

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АЛГОРИТМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЛЕНТЫ

В.В. Дмитриева<sup>1</sup>, П.Е. Сизин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия

<sup>2</sup> ИБО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

**Аннотация:** Поскольку шахтные потоки угля носят случайный характер, то для повышения эффективности использования транспортирующего груз ленточного конвейера рационально согласовать скорость движения ленты с величиной поступающего на нее груза. Выполнена оценка качества регулирования скорости при различных алгоритмах. Для дискретного регулирования оценена доля загрузки конвейера. Рассмотрено различное количество уровней переключения скорости, и для каждого случая определена погонная нагрузка  $q(t)$  конвейера и ее расхождение с номинальным значением  $q_{ном}$ . Для непрерывного регулирования выявлена величина средней квадратичной ошибки, возникающей в результате расхождения текущей скорости движения ленты с максимальной скоростью, пропорциональной величине грузопотока. Эти расчеты выполнены для двух случаев: если спектральная плотность случайного грузопотока описывается нормальным законом распределения и усеченно-нормальным. Рассмотрен вопрос энергоэффективности использования систем регулирования скорости ленты. Выявлено, что наибольшая эффективность достигается в том случае, если грузопоток является прерывистым процессом, который состоит из чередующихся периодов поступления угля и его отсутствия, а длительность этих периодов случайна. Здесь снижение энергозатрат на транспортировку полезного ископаемого может достигать 12% для трехуровневого регулирования, 13% для четырехуровневого регулирования и 15% — для непрерывного регулирования. Показано, что экономия электроэнергии возрастает, если есть значительные по длительности периоды отсутствия — в эти периоды велик выигрыш от движения ленты на малой скорости. Полученные решения могут быть применены для синтеза системы управления, регулирующей скорость магистрального конвейера.

**Ключевые слова:** дискретное регулирование скорости, оптимальные уровни переключения скорости, непрерывное регулирование скорости, средняя квадратичная ошибка регулирования, энергетическая эффективность регулирования, экономия электроэнергии.

**Для цитирования:** Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Эффективность эксплуатации ленточного конвейера в зависимости от алгоритмов регулирования скорости ленты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11. – С. 128–139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-128-139.

---

## Efficiency of belt conveyor as function of belt speed regulation algorithm

V.V. Dmitrieva<sup>1</sup>, P.E. Sizin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

---

**Abstract:** Coal flows in mines feature randomness. For this reason, it is reasonable to enhance efficiency of belt conveyors through coordination of belt speed and size of coal feed to be transported. The speed regulation quality of different control algorithms is evaluated. For the purpose of discontinuous control, the conveyor load factor is estimated. Different numbers of speed selection levels are analyzed, and the linear load per unit length of conveyor,  $q(t)$ , as well as its deviation from the rated value  $q_{rate}$  are determined for each scenario. For the continuous speed regulation, the RMS error of deviation of the current maximal belt speed proportional to the load size is evaluated. These calculations are performed for two cases of spectral density of random load: the normal distribution and the truncated normal distribution. The energy efficiency of the belt speed regulation systems is discussed. The highest energy efficiency is reached when the load flow is a discontinuous process of periods of coal feed and no coal feed, with random durations of these periods. Reduction in the energy consumption of mineral conveying can reach 12, 13 and 15% in case of three-level, four-level and continuous speed regulation, respectively. Energy saving grows when the no coal flow periods are long as the belt moves with lower speed in these periods. These solutions can be applied to the synthesis of a control system for a main conveyor speed.

**Key words:** discontinuous speed regulation, optimized speed selection levels, continuous speed regulation, RMS error of regulation, energy efficiency of regulation, energy saving.

**For citation:** Dmitrieva V. V., Sizin P. E. Efficiency of belt conveyor as function of belt speed regulation algorithm. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11):128-139. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-128-139.

---

### Постановка задачи

Хорошо известно, что грузопотоки, поступающие на ленточные конвейеры от горных машин, испытывают значительные колебания во времени, носящие случайный характер [1, 2]. В связи с этим встает вопрос регулирования скорости движения ленты конвейера. Высокопроизводительный конвейерный транспорт обычно рассчитывается по максимальной производительности комбайнов или других выемочных машин. Это гарантирует отсутствие существенных просыпей груза, но конвейер в этом случае оказывается недогруженным и в некоторые моменты даже вынужден работать вхолостую. В результате снижается пропускная способность под-

земного транспорта, значительно увеличивается стоимость доставки груза и возникает угроза аварии при сильной неравномерности грузопотока. Особенную актуальность эта проблема приобретает в случае конвейеров длиной в несколько километров, имеющих изгибы на пути следования [3]. Те же проблемы сохраняют значимость и в случае трубчатых конвейеров. Недогрузка конвейера приводит не только к избыточному расходу электроэнергии, но и к снижению всего комплекса технико-экономических показателей конвейеров (например, за счет более быстрого износа лент, редукторов и роликов).

