

УДК 621.867:004.94

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.02.026

Реутов Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
Брянский государственный
технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября, 7
e-mail: aareutov@yandex.ru

Reutov Alexander A.

Doctor of technical sciences, professor,
The Bryansk State Technical University,
241035, Bryansk, 7 bul. 50years of October
e-mail: aareutov@yandex.ru

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СТУПЕНЧАТОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
СКОРОСТИ КОНВЕЙЕРА****SIMULATION OF THE CONVEYOR SPEED
STEP CONTROL***Аннотация:*

Рассмотрено моделирование процесса ступенчатого регулирования скорости конвейера с использованием программ Mathcad, Simulink. Показано, что общие статистические характеристики грузопотоков можно использовать лишь для ориентировочной оценки значений скоростей ступеней V_i . Для более точного определения значений V_i необходимо моделировать процесс регулирования скорости конвейера с реальными значениями грузопотока за рабочую смену или за сутки. Получены аналитические зависимости для вычисления оптимальных значений скорости конвейера через статистическую оценку грузопотока за период наблюдения.

Рассмотрен пример имитационного моделирования с применением программы Mathcad. С использованием линейной интерполяции 104 значений грузопотока и операторов программирования вычислены значения V_{cp} и N_n для двух-, трех- и четырехступенчатых режимов регулирования. Результаты работы могут использоваться при проектировании регулируемого привода ленточных конвейеров.

Ключевые слова: грузопоток, конвейер, ступенчатое регулирование скорости, алгоритм регулирования, имитационное моделирование, Mathcad, Simulink

Abstract:

The possibilities of step control conveyor speed simulation within Mathcad and Simulink software are considered in the article. General statistical parameters of the conveyor load can be used for a rough estimation of the speed step values only. To check the efficiency of the control algorithms and to determine the characteristics of the control system more accurately it is necessary to simulate the process of speed control with real values of traffic for a work shift or for a day. The analytical formulas for optimal speed step values were obtained using empirical values of load. The simulation example within Mathcad software is considered. The values of V_{cp} and N_n for two-step, three-step and four-step control regimes were calculated with linear interpolation of 104 load data and the use of Mathcad programming operators. Work results can be applied during the design of belt conveyors with adjustable drives.

Key words: load flow, conveyor, the stepped speed regulation, an algorithm of regulation, simulation, Mathcad, Simulink

Введение

При проектировании конвейеров горных предприятий необходимо учитывать, что поступающий на конвейер грузопоток изменяется в течение времени. Характеристики грузопотоков, поступающих на конвейеры горных предприятий, измерялись сотрудниками ИГД им. А.А. Скочинского, НИИКМА им. Л.Д. Шевякова и других организаций. По результатам статистической обработки эмпирических данных грузопотоков были разработаны методики расчета оптимальных параметров конвейеров и бункеров, обеспечивающих минимальные эксплуатационные расходы.

В [1] отмечено, что вследствие неравномерной работы очистного оборудования участковый конвейер значительную часть времени работает с неполной загрузкой. Поэтому предложено выбирать участковый конвейер с учетом коэффициента машинного времени добывающего оборудования и коэффициента неравномерности грузопотока. Приведенные эмпирические значения минутного грузопотока Q_m , т. е. массы груза, поступающего на конвейер за одну минуту, показывают изменение Q_m от 2 до 5 т/мин в течение 9 минут.

Снижение загрузки конвейера ведет к гиперболическому увеличению удельных энергозатрат χ на транспортирование. Так, работа конвейера с 25-процентной загрузкой увеличивает χ на 160 % по сравнению с номинальной загрузкой [2].

