ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):130-138
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.647.21 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138

НЕПРЕРЫВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА В СЛУЧАЕ УСЕЧЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ГРУЗОПОТОКА

В.В. Дмитриева[1], П.Е. Сизин[2]

[1] РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия
[2] ИБО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

Аннотация: Актуальной проблемой горных транспортных систем является повышение эффективности использования конвейерных линий. Рассматривается непрерывное регулирование скорости. Исследование проводилось с целью построения передаточной функции для следящей системы, воспроизводящей входной сигнал $Q(t)$. Задача ограничена повторением входящего сигнала с некоторым запаздыванием по времени t_0, поскольку технически нереализуемо мгновенное изменение скорости движения ленты конвейера, соответствующее изменению грузопотока. Если определить спектральную плотность сигнала скорости, как пропорциональную спектральной плотности грузопотока $S_Q(\omega)$, то с применением метода, предложенного В.В. Солодовниковым, получается выражение для передаточной функции: $\Phi(j\omega) = e^{-\alpha t_0}$. Найден минимальный средний квадрат ошибки, нужный для оценки качества регулирования. Предложено уточнение для выражения спектральной плотности. Рассмотрена усеченная спектральная плотность и найдена новая передаточная функция, а также минимальный средний квадрат ошибки регулирования. С учетом того, что грузопотоки изменяются много медленнее релаксационных процессов в конвейере, качество управления оказывается еще выше. При $M_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$ это отклонение составляет примерно 3% от математического ожидания, а конвейер оказывается загруженным на 98,5%. Значит, регулирующая система успевает с хорошей точностью повторить входящий сигнал и сохранить полную загрузку конвейера без просыпей, удерживая $Q/v = h$ = const.

Ключевые слова: ленточный конвейер, система управления скоростью, оптимальная передаточная функция, шахтный грузопоток, стохастический процесс, спектральная плотность, корреляционная функция, минимальный средний квадрат ошибки регулирования.

Для цитирования: *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.

Continuous belt conveyor speed control in case of reduced spectral density of load flow

V.V. Dmitrieva[1], P.E. Sizin[2]

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia,
[2] Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia e-mail: mstranger@list.ru

© В.В. Дмитриева, П.Е. Сизин. 2020.

Abstract: Mine transportation is currently concerned with improvement of conveyor efficiency. This study addresses the continuous conveyor speed control. The study was aimed to describe a transfer function for a servo-mechanism realizing an input signal—$Q(t)$. The problem is complicated by the input signal repeat at a certain time lag t_0 as the instantaneous change in the belt conveyor speed pursuant to the load flow variation is impossible. In case that the spectral density of the speed signal is proportional to the spectral density of the load flow, $S_Q(\omega)$, using the method proposed by V.V. Solodovnikov, it is possible to arrive to the transfer function expression: $\Phi(j\omega) = e^{-\alpha t_0}$. The minimum mean square error for the control performance evaluation is found. Adjustment of the spectral density expression is proposed. The reduced spectral density is considered, as well as the new transfer function and the minimum mean square error of control are found. Load flows change much slower than relaxation processes in conveyors, the control performance becomes even better. At $M_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$ this improvement makes approximately 3% of mathematical expectation while conveyors become loaded up to 98.5 %. %. Accordingly, the controlling system has enough time to repeat input signals at a high accuracy and to keep full load of the conveyor without spillage by maintaining $Q/v = h$ = const.

Key words: belt conveyor, speed control, optimized transfer function, mine load flow, stochastic process, spectral density, correlation function, minimum mean square error of control.

For citation: 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;(2):130-138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-130-138.

Корреляционный анализ шахтных грузопотоков

Одной из актуальных проблем горных предприятий является повышение экономической эффективности эксплуатации конвейерных установок. Причиной невысокой степени использования конвейерных транспортных схем является неравномерность шахтных грузопотоков [1]. Работа ленточного конвейера с постоянной скоростью приводит к существенной недогрузке линии, а в некоторые промежутки времени — к работе вхолостую. Следовательно, себестоимость транспортировки увеличивается. Особенно ощутимы такие потери в случае магистральных угольных конвейеров, длина которых может превышать 20 км [2]. Кроме того, растет степень износа конструктивных элементов конвейера — ленты, редукторов, роликов. Моделирование поведения конвейерной ленты и конструкций, обеспечивающих ее движение — уже сложная задача, решаемая в настоящее время численными методами [3, 4]. Нетривиальной оказывается и проблема удержания ленты на поворотах конвейера [5].

