. Заклика, М. Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью / Заклика М., Колек М., Тытко С. - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/for-conveyance.pdf>. – Загл. с экрана.
4. Уайлд, Д. Оптимальное проектирование / Д. Уфйлд. – М., 1981. – 272 с.
5. Лаухофф, Х. Действительно ли регулирование скорости ленточных конвейеров способствует экономии энергии? // Глюкауф - Эссен-М., 2006. – № 1 (март) - с. 9-15
6. 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.
7. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В.В.Ададунов, В.В.Ариненков, Ф.С.Воюш [и др]. – Под ред. В.А.Будишевского, А.А.Сулимы. – Донецк, 1999. – 216 с.
8. 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.
9. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. – Под ред. И.Я.Браславского. – М., 2004. – 202 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/asinhr\\_electroprivod\\_brasl.pdf](http://en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/asinhr_electroprivod_brasl.pdf). – Загл. с экрана.
10. Стадник, Н.И. Частотно регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей - Оптимізація виробничих процесів, 2013 - № 14. – с. 22-26.

#### REFERENCES

1. Semenchenko, A., Shabayev, O., Khitsenko, A. and Stepanenko, O. (2012), “Functional model of the combine for high excavation rates”, *DonNTU scientific works, electromechanical series*, no. 23 (196), pp. 219-226.

2. Rukhlov, A. and German, E. (2010), "Energy characteristics of the main conveyor transport in coal mines", available at: [http://www.nbu.gov.ua/old\\_jrn/natural/Geta/2010\\_84/7.pdf](http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/Geta/2010_84/7.pdf).
3. Zaklika, M., Kolek, M. and Tytko, S., "Belt conveyors with adjustable speed", available at: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/for-conveyance.pdf>.
4. Wild, D. (1981), *Optimalnoye proektirovaniye* [Optimal Designing], Moscow, SU.
5. Lauhoff H. (2006) "Is the speed of belt conveyors regulation contributes to energy savings?", *Glukauf*, no. 1, pp. 9-16.
6. Semenchenko, A., Stadnik, M., Belitsky, P., Semenchenko, D. and Stepanenko, O. (2016), "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 advanced technologies*, no. 82, pp. 42-51.
7. Budishevsky, V. etc. (1999), *Teoreticheskiye osnovy i raschety transporta energoyemkikh proizvodstv* [Theoretical bases and calculations of transport in energy-intensive industries], Donetsk, UA.
8. Kondrahin, V., Stadnik, N. and Belitskiy, P. (2013), "Operating parameters statistical analysis for the belt conveyor in mine", *DonNTU scientific works, electromechanical series*, no. 2, pp. 140-150.
9. Braslavskiy I., Ishmatov Z. and Polyakov, V. (2004,) "Energy saving asynchronous electric drive", available at: [http://www.en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/asinh\\_electroprivod\\_brasl.pdf](http://www.en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/asinh_electroprivod_brasl.pdf).
10. Stadnik M. (2013), "Frequency-controlled electric drive of belt conveyors based on self-ventilated engines", *Optimization of vibration processes*, no. 14, pp. 22-26.

---

### Об авторах

**Семенченко Анатолий Кириллович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горных машин и мехатронных систем машиностроения, Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), г. Покровск, Украина, aksemen@inbox.ru

**Стадник Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических систем, технологий и автоматизации в АПК, Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница, Украина, stadnik1948@gmail.com

**Белицкий Павел Владимирович**, магистр, инженер кафедры горных машин и мехатронных систем машиностроения, Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), г. Покровск, Украина, pabel30.04.1980@gmail.com

**Семенченко Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и мехатронных систем машиностроения, Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), г. Покровск, Украина, sda190476@mail.ru

### About the authors

**Semenchenko Anatoliy Kirillovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Head of the Department of Mining Machines and Mechatronic Systems of Mechanical Engineering, Donetsk National Technical University (DonNTU), Pokrovsk, Ukraine, aksemen@inbox.ru

**Stadnik Nikolay Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of the Department of Electrical Systems and Automation Technology in the Agricultural Sector, Vinnitsa National Agricultural University, Vinnitsa, Ukraine, stadnik1948@gmail.com

**Belitskiy Pavel Vladimirovich**, Master of Science, Engineer in the Department of Mining Machines and Mechatronic Systems of Mechanical Engineering, Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine, pabel30.04.1980@gmail.com

**Semenchenko Dmitriy Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in the Department of Mining Machines and Mechatronic Systems of Mechanical Engineering, Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine, sda190476@mail.ru

---

**Анотація.** Метою роботи є розробка та обґрунтування цільової функції для оптимізації режимів роботи приводу стрічкового конвеєра за критерієм енергоефективності. Об'єкт дослідження: процес енергоспоживання при транспортуванні сипучого вантажу стрічковим конвеєром з регульованим приводом. Предмет дослідження: обґрунтування параметрів (змінних проектування), які найбільше впливають на енергоспоживання і розробка математичної моделі цільової функції з урахуванням цих параметрів. У статті наведено залежність цільової функції оптимізації і режимів роботи регульованого приводу стрічкового конвеєра від параметрів конструкції електричної і механічної компонент конвеєра, і технології транспортування вантажу. Вирішено задачу встановлення залежності питомих показників

енергоспоживання на стрічковому конвеєрі від режиму завантаженості стрічки по приймальній здатності на прикладі функціонування стрічкового конвеєра при відсутності зовнішнього регулювання швидкості стрічки. Результати досліджень будуть корисні при виборі і розробці регульованого приводу для гірничої промисловості, створенні теоретичної бази для обґрунтування структури, параметрів і простору проектування регульованих приводів стрічкових конвеєрів, для вирішення питань створення стрічкових конвеєрів підвищеного технічного рівня і підвищення ефективності їх експлуатації.

**Ключові слова:** питомі енерговитрати, цільова функція, завантаженість стрічки, навантаженість приводу, коефіцієнт корисної дії, глибина регулювання швидкості.

**Abstract.** Purpose of the study is to develop and justify target function for optimizing operation modes of the belt conveyor by energetic effectiveness criterion. Object of the study: energy consumption process during transportation of loose cargo by the belt conveyor with adjustable drive. Subject of the study: to validate parameters (design variables), which mostly affect the energy consumption, and to develop mathematical model of the target function with taking into account these parameters. The article shows dependence of the target function for optimizing operation modes of the belt conveyor with adjustable drive on the design parameters of electrical and mechanical components of the conveyor and technology of cargo transportation.

Problem of establishing dependence between indexes of specific power consumption for the belt conveyor and load capacity of the belt by its input capacity was solved on the example of operation of the belt conveyor with no external belt-speed adjustment. Results of the research will be useful while choosing and designing adjustable drive for the mining industry, creating theoretical basis for justifying structure, parameters and space while designing adjustable drives, for solving problems while creating belt conveyors of advanced technical level with improved efficiency of their operation.

**Key words:** specific energy consumption, target function belt load, drive load, efficiency, speed control.

*Стаття поступила в редакцію 30.07. 2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Ф. Монастырским*