Изменение скорости конвейера при регулировании вызывает ряд техниче-

ских проблем — перегрев привода, избыточное натяжение и проскальзывание ленты и даже просыпи транспортируемого груза. Эти проблемы обсуждаются в [4], возможная реализация системы управления — в [5]. Такое управление требует сложной системы датчиков и электронных схем, обрабатывающих их показания [6]. Вопросы энергетической эффективности управления рассматриваются в [7] в связи с процессом торможения ленты.

Как говорилось в предыдущих работах авторов [8–10], существенного повышения экономической эффективности можно добиться путем согласования режимов работы и параметров ленточного конвейера с фактическим входным грузопотоком [8].

Регулировать скорость движения ленты конвейера можно двумя способами: дискретно и непрерывно. Для оценки эффективности регулирования далее сравниваются оба способа.

### Качество при дискретном регулировании

Сначала проанализируем дискретный алгоритм регулирования [11]. Обозначим входящий грузопоток через  $Q(t)$ , скорость ленты конвейера через  $v(t)$ . Тогда текущая погонная нагрузка конвейера определится как:

$$q(t) = \frac{Q(t)g}{v(t)} \quad (1)$$

где  $Q(t)$  измеряется в кг/с;  $v(t)$  — м/с;  $q(t)$  — в Н/м;  $g$  — ускорение свободного падения, принимаемое равным 10 м/с<sup>2</sup>.

Конвейер должен быть выбран так, чтобы его максимальная скорость соответствовала максимально возможному грузопотоку от добычной машины  $Q_{\max}$ , что позволяет вывозить весь груз без просыпей. Погонная нагрузка, достигаемая при максимальном значении грузопотока, называется номинальной погонной нагрузкой,  $q_{\text{ном}}$ . Далее, необ-

ходимо определить количество промежуточных уровней регулирования  $Q_i$  и их числовые значения. Если грузопоток находится в интервале  $Q_{i-1} < Q(t) \leq Q_i$ , то конвейер движется со скоростью  $v_i$ , обеспечивая транспортировку груза без просыпей вплоть до уровня  $Q_i$ . Если в некоторый момент времени грузопоток превышает этот уровень, скорость переключается на следующий. Максимальная погонная нагрузка на всех уровнях одинакова:

$$\frac{Q_1 g}{v_1} = \frac{Q_2 g}{v_2} = \frac{Q_3 g}{v_3} = q_{\text{ном}}. \quad (2)$$

Верхний уровень определяется максимальным возможным грузопотоком. Предположим, что конвейер выбран таким образом, что его максимальная скорость как раз позволяет вывозить максимальный грузопоток без просыпей. При дискретном регулировании число промежуточных уровней, как правило, невелико. Пусть таких уровней будет три. Значения уровней регулирования могут быть найдены из соображения минимизации математического ожидания скорости конвейера, которое может быть записано в виде суммы вкладов от движения ленты со скоростями  $v_1, v_2$  и  $v_3$ :

$$m_{v_{cp}} = \frac{g}{q_{\text{ном}}} \left[ Q_1 \int_{-\infty}^{Q_1} f(Q) dQ + Q_2 \int_{Q_1}^{Q_2} f(Q) dQ + Q_3 \int_{Q_2}^{Q_3} f(Q) dQ \right] \quad (3)$$

Если верхний уровень  $Q_3$  задан, другие два определяем, отыскивая минимум этого выражения.

Основываясь на работах многочисленных авторов (напр., [12, 13]), примем, что величина грузопотока описывается нормальным распределением с плотностью вероятности:

$$f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Q} \exp \left( -\frac{(Q - m_Q)^2}{2\sigma_Q^2} \right). \quad (4)$$

Тогда для уровней  $Q_1$  и  $Q_2$  получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} Q_2 - Q_1 = \frac{F(Q_1)}{f(Q_1)}; \\ Q_3 - Q_2 = \frac{F(Q_2) - F(Q_1)}{f(Q_2)}; \end{cases} \quad (5)$$

где  $F(Q) = \int_{-\infty}^Q f(t)dt$  — функция распределения для  $f(Q)$ .

Решить систему (5) можно только численными методами. Для удобства использования разработанного алгоритма используем безразмерные переменные согласно [9]:

$$x_i = \frac{Q_i - m_Q}{\sigma_Q}. \quad (6)$$

Это позволит получить универсальный результат для нахождения оптимальных уровней регулирования вне зависимости от параметров реального грузопотока. Характеристики  $m_Q$  и  $\sigma_Q$  этого грузопотока достаточно подставить в (6) и выразить величины уровней регулирования  $Q_i$ .

Руководствуясь «правилом трех сигм», примем для верхнего уровня  $Q_3 = m_Q + 3\sigma_Q$ , то есть  $x_3 = 3$ . Численный расчет дает значения  $x_1 = -0,064$ ,  $x_2 = 1,128$ .

Для дальнейшего понадобятся оценки средней по времени погонной нагрузки на конвейер при различных алгоритмах регулирования.

