

УДК 622.647.2

д.т.н. Корнеев С. В.,
к.т.н. Доброногова В. Ю.,
Долгих В. П.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, vidofea@gmail.com)

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ УТОЧНЁННОГО ТЯГОВОГО РАСЧЁТА

Приведён анализ скоростных режимов работы шахтных ленточных конвейеров и обоснование эффективности регулирования их скорости по фактору затрат энергии в условиях неравномерных грузопотоков с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта.

Ключевые слова: ленточный конвейер, скорость, специальный метод уточнённого тягового расчёта.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. На угольных шахтах при эксплуатации ленточных конвейеров насущной проблемой является снижение энергозатрат, которые достигают 20 % от всей потребляемой на шахтах электроэнергии.

Часть потребляемой приводом конвейера энергии — практически постоянная — расходуется на перемещение тягового органа (ТО), другая, вариативная часть затрачивается на перемещение груза. Изменчивость второй составляющей вызвана неравномерностью поступающих на работающий конвейер грузопотоков и перерывами в их поступлении. При увеличении доли этой составляющей, что достигается в результате максимально возможного заполнения ленты грузом, уменьшаются коэффициент тары конвейера и, соответственно, доля затрат энергии на перемещение ТО. Повышается выраженный в массовых единицах транспортируемого груза ресурс ленты и роликкоопор, а также КПД электродвигателей. Снижение энергозатрат путём увеличения доли второй составляющей в общем балансе потребляемой энергии является одним из направленных решений указанной выше проблемы. Технически это обеспечивается двумя способами: 1) управлением характеристиками грузопотока посредством аккумулирующих

бункеров; 2) автоматическим регулированием скорости конвейера [1–3].

Для конвейерных линий участкового транспорта, в отличие от магистральных конвейеров, применение аккумулирующих бункеров в силу больших капитальных затрат на их сооружение при сравнительно небольшом сроке эксплуатации этих линий, как правило, оказывается экономически нецелесообразным.

Более эффективным представляется частотное регулирование приводных асинхронных двигателей (АД) участковых конвейеров, направленное на поддержание погонной массы груза на конвейере на заданном максимально возможном уровне. Однако широкого распространения управление скоростью конвейера не получило. Причины этому следующие: 1) обоснование эффективности регулирования скорости основывается на показателях потребления электрической энергии, рассчитываемых с применением типовой методики тягового расчёта, в которой не учитывается влияние скорости тягового органа на сопротивление движению ТО, в результате чего, как показано в работе [4], погрешность расчётов может достигать 22 %; 2) остаётся недостаточно исследованным влияние регулирования скорости на долговечность конструктивных элементов конвейера (ленты, роликов и пр.), при кото-

ром, с одной стороны, проходимость ими путь или число циклов нагружения снижаются, а с другой — погонная масса груза и, соответственно, нагрузки возрастают; 3) преобразователи частоты АД, до появления современных, основывающихся на новой элементной базе и имеющих рудничное исполнение преобразователей частоты со звеном постоянного тока (ПЧВ-К У5, DYNAVERT VSD-1140V, BARTEC и др.), по своим характеристикам не подходили для работы в подземных условиях угольных шахт.

Также очевидно: 1) использование высокопроизводительных конвейеров для обслуживания малых грузопотоков со снижением при этом скорости просто нецелесообразно; 2) увеличению скорости движения ленты сверх номинального значения препятствуют свойства транспортируемого груза, который может сыпаться с конвейера; 3) длительная работа преобразователя частоты в режиме пониженных частот требует принудительного охлаждения как АД, так и самого преобразователя.

Все эти вопросы по-прежнему требуют системного исследования.

Постановка задачи. Задачей исследования является анализ скоростных режимов работы шахтных ленточных конвейеров и обоснование эффективности регулирования их скорости по фактору затрат энергии в условиях поступления случайных грузопотоков с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта.

Изложение материала и его результаты. В подавляющем большинстве участков конвейерных линий, состоящих из нескольких конвейеров (в частном случае — один конвейер), погрузка каждого из них осуществляется в его хвостовой части, а какие-либо дополнительные пункты погрузки по длине конвейерного става не предусматриваются.

