

УДК 622.647.2

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

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

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ С УПРЕЖДЕНИЕМ

Приведены алгоритм расчета с упреждением количества груза, поступающего на конвейер на каждом шаге управления, и задаваемого значения скорости, а также соответствующая структурная схема системы автоматического регулирования скорости шахтных ленточных конвейеров.

Ключевые слова: ленточный конвейер, скорость, система автоматического регулирования скорости конвейера, упреждение.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Десятки лет широко обсуждается вопрос регулирования скорости шахтных ленточных конвейеров при поступлении на них существенно неравномерных случайных грузопотоков [1–3]. Установлено, что в зависимости от математического ожидания минутного грузопотока и коэффициента поступления груза на конвейер, находящегося в пределах от 0 до 1, экономия электроэнергии в результате регулирования скорости может достигать 22 % [4]. В качестве наиболее перспективного способа управления скоростью тягового органа (ТО) рассматривается частотное регулирование приводных асинхронных двигателей (АД), направленное на поддержание погонной массы груза на конвейере на заданном максимально возможном уровне. Однако широкого распространения управление скоростью конвейера не получило, так как до недавнего времени преобразователи частоты АД по массогабаритным показателям не были приспособлены для работы в подземных условиях угольных шахт, а их длительная работа в режиме пониженных частот требовала принудительного охлаждения как электродвигателя, так и самого преобразователя.

В настоящее время появились преобразователи частоты (ПЧВ-К У5, DYNAVERT

VSD-1140V, BARTEC и др.), основывающиеся на новой элементной базе, имеющие рудничное исполнение и вполне приемлемые габариты. Также в результате применения специального уточненного тягового расчета [4] и компьютерного моделирования процесса загрузки конвейера случайным грузопотоком преодолены трудности обоснования целесообразности регулирования скорости в конкретных условиях эксплуатации.

На первый план выдвигаются вопросы, связанные с выбором алгоритма расчета задаваемых в системе автоматического управления (САУ) значений скорости и определения рациональных параметров регулирования применительно к свойствам датчика заполнения конвейера грузом, обычно конвейерных весов, и характеристикам случайного грузопотока.

Постановка задачи. Задачей исследования является разработка структурной схемы системы автоматического регулирования скорости шахтных ленточных конвейеров, алгоритма расчета задаваемых значений скорости и временных параметров системы, обеспечивающих наилучшее заполнение конвейера грузом.

Изложение материала и его результаты. Рассматривается скоростной режим работы конвейера, на который с перерывами

поступает существенно неравномерный случайный грузопоток. При этом предполагается непрерывная работа конвейера, за исключением остановок, обусловленных отказами самого конвейера. При поступлении на него груза скорость регулируется, в результате чего погонная масса груза поддерживается на некотором заданном уровне ρ_3 . Если же груз не поступает, то скорость поддерживается на некотором заданном минимальном уровне v_{\min} .

Идеальным является регулирование, если при поступлении на конвейер Δt -грузопотока, где Δt — мерный интервал времени, обеспечивается условие $\bar{\rho}_k = \rho_3$, где $\bar{\rho}_k$ — среднее значение погонной массы груза на участке конвейера длиной $l_k = v_k \Delta t$, заполняемом поступающей на конвейер в течение времени Δt k -ой порцией q_k груза, $\bar{\rho}_k = q_k / v_k \Delta t$ ($k = 1, \dots, k_{\max}$). Реализация скорости v_k в течение каждого k -го интервала времени предполагается неизменной: $v_k = q_k / \rho_3 \Delta t$. В случае базового варианта (скорость не регулируется) величина $\bar{\rho}_k$ на каждом k -ом участке конвейера длиной $l_k = \Delta t \cdot v_n$, где v_n — номинальная скорость конвейера, также предполагается неизменной, но для каждого k разной, причем $\bar{\rho}_k = q_k / v_n \Delta t$.