Математическое ожидание погонной нагрузки при трехуровневом регулировании скорости есть:

$$\begin{aligned} M(q) = & \frac{g}{v_1} \int_{-\infty}^{Q_1} Q f(Q) dQ + \\ & + \frac{g}{v_2} \int_{Q_1}^{Q_2} Q f(Q) dQ + \frac{g}{v_3} \int_{Q_2}^{\infty} Q f(Q) dQ \end{aligned} \quad (7)$$

Более удобно использовать безразмерную нормированную величину:

$$\begin{aligned} \eta = \frac{M(q)}{q_{ном}} = & \frac{1}{Q_1} \int_{-\infty}^{Q_1} Q f(Q) dQ + \\ & + \frac{1}{Q_2} \int_{Q_1}^{Q_2} Q f(Q) dQ + \frac{1}{Q_3} \int_{Q_2}^{\infty} Q f(Q) dQ \end{aligned} \quad (8)$$

Для найденных значений  $x_i$  получаем  $\eta = 0,78$ , т.е. конвейер оказывается загружен на 78%. Некоторого увеличения параметра  $\eta$  можно добиться, уменьшая верхний уровень  $Q_3$ . Например, при уменьшении его до  $Q_3 = m_Q + 2\sigma_Q$  величина  $\eta$  становится равной 0,82. Но в этом случае придется мириться с просыпаниями: вероятность превышения грузопотоком  $Q_3$  этого значения равна  $0,5 - \Phi(2) \approx 0,0028$ .

В работе [9] отмечается, что нормальное распределение недостаточно корректно описывает наблюдающиеся грузопотоки ввиду наличия бесконечных «хвостов», отсутствующих на практике. Одним из вариантов модификации нормального распределения является его усеченная форма с плотностью вероятности:

$$\begin{aligned} f(x) = & \frac{\varphi(x) - \varphi(\Delta)}{2\Phi(\Delta) - 2\Delta\varphi(\Delta)}; \\ |x| \leq \Delta; \varphi(x) = & \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}; \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Delta$  — параметр, ограничивающий функцию  $f(x)$ ;  $\Phi(x)$  — функция распределения для  $f(x)$ .

У этого распределения полагается  $f(x) = 0$  при  $|x| > \Delta$ . Повторяя вычисления для усеченного нормального распределения с  $m_Q = 30$  т/мин,  $\Delta = 2$  получаем  $\eta = 0,83$ , т.е. в случае усеченного варианта распределения качество управления, определяемое коэффициентом  $\eta$ , также несколько возрастает.

Все предыдущие результаты получены для очень неравномерных грузопотоков. Если относительный разброс грузопотока (характеризуемый отноше-

нием  $\sigma_Q / m_Q$ ) уменьшается, качество управления возрастает. Рассмотрим величину:

$$1 - \eta = \int_{-\infty}^{Q_1} \frac{Q_1 - Q}{Q_1} f(Q) dQ + \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{Q_2 - Q}{Q_2} f(Q) dQ + \int_{Q_2}^{\infty} \frac{Q_3 - Q}{Q_3} f(Q) dQ = M \left( \frac{Q_i - Q}{Q_i} \right) \quad (10)$$

где  $Q_i$  – текущий уровень.

Формула (10) характеризует относительное отклонение величины грузопотока от соответствующего ей уровня регулирования. В аргументе математического ожидания (10) числитель пропорционален  $\sigma_Q$ , а знаменатель –  $m_Q$ . Тогда вся дробь пропорциональна  $\sigma_Q / m_Q$ . И действительно, для  $m_Q = 60$  т/мин,  $\sigma_Q = 10$  т/мин численный эксперимент дает  $\eta = 0,91$ , а  $1 - \eta = 0,09$  – в два раза меньше, чем для  $m_Q = 30$  т/мин,  $\sigma_Q = 10$  т/мин. Если имеется возможность сделать грузопоток более равномерным, например, используя накопительные бункеры, качество управления также очевидно возрастает. Следует, однако, отметить, что чем равномернее грузопоток, тем меньше отношение  $\sigma_Q / m_Q$ , тем меньше экономия, получаемая с помощью регулирования скорости.

Для грузопотоков с высокой неравномерностью эффективным может оказаться многоуровневое регулирование. Вновь используем простые модельные данные  $m_Q = 30$  т/мин,  $\sigma_Q = 10$  т/мин. Для четырех уровней скорости, принимая верхний равным  $x_4 = 3$ , получим:  $x_1 = -0,465$ ,  $x_2 = 0,431$ ,  $x_3 = 1,383$ , и  $\eta = 0,825$ . Качество управления, как видно, заметно возросло в сравнении с  $\eta = 0,78$  для трех уровней регулирования.

Точная реализация оптимальных уровней регулирования скорости воз-

можно не всегда. Для случая, если электропривод конвейера допускает лишь равноотстоящие значения скорости, регулирование описано в работе (патенте) профессора А.А. Реутова «Способ регулирования скорости ленты конвейера» [14]. Изобретение относится к способам регулирования скорости грузонесущего органа конвейера, в частности ленты. Задачей автора является повышение эффективности работы конвейера.