Система автоматического управления (САУ) приводом при установившемся движении тягового органа может выполнять следующие функции: 1) при прекра-

щении поступления груза останавливать конвейер или поддерживать его скорость на некотором минимально допустимом уровне; 2) при случайных грузопотоках регулировать скорость в функции среднего значения погонной массы груза на участке загрузки, расположенном над датчиком веса, для поддержания заданного значения ρ_3 погонной массы груза на конвейере на уровне $\rho_{\text{доп}}$, соответствующем приёмной способности конвейера, или при загрузке всего конвейера на уровне, обеспечивающем номинальную нагрузку привода.

В качестве сенсоров САУ АД конвейера обычно служат расположенные в пункте погрузки конвейерные весы и, в случае необходимости, датчик скорости ленты.

При поступлении на конвейер нескольких грузопотоков, загружаемых в разных пунктах по длине конвейера, обеспечить путём регулирования скорости равномерное, хотя бы на отдельных участках, заполнение става затруднительно. Поэтому в ряде работ, например в [3], с целью энергосбережения предлагается регулировать скорость, как вариант, для поддержания на заданном уровне статического усилия на валу двигателя. Однако в этом случае, по нашему мнению, при неравномерных грузопотоках и отсутствии контроля заполнения ленты возможно её локальное переполнение и пересыпание груза через борта. Более того, в случае перерывов в поступлении грузопотоков на работающий конвейер и снижения нагрузок до значений, соответствующих режиму холостого хода, искусственное поддержание нагрузки привода на номинальном уровне вообще не имеет смысла.

Поэтому далее рассматриваются только конвейерные линии с загрузкой конвейеров в хвостовой части и регулированием скорости для обеспечения максимально возможной загрузки конвейера.

Возможны следующие четыре основных скоростных режима работы конвейерной линии:

1. *Конвейерная линия работает практически непрерывно, за исключением ос-*

тановок, связанных с отказами самой линии, скорость конвейеров не регулируется. В настоящее время это наиболее распространённый вариант работы шахтных конвейеров, который в данной работе принимается в качестве базового.

Если при остановке любого конвейера в цепочке последовательно расположенных конвейеров останавливается вся линия, то в этом случае всю конвейерную линию можно рассматривать как единый конвейер. При поступлении на конвейерную линию нескольких грузопотоков происходит их суммирование. Погонная масса груза на конвейере изменяется по его длине и является случайной величиной.

2. *Конвейерная линия работает только при поступлении на неё груза, скорость конвейеров не регулируется.* При таком режиме работы полностью исключаются незагруженные участки на конвейерах, чем он, с энергетической точки зрения, выгоднее предыдущего режима, так как в этом случае в среднем увеличивается погонная масса груза на конвейере и, следовательно, снижаются коэффициент тары, а также, соответственно, доля затрачиваемой электроэнергии, которая приходится на перемещение ГО.

На практике такой режим вряд ли осуществим в полной мере, поскольку остановки конвейерной линии при кратковременных перерывах в поступлении груза могут привести к усложнению управления конвейерами, частым запускам линии с повышенными пусковыми нагрузками и затратами времени.

3. *Конвейерная линия работает только при поступлении на неё груза, скорость конвейеров регулируется.* На машинном времени работы линии паузы в поступлении груза отсутствуют, т. е. конвейеры всегда полностью загружены по длине. Регулируется скорость первого по ходу грузопотока конвейера для поддержания погонной массы груза ρ на заданном уровне, а скорость остальных конвейеров, во избежание бункеризации груза, должна быть

равна скорости первого конвейера. С точки зрения потребления энергии это самый экономически выгодный режим, однако, как и предыдущий 2-й режим, на практике он, по тем же причинам, вряд ли может быть реализован в полной мере.