В этой связи представляется актуальным вопрос регулирования скорости конвейера. Если изменять скорость движения ленты в соответствии с фактической величиной поступающего от выемочной машины грузопотока [6], можно значительно повысить эффективность использования конвейерного транспорта и увеличить надежность конструкции конвейера. Основным затруднением при такой постановке задачи является случайный характер грузопотоков, поэтому еще с прошлого столетия при описании грузопотоков начали пользоваться понятиями и методами теории случайных процессов.

Исследованием шахтных грузопотоков занимались такие известные ученые, как Г.И. Солод, Л.Г. Шахмейстер, Р.В. Мерцалов, О.М. Зарецкий и др. Р.В. Мерцаловым [7] был надежно установлен случайный, недетерминированный характер грузопотоков. На шахтах Карагандинского угольного бассейна им были получены сменные реализации случайного

грузопотока $Q(t)$, и после статистической обработки определены их количественные характеристики. В ходе его работы получила подтверждение идея о стационарности непрерывного грузопотока, а его корреляционную функцию удалось аппроксимировать экспонентой:

$$R_Q(\tau) = D_Q e^{-\alpha|\tau|}, \qquad (1)$$

где $\alpha > 0$ — характеристика грузопотока, зависящая от горно-геологических и технологических условий; D_Q — величина дисперсии грузопотока.

В диссертации О.М. Зарецкого [8] были построены графики корреляционных функций непрерывных грузопотоков. Сглаженные оценки спектральных плотностей аппроксимированы выражением:

$$S(\omega) = \frac{D_Q \alpha}{\pi\left(\alpha^2 + \omega^2\right)}, \qquad (2)$$

обратное преобразование Фурье которого представляет собой экспоненциальную функцию $R(\tau) = De^{-\alpha_c|\tau|}$.

В результате проведенных О.М. Зарецким исследований были сделаны основные выводы:

- минутные грузопотоки имеют нормальное распределение;
- спектральная плотность распределена в основном (89—94%) в диапазоне частот 0—0,04 Гц;
- мощность процесса равна нулю уже на частотах 0,08—0,07 Гц.

Представляют интерес выполненные в 1992 г. В.В. Брагиным, Л.Д. Ларичкиным, А.Л. Шевелевым исследования по изучению грузопотоков из забоев на шахте «Распадская» [9]. Авторы подтвердили, что закон распределения шестидесятисекундных грузопотоков носит нормальный характер. В работе рассматриваются грузопотоки именно такой длительности, поскольку эта длительность мала по сравнению с длительностью рабочей смены, и полученные реализации хорошо описывают поступление угля из забоя.

Еще следует отметить, что длительность релаксационных процессов в ленте километрового конвейера заканчивается в зависимости от конструктивных особенностей (тип ленты, материал, ширина) за 20—30 с, следовательно, более частые изменения величины грузопотока конвейер не успеет отработать. Авторами вычислялись следующие характеристики грузопотока $Q(t)$: математическое ожидание $m_Q(t)$, дисперсия $D_Q(t)$, корреляционная функция $R_Q(\tau)$ и спектральная плотность $S_Q(\omega)$.

В качестве исходных данных для дальнейшей разработки непрерывной системы управления скоростью ленты конвейера используем статистические параметры грузопотоков, приведенные в таблице.

И в настоящее время продолжаются исследования статистических характеристик шахтных грузопотоков [10] и их моделирование [11, 12].

