

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРА С ЗАГРУЗОЧНЫМ БУНКЕРОМ ПРИ СТУПЕНЧАТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ

РЕУТОВ А. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Брянский государственный технический университет  
(Россия, г. Брянск, бульв. 50 лет Октября, 7)

**Введение.** Рассмотрены особенности работы конвейеров при нерегулярных грузопотоках. Проанализированы возможности регулирования скорости конвейера. Показано, что для повышения точности расчетов конвейерных систем необходимо моделирование их работы с реальными значениями грузопотоков.

**Цель работы.** Разработка процедуры оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера.

**Методика проведения исследований.** Сформулирована задача оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера. В качестве частных критериев оптимальности приняты номинальная производительность конвейера, емкость бункера, среднее значение скорости. Количество переключений скорости за время моделирования учтено как ограничение. Для определения значений частных критериев оптимальности проведено имитационное моделирование процесса ступенчатого регулирования скорости конвейера с использованием программы Mathcad. Оптимальные параметры транспортной системы выбраны из Парето-доминирующих решений с использованием обобщенного критерия – суммы амортизационных отчислений от капитальных затрат и затрат на электроэнергию.

**Анализ и обсуждение результатов.** Отличием процедуры оптимизации является учет алгоритма регулирования скорости конвейера и реальной реализации грузопотока вместо его вероятностных характеристик. Рассмотренный пример оптимизации с использованием 130 дискретных значений грузопотока и программы Mathcad показал, что установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность конвейера на 10–30 %. Пять лучших Парето-доминирующих решений примера включают конвейер с минимальной шириной ленты. Разработанная процедура имитационного моделирования может быть использована для оптимизации параметров и других транспортных систем с нерегулярными грузопотоками.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер; загрузочный бункер; регулирование скорости; критерии оптимальности; имитационное моделирование; амортизационные отчисления.

**Введение.** Грузопотокам горных предприятий присуща неравномерность, обусловленная особенностями работы забойного оборудования [1, 2]. Для сглаживания неравномерности грузопотоков системы непрерывного транспорта горных предприятий включают аккумулирующие бункеры в местах загрузки и перегрузки.

По результатам статистической обработки эмпирических данных грузопотоков проектными организациями разработаны рекомендации по определению параметров конвейеров и бункеров, соответствующих характеристикам забойного оборудования.

В [3] приведена методика расчета емкости  $E_6$  загрузочного бункера конвейера угольной шахты:

$$E_6 = Q_{\max} K_6,$$

где  $Q_{\max}$  – максимальный минутный грузопоток, поступающий в бункер;  $K_6$  – нормативный коэффициент, табличные значения которого составлены на основе эмпирических данных.

Эту методику нельзя использовать для транспортных систем, характеристики грузопотоков которых недостаточно изучены.

Вероятностные методы расчета транспортных систем применимы для грузопотоков с устойчивыми характеристиками, однако в большинстве случаев забойные грузопотоки не являются ни стационарными, ни нормальными случайными процессами. Поэтому их статистические характеристики можно использовать лишь для ориентировочных расчетов.

Неполная загрузка конвейера ведет к гиперболическому увеличению удельных энергозатрат на транспортирование. Так, работа конвейера с 25 %-ной загрузкой увеличивает энергозатраты на 160 % по сравнению с номинальной загрузкой [4].

Для горных предприятий с учетом технологии добычи необходимо использовать значения фактического грузопотока за рабочую смену или за сутки. Результаты замеров грузопотока и мощности привода магистрального ленточного конвейера 2ЛУ120 в течение 4 сут. на шахте «Должанская-Капитальная» представлены в [5].

В [6] описано применение программируемого логического контроллера для управления конвейерной системой электростанции вместо полуавтоматической системы управления на основе реле. Отмечается повышение надежности управления, возможность мониторинга конвейерной системы в реальном времени.

Стратегия управления ленточным конвейером с использованием теории нейронной сети для оптимизации параметров ПИД-регулятора скорости, позволяющая устранить неравномерности движения ленты, предложена в [7].