При скорости ленты, например, 2,5 м/с за одну минуту происходит загрузка 150 м ленты конвейера, поэтому для оценки загруженности ленты и отсутствия просыпей необходимо использовать эмпирические значения грузопотока за более короткий промежуток времени. Характеристики минутных грузопотоков пригодны для расчетов конвейеров с загрузочным бункером, оборудованным питателем. В ряде случаев установка загрузочного бункера конвейера невозможна или требует существенных капитальных затрат. Для анализа безбункерной загрузки конвейеров необходимы значения грузопотока Q_c за время $t_Q = 1 \dots 3$ с. Обработка результатов замеров забойных грузопотоков угольных шахт показала, что коэффициент вариации Q_c достигает величины 0,73 при $t_Q = 1,2$ с [3].

Целью исследования является разработка имитационных моделей для проверки работоспособности алгоритмов и определения параметров управления скоростью конвейера с учетом поступающего грузопотока.

Возможности регулирования скорости конвейера

Важным способом снижения эксплуатационных расходов является регулирование скорости конвейера в соответствии с фактическим грузопотоком. Регулирование скорости конвейеров не получило ранее широкого распространения на горных предприятиях из-за недостаточной надежности и эффективности регулирующей аппаратуры.

Многоскоростные асинхронные электродвигатели позволяют дискретно изменять скорость конвейера. Их применение обеспечивает движения грузонесущего органа с несколькими фиксированными скоростями, однако согласовать скорости электродвигателя с необходимыми скоростями конвейера практически невозможно. Кроме того, переключение скоростей сопровождается вредными электромагнитными и механическими процессами в приводе конвейера.

Новые возможности регулирования появились с созданием полупроводниковых устройств регулирования электроприводов, которые позволяют регулировать в широком диапазоне частоту вращения и электромагнитный момент электродвигателя.

Поступающий на конвейер грузопоток изменяется почти непрерывно. Если устройство регулирования также изменяет скорость конвейера непрерывно в соответствии с изменением Q_c , 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 [4].

При проектировании конвейеров используют большое количество критериев [5]. Для выбора оптимального количества ступеней и соответствующих им значений скорости в качестве критериев можно использовать энергопотребление конвейера или приведенную стоимость транспортировки. Однако рассчитать эти показатели с приемлемой точностью трудоемко. В качестве критерия эффективности регулирования скорости конвейера лучше использовать среднее значение скорости или путь, пройденный лентой, за установленное время.

В [6] приведены зависимости для расчета значений скорости ступеней V_i для стационарного нормального случайного процесса изменения Q_c . Однако многие исследователи отмечают, что во многих случаях забойные грузопотоки не являются ни стационарными, ни нормальными случайными процессами [7]. Поэтому общие статистические характеристики грузопотоков можно использовать лишь для ориентировочной оценки значений V_i . Для более точного определения значений V_i необходимо моделирование процесса регулирования скорости с реальными значениями грузопотока Q_c за установлен-

ное время. Для горных предприятий с учетом технологии добычи необходимо использовать значения грузопотока Q_c за рабочую смену или за сутки. Результаты замеров грузопотока и мощности привода магистрального ленточного конвейера 2ЛУ120 в течение 4 суток на шахте «Должанская-Капитальная» представлены в [8].

Расчетное значение средней скорости m_V зависит от ожидаемой относительной длительности P_i работы конвейера со скоростью i -ой ступени V_i :

$$m_V = V_1 P_1 + V_2 P_2 + \dots + V_n P_n; \quad \sum_{i=1}^{N_S} P_i = 1, \quad (1)$$

где N_S – количество ступеней регулирования.

Скорость i -ой ступени V_i выразим через величину номинальной погонной нагрузки ψ и значение грузопотока Q_i , соответствующего i -ой ступени:

$$V_i = Q_i / \psi.$$

Величина номинальной погонной нагрузки ψ является конструктивной характеристикой конвейера и обеспечивает его нормальную работу без просыпания груза:

$$\psi = Q_n / V_n,$$

где Q_n и V_n – номинальные значения производительности и скорости конвейера.