4. *Конвейерная линия работает непрерывно, за исключением остановок, обусловленных отказами самой линии; при поступлении груза на тот или иной конвейер его скорость регулируется, в результате чего погонная масса груза поддерживается на некотором заданном уровне. Если же груз не поступает, то скорость поддерживается на некотором заданном минимальном уровне v_{min} .* Обычно для конвейеров с самообдуваемыми АД по условию допустимого нагрева двигателей v_{min} принимается равной $(0,1 \dots 0,25)v_n$, где v_n — номинальное значение скорости конвейера [5].

Чем меньше v_{min} , тем больше этот режим приближается к 3-му режиму. При таком управлении уже на первом в линии конвейере происходит, по сравнению с базовым режимом, уменьшение длины, «сокращение» незагруженных участков ленты, образующихся при отсутствии поступления на конвейер груза. Более того, при индивидуальном управлении скоростью конвейеров на каждом последующем в линии конвейере этот эффект может усиливаться, так как при его работе на скорости v_{min} (груз не поступает) скорость предыдущего конвейера, работающего в режиме загрузки, может оказаться больше, чем v_{min} . Дополнительное за счёт этого эффекта снижение расхода электроэнергии составляет 4...5 % [2].

В принципе, возможны варианты управления, например, каждым конвейером в системе отдельно. Возможна работа конвейера при поступлении на него груза до его полного заполнения (используется аккумулярующая способность конвейера) при неработающем последующем элементе системы. Существующая система автоматического управления конвейерной линией (САУКЛ) позволяет отключать отдельные конвейеры, работающие в режиме холостого хода.

Для выяснения преимуществ 4-го режима работы в сопоставлении с базовым режимом произведено моделирование процесса загрузки наиболее распространённого на угольных шахтах участкового конвейера 1Л800Д, оснащённого лентой EP-800/4-5+2 и роlikоопорами ГЖ80-108-30, в обоих режимах в соответствии с алгоритмом [6], основывающимся на специальной уточнённой методике тягового расчёта [7]. Длина конвейера — 600 м, угол установки — 0°. Погонная масса ленты — 13,8 кг/м; допустимая погонная масса груза $\rho_{\text{доп}}$ — 60 кг/м; масса вращающихся частей роlikоопоры — 14,7 кг; расстояние между роlikоопорами верхней ветви — 1,2 м; номинальная скорость конвейера v_n — 2 м/с.

Непрерывный минутный углепоток, поступающий на конвейер, является нормальным случайным процессом. Математическое ожидание углепотока m_q варьируется в пределах от 0 до 3,5 т/мин; коэффициент вариации принимается равным 0,57; корреляционная функция представляется в виде экспоненты; время корреляции τ_k — 4 мин.

Длительности импульсов и пауз в поступлении груза, наблюдаемых в течение машинного времени конвейера, являются случайными величинами, подчиняющимися экспоненциальному закону распределения.

Коэффициент поступления груза на конвейер (для базового варианта он является также коэффициентом заполнения конвейера):

$$k_{\text{п. г}} = \frac{\bar{t}_{\text{и}}}{\bar{t}_{\text{и}} + \bar{t}_{\text{п}}} = \frac{\lambda v}{\lambda(\lambda + v)}, \quad (1)$$

где $\bar{t}_{\text{и}}$ и $\bar{t}_{\text{п}}$ — математические ожидания длительностей импульсов и пауз в поступлении груза, λ и v — параметры законов распределения, $\lambda = 1/\bar{t}_{\text{и}}$, $v = 1/\bar{t}_{\text{п}}$.

Коэффициент поступления груза в результате выбора значений $\bar{t}_{\text{и}}$ и $\bar{t}_{\text{п}}$ варьируется в пределах от 0 до 1.

Интервал времени управления АД t_y также, как и мерный интервал грузопотока, принимается равным одной минуте.

Грузопоток, поступающий на конвейер в течение его машинного времени, представляется в виде временного ряда q_k ($k = 1, \dots, k_{\text{max}}$). Заметим, что $q_k = 0$, если груз на конвейер не поступает. Число реализаций k_{max} минутного грузопотока q_k принимается равным 10^4 .