Постановка задачи

Г.И. Солодом в статьях [13, 14] обосновывалась возможность и целесообразность регулирования скорости ленточного конвейера в зависимости от величины поступающего на него грузопотока. В этих работах предложено строить систе-

Комбайн 1К-52—111	Комбайн ЛГД-1
$M_Q(t)$ = 2,37 т/мин	$M_Q(t)$ = 1,71 т/мин
$\sigma_Q(t)$ = 0,94 т/мин	$\sigma_Q(t)$ = 0,68 т/мин
$R_Q(\tau) = e^{-0.249\|\tau\|}$	$R_Q(\tau) = e^{-0.216\|\tau\|}$
$S_Q(\omega) = \frac{0,22}{\pi(0,0625 + \omega^2)}$	$S_Q(\omega) = \frac{0,098}{\pi(0,046 + \omega^2)}$

мы управления либо по принципу стабилизации регулируемого параметра на определенном уровне, либо по принципу следящих систем, в которых выходная величина воспроизводит изменение входного сигнала.

В разрабатываемых по этим принципам системах управления скоростью движения ленты конвейера регулируемым параметром является фактическая погонная нагрузка $q_{факт}$, возмущающим воздействием — грузопоток $Q(t)$, а заданием — скорость движения ленты $v(t)$, пропорциональная расчетной нагрузке $q_н$ [15—17].

Определение оптимальной передаточной функции системы управления

Регулировать скорость движения ленты конвейера можно двумя способами: дискретно и непрерывно. В настоящей работе рассматривается непрерывное регулирование скорости [18]. Нашей целью является построение передаточной функции для следящей системы управления, воспроизводящей получаемый сигнал.

Пусть случайный сигнал $X(t)$ поступает на вход линейной динамической системы, на выходе которой получаем случайный сигнал $Y(t)$. Необходимо отметить, что точное воспроизведение входящего сигнала (мгновенное изменение скорости движения ленты конвейера, соответствующее изменению грузопотока) технически нереализуемо. Ограничимся задачей повторения входящего сигнала с некоторым запаздыванием по времени t_0. Спектральная плотность $S_Y(\omega)$ случайной величины на выходе линейной динамической системы может быть найдена как:

$$S_Y(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_X(\omega), \qquad (3)$$

где $W(j\omega)$ — частотная передаточная функция искомой системы; $S_X(\omega)$ — спектральная плотность входного сигнала.

Тогда:

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{S_Y(\omega)}{S_X(\omega)}. \qquad (4)$$

Используя работы Р.В. Мерцалова, запишем корреляционную функцию минутного и тридцатисекундного шахтного грузопотока в виде (1). Пользуясь комплексной формой преобразования Фурье, определим спектральную плотность $S_Q(\omega)$ по формуле (2). Разложим спектральную плотность $S_Q(\omega)$ грузопотока на два множителя. Все полюса одного из них лежат в верхней комплексной полуплоскости, а другого — в нижней [19, 20]:

$$S_Q(\omega) = \frac{D_Q\alpha}{\pi(\alpha^2+\omega^2)}. \qquad (5)$$

Заменим $(\alpha^2+\omega^2) = (\omega + j\alpha)(\omega - j\alpha)$,

тогда

$$\frac{D_Q\alpha}{\pi(\omega + j\alpha)(\omega - j\alpha)} = \Psi(j\omega)\Psi^*(-j\omega). \qquad (6)$$

Следовательно, искомые множители имеют вид:

$$\Psi(j\omega) = \frac{\sqrt{D_Q\alpha}}{\sqrt{\pi}(\omega - j\alpha)},$$

и

$$\Psi^*(-j\omega) = \frac{\sqrt{D_Q\alpha}}{\sqrt{\pi}(\omega + j\alpha)}. \qquad (7)$$

Определим спектральную плотность сигнала скорости, подлежащего отработке, как пропорциональную спектральной плотности грузопотока $S_Q(\omega)$:

$$S_v(\omega) = \frac{D\alpha}{\pi h^2(\alpha^2+\omega^2)};\ h = \frac{Q_{max}}{v_{max}}. \qquad (8)$$

Общая формула для передаточной функции имеет вид:

$$\Phi(j\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(j\omega)}\int_0^\infty e^{-j\omega t}dt\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_Q(\omega)}{\psi^*(j\omega)}e^{j\omega(t+t_0)}d\omega. \qquad (9)$$

Здесь $\psi(j\omega) = -jW(j\omega) = \frac{\sqrt{D\alpha}}{\sqrt{\pi}h(\omega - j\alpha)}$.