В [8] представлен метод нечеткого управления ленточными конвейерами для повышения их энергоэффективности. Отмечено, что дискретное управление предпочтительно при регулировании скорости ленты, а нечеткая логика применяется для изменения скорости загрузки.

В [9] разработана система управления транспортной системой угольной шахты, включающей угольный комбайн, участковый конвейер и магистральный конвейер с загрузочным бункером, но оптимизация параметров транспортной системы не рассмотрена. Для более точных расчетов необходимо моделирование работы транспортных систем с реальными значениями грузопотоков за установленное время [10].

**Возможности регулирования скорости конвейера.** Важным способом снижения эксплуатационных расходов горного транспорта является регулирование скорости транспортирования груза в соответствии с фактическим грузопотоком.

Грузопоток, поступающий на конвейер из забоя, изменяется почти непрерывно. Если устройство регулирования также изменяет скорость конвейера непрерывно в соответствии с изменением грузопотока, то конвейер постоянно работает в переходном динамическом режиме с повышенным износом и энергозатратами. Ступенчатое регулирование скорости сокращает количество и время переходных динамических процессов, повышает эффективность работы конвейера за счет обеспечения полной загрузки ленты без просыпания груза, уменьшения потерь энергии и износа узлов конвейера [11].

Установка загрузочного бункера сглаживает неравномерность грузопотока и позволяет использовать конвейер меньшей производительности. Стационарный загрузочный бункер устанавливают в месте перегрузки с участкового конвейера на магистральный. Небольшой загрузочный бункер, перемещаемый вместе с забоем, может быть установлен в месте загрузки участкового конвейера [12].

В [13] предложен способ регулирования скорости конвейера с загрузочным бункером, согласно которому загрузку бункера производят независимо от работы конвейера, если уровень заполнения бункера  $\psi$  не превышает предельного значения  $\Psi_N$ .

Конвейер включают, если уровень заполнения  $\psi$  бункера больше начального значения  $\Psi_0$ . Автоматизированный питатель непрерывно подает груз из бункера на конвейер в соответствии с текущей приемной способностью конвейера.

Затем скорость конвейера изменяют до значения  $V_i$ , если значение уровня заполнения  $\psi$  соответствует условию  $\Psi_{i-1} < \psi \leq \Psi_i$ , а  $V \neq V_i$ ,  $i = 1 \dots N$  ( $\Psi_i$  – значение  $i$ -го уровня заполнения бункера;  $V_i$  – значение  $i$ -й ступени скорости ленты;  $N$  – количество ступеней регулирования скорости конвейера), или обеспечивают скорость конвейера  $V = V_n$ , если  $\psi > \Psi_N$  ( $V_n$  – номинальная скорость конвейера).

Конвейер останавливают, если уровень заполнения  $\psi$  бункера меньше начального значения  $\Psi_0$ , или скорость  $V$  не принимает значения  $V_i$  в течение времени регулирования, или система управления подала команду остановки конвейера.

**Цель работы** – разработка процедуры оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера.

**Методика проведения исследований.** Рассмотрим транспортную систему, состоящую из загрузочного бункера и конвейера со ступенчатым регулированием скорости. Поступающий в бункер грузопоток  $Q_c$  представим массивом данных регулярных замеров, произведенных с интервалом  $t_Q$ .

Сформулируем задачу оптимизации. Оптимизируемыми параметрами транспортной системы являются количество ступеней регулирования скорости конвейера  $N$ , значения скоростей ступеней  $V_i$ , значения уровней заполнения бункера  $\Psi_i$ . Примем, что количество фиксированных значений уровня заполнения бункера равно количеству ступеней регулирования скорости  $N$ .

Критериями оптимальности являются емкость бункера  $E_b$ , номинальная производительность конвейера  $Q_n$ , среднее значение скорости  $V_{cp}$ .

Количество переключений скорости  $N_n$  за время моделирования будем рассматривать как ограничение. С учетом времени разгона и торможения конвейера, необходимого для изменения его скорости, экспертная оценка ограничения имеет вид:  $N_n < 3 \text{ мин}^{-1}$  при  $N = 1$ ;  $N_n < 4 \text{ мин}^{-1}$  при  $N = 2$  и  $N_n < 6 \text{ мин}^{-1}$  при  $N = 3$ .