На практике равномерное заполнение конвейера с постоянной погонной массой путем регулирования скорости не достижимо в полной мере по трем причинам: 1) посредством конвейерных весов нельзя точно определить погонную массу груза на конвейере, а лишь массу груза на участке ленты над весами, а затем среднее значение погонной массы груза на этом участке; 2) в течение каждого интервала времени измерения, осуществляемого САУ, конвейер заполняется при некоторой, практически постоянной, скорости, соответствующей данному интервалу, но при изменяющемся во времени грузопотоке; 3) в каждый момент времени расчет задаваемых значений

скорости производится на основании прошлых показаний конвейерных весов при существующей изменчивости грузопотока и некоторой, присущей способу и средствам регулирования, задержке времени.

Рассмотрим процедуру регулирования скорости в течение непрерывного времени t_n поступления груза для общего случая задания временных интервалов управления и измерения.

Примем следующие обозначения: шаг измерения конвейерными весами, т. е. длительность интервала времени, через который снимаются показания конвейерных весов и определяется количество груза, поступившего за это время на конвейер, — t_n ; интервал времени, через который осуществляется управления скоростью (шаг управления), — t_y ; время, в течение которого груз проходит весы, — t_b . В общем случае $t_y \neq t_n$, $t_y \neq t_b$, $t_n \neq t_b$. Длительности интервалов времени t_y и t_n являются величинами постоянными. Величина t_y принимается кратной t_n , т. е. отношение t_y/t_n принимается равным некоторому целому числу j_{\max} . Скорость v_k на каждом k -ом шаге управления ($k = 1, 2, \dots, k_{\max}$) и, соответственно, величина $t_{b k}$, являющаяся функцией скорости, в течение времени t_y не изменяются, причем

$$t_{b k} = l_b / v_k, \quad (1)$$

где l_b — длина участка ленты над конвейерными весами.

Величина $t_{b k}$ на каждом шаге управления в зависимости от скорости и выбора t_n может находиться в следующем соотношении с t_n : $t_{b k} \geq t_n$ или $t_{b k} < t_n$.

Среднее значение погонной массы груза на участке конвейера над конвейерными весами на j -ом шаге измерения ($j = 1, \dots, j_{\max}$) в пределах k -го шага управления определяется на основании показания весов

$$\bar{\rho}_{b k j} = g_{b k j} / l_b = g_{b k j} / t_{b k} v_k, \quad (2)$$

где $g_{b k j}$ — полученная на j -ом шаге измерения реализация случайной величины

$G_{\text{в}}$ — количества груза на конвейерных весах.

Прогнозируемое количество груза, поступившего на конвейер на j -ом шаге измерения,

$$G_{\text{п}kj} = g_{\text{в}kj} + \int_0^{t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}} Q^{ps}(t_{\text{и}}, g_{\text{в}kj}) dt_{\text{и}}, \quad (3)$$

где $Q^{ps}(t_{\text{и}}, g_{\text{в}kj})$ — поступающий на конвейер мгновенный грузопоток, являющийся апостериорным процессом относительно наблюдаемого значения $g_{\text{в}kj}$.

Среднее значение погонной массы груза $\bar{\rho}_{\text{и}kj}$, поступающего на конвейер за время $t_{\text{и}}$ на j -ом шаге измерения, точно определить не представляется возможным, поэтому с некоторым приближением полагаем, что $\bar{\rho}_{\text{и}kj} = \bar{\rho}_{\text{в}kj} = g_{\text{в}kj} / t_{\text{в}k}$.