Величины P_i могут быть вычислены через статистическую оценку $p(x)$ суммарной длительности грузопотока $Q_c = x$ за период наблюдения (то есть через статистическую плотность распределения величины Q_c):

$$P_i = \int_{Q_{i-1}}^{Q_i} p(x) dx; \quad i = 1, \dots, N_S.$$

Необходимое условие минимума средней скорости m_V имеет следующий вид:

$$\frac{\partial m_V}{\partial Q_i} = 0, \quad i = 1, \dots, N_S - 1. \quad (2)$$

Если система управления не останавливает конвейер при $Q_c = 0$, а лишь снижает скорость до значения V_0 , то уравнение (1) принимает вид:

$$m_V = V_0 P_0 + \frac{Q_1}{\psi} P_1 + \frac{Q_2}{\psi} P_2 + \dots + V_n (1 - P_0 - P_1 - \dots - P_{n-1}).$$

Имитационное моделирование с использованием Mathcad

Целью имитационного моделирования процесса регулирования скорости конвейера является проверка работоспособности алгоритма, определение оптимальных параметров регулирования, соответствующих характеристикам поступающего на ленту грузопотока Q_c , например, определение оптимального количества ступеней регулирования и соответствующих им значений производительности.

В качестве критериев эффективности регулирования примем среднее значение скорости V_{cp} и количество переключений скорости N_n за время моделирования.

Исходными данными для имитационного моделирования являются эмпирические данные замеров грузопотока Q_c . При $t_Q = 1$ с только за одну восьмичасовую рабочую смену результаты замеров включают 28800 значений Q_c . Программная обработка таких больших массивов данных возможна с использованием математических программ Mathcad, Matlab или программ, специально написанных для данной задачи на одном из алгоритмических языков.

Рассмотрим пример имитационного моделирования процесса регулирования скорости конвейера с использованием программы Mathcad. В качестве исходных данных использованы 104 значения Q_c с математическим ожиданием 28,8 кг/с и средним квадратичным отклонением 14,2 кг/с. Максимальные значения Q_c достигают 50 кг/с, что соответствует теоретической производительности конвейера 180 т/ч $t_Q = 3$ с.

С использованием линейной интерполяции дискретных значений Q_c и операторов программирования вычислены значения V_{cp} и N_n для двух-, трех- и четырехступенчатых режимов регулирования при номинальной скорости $V_n = 2,5$ м/с.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения V_{cp} и N_n для оптимальных значений скорости ступеней V_i ($i = 0 \dots N_s$), рассчитанных по уравнениям (2).

Таблица 1

Результаты моделирования

N_s	V_i / V_n	V_{cp} , м/с	N_n
2	0,125; 0,66; 1	1,96	11
3	0,125; 0,3; 0,66; 1	1,79	16
4	0,125; 0,25; 0,6; 0,75; 1	1,74	24

Количество значений отношения скоростей V_i/V_n в таблице на единицу превышает N_s , так как в модели принято $V_0 = V_n/8$ при $Q_c = 0$.

На рис. 1 приведены графики рассмотренного примера изменения поступающего грузопотока Q_c и скорости конвейера во времени. Для приведения к одному масштабу значения Q_c на графике умножены на 0,05, т. е. масштаб по оси ординат для Q_c – 1:20 кг/с. V_{two} , V_{three} , V_{four} – скорость конвейера (м/с) при двухступенчатом, трехступенчатом и четырехступенчатом регулировании.

Для использованных в примере исходных данных наиболее заметно V_{cp} снижается при двух- и трехступенчатом регулировании. Четырехступенчатый режим снижает V_{cp} лишь на 2,9 % по сравнению с трехступенчатым при заметном увеличении N_n на 53 %.