**Имитационное моделирование регулирования скорости конвейера.** Целью имитационного моделирования процесса регулирования скорости конвейера является определение значений критериев оптимальности при заданных параметрах способа регулирования и данных замеров грузопотока  $Q_c$ .

На каждом шаге моделирования проведем повторяющиеся вычисления текущих значений уровня заполнения бункера  $\psi$ , скорости конвейера  $V$ :

$$\Psi_k = \Psi_{k-1} + Q_k - \gamma V_{k-1} t_Q,$$

где  $Q_k$  – масса груза, поступившего в бункер за время  $t_Q$  на  $k$ -м шаге, кг;  $\Psi_k$  и  $\Psi_{k-1}$  – текущий уровень заполнения бункера на  $k$ -м и  $(k-1)$ -м шагах, кг;  $V_{k-1}$  – скорость конвейера на  $(k-1)$ -м шаге, м/с;  $\gamma$  – номинальная погонная нагрузка конвейера, кг/м.

Величина номинальной погонной нагрузки  $\gamma$  является конструктивной характеристикой конвейера и обеспечивает его нормальную работу без просыпания груза ( $\gamma = Q_n/V_n$ ). Величину текущей скорости  $V_k$  зададим согласно способу регулирования.

В результате моделирования получим массивы значений уровня заполнения бункера  $\psi$  и скорости конвейера  $V$  таких же размеров, что и  $Q_c$ . После обработки массивов определим среднее значение скорости  $V_{cp}$  и количество переключений скорости  $N_n$ .

**Процедура выбора оптимальных параметров транспортной системы.** Сформированная задача оптимизации является многокритериальной. Для определения значений трех частных критериев необходимо многократное имитацион-

ное моделирование процесса регулирования скорости конвейера при допустимых значениях параметров.

Для поиска оптимальных параметров транспортной системы применим следующую вычислительную процедуру:

- сформируем реализацию грузопотока в виде массива значений массы груза, поступающего в загрузочный бункер;
- определим область допустимых значений оптимизируемых параметров;
- проведем моделирование работы транспортной системы и вычислим значения частных критериев в области допустимых значений параметров с заданным шагом;
- выберем Парето-доминирующие решения;
- сформируем обобщенный критерий эффективности транспортной системы;
- выберем оптимальное решение из Парето-доминирующих по обобщенному критерию.

В обобщенном критерии приходится совмещать частные критерии, характеризующие объект с разных сторон. Частные критерии имеют различную природу и оцениваются по разным шкалам. Построение обобщенного критерия возможно приведением частных критериев к единой единице измерения.

**Таблица 1. Параметры ленточных конвейеров**  
**Table 1. Belt conveyors parameters**

Тип	$Q_n$ , т/ч	$V_n$ , м/с	$\gamma$ , кг/м	$W$ , кВт
1Л100	470	1,6	81,6	55
1Л80	420	2,0	58,3	55
1Л80	330	1,6	57,3	40

**Пример оптимизации конвейера с загрузочным бункером.** Рассмотрим пример оптимизации ступенчатого регулирования скорости подземного участкового конвейера с загрузочным бункером. В качестве исходных данных использованы 130 значений реализации случайного грузопотока угольного комбайна  $Q_c$  с математическим ожиданием 73 кг/с и средним квадратичным отклонением 41,5 кг/с. Максимальные значения  $Q_c$  достигают 130,5 кг/с, что соответствует теоретической производительности 470 т/ч.

Определим оптимальные значения параметров транспортной системы  $N$ ,  $V_i$ ,  $\Psi_i$  ( $i = 1 \dots N$ ) для заданной реализации случайного грузопотока с использованием критериев оптимальности  $E_b$ ,  $Q_n$ ,  $V_{cp}$  и ограничения  $N_n$ .

Для поиска оптимальных значений параметров транспортной системы реализуем *этапы вычислительной процедуры*.

1. Определим область допустимых значений оптимизируемых параметров.