Тогда расчетное количество груза, поступившего на конвейер на j -ом шаге измерения,

$$G_{\text{р}kj} = \bar{\rho}_{\text{и}kj} t_{\text{и}} v_k = \frac{g_{\text{в}kj}}{t_{\text{в}k}} t_{\text{и}}. \quad (4)$$

Абсолютная погрешность расчета относительно прогнозируемого значения количества груза, которое грузится на конвейер за время $t_{\text{и}}$ на j -ом шаге измерения, определяемая с учетом выражений (2) и (3),

$$\Delta G_{kj} = \left| G_{\text{п}kj} - G_{\text{р}kj} \right| = \left| g_{\text{в}kj} + \int_0^{t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}} Q^{ps}(t_{\text{и}}, g_{\text{в}kj}) dt_{\text{и}} - \frac{g_{\text{в}kj} t_{\text{и}}}{t_{\text{в}k}} \right|. \quad (5)$$

Учитывая дискретный характер измерения грузопотока посредством конвейерных весов, представляем выражение (4) в виде

$$\Delta G_{kj} = \left| G_{\text{п}kj} - G_{\text{р}kj} \right| = \left| g_{\text{в}kj} \pm \sum_{r=1}^{r_{\text{max}}} G_{\text{в}kj r}^{ps}(t_{\text{и}r}, g_{\text{в}kj}) - \frac{g_{\text{в}kj} t_{\text{и}}}{t_{\text{в}k}} \right|, \quad (6)$$

где $G_{\text{в}kj r}^{ps}(t_{\text{и}r}, g_{\text{в}kj})$ — апостериорные значения случайной величины $G_{\text{в}}$ в

моменты времени $t_{\text{и}r}$ относительно наблюдаемого значения $g_{\text{в}kj}$, $t_{\text{и}r} = t_{\text{в}k}(1+r)$, $r=1, 2, \dots, r_{\text{max}}$; знак «+» перед выражением

$\sum_{r=1}^{r_{\text{max}}} G_{\text{в}kj r}^{ps}(t_{\text{и}r}, g_{\text{в}kj})$ принимается в слу-

чае $t_{\text{и}} \geq t_{\text{в}k}$, а знак «-» — при $t_{\text{и}} < t_{\text{в}k}$.

Величина r_{max} определяется по формулам:

– если $t_{\text{и}} \geq t_{\text{в}k}$, то

$$r_{\text{max}} = \begin{cases} \text{ent}[(t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}) / t_{\text{в}k}] + 1, & \text{если } \text{frac}[(t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}) / t_{\text{в}k}] \geq 0,5; \\ \text{ent}[(t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}) / t_{\text{в}k}], & \text{если } \text{frac}[(t_{\text{и}} - t_{\text{в}k}) / t_{\text{в}k}] < 0,5; \end{cases}$$

– если $t_{\text{в}k} > t_{\text{и}}$, то

$$r_{\text{max}} = \begin{cases} \text{ent}[(t_{\text{в}k} - t_{\text{и}}) / t_{\text{и}}] + 1, & \text{если } \text{frac}[(t_{\text{в}k} - t_{\text{и}}) / t_{\text{и}}] \geq 0,5; \\ \text{ent}[(t_{\text{в}k} - t_{\text{и}}) / t_{\text{и}}], & \text{если } \text{frac}[(t_{\text{в}k} - t_{\text{и}}) / t_{\text{и}}] < 0,5, \end{cases}$$

где ent и frac — операторы определения соответственно целой и дробной части числа.

Если $r_{\text{max}} = 0$, то принимается

$$\sum_{r=1}^{r_{\text{max}}} G_{\text{в}kj r}^{ps}(t_{\text{и}r}, g_{\text{в}kj}) = 0.$$

Из анализа выражений (5) и (6), а также рисунка 1 следует, что при $t_{\text{и}} = t_{\text{в}k}$ $G_{\text{р}kj} = G_{\text{п}kj} = g_{\text{в}kj}$, а абсолютная погрешность вычислений ΔG_{kj} равна нулю (см. рис. 1, в). В этом случае также совпадают $\bar{\rho}_{\text{и}j}$ и $\bar{\rho}_{\text{в}j}$. При $t_{\text{и}} \rightarrow 0$

$$\Delta G_{kj} = g_{\text{в}kj} - \sum_{r=1}^{r_{\text{max}}} G_{\text{в}kj r}^{ps}(t_{\text{и}r}, g_{\text{в}kj}).$$

Если при регулировании скорости выполнять условие $t_{\text{и}} = t_{\text{в}k}$, то это приведет к необходимости изменения на каждом шаге управления скоростью числа j_{max} измерений.