В настоящее время известны многоскоростные асинхронные электродвигатели, позволяющие дискретно изменять скорость движения ленты конвейера. Применение таких двигателей в приводах конвейеров обеспечивает возможность движения грузонесущего органа с несколькими фиксированными скоростями, однако эти скорости практически не согласуются с загрузкой конвейера. Это не позволяет эффективно регулировать скорость ленты соответственно поступающему грузопотоку, плавно изменять скорость без рывков. Автор предлагает изменять скорость движения ленты путем управления приводом конвейера. Предлагаемый алгоритм следующий.

Скорость ленты измеряют в месте загрузки и осуществляют одно из следующих действий:

- увеличивают скорость ленты на величину  $\Delta Q_1 g / q_{\text{НОМ}}$  в течение времени  $\Delta t_1$ , если поступающий грузопоток  $Q_{\text{вх}}$  превышает приемную способность конвейера  $Q_i$ , где  $\Delta Q_1$  – отношение номинальной производительности конвейера к выбранному количеству ступеней регулирования скорости ленты при увеличении скорости,  $q_{\text{НОМ}}$  – номинальная погонная нагрузка;
- уменьшают скорость ленты на величину  $\Delta Q_2 g / q_{\text{НОМ}}$  в течение времени  $\Delta t_2$ , если поступающий грузопоток  $Q_{\text{вх}}$  меньше приемной способности конвейера  $Q_i$  на величину  $\Delta Q_2$ , где  $\Delta Q_2$  – от-

ношение номинальной производительности конвейера к выбранному количеству ступеней регулирования скорости ленты при уменьшении скорости;

- оставляют скорость ленты без изменения, если величина поступающего грузопотока  $Q_{вх}$  находится в диапазоне значений от  $Q_i - \Delta Q_2$  до  $Q_i$ ;

- прекращают загрузку конвейера без изменения скорости ленты, если поступающий грузопоток  $Q_{вх}$  превышает максимальную приемную способность конвейера  $Q_i$ .

Время переключения конвейера с меньшей скорости на большую может быть найдено по формуле:

$$\Delta t_1 \geq \frac{\Delta Q_1 g}{q_{ном} a_1}, \text{ с} \quad (11)$$

где  $a_1$  — допустимое ускорение ленты.

Время переключения с большей скорости на меньшую  $\Delta t_2$  следует искать:

$$\Delta t_2 \geq \frac{\Delta Q_2 g}{q_{ном} a_2}, \text{ с} \quad (12)$$

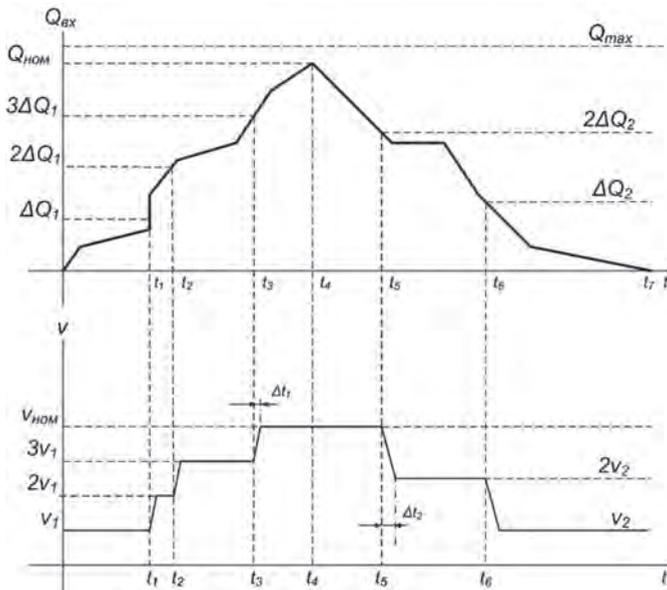
где  $a_2$  — допустимое замедление ленты.

Графическое представление предлагаемого способа регулирования изображено на рисунке.

При осуществлении такого регулирования должен быть получен результат, заключающийся в повышении эффективности работы конвейера за счет того, что ступенчатое регулирование скорости ленты обеспечит полную загрузку ленты без просыпания груза, уменьшит потери энергии и износ узлов конвейера.

В этом случае управление не совпадает с оптимальным, и значение  $\eta$  несколько снижается.