Для безбункерной работы транспортной системы необходим конвейер с приемной способностью не менее 130,5 кг/с (470 т/ч). При установке бункера приемная способность может быть уменьшена до 73 кг/с (263 т/ч).

Рассмотрим три типовых ленточных конвейера с шириной ленты 0,8 м и 1 м, мощностью привода  $W$ , равной 40 и 55 кВт, номинальная производительность  $Q_n$  которых превышает 263 т/ч (табл. 1).

Рассмотрим одно-, двух- и трехступенчатые режимы регулирования скорости конвейера со следующими параметрами:  $N = 1 \dots 3$ ;  $\Psi_i \in [0, 1000]$  кг;  $V_i \in [0, V_n]$  м/с ( $i = 1 \dots N$ ).

2. Проведем имитационное моделирование процесса регулирования скорости конвейера с использованием программы Mathcad и вычислим значения частных критериев.

На рис. 1 приведены графики поступающего в бункер грузопотока  $Q_c$ , кг/с, текущего уровня заполнения бункера  $\psi$ , кг, и скорости  $V$ , м/с, конвейера 1Л80 при трехступенчатом регулировании скорости и  $t_Q = 6$ .

3. Выберем Парето-доминирующие решения из результатов имитационного моделирования (табл. 2).

В табл. 2 принято  $E_6 = 1,1 \max \psi_k$ ,  $k = 1 \dots n$  ( $n$  – количество значений в массиве  $Q_c$ ).

4. Сформируем обобщенный критерий экономической эффективности транспортной системы.

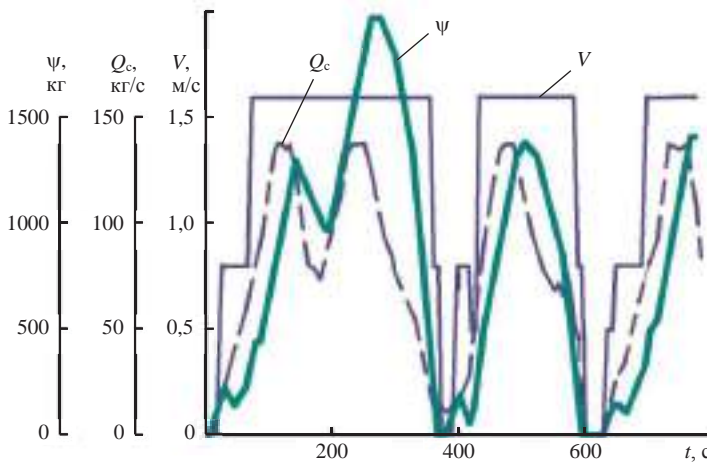


Рис. 1. Графики изменения поступающего грузопотока  $Q_c$ , текущего уровня заполнения бункера  $\psi$  и скорости конвейера  $V$  конвейера во времени (решение № 11 табл. 2)

Fig. 1. Graphs of  $Q_c$  incoming freight flow alteration, current filling level of a bunker  $\psi$ , and conveyor speed  $V$  in time (solution no. 11, table 2)

Большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями. В табл. 2 приведены только 11 альтернатив – Парето-доминирующих решений с разными значениями параметров транспортной системы и регулирования. Для выбора оптимального решения, обеспечивающего наибольшую экономическую эффективность транспортной системы, сформируем обобщенный критерий  $Q$ . Для этого сформулируем частные критерии по-новому и приведем их к единой единице измерения (тыс. р.). Тогда оценку  $i$ -й альтернативы выразим суммой значений новых частных критериев  $K_{ij}$

$$Q_i = \sum_{j=1}^3 K_{ij},$$

где  $K_{1j}$  и  $K_{2j}$  – амортизационные отчисления от капитальных затрат на приобретение и монтаж конвейера и загрузочного бункера  $j$ -го решения;  $K_{3j}$  – годовые расходы на электроэнергию конвейера  $j$ -го решения.

Экономические потери от увеличения количества переключений скорости конвейера учесть сложно, поскольку отсутствуют соответствующие теоретические или эмпирические зависимости. Поэтому количество переключений скорости  $N_{\Pi}$  будем по-прежнему использовать как ограничение.