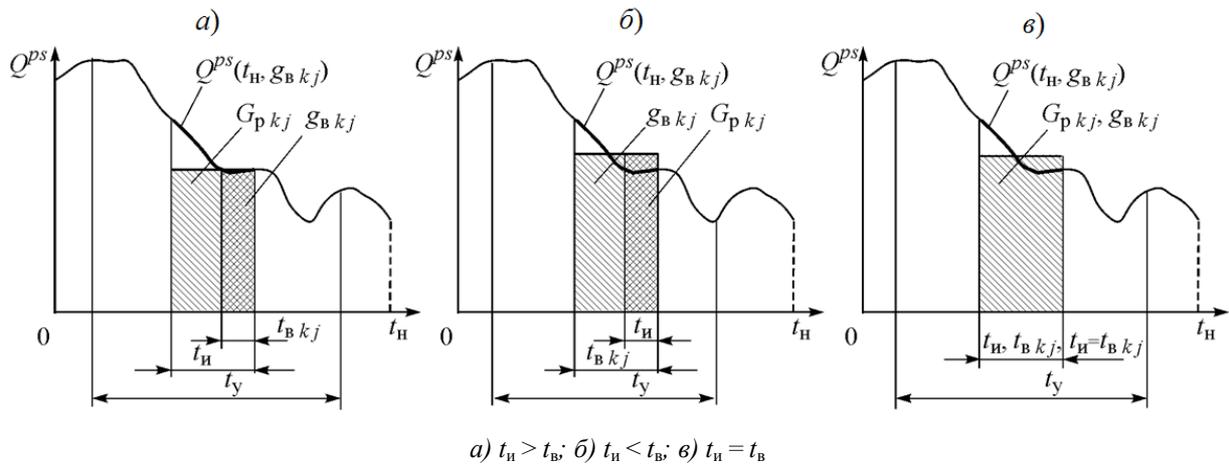


Рисунок 1 Геометрическая интерпретация алгоритма определения массы груза $G_{p k j}$, поступающего на конвейер за время t_n

Наконец, в результате суммирования всех $G_{p k j}$ с учетом формулы (8) получим расчетное количество груза, поступившего на конвейер за время t_y на k -ом шаге управления

$$G_{p k} = \frac{t_n v_k}{l_B} \sum_{j=1}^{j_{\max}} g_{B k j} = \frac{t_n}{t_{B k}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} g_{B k j}. \quad (7)$$

При $t_n = t_{B k}$ значение $G_{p k}$ является фактическим G_k , т. е.

$$G_{p k} = G_k = \sum_{j=1}^{j_{\max}} g_{B k j}.$$

Таким образом, ошибки расчета $G_{p k j}$ и $G_{p k}$ исключаются и определяются фактические значения, если принять $t_n = t_{B k}$.

Если ориентироваться на полученное значение $G_{p k}$, то соответствующее формируемое в задающем устройстве САУ конвейера задаваемое значение скорости v_3 , оно же v_{k+1} , при котором обеспечивается выполнение условия $\bar{\rho}_{y k} = \rho_3$, где $\bar{\rho}_{y k}$ — среднее на k -ом шаге управления значение погонной массы груза, может быть определено из выражения

$$G_{p k} = \rho_3 v_3 t_y = \rho_3 v_{k+1} t_y. \quad (8)$$

Отсюда

$$v_{k+1} = G_{p k} / \rho_3 t_y. \quad (9)$$

При скорости v_{k+1} заданная погонная масса груза ρ_3 , даже при определении G_k , обеспечивается в среднем, в отдельные же моменты времени в связи с изменчивостью грузопотока неизбежны отклонения фактических значений погонной массы от ρ_3 .