Если имеется возможность задавать промежуточные уровни скорости произвольно, пользуясь описанным выше алгоритмом нахождения оптимальных уровней, качество регулирования возрастает. Например, если для трехуровневого регулирования использовать и при росте, и при спаде грузопотока равноотстоящие уровни, то для взятых в качестве примера данных:  $m_Q(t) = 30$  т/мин,  $\sigma_Q(t) = 10$  т/мин, — получа-



Графики изменения входного грузопотока и скорости ленты

Graphs of changes in input mine freight traffic and the speed of the conveyor belt

ем для (8) значение  $\eta_1 = 0,749$ . При использовании оптимальных уровней получаем для (8) значение  $\eta_2 = 0,782$ . Для четырехуровневого регулирования качество управления повышается — соответственно  $\eta_1 = 0,794$  и  $\eta_2 = 0,825$ . Если грузопоток более равномерен, качество управления возрастает, но уменьшается относительный выигрыш от использования точно вычисленных уровней регулирования. Так, для усеченного нормального распределения с параметрами  $m_Q(t) = 30$  т/мин,  $\sigma_Q(t) = 10$  т/мин,  $\Delta = 2$  и четырех уровней регулирования имеем соответственно  $\eta_1 = 0,856$  и  $\eta_2 = 0,867$ , а в случае нормального распределения  $m_Q(t) = 60$  т/мин,  $\sigma_Q(t) = 10$  т/мин уже три уровня регулирования дают  $\eta = 0,858$  и  $\eta = 0,880$ . Следует отметить, что качество управления, характеризуемое величиной  $\eta$ , с ростом числа дискретных уровней растет весьма медленно, и использование систем с более чем четырьмя дискретными уровнями едва ли рационально. Для получения необходимо не менее шести уровней. Вопрос о целесообразности использования таких систем требует особого рассмотрения.

### Качество при непрерывном регулировании

В случае возможности непрерывного регулирования скорости по принципу следящей системы можно добиться практически стопроцентного использования производительности [15]. Ограничением на этом пути является только инерционность конвейера, не позволяющая в точности повторять изменения входящего грузопотока. Пусть спектральная плотность входящего грузопотока описывается выражением [10]:

$$S(\omega) = \frac{D_Q \alpha}{\pi(\alpha^2 + \omega^2)}, \quad (13)$$

где  $D_Q$  — дисперсия входящего грузопотока;  $\alpha$  — параметр, характеризующий

преобладающую частоту входного сигнала. Введем понятие среднего квадрата ошибки регулирования. Под этим будем понимать средний квадрат отклонения текущей скорости конвейера от теоретической, пропорциональной грузопотоку  $V(t) = Q(t)g / q_{ном}$ . Если спектральная плотность грузопотока равна (13), то величина этого показателя качества регулирования равна:

$$\tilde{\varepsilon}_{min}^2 = \frac{\sigma_v^2}{4\pi} (1 - e^{-2\alpha t_0}); \quad \sigma_v = \frac{\sigma_Q g}{q_{ном}}. \quad (14)$$

Здесь  $t_0$  — время запаздывания управляющей системы. Оценим среднее отклонение скорости. При  $\alpha t_0 \gg 1$  в формуле (14) можно пренебречь экспонентой в сравнении с единицей:

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{min} &\approx \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{min}^2} = \frac{\sigma_v}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - e^{-2\alpha t_0}} \approx \\ &\approx \frac{\sigma_v}{2\sqrt{\pi}} \approx \frac{\sigma_v}{3,54} \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, при  $m_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$  ошибка оказывается приблизительно равной  $\tilde{\varepsilon}_{min} = m_v(t) / 10$ . Нужно учесть, что при стохастическом процессе выходной сигнал половину времени находится несколько выше входного, а половину времени ниже. Половину времени конвейер оказывается недогружен примерно на 10%, половину времени на столько же перегружен. Если считать, что у конвейера имеется конструктивный ресурс, позволяющий избежать просыпей при незначительном превышении грузопотоком величины  $m_Q(t)$ , то половину времени конвейер будет загружен полностью, другую половину времени — в среднем на 90%, и можно сказать, что конвейер оказывается загруженным примерно на 95%.

С учетом того, что грузопотоки изменяются весьма медленно, много медленнее переходных процессов в ленте, возникающих при резких изменениях скорости ее движения, качество управ-

ления оказывается еще выше. Для приведенного в начале работы значения  $\alpha \approx 0,25 \text{ мин}^{-1} \approx 0,004 \text{ с}^{-1}$  и времени релаксации  $t \approx 20 \text{ с}$  параметр  $2\alpha t_0$  оказывается малым. Используя известную асимптотику  $e^t \approx 1 + t$ , получаем:

$$\tilde{\varepsilon}_{\min} \approx \frac{\sigma_v}{\sqrt{\pi}} \alpha t_0 \approx 0,09 \sigma_v \quad (16)$$

При  $m_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$  отклонение составляет примерно 3% от математического ожидания, а конвейер оказывается загруженным на 98,5%. Это означает, что регулирующая система успевает с очень хорошей точностью повторить входящий сигнал и сохранять полную загрузку конвейера без просыпей, удерживая  $Qg/v = q_{\text{ном}} = \text{const}$ .