Амортизационные отчисления выразим через капитальные затраты на приобретение и монтаж конвейера и загрузочного бункера, сроки их амортизации.

Годовые расходы на электроэнергию вычислим через номинальную мощность и среднюю скорость конвейера:

$$K_3 = C_E W T_1 V_{cp} / V_n,$$

где  $C_E$  – тариф на электроэнергию для промышленных предприятий, тыс. р./( $\text{kBt} \cdot \text{ч}$ ),  $T_1$  – годовая продолжительность работы конвейера, ч.

**Таблица 2. Парето-доминирующие решения**  
**Table 2. Pareto-dominant solutions**

Номер решения	$V_0; V_1; V_2, \text{ м/с}$	$\Psi_i, \text{ кг}$	$Q_n, \text{ т/ч}$	$E_6, \text{ кг}$	$V_{cp}, \text{ м/с}$	$N_n$
$N = 1$						
1	0; 1,6	1000	470	2060	0,89	17
2	0; 2	1000	420	2385	1,21	13
3	0; 1,6	300	330	2171	1,25	11
$N = 2$						
4	0,2; 1,1; 1,6	–	470	0	1,25	11
5	0; 0,8; 1,6	100; 400	470	817	0,93	24
6	0; 0,8; 2,0	50; 400	420	1010	1,28	18
7	0; 0,8; 1,6	100; 300	330	2171	1,25	12
$N = 3$						
8	0,2; 0,5; 1,1; 1,6	–	470	0	1,15	16
9	0; 0,5; 1,3; 1,6	100; 400; 1000	470	1321	0,89	23
10	0; 0,5; 1,0; 2	30; 100; 300	420	927	1,27	27
11	0; 0,5; 0,8; 1,6	50; 100; 300	330	2171	1,25	12

В табл. 3 приведены значения частных и обобщенного критериев для пяти лучших решений из табл. 2. ( $K_2 = 25$  тыс. р./ $\text{м}^2$  поверхности бункера;  $C_E = 4,69$  р./( $\text{kBt} \cdot \text{ч}$ );  $T_1 = 4000$  ч).

Для сравнения отметим, что конвейер 1Л100 без бункера и регулирования скорости имеет значение обобщенного критерия  $Q = 4157$  тыс. р.

5. Выберем оптимальное решение из Парето-доминирующих.

Поскольку обобщенный критерий имеет негативный смысл, то оптимальным является решение № 11 с минимальным значением  $Q = 3376,3$  тыс. р.

**Анализ и обсуждение результатов.** Вычислительная процедура оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером и регулирования скорости может быть реализована с использованием программ Mathcad, Matlab и др. Отличительной особенностью процедуры оптимизации является учет алгоритма регулирования скорости конвейера и реальной реализации грузопотока, а не его вероятностных характеристик.

Рассмотренный пример оптимизации при нерегулярном грузопотоке показал, что большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями. Оптимальные параметры транспортной системы выбраны из Парето-доминирующих решений с учетом амортизационных отчислений от капитальных затрат и затрат на электроэнергию.

Для использованных в примере исходных данных пяти лучших Парето-доминирующих решений (табл. 3) включают конвейер с минимальной шириной ленты (0,8 м). Имитационное моделирование показало, что применение конвейера

с большей производительностью позволяет снизить объем загрузочного бункера, однако оптимальным оказалось решение с наименьшей среди рассмотренных производительностью конвейера.

Установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность конвейера на 10–30 %. С увеличением емкости загрузочного бункера величина средней скорости конвейера снижается. Количество ступеней регулирования скорости в данном примере оказалось малозначимым параметром, поскольку большую часть времени работы конвейера его скорость равна номинальной (рис. 1).