Рассматривается идеальное регулирование скорости, при котором в случае поступления груза в течение соответствующего k -го интервала времени обеспечивается равенство k -й погонной массы груза ρ_k заданному значению ρ_3 . При этом реализация скорости $v_k = q_k / \rho_3 t_y$.

В случае базового варианта (скорость постоянна) величина погонной массы груза ρ_k на каждом k -ом участке загрузки конвейера длиной $l_k = t_y v_n$ также предполагается неизменной, но для каждого k разная, так как $\rho_k = q_k / \rho_3 v_n$.

В реальных условиях в обоих случаях погонная масса груза в течение минуты может изменяться случайным образом, что, естественно, отражается на точности моделирования. Точность моделирования будет выше, если, сокращая шаг управления скоростью, оперировать внутриминутными углепотоками. Однако для них не накоплены достаточные для моделирования статистические данные.

Зависимости средних значений мощности \bar{N}_p и $\bar{N}_{\text{нр}}$ от m_q и $k_{\text{п. г}}$, полученные для базового и 4-го скоростных режимов конвейера с применением специальной уточнённой методики тягового расчёта, отражены на рисунке 1, а.

При расчёте по специальной уточнённой методике сопротивления движению ленты с грузом при прохождении i -ой роlikоопоры $W_{ik}(v_k, \rho_{ik}, S_{ik})$ определяются по формулам [7]:

– при регулировании скорости в случае поступления груза ($\rho_k = \rho_3$):

$$W_{ik}(S_{ik}, v_k) = 7,62 - 1,23S_{ik} + 28,87v_k - 0,0062S_{ik}v_k + 0,023S_{ik}^2 + 3,75v_k^2; \quad (2)$$

– при постоянной скорости v_n :

$$W_{ik}(S_{ik}, \rho_{ik}) = 39,78 - 1,85S_{ik} + 0,53\rho_{ik} - 0,0036S_{ik}\rho_{ik} + 0,028S_{ik}^2 - 0,0046\rho_{ik}^2. \quad (3)$$

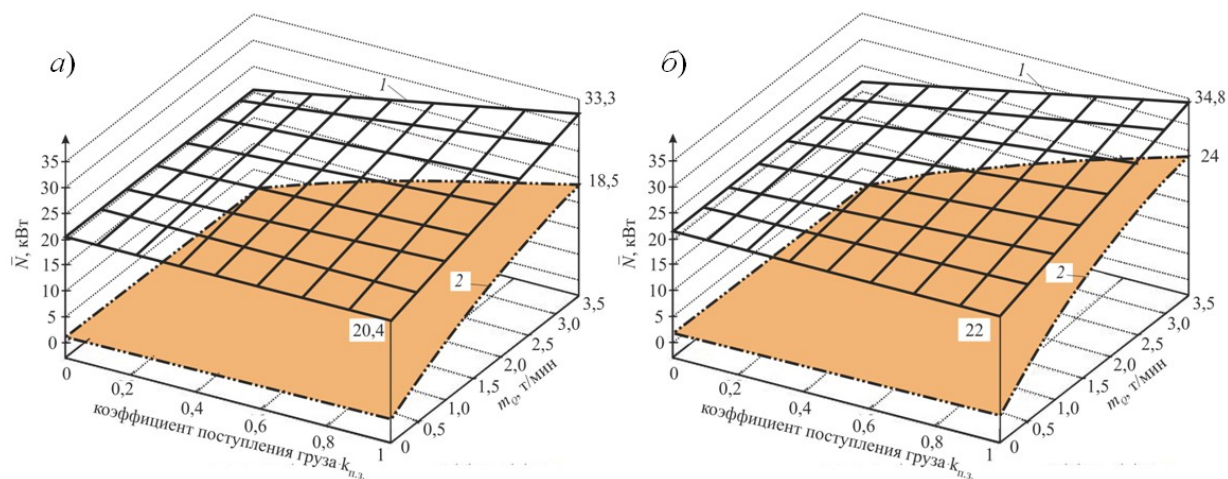
Для каждого варианта регулирования скорости среднее значение мощности, являющейся произведением случайных величин — скорости v и тягового усилия на приводном барабане W , — может быть также определено по формуле

$$\bar{N} = \bar{v}\bar{W} + \bar{K}(v, W), \quad (4)$$

где \bar{v} и \bar{W} — средние значения скорости и тягового усилия конвейера; $\bar{K}(v, W)$ —

оценка корреляционного момента случайных величин v и W .