### Энергетическая эффективность

Обратимся теперь к вопросу энергозатрат при работе ленточного конвейера. Тяговое усилие при движении ленты:

$$F = k(q + 2q_n + q'_p + q''_p)w'L, \quad (17)$$

где  $q_n, q'_p, q''_p$  — распределенная погонная нагрузка соответственно от ленты, верхних и нижних роликоопор;  $k$  — коэффициент, учитывающий длину конвейера, при  $L \geq 1 \text{ км}$  он близок единице, для коротких конвейеров его значение может достигать 4 [16];  $w'$  — коэффициент сопротивления, родственный коэффициенту трения, для современных качественно собранных конвейеров он не превышает 0,02 [16];  $L$  — длина конвейера, м.

Для нахождения величины  $q_n$ , измеряемой в Н/м, воспользуемся равенством  $q_n = aB$ , где  $B$  — ширина ленты, м (мы примем  $B = 2$ );  $a$  — безразмерный коэффициент, характеризующий условия эксплуатации конвейера. Для легких условий эксплуатации он принимается равным 100 [16]. Вклад в распределенную линейную нагрузку от верхних и нижних роликоопор находится по формулам

$$q'_p = \frac{G'}{l'}; q''_p = \frac{G''}{l''} \quad (18)$$

где  $l'$  — расстояние между роликоопорами на верхней ветке ленты, для широкой ленты ( $B = 2 \text{ м}$ ) его можно принять равным 1 м;  $l''$ , м — расстояние между роликоопорами на нижней ветви, может быть принято 2 м. Константы  $G'$  и  $G''$  определяются из формул  $G' = 0,0304D_p^2$ ;  $G'' = 0,026D_p^2$  [16]. Здесь  $D_p$  — диаметр ролика в мм, при  $D_p = 100$  получаем  $q'_p = 304 \text{ Н/м}$ ,  $q''_p = 130 \text{ Н/м}$ . Для вклада в погонную нагрузку сопротивления движению самой конструкции конвейера получаем

$$2q_n + q'_p + q''_p \approx 400 \text{ Н/м} + 304 \text{ Н/м} + 130 \text{ Н/м} = 834 \text{ Н/м} \quad (19)$$

Вычислим требуемую мощность привода, обеспечивающую движение ленты с требуемой скоростью:

$$N = \frac{Fv}{\eta}, \quad (20)$$

где  $\eta$  — КПД электропривода.

Используя (17) и учитывая, что  $qv = Qg$ , получаем:

$$N = \frac{kw'L}{\eta} [Qg + v(2q_n + q'_p + q''_p)] \quad (21)$$

Для оценки средней мощности привода за длительный период работы нам потребуется найти среднее значение скорости, определяемое как ее математическое ожидание. Для случая трехуровневого дискретного регулирования средняя скорость:

$$v_{cp} = v_1P(v_1) + v_2P(v_2) + v_3P(v_3), \quad (22)$$

где  $P(v_i)$  — вероятности дискретных значений скорости.

В безразмерных величинах  $x_i$  (6):

$$v_{cp} = v_{\max} \left( \frac{m_Q + x_1\sigma_Q}{m_Q + 3\sigma_Q} (0,5 + \Phi(x_1)) + \frac{m_Q + x_2\sigma_Q}{m_Q + 3\sigma_Q} (\Phi(x_2) - \Phi(x_1)) + 0,5 - \Phi(x_2) \right) \quad (23)$$

Будем считать, что при отсутствии регулирования скорость ленты всегда равна  $v_{\max}$  во избежание просыпей. Тогда для оценки энергоэффективности регулирования найдем отношение мощности  $N$  при наличии регулирования к мощности  $N_0$  в его отсутствие:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{m_Q g + v_{cp} (2q_l + q'_p + q''_p)}{m_Q g + v_{\max} (2q_l + q'_p + q''_p)} \quad (24)$$

Используем для расчета данные:  $m_Q(t) = 30$  т/мин,  $\sigma_Q(t) = 10$  т/мин и вычислим по (23) среднюю скорость для трехуровневого регулирования:  $v_{cp} = 0,638 v_{\max}$ , для четырехуровневого регулирования при тех же начальных данных  $v_{cp} = 0,599 v_{\max}$ , для непрерывного регулирования, считая упрощенно, что скорость в точности следует за грузопотоком и  $\eta = 1$ , получаем  $v_{cp} = 0,5 v_{\max}$ . Отношение (24) равно 0,91 в первом случае, 0,90 во втором и 0,875 в третьем.

Ясно, что при улучшении регулирования снижается средняя скорость ленты и за счет этого уменьшается расход энергии. Заметим, что если пренебречь силами сопротивления самого конвейера, то снизить энергозатраты за счет регулирования скорости невозможно, поскольку, как следует из (21), при отсутствии сопротивления мощность, а значит, и работа по вывозу заданной массы груза на заданное расстояние при заданном коэффициенте трения есть величина постоянная, не зависящая от скорости ленты.

Для оценки технической эффективности конвейера, срока службы ленты и роликов и т.д. необходимо знать пробег ленты за время работы. Обозначая это время через  $T$ , получаем для пробега  $S$  очевидное выражение  $S = v_{cp} T$ . В частности, при реализации непрерывного регулирования, можно добиться снижения пробега ленты в два раза,  $S = 0,5 v_{\max} T$ .