**Таблица 3. Значения частных и обобщенного критериев, тыс. р.**  
**Table 3. Values of specific and general criteria, thousands of rubles**

Номер решения	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$Q$
3	2500,0	291,9	586,3	3378,2
6	2562,5	175,2	660,4	3398,1
7	2500,0	291,9	587,7	3379,6
10	2562,5	165,5	655,2	3383,2
11	2500,0	291,9	584,4	<b>3376,3</b>

**Область применения результатов.** Разработанная процедура применима для любого конвейера, участкового или магистрального, при известных реализациях поступающего в бункер грузопотока. Процедура имитационного моделирования может быть использована для оптимизации параметров и других транспортных систем с нерегулярными грузопотоками, например карьерного и подземного автотранспорта, а также рельсового транспорта.

**Выводы.** Разработанная вычислительная процедура многокритериальной оптимизации параметров конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости конвейера применима для любого конвейера, в том числе участкового или магистрального, при известных реализациях поступающего в бункер грузопотока. Для вычисления частных критериев оптимальности используется имитационное моделирование работы транспортной системы с реальным грузопотоком.

Большинство результатов имитационного моделирования являются Парето-доминирующими решениями, поэтому для выбора оптимального решения необходимо использовать обобщенный критерий.

Рассмотренный пример показал, что установка загрузочного бункера позволяет снизить номинальную производительность и среднюю скорость конвейера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко В. А., Креймер Е. Л. Исследование внутриминутных характеристик забойных грузопотоков // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 4. М.: Недра, 1978. С. 27–33.
2. Мерцалов Р. В. Обобщение статистики о неравномерности забойных грузопотоков на угольных шахтах // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 9. М.: Недра, 1984. С. 5–13.
3. Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные конвейерные установки. М.: Недра, 1976. С. 27–29.
4. Semenchenko A., Stadnik M, Belitsky P., Semenchenko D., Stepanenko O. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Issue 4/1 (82). P. 42–51.
5. Кондрахин В. П., Стадник Н. И., Белицкий П. В. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. 2013. № 2 (26). С. 140–150.
6. Zhang J., Che Y., Zhao L. Power plant coal conveyor coal link PLC control system // 4th Int. Conf. on Power Electronics Systems and Applications, PESA 2011, Article number 5982927.
7. Ma X. M., Gao X. X. Coal belt conveyor PID controller parameter regulation with neural network // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 319. P. 583–589.

8. Pang Y., Lodewijks G., Schott D. L. Fuzzy controlled energy saving solution for large-scale belt conveying systems // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 261–262. P. 59–64.

9. Ставицкий В. Н., Оголубченко А. С. Математическое моделирование транспортной системы добычного участка // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2013. № 1 (24). С. 53–63.

10. Реутов А. А. Имитационное моделирование процесса ступенчатого регулирования скорости конвейера // *Проблемы недропользования*. 2017. № 2. С. 26–32.

11. Реутов А. А. Обеспечение загрузки конвейеров с регулируемой скоростью ленты // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2005. № 3 (7). С. 4–6.

12. Реутов А. А. Монтаж, эксплуатация и ремонт ленточных конвейеров. Брянск: БГТУ, 2008. 15 с.

13. Способ регулирования скорости конвейера с загрузочным бункером: пат. 2628830 Рос. Федерация. № 2016143662; заявл. 07.11.16; опублик. 22.08.17. Бюл. № 24.

Поступила в редакцию 21 февраля 2018 года

Реутов А. А. Оптимизация конвейера с загрузочным бункером при ступенчатом регулировании скорости // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 6. С. 109–117.

### Сведения об авторах:

**Реутов Александр Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и оборудования Брянского государственного технического университета. E-mail: bgtu2012@yandex.ru

## OPTIMIZATION OF A CONVEYOR WITH A LOADING BUNKER UNDER DISCONTINUOUS SPEED VARIATION

**Reutov A. A.**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia.

**Introduction.** Peculiarities of conveyors operation are considered under irregular freight flows. Conveyor speed variation capabilities are analyzed. It has been revealed that in order to increase the accuracy of conveyor systems calculation it is necessary to simulate their work with real values of freight flows.

**Research aim** is a conveyor with a loading bunker parameters optimization procedure development under discontinuous speed variation.