Введем для удобства дополнительные обозначения:

$$\beta(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{S_Q(\omega)}{\psi^*(j\omega)}e^{j\omega(t+t_0)}d\omega; \quad (10)$$

$$B(j\omega)=\int_0^{\infty}e^{-j\omega t}\beta(t)dt;\ \Phi(j\omega)=\frac{B(j\omega)}{\psi(j\omega)}. \quad (11)$$

Вычисляя интеграл с помощью теории вычетов, находим

$$\beta(t)=j\frac{1}{h}\sqrt{\frac{\alpha D}{\pi}}e^{-\alpha(t+t_0)}.$$

И после стандартного интегрирования получаем выражение для передаточной функции:

$$\Phi(j\omega)=e^{-\alpha t_0}. \quad (12)$$

Минимальный средний квадрат ошибки регулирования [21] определяется формулой

$$\varepsilon^2_{\min}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{t_9}\gamma^2(t)dt;$$

$$\gamma(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\psi(j\omega)e^{j\omega t}d\omega. \quad (13)$$

В данном случае находим

$$\varepsilon^2_{\min}=\frac{D}{4\pi h^2}\left(1-e^{-2\alpha t_0}\right). \quad (14)$$

Выражение для спектральной плотности (2) оказывается, однако, недостаточным для описания реальных грузопотоков [22]. Их частотный спектр не простирается до бесконечности в область высоких частот, кроме того, конвейер обладает значительной инерционностью и не может реагировать на частоты, превышающие 0,1 Гц. Такие частоты, по данным О.А. Зарецкого, как раз и отсутствуют в спектре грузопотока. Рассмотрим в этой связи усеченную спектральную плотность $\tilde{S}_Q(\omega)$ (все величины, относящиеся к усеченному спектру, будем отмечать тильдой):

$$\tilde{S}_Q(\omega)=S_Q(\omega)f(\omega);$$

где $f(\omega)=\dfrac{1}{1+\left(\dfrac{\omega}{\beta}\right)^4}=\dfrac{\beta^4}{\omega^4+\beta^4}$. (15)

Здесь β — параметр, ограничивающий спектр частот сверху; функция $f(\omega)$ близка к единице при $|\omega|<\beta$ и близка к нулю при $|\omega|>\beta$. Теперь

$$\tilde{\psi}(j\omega)=$$

$$=\frac{\sqrt{D\alpha}\beta^2}{\sqrt{\pi}h(\omega-j\alpha)\left(\omega-\dfrac{j+1}{\sqrt{2}}\beta\right)\left(\omega-\dfrac{j-1}{\sqrt{2}}\beta\right)}. \quad (16)$$

В разложении $\tilde{\Psi}(j\omega)$ на элементарные дроби

$$\tilde{\psi}(j\omega)=$$

$$=\frac{a_1}{\omega-j\alpha}+\frac{a_2}{\omega-\dfrac{j+1}{\sqrt{2}}\beta}+\frac{a_3}{\omega-\dfrac{j-1}{\sqrt{2}}\beta}, \quad (17)$$

найдем множители a_i методом неопределенных коэффициентов. Получаем

$$a_1=\frac{\sqrt{D_Q\alpha}\beta^2}{\sqrt{\pi}h\left(\alpha^2+\beta^2-\sqrt{2}\alpha\beta\right)}$$

$$a_{2,3}=\frac{\sqrt{D_Q\alpha}\beta}{\sqrt{\pi}h\left(\dfrac{\beta}{\sqrt{2}}\pm j\left(\dfrac{\beta}{\sqrt{2}}-\alpha\right)\right)}; \quad (18)$$

Теперь

$$\tilde{\beta}(t)=j\sum a_i e^{-j\lambda_i t};\ \lambda_1=j\alpha;$$

$$\lambda_{2,3}=\frac{j\beta}{\sqrt{2}}\pm\frac{\beta}{\sqrt{2}}. \quad (19)$$

Новая передаточная функция

$$\tilde{B}(j\omega)=\sum\frac{a_i}{\omega-\lambda_i}e^{j\lambda_i t};$$

$$\tilde{\Phi}(j\omega)=\frac{\sum\dfrac{a_i}{\omega-\lambda_i}e^{j\lambda_i t}}{\sum\dfrac{a_i}{\omega-\lambda_i}}. \quad (20)$$