Для достаточно длинных конвейеров ($L_k \gg v_k t_y$ и $L_k \gg v_k \tau_k$) при существенном ослаблении статистической связи между случайными величинами v и W вторым слагаемым в выражении (4) в ряде случаев можно пренебречь. Например, для типичного случая при $m_q = 3,42$ т/мин и $k_{п.г} = 0,5$ (длина конвейера 600 м, $t_y = 1$ мин) в результате моделирования получено: $\bar{v} = 0,97$ м/с; $\bar{W} = 25,1$ кН; $\bar{N} = 26,5$ кВт. При расчёте по формуле (4) $\bar{N} = 25,7$ кВт. Относительная погрешность составляет 3 %.



а) расчёт по специальной уточнённой методике тягового расчёта;
 б) расчёт по типовой методике тягового расчёта;
 1 — базовый режим (скорость не регулируется);
 2 — 4-й режим (скорость регулируется)

Рисунок 1 Зависимости мощности, потребляемой конвейером 1Л800Д, от математического ожидания минутного углепотока и коэффициента поступления груза на конвейер

В каждом конкретном случае эффективность регулирования скорости можно оценить посредством разности $\Delta\bar{N} = \bar{N}_{нр} - \bar{N}_p$ или коэффициента эффективности $k_p = \Delta\bar{N} / \bar{N}_{нр}$. Из анализа рисунка 1, а видно, что наименьшие значения величин $\Delta\bar{N}$ и k_p , равные, соответственно, 14,8 кВт и 0,44, отвечают наибольшему заполнению ленты, т. е. в данном случае сочетанию ис-

ходных данных: $m_q = 3,5$ т/мин и $k_{п.г} = 1$. В режимах, близких к режиму холостого хода конвейера, т. е. при $m_q \rightarrow 0$ или $k_{п.г} \rightarrow 0$, величины $\Delta\bar{N}$ и k_p принимают наибольшие значения, в данном случае, соответственно, 19,58 кВт и 0,96, в общем же случае $k_p \rightarrow 1 - v_{\min} / v_n$. Подтверждается известный факт — регулирование скорости наиболее эффективно при малых грузопотоках.

Ожидаемая годовая экономия электроэнергии определяется по формуле

$$C_э = T_m c_p \Delta \bar{N}, \quad (5)$$

где T_m — продолжительность машинного времени работы конвейера в течение года, час; c_p — стоимостная оценка активной электроэнергии, по действующим ценам и тарифам для потребителей 1-го класса напряжения $c_p = 3,673$ рос. руб. за 1 кВт·час (Постановление Совета Министров ЛНР от 25 октября 2016 г. № 600).

Для конвейера 1Л800Д для заданных значений m_q и $k_{п.г}$ величина $\Delta \bar{N}$ находится в пределах от 15,3 до 19,55 кВт, коэффициент эффективности регулирования скорости — от 0,45 до 0,96; при годовой продолжительности работы конвейера T_m , равной 3150 ч, величина $C_э$ находится в диапазоне значений от 177 до 226 тыс. рос. руб. При стоимости $C_{п.г}$ одного преобразователя частоты, равной 400 тыс. рос. руб., ожидаемый срок окупаемости будет равен $C_{п.г}/T = 400/177(226) = 2,2(1,7)$ года.

Аналогичные результаты, полученные с применением типовой методики тягового расчёта, отражены на рисунке 1,б. Величины $\Delta \bar{N}$, k_p и $C_э$, полученные для всего спектра характеристик шахтных грузопотоков, находятся в диапазоне значений, соответственно, 10,8 кВт, 0,31 и 125 тыс. рос. руб.