**Research methodology.** The problem of a conveyor with a loading bunker parameters optimization is formulated under conveyor discontinuous speed variation. Conveyor nominal output, bunker capacity, and velocity average value are taken as particular criteria of optimality. The quantity of speed shifts in a time of simulation is considered as a limitation. In order to determine the values of particular criteria of optimality, simulation modeling of a conveyor discontinuous speed variation process was fulfilled on Mathcad program. Transport system optimal parameters are chosen among Pareto-dominant solutions with the use of a generalized criterion – an amount of depreciation from capital expenditures and energy cost.

**Results analysis and discussion.** A distinctive feature of an optimization procedure consists in taking into account the algorithm of conveyor speed variation and actual realization of a freight flow instead of its probabilistic characteristics. The examined example of optimization with the use of 130 discrete values of a freight flow and Mathcad program has shown that loading bunker installation makes it possible to reduce nominal capacity of a conveyor by 10–30%. Five best Pareto-dominant solutions of an example include a conveyor with minimum belt width. The worked out simulation modeling procedure can be used to optimize parameters of other transport systems with irregular freight flows.

**Key words:** belt conveyor; loading bunker; speed variation; optimality criteria; simulation modeling; depreciation.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-109-117

### REFERENCES

1. Ponomarenko V. A., Kreimer E. L. [Investigation of bottom hole freight flows characteristics within one minute]. *Shakhtnyi i kar'ernyi transport. Vyp. 4* [Shaft and open pit transport. Issue 4]. Moscow, Nedra Publ., 1978, pp. 27–33.
2. Mertsalov R. V. [Generalization of statistics on bottom hole freight flows irregularity in coal mines]. *Shakhtnyi i kar'ernyi transport. Vyp. 9* [Shaft and open pit transport. Issue 9]. Moscow, Nedra Publ., 1984, pp. 5–13.
3. Shakhmeister L. G., Solod G. I. *Podzemnye konveiernye ustanovki* [Underground conveyor units]. Moscow, Nedra Publ., 1976, pp. 27–29.
4. Semenchenko A., Stadnik M., Belitsky P., Semenchenko D., Stepanenko O. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, issue 4/1 (82), pp. 42–51.
5. Kondrakhin V. P., Stadnik N. I., Belitskii P. V. [Statistic analysis of a shaft belt conveyor operating parameters]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Girnicho-elektromekhanichna – Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Mining Electromechanics*, 2013, no. 2 (26), pp. 140–150.



6. Zhang J., Che Y., Zhao L. Power plant coal conveyer coal link PLC control system. *4th Int. Conf. on Power Electronics Systems and Applications*, PESA 2011, Article number 5982927.
7. Ma X. M., Gao X. X. Coal belt conveyer PID controller parameter regulation with neural network. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 319, pp. 583–589.
8. Pang Y., Lodewijks G., Schott D. L. Fuzzy controlled energy saving solution for large-scale belt conveying systems. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 261–262, pp. 59–64.
9. Stavitskii V. N., Ogoibchenko A. S. [Mathematical modeling of production site transport system]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Obchislivual'na tekhnika ta avtomatizatsiia – Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Computer Engineering and Automatics*, 2013, no. 1 (24), pp. 53–63.
10. Reutov A. A. [Simulation of the conveyor speed step control]. *Problemy nedropol'zovaniia – The Problems of Subsoil Use*, 2017, no. 2, pp. 26–32. (In Russ.)
11. Reutov A. A. [Providing load of conveyors with controlled belt speed] *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2005, no. 3 (7), pp. 4–6. (In Russ.)
12. Reutov A. A. *Montazh, ekspluatatsiia i remont lentochnykh konveierov* [Installation, operation, and maintenance of belt conveyors]. Bryansk, BSTU Publ., 2008. 15 p.
13. *Sposob regulirovaniia skorosti konveiera s zagruzochnym bunkerom* [A method of controlling the speed of a conveyor with a loading bunker]. Patent RF, no. 2628830, 2007.

### Information about authors

**Reutov Alexander Alexeevich** – Doctor of Engineering sciences, professor of the Department of Mechanical-Handling Machines and Equipment, Bryansk State Technical University. E-mail: bgtu2012@yandex.ru

---