При $\beta >> \alpha$ имеем $|\lambda_1| << |\lambda_{2,3}|$, и тогда для получения минимального среднего квадрата ошибки регулирования можно ограничиться первым слагаемым в (17). Тогда

$$\tilde{\varepsilon}^2_{\min} = \frac{D\beta^4}{4\pi h^2\left(\alpha^2+\beta^2-\sqrt{2}\alpha\beta\right)^2}\left(1-e^{-2\alpha t_0}\right). \quad (21)$$

Если пренебречь α в сравнении с β, полученное значение стремится к результату (14). Это приближение мы и будем использовать для оценки качества выбранного способа управления. Примем для входящего грузопотока простые оценки $M_Q(t)$ = 3 т/мин; $\sigma_Q(t)$ = 1 т/мин. Поскольку в качестве выходного сигнала рассматривается скорость ленты, при идеальном воспроизведении входящего грузопотока должно быть $M_v(t) = M_Q(t)/h$; $\sigma_v(t) = \sigma_Q(t)/h$. С этими величинами будем сравнивать ошибку регулирования. Формула (21) приводится к виду:

$$\tilde{\varepsilon}^2_{\min} = \frac{\sigma_v^2}{4\pi}\left(1-e^{-2\alpha t_0}\right). \quad (22)$$

Если произведение не мало, множитель в скобках близок к единице, и средний модуль ошибки

$$\tilde{\varepsilon}_{\min} = \sqrt{\tilde{\varepsilon}^2_{\min}} = \frac{\sigma_v}{2\sqrt{\pi}}\sqrt{1-e^{-2\alpha t_0}} \approx \approx \frac{\sigma_v}{2\sqrt{\pi}} \approx \frac{\sigma_v}{3{,}54}. \quad (23)$$

Выводы

Таким образом, при $M_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$ ошибка оказывается приблизительно равной $\tilde{\varepsilon}_{\min} = M_Q(t)/10$. 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 избегать просыпей при превышении грузопотоком величины $M_Q(t)$, то можно сказать, что конвейер оказывается загруженным примерно на 95%. Для сравнения можно указать, что при применении дискретного алгоритма регулирования для тех же начальных данных загрузка конвейера оказывается равной примерно 78% для трехуровневого регулирования и 82,5% для четырехуровнего [23]. Видно, что непрерывный алгоритм регулирования дает в этом отношении существенный выигрыш.

С учетом того, что грузопотоки изменяются намного медленнее релаксационных процессов в конвейере, качество управления оказывается еще выше. Для приведенного в начале работы значения $\alpha \approx 0{,}25$ мин$^{-1} \approx 0{,}004$ и времени релаксации $t \approx 20$ с параметр $2\alpha t_0$ оказывается малым. Используя известную асимптотику $e^t \approx 1 + t$, получаем:

$$\tilde{\varepsilon}_{\min} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{\pi}}\alpha t_0 \approx 0{,}09\sigma_v \quad (24)$$

При $M_Q(t) = 3\sigma_Q(t)$ это 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 $Q/v = h = const$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bahke T.* Dimensioning and application of belt conveyors with intermediate belt drive (T-T System) // Bulk Solids Handling. 1982, no 1, pp. 47—57.

2. *Thompson M., Jennings A.* Impumelelo coal mine is home to the world's longest belt conveyor // Mining Engineering. 2016. Vol. 68, Iss. 10. pp. 14—35.

3. Fedorko G., Molnár V., Kopas M. Calculation and simulation model of a system RopeCon // TEM Journal. 2018. Vol. 7, Issue 3, Pp. 480—487, DOI: 10.18421/TEM73-02.

4. Mikušová N., Mill'o S. Modelling of conveyor belt passage by driving drum using finite element methods // Advances in Science and Technology Research Journal. 2017, Vol. 11, Issue 4, pp. 239—246. DOI: 10.12913/22998624/80311.

5. *Galkin V. I.* Design features of belt conveyors with spatial track for transporting bulk materials // Mining Industry Journal, 2018, no 1 (137), pp. 84—86.