В практике горнодобывающих предприятий распространен также случай [12], когда грузопоток представляет собой прерывистый процесс, который состоит из многократно чередующихся в течение смены периодов поступления полезного ископаемого и его отсутствия, причем длительность этих периодов случайна. Отсутствие груза на конвейере бывает связано с остановкой горной машины для осмотра, выполнения различных технологических операций на концевых участках забоя, устранения технических неисправностей и т.д.

По данным работ [12, 13] длительность этих периодов случайна и описывается показательным распределением с разными константами для периодов наличия и отсутствия груза. Пусть плотность распределения длительности периода наличия груза:

$$f_n(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (25)$$

а аналогичная плотность для его отсутствия:

$$f_o(t) = \mu e^{-\mu t}. \quad (26)$$

Математическое ожидание длительности одного периода поступления груза равно  $1/\lambda$ , аналогичная величина для отсутствия груза равна  $1/\mu$ . Поскольку эти состояния чередуются, очевидно, что вероятность отсутствия груза равна

$$\frac{1/\lambda}{1/\mu + 1/\lambda} = \frac{\mu}{\lambda + \mu},$$

вероятность наличия груза  $\frac{\lambda}{\lambda + \mu}$ .

На время отсутствия грузопотока ленту конвейера можно останавливать, однако многократные процессы пуска и остановки ускоряют износ системы привод-конвейер и являются нежелательными. Кроме того, для привода являются нежелательными частые пусковые процессы, сопровождающиеся большими бросками «пускового» тока. Возможным решением является движение ленты конвейера без груза с небольшой ско-

ростью  $v_0$ , называемой ползучей скоростью. Примем для  $v_{\max} = 3$  м/с значение  $v_0 = 0,3$  м/с. Средняя скорость движения ленты конвейера при реализации такого алгоритма, очевидно, будет равна:

$$\bar{v} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} v_{cp} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} v_0 \quad (27)$$

Пусть суммарная длительность периодов поступления грузопотока на конвейер составляет 75% всей длительности работы, длительность отсутствия — 25%, что согласуется с данными работы [16]. Тогда

$$\frac{N}{N_0} = \frac{m_Q g + \bar{v}(2q_n + q'_p + q''_p)}{m_Q g + v_{\max}(2q_n + q'_p + q''_p)} \quad (28)$$

В этом случае отношение (24) будет равно 0,88 для трехуровневого регулирования, 0,87 для четырехуровневого регулирования и 0,85 — для непрерывного регулирования. Видно, что экономия электроэнергии возрастает, если есть значительные по длительности периоды отсутствия — в эти периоды, ра-

зумеется, велик выигрыш от движения ленты на малой скорости.

### Выводы

Таким образом, отрицательные технологические и экономические факторы, вызванные неравномерностью поступления грузопотока на ленточный конвейер, могут быть существенно уменьшены за счет применения различных алгоритмов регулирования скорости конвейера. В работе рассмотрена сравнительная эффективность дискретного регулирования скорости с различными алгоритмами нахождения промежуточных уровней скорости, а также непрерывного регулирования. Наибольшая экономия энергии получается при реализации непрерывного алгоритма регулирования, когда скорость ленты пропорциональна величине входящего грузопотока. Полученные решения могут быть применены для синтеза управляющей системы, регулирующей скорость конвейера в зависимости величины входного грузопотока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко В. П. Методы описания величины случайного грузопотока ленточных конвейеров горных предприятий на основе ее эмпирических распределений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № 3. — С. 287–289.
2. Прокуда В. М., Мишанский Ю. А., Проценко С. Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» // Гірнична електромеханіка та автоматика. — 2012. — № 88. — С. 107–111.
3. Галкин В. И. Конструктивные особенности ленточных конвейеров с пространственной трассой для транспортирования сыпучих материалов // Горная промышленность. — 2018. — № 1. — С. 84–86.
4. He D., Pang Y., Lodewijks G., Liu X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials // Powder Technology. 2018. Vol. 327. Pp. 408–419. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.002.
5. He D., Pang Y., Lodewijks G. Speed control of belt conveyors during transient operation // Powder Technology. 2016. Vol. 301. Pp. 622–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.004.
6. Li Zh., Zeng F., Yan C., Wang J., Tang L. Design of belt conveyor speed control system of «Internet+» / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 563. No 4. DOI: 10.1088/1757-899X/563/4/042088.
7. Bebic M., Ristic L. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2018. № 1. Pp. 51–60.

8. Дмитриева В. В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера. Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. — М., 2005. — 162 с.

9. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Определение величин и числа оптимальных уровней переключения скорости движения ленты конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 147–155. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-147-155.

10. Дмитриева В. В., Сизин П. Е. Непрерывное регулирование скорости ленточного конвейера в случае усеченной спектральной плотности грузопотока // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 130–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138.

11. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г., Лобачева А. К. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточного конвейера. — М.: изд. МГИ, 1974. — 45 с.

12. Мерцалов Р. В. Исследования подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. — М., 1968.