Очевидно, что наибольший эффект от регулирования скорости обеспечивается при существенной неравномерности грузопотоков, а точность расчётов показателей эффективности (до 30 %) — при проведении расчётов с применением специальной уточнённой методики, что позво-

ляет при заданных условиях эксплуатации более обоснованно выбирать скоростной режим конвейера.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Наиболее рациональным является режим работы конвейера (конвейерной линии), при котором он работает непрерывно, за исключением остановок, обусловленных отказами самого конвейера. При поступлении груза на конвейер его скорость регулируется в функции поступающего грузопотока. Если же груз не поступает, то скорость поддерживается на некотором заданном минимальном уровне v_{\min} .

2. Величины коэффициента эффективности регулирования скорости k_p и, соответственно, годовой экономии электроэнергии $C_э$, полученные для конвейера 1Л800Д при расчёте с применением специальной уточнённой методики тягового расчёта для всего спектра характеристик шахтных грузопотоков, находятся в диапазоне значений, соответственно, от 0,45 до 0,96 и от 177 до 226 тыс. рос. руб.

3. Наибольшее значение коэффициента эффективности регулирования скорости конвейера k_p , достигаемое в области малых грузопотоков, т. е. при $m_q \rightarrow 0$ или $k_{п.г} \rightarrow 0$, равно $1 - v_{\min} / v_H$.

4. Точность определения коэффициента эффективности регулирования скорости конвейера в результате применения специальной уточнённой методики тягового расчёта повышается, в зависимости от характеристик грузопотока, до 30 %, что позволяет более обоснованно выбирать скоростной режим.

Библиографический список

1. Шахмейстер, Л. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров [Текст] / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева. — М. : 1972. — 106 с.
2. Заика, В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта [Текст] / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2015. — № 3. — С. 82–88.
3. Ставицкий, В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера [Текст] / В. Н. Ставицкий // Наукові праці ДонНТУ. — 2012. — № 201. — С. 49–53.

4. Корнеев, С. В. Моделирование реальных нагрузок в шахтных ленточных конвейерах на основе уточнённого тягового расчёта [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих, В. Ю. Доброногова // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2019. — № 56. — С. 81–90.

5. Стадник, Н. И. Частотно-регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей [Текст] / Н. И. Стадник // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. — 2012. — Вып. 2. — С. 226–232.

6. Корнеев, С. В. Опыт моделирования забойных углетоковок [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих, В. Ю. Доброногова // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2018. — № 52. — С. 21–28.

7. Корнеев, С. В. Методика тягового расчёта шахтных ленточных конвейеров на основе компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Известия вузов. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 81–89.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., к.т.н., доц., и.о. зав. каф. ГЭиТС ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 03.10.19.

**д.т.н. Корнеев С. В., к.т.н. Доброногова В. Ю., Долгих В. П. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ОБҐРУНТУВАННЯ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ШАХТНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОЇ МЕТОДИКИ УТОЧНЕНОГО ТЯГОВОГО
РОЗРАХУНКУ**

Наведено аналіз швидкісних режимів роботи шахтних стрічкових конвеєрів та обґрунтування ефективності регулювання їх швидкості за фактором витрат енергії в умовах нерівномірних вантажопотоків із застосуванням спеціальної методики уточненого тягового розрахунку.

Ключові слова: *стрічковий конвеєр, швидкість, спеціальний метод уточненого тягового розрахунку.*

**Doctor of Technical Science Korneev S. V., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.
(DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**JUSTIFICATION OF THE RATE MODE OF MINE BELT CONVEYORS USING A SPECIAL
TECHNIQUE OF REFINED TRACTION CALCULATION**

There has been given the analysis of high-rate operating modes of mine belt conveyors and substantiation the efficiency of regulating their rate by the factor of energy costs within the conditions of non-uniform freight flows using special techniques of refined traction calculation.

Key words: *belt conveyor, rate, special method of refined traction calculation.*