6. *Дмитриева В. В.* Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М., 2005. — 162 с.

7. *Мерцалов Р. В.* Исследования подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М., 1968.

8. *Зарецкий О. М.* Исследование неравномерности грузопотоков из очистных забоев угольных шахт и разработка методики расчета и выборки параметров привода выравнивающих бункер конвейеров. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. — М., 1979.

9. *Брагин В. В.*, *Шевелев А. Л.*, *Ларичкин Л. Д.* Формирование грузопотоков угля из комплексно-механизированных забоев // Сборник научных трудов ассоциации «Кузбасуглетехнология». — 1992. — № 5. — С. 16—29.

10. *Кондрахин В. П.*, Стадник Н. И, *Белицкий П. В.* Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: горно-электромеханическая. — 2013. — № 2(26). — С. 140—150.

11. *Прокуда В. М.*, *Мишанский Ю. А.*, *Проценко С. Н.* Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» // Горная электромеханика. — 2012. — № 88. — С. 107—111.

12. *Дмитриева В. В.*, *Сизин П. Е.* Корреляционный анализ и методы моделирования случайного грузопотока, поступающего на сборный конвейер // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 10. — С. 145—155. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-145-155.

13. *Солод Г. И.* О технологических предпосылках автоматизации конвейеров и конвейерных линий в горнодобывающей промышленности / Транспорт горных предприятий: Сборник статей. — М.: Недра, 1968.

14. *Солод Г. И.*, *Папоян Р. Л.* Основные технические и технологические предпосылки автоматизации шахтных конвейеров с регулируемой скоростью / Механизация и автоматизация рудничного транспорта: Сборник статей. — М.: Недра, 1965. — С. 120—126.

15. *Шахмейстер Л. Г.*, *Дмитриев В. Г.* Вероятностные методы расчета транспортирующих машин. — М.: Машиностроение, 1983. — 265 с.

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

17. *Дмитриев В. Г.*, *Вержанский А. П.* Специальные ленточные конвейеры. — М.: Изд-во «Горная книга», 2019. — 490 с.

18. *Polderman J. W.*, *Willems J. C.* Introduction to mathematical systems theory: a behavioral approach (texts in applied mathematics) 2nd edition. New York: Springer, 2007. 455 p.

19. *Солодовников В. В.*, *Дмитриев А. Н.*, *Егупов Н. Д.* Спектральные методы расчета и проектирования систем управления. — М.: Машиностроение, 1986. — 406 с.

20. *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.

21. *Шахмейстер Л. Г.*, *Дмитриев В. Г.*, *Лобачева А. К.* Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточного конвейера. — М.: Изд-во МГИ, 1974. — 45 с.

22. *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.

23. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. Bahke T. Dimensioning and application of belt conveyors with intermediate belt drive (T-T System). *Bulk Solids Handling*. 1982, no 1, pp. 47—57.

2. Thompson M., Jennings A. Impumelelo coal mine is home to the world's longest belt conveyor. *Mınıng Engineering*. 2016. Vol. 68, Iss. 10. pp. 14—35.

3. Fedorko G., Molnár V., Kopas M. Calculation and simulation model of a system RopeCon. *TEM Journal*. 2018. Vol. 7, Issue 3, Pp. 480—487, DOI: 10.18421/TEM73-02.

4. Mikušová N., Mill'o S. Modelling of conveyor belt passage by driving drum using finite element methods. *Advances in Science and Technology Research Journal.* 2017, Vol. 11, Issue 4, pp. 239—246. DOI: 10.12913/22998624/80311.

5. Galkin V. I. Design features of belt conveyors with spatial track for transporting bulk materials. *Mining Industry Journal*, 2018, no 1 (137), pp. 84—86.

6. 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.

7. 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.

8. Zaretskiy O. M. *Issledovanie neravnomernosti gruzopotokov iz ochistnykh zaboev ugol'nykh shakht i razrabotka metodiki rascheta i vyborki parametrov privoda vyravnivayushchikh bunker konveyerov* [Investigation of unevenness of freight traffics from clean faces of coal mines and development of methods of calculation and selection of parameters of conveyor leveling hopper drives], Candidate's thesis, Moscow, 1979.