13. Разумный Ю. Т., Заика В. Т., Прокуда В. Н. Формирование характеристик потока угля конвейерного транспорта по данным моделирования грузопотоков из очистных забоев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. — 2013. — № 2 (15). — С. 201–206.

14. Реутов А. А. Патент № 2600404. Способ регулирования скорости ленты конвейера. 2015.10.14.

15. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. Теория автоматического управления техническими системами: учебное пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993. — 492 с.

16. Дмитриев В. Г., Вержанский А. П. Основы теории ленточных конвейеров. — М.: Изд-во «Горная книга», 2017. — 590 с. **ГИАЗ**

## REFERENCES

1. Dyachenko V. P. Methods of describing of the random freight traffic value of the band conveyors of mining enterprises on the basis of its empirical distributions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no 3, pp. 287–289. [In Russ].

2. Prokuda V. M., Mishansky Yu. A., Prozenko S. N. Investigation and evaluation of the freight traffic on the magistral conveyor transport of the PSP «Mine «Pavlogradskaya» PAO «DTEK Pavlogradugol». *Girnichа elektromekhanika ta avtomatika*. 2012, no 88, pp. 107–111.

3. Galkin V. I. Design features of belt conveyors with a spatial route for transporting bulk materials. *Russian Mining Industry*. 2018, no 1, pp. 84–86. [In Russ].

4. He D., Pang Y., Lodewijks G., Liu X. Healthy speed control of belt conveyors on conveying bulk materials. *Powder Technology*. 2018. Vol. 327. Pp. 408–419. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.01.002.

5. He D., Pang Y., Lodewijks G. Speed control of belt conveyors during transient operation. *Powder Technology*. 2016. Vol. 301. Pp. 622–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.07.004.

6. Li Zh., Zeng F., Yan C., Wang J., Tang L. Design of belt conveyor speed control system of «Internet+». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 563. No 4. DOI: 10.1088/1757-899X/563/4/042088.

7. Bebic M., Ristic L. Speed controlled belt conveyors: drives and mechanical. *Advances in Electrical and Computer Engineering*. 2018, no 1. Pp. 51–60.

8. Dmitrieva V. V. *Razrabotka i issledovanie sistemy avtomaticheskoy stabilizatsii pogonnoy nagruzki magistral'nogo konveyera* [Development and research of the system of automatic stabilization of linear load of the main conveyor], Candidate's thesis, Moscow, 2005, 162 p.

9. Dmitrieva V. V., Sizin P. E. Value and number of optimal gear change levels for conveyor belt velocity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 6, pp. 147–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-147-155.

10. Dmitrieva V. V., Sizin P. E. Continuous belt conveyor speed control in case of reduced spectral density of load flow. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 2, pp. 130–138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138.

11. Shakhmeyster L. G., Dmitriev V. G., Lobacheva A. K. *Dinamika gruzopotokov i regulirovanie skorosti lentochnogo konveyera* [Dynamics of freight traffic and regulating of the speed of a belt conveyor], Moscow, izd. MGI, 1974, 45 p.

12. Mertsalov R. V. *Issledovaniya podzemnykh gruzopotokov i ustanovlenie sposobov povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya shakhtnykh konveyerov* [Study of underground freight traffics and finding ways to improve the efficiency of use of mining conveyors], Candidate's thesis, Moscow, 1968.

13. Razumnyy Yu. T., Zaika V. T., Prokuda V. N. Formation of characteristics of the coal flow of conveyor transport based on the data of modeling of mine freight traffic from treatment faces. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Elektrotehnika i energetika.* 2013, no 2 (15), pp. 201–206.

14. Reutov A. A. Patent RU 2600404. 2015.10.14.

15. Solodovnikov V. V., Plotnikov V. N., YAKovlev A. V. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnicheskimi sistemami: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theory of automatic control of technical systems: studies. Handbook for universities], Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1993, 492 p.

16. Dmitriev V. G., Verzhanskiy A. P. *Osnovy teorii lentochnykh konveyerov* [Grounds of the belt conveyor theory], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2017, 590 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Дмитриева Валерия Валерьевна* — канд. техн. наук, доцент,  
РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина,  
e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,

*Сизин Павел Евгеньевич* — канд. физ.-мат. наук, доцент,  
ИБО НИТУ «МИСиС», e-mail: mstranger@list.ru.

**Для контактов:** Сизин П.Е., e-mail: mstranger@list.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Dmitrieva*, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Gubkin Russian State University of Oil and Gas  
(National Research University),

119991, Moscow, Russia, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,

*P.E. Sizin*, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,  
Institute of Basic Education,

National University of Science and Technology «MISIS»,  
119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru.

**Corresponding author:** P.E. Sizin, e-mail: mstranger@list.ru.

Получена редакцией 24.02.2020; получена после рецензии 28.04.2020; принята к печати 10.10.2020.

Received by the editors 24.02.2020; received after the review 28.04.2020; accepted for printing 10.10.2020.