По сути, при определении v_{k+1} предполагается, что $G_{p k} = G_{p k+1}$, где $G_{p k+1}$ — ожидаемое расчетное значение груза, которое поступит на конвейер на $k+1$ -ом шаге управления. В частном, при соблюдении равенства $t_n = t_{B k}$, и наиболее благоприятном случае предполагается, что $G_k = G_{k+1}$.

Выполнение приведенных равенств вряд ли возможно в связи с изменчивостью грузопотока. К ошибкам расчета $G_{p k j}$, если $t_n \neq t_{B k}$, а затем и $G_{p k}$, добавляется ошибка, вызванная несоответствием $G_{p k+1}$ значению $G_{p k}$. Поэтому неизбежны отклонения фактических средних значений погонной массы от ρ_3 . С целью минимизации такого рода ошибок предлагается на каждом шаге управления прогнозировать $G_{p k+1}$, т. е. определять с упреждением t_y его прогнози-

руемое значение $G_{\text{пр } k+1}$. Для этого в задающем устройстве САУ накапливается некоторое число n предшествующих $k+1$ -ому шагу управления значений количества груза, поступавшего на конвейер за время t_y , иначе, формируется временной ряд m_i , $i=1, 2, \dots, n$ (см. рис. 2). На каждом шаге управления на линейке с n ячейками осуществляется последовательный перенос содержимого каждой ячейки, начиная со 2-й, в ячейку, расположенную слева (сдвиг массива данных). В результате n -я ячейка освобождается, и туда заносится значение $G_{\text{р } k}$, т. е. m_n становится равным $G_{\text{р } k}$. Согласно наблюдаемым значениям временного ряда определяются его статистические характеристики (среднее значение, стандартное отклонение, спектр, выборочная и частная автокорреляционные функции) и по известным алгоритмам [5] осуществля-

ется построение наиболее подходящей модели временного ряда. Это может быть в случае стационарного ряда модель процесса скользящего среднего или авторегрессии, или авторегрессии — скользящего среднего. В случае нестационарного ряда — модель процесса авторегрессии — проинтегрированного скользящего среднего. На основании полученной модели определяется прогнозное значение $G_{\text{пр } k+1}$.

При таком подходе задаваемое значение скорости

$$v_3 = G_{\text{пр } k+1} / \rho_3 t_y. \quad (10)$$

Упреждение при вычислении v_3 имеет смысл, если ошибка прогнозирования существенно меньше ошибки, связанной с инерционностью САУ и изменчивостью грузопотока.