9. Bragin V. V., Shevelev A. L., Larichkin L. D. Formation of coal freight traffic from a fully mechanized faces. *Sbornik nauchnykh trudov assotsiatsii «Kuzbasugletekhnologiya»*. 1992, no 5, pp. 16—29. [In Russ].

10. Kondrakhin V. P., Stadnik N. I, Belitskiy P. V. Statistical analysis of the exploitation parameters of the mine band conveyor. *Nauchnye trudy Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: gorno-elektromekhanicheskaya*. 2013, no 2(26), pp. 140—150. [In Russ].

11. Prokuda V. M., Mishanskiy Yu. A., Protsenko S. N. Investigation and evaluation of the freight traffic on the magistral conveyor transport of the PSP «Mine «Pavlogradskaya» PAO «DTEK Pavlogradugol». *Gornaya elektromekhanika*. 2012, no 88, pp. 107—111. [In Russ].

12. Dmitrieva V. V., Sizin P. E. Correlation analysis and method of modeling random load flow on collecting conveyor. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018, no 10, pp. 145—155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-145-155.

13. Solod G. I. On technological prerequisites for automation of conveyors and conveyor lines in the mining industry. *Transport gornykh predpriyatiy*: Sbornik statey [Transport of mining enterprises: Collection of articles], Moscow, Nedra, 1968.

14. Solod G. I., Papoyan R. L. Basic technical and technological prerequisites for automation of mine conveyors with adjustable speed. *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya rudnichnogo transporta*: Sbornik statey [Mechanization and automation of mine transport], Moscow, Nedra, 1965, pp. 120—126.

15. Shakhmeyster L. G., Dmitriev V. G. *Veroyatnostnye metody rascheta transportiruyushchikh mashin* [Probabilistic methods for calculating transporting machines], Moscow, Mashinostroenie, 1983, 265 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.

17. Dmitriev V. G., Verzhanskiy A. P. *Spetsial'nye lentochnye konveyery* [Special belt conveyors], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2019, 490 p.

18. Polderman J. W., Willems J. C. *Introduction to mathematical systems theory: a behavioral approach (texts in applied mathematics),* 2nd edition. New York: Springer, 2007. 455 p.

19. Solodovnikov V. V., Dmitriev A. N., Egupov N. D. *Spektral'nye metody rascheta i proektirovaniya sistem upravleniya* [Spectral methods of calculation and design of control systems], Moscow, Mashinostroenie, 1986, 406 p.

20. 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: Higher educational aid], Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1993, 492 p.
21. 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-vo MGI, 1974, 45 p.
22. D'yachenko 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. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2007, no 3, pp. 287—289. [In Russ].
23. Dmitrieva V.V., Sizin P.E. Value and number of optimal gear change levels for conveyor belt velocity. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):147-155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-147-155.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриева Валерия Валерьевна — канд. техн. наук, доцент,
РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, e-mail : dm-valeriya@yandex.ru,
Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук,
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.), 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 01.11.2019; получена после рецензии 21.11.2019; принята к печати 20.01.2020.
Received by the editors 01.11.2019; received after the review 21.11.2019; accepted for printing 20.01.2020.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ

(2019, № 12, СВ 50, 28 с.)

Иванов Д.С.[1], аспирант, e-mail: Dmitry.ivaivanoff@yandex.ru,
Ветрова И.Г.[1], аспирант, e-mail: Vetrova.1ria@yandex.ru,
[1] НИТУ «МИСиС»

Рассмотрены современные тенденции в области добычи угля, ГИС технологии, технологические решения по повышению полноты извлечения угольных запасов. Технологические решения применяемые на данный момент на угольных предприятиях. Проблемы и перспективы развития угольной промышленности России.

THE ROLE OF MODERN TECHNOLOGIES IN COAL MINING

D.S. Ivanov[1], Graduate Student, *I.G. Vetrova*[1], Graduate Student,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Modern trends in the field of coal mining, GIS technologies, and technological solutions for increasing the completeness of coal reserves extraction are considered. Technological solutions currently used in coal enterprises. Problems and prospects of development of the Russian coal industry.