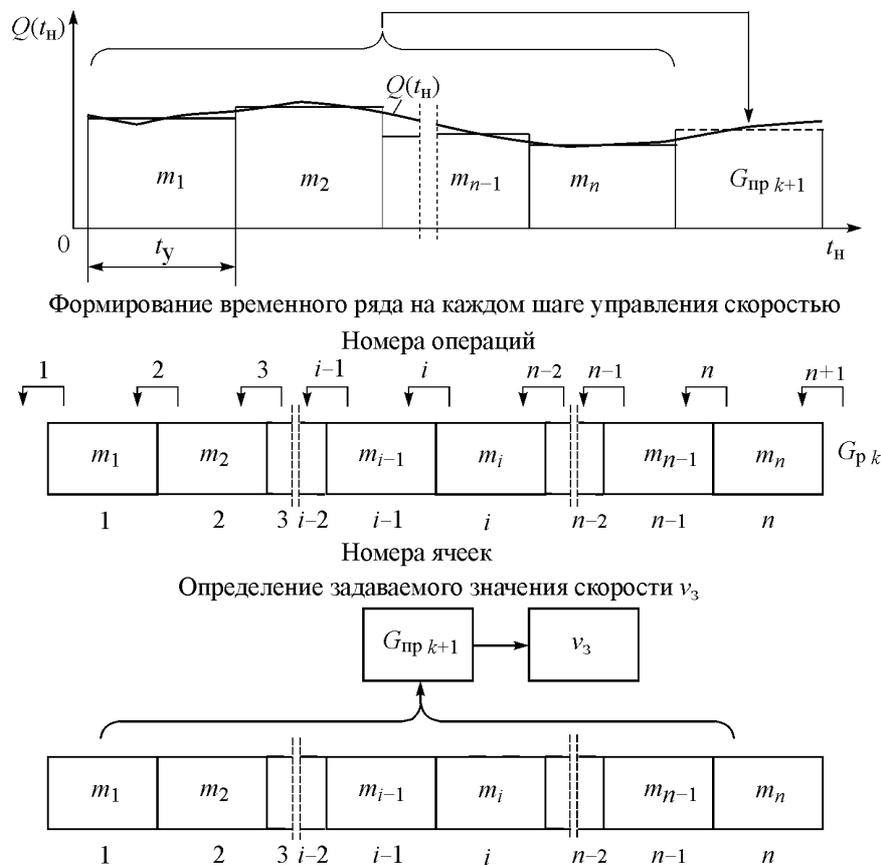


Рисунок 2 Графическая интерпретация алгоритма определения задаваемой скорости конвейера

Сопоставляя значение скорости v , соответствующее установленному на основании прямых измерений величины $G_{p\ k+1}$, значению v_3 , полученному из выражения (9), определим относительную ошибку регулирования скорости, вызванную неточным прогнозированием,

$$\varepsilon_v = \frac{|v - v_3|}{v_3} = \left| \frac{t_{и}}{t_{y} l_{B} \rho_3} (G_{k+1} - G_{пр\ k+1}) \right|. \quad (11)$$

Структурная схема системы автоматического управления скоростью с упреждением шахтного ленточного конвейера приведена на рисунке 3. Основой системы является микропроцессорное устройство (контроллер или одноплатный компьютер). В него через соответствующие согласующие устройства вводятся сигналы входных координат, полученные с конвейерных весов и датчика скорости конвейера. В микропроцессорном устройстве по

сигналу таймера через интервалы времени t_y формируются и заполняются элементы временного ряда m_1, m_2, \dots, m_k , а затем по заданному алгоритму рассчитывается прогнозируемое значение $G_{пр\ k+1}$. Исходя из прогноза загрузки вычисляется необходимая скорость конвейера, которая в качестве сигнала задания скорости поступает в САУ электропривода конвейера.

САУ электропривода конвейера выполнена по классической схеме «по возмущению» (в случае необходимости возможна схема «с обратной связью по скорости»). САУ, получая сигнал задания скорости, стремится обеспечить заданную скорость движения тягового органа конвейера.

Таким образом, осуществляется управление скоростью конвейера, при котором среднее на каждом шаге управления значение погонной массы груза на ленте будет стремиться к заданной постоянной величине.

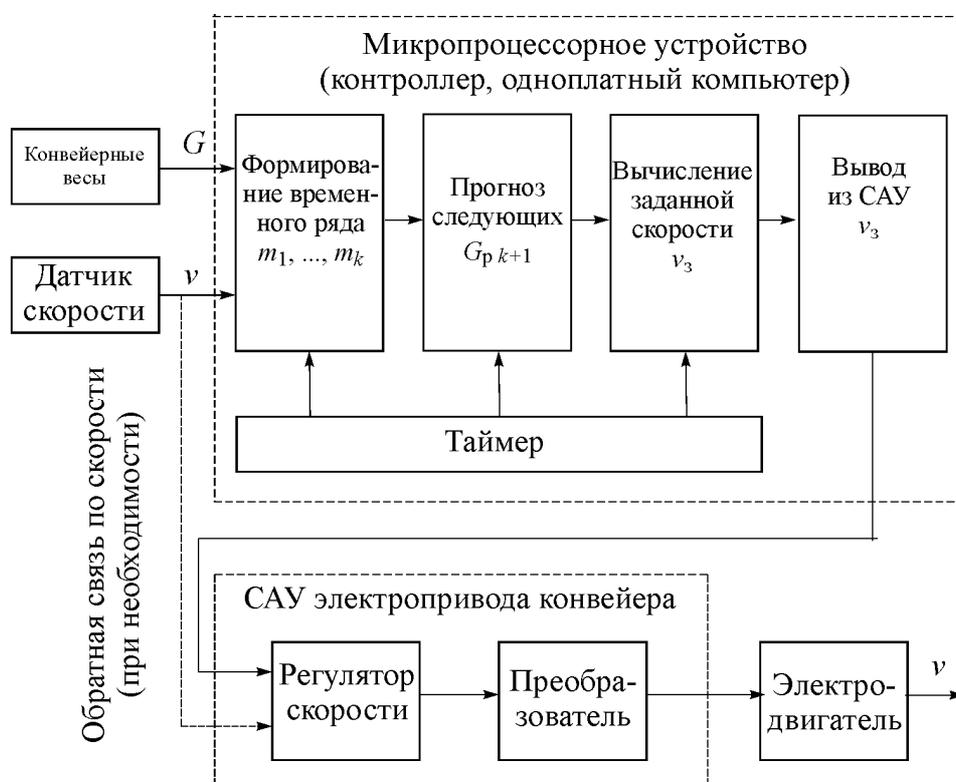


Рисунок 3 Графическая интерпретация алгоритма определения задаваемой скорости конвейера

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Максимальный эффект от регулирования скорости, который заключается в максимальном на каждом шаге управления приближении погонной массы груза на конвейере к некоторому заданному значению, достигается в случае равенства интервалов времени прохождения грузом конвейерных весов и измерения количества груза на весах.

2. Прогнозирование количества груза, поступающего на конвейер за время, соответствующее шагу управления скоростью,

позволит снизить ошибку вычисления скорости, задаваемой в САУ электропривода конвейера.

3. Разработаны алгоритм расчета с упреждением количества груза, которое поступает на конвейер на каждом шаге управления, и задаваемого значения скорости, а также соответствующая структурная схема САУ электроприводом конвейера. При таком подходе обеспечивается наилучшее приближение среднего на каждом шаге управления значения погонной массы груза на конвейере к заданной постоянной величине.

Библиографический список

1. Шахмейстер, Л. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров [Текст] / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева. — М. : Московский горный ин-т, 1972. — 164 с.
2. Заика, В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта [Текст] / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2015. — № 3. — С. 82–88.
3. Ставицкий, В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера [Текст] / В. Н. Ставицкий // Наукові праці ДонНТУ. — 2012. — № 201. — С. 49–53.
4. Корнеев, С. В. Методика тягового расчета шахтных ленточных конвейеров на основе компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Изв. вузов. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 81–89.
5. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Выпуск 1 [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. — М. : Мир, 1974. — 408 с.

© Корнеев С. В.© Зотов В. А.© Доброногова В. Ю.© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТИ Леоновым А. А., к.т.н., доц., зав. каф. ГЭиТС СИПИМ ЛГУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 01.09.2020.

Doctor of Technical Sciences Korneev S. V., PhD in Engineering Zotov V. A., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P. (DonSTI, Alchevsk, LPR, vidofea@gmail.com)

AUTOMATIC RATE-PREDICTIVE CONTROL SYSTEM FOR MINE BELT CONVEYORS

There have been given the predictive computation algorithm of the quantity of load incoming to the conveyor at each control step, and the set rate value, as well as a corresponding block diagram of the automatic rate control system for mine belt conveyors.

Key words: belt conveyor, rate, automatic rate control system of conveyor, prediction.