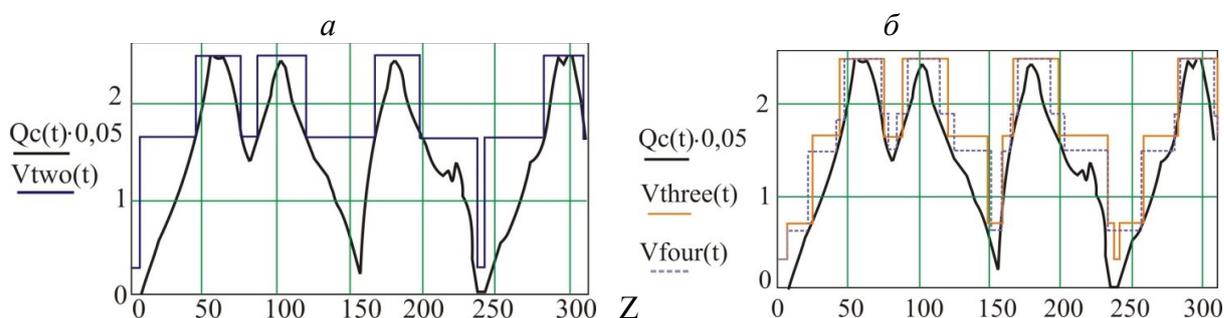


Рис. 1 – Графики изменения грузопотока Q_c (кг/с) и скорости конвейера (м/с) во времени t (с): *a* – двухступенчатое регулирование, *б* – трех- и четырехступенчатое регулирование

В рассмотренном примере значения скоростей ступеней V_i остаются неизменными, а в [9] предложен способ ступенчатого регулирования скорости ленты конвейера, в котором количество ступеней регулирования и скорости ступеней V_i принимают разные значения при возрастании и снижении грузопотока.

Инкрементный алгоритм регулирования скорости ленты конвейера

Способ [9] включает постоянное измерение фактической скорости ленты путем управления приводом конвейера в местах загрузки и поступающего грузопотока. Приемная способность конвейера q_{out} (кг/с) зависит от текущей скорости V ленты в месте загрузки и номинальной погонной нагрузки ψ (кг/м) конвейера ($q_{out} = \psi V$).

Скорость ленты *увеличивают* на величину q_1/ψ в течение времени Δt_1 , если поступающий грузопоток Q_c превышает приемную способность конвейера q_{out} ; или *умень-*

шают скорость ленты на величину q_2/ψ в течение времени Δt_2 , если поступающий грузопоток Q_c меньше приемной способности конвейера q_{out} на величину q_2 ; или *оставляют* скорость ленты без изменения, если величина поступающего грузопотока Q_c находится в диапазоне значений от $q_{out} - q_2$ до q_{out} ; или *прекращают* загрузку конвейера без изменения скорости ленты, если поступающий грузопоток Q_c превышает максимальную приемную способность конвейера Q_{max} .

Здесь q_1, q_2 – отношение номинальной производительности конвейера Q_n к выбранному количеству ступеней регулирования при увеличении и снижении скорости ленты. Интервалы времени Δt_1 и Δt_2 необходимы для плавного изменения скорости. Если a_1 и a_2 – допустимые ускорение и замедление ленты, то $\Delta t_1 \geq q_1/\psi \cdot a_1$, $\Delta t_2 \geq q_2/\psi \cdot a_2$.

Имитационная модель инкрементного алгоритма регулирования скорости разработана в среде Simulink с использованием блоков «From File», «Scope», «HitCrossing», «Unit Delay», «Saturation», «Stop Simulation» и др. для трехступенчатого режима увеличения скорости V ленты от начального значения V_0 до номинального значения V_n и двухступенчатого режима снижения скорости V ленты от V_n до V_0 . При этом $q_1 = Q_n/3$, а $q_2 = Q_n/2$.

Трехступенчатый режим увеличения скорости позволяет увеличивать скорость V ленты на величину инкремента $\Delta_1 = (V_n - V_0)/3$. Двухступенчатый режим снижения скорости позволяет уменьшать скорость ленты на величину инкремента $\Delta_2 = (V_n - V_0)/2$. Большое количество ступеней при увеличении скорости и меньшее при снижении позволяют плавно увеличивать скорость и снизить количество переключений при снижении грузопотока.

Результаты моделирования для 104 значений Q_c рассмотренного выше примера приведены на рис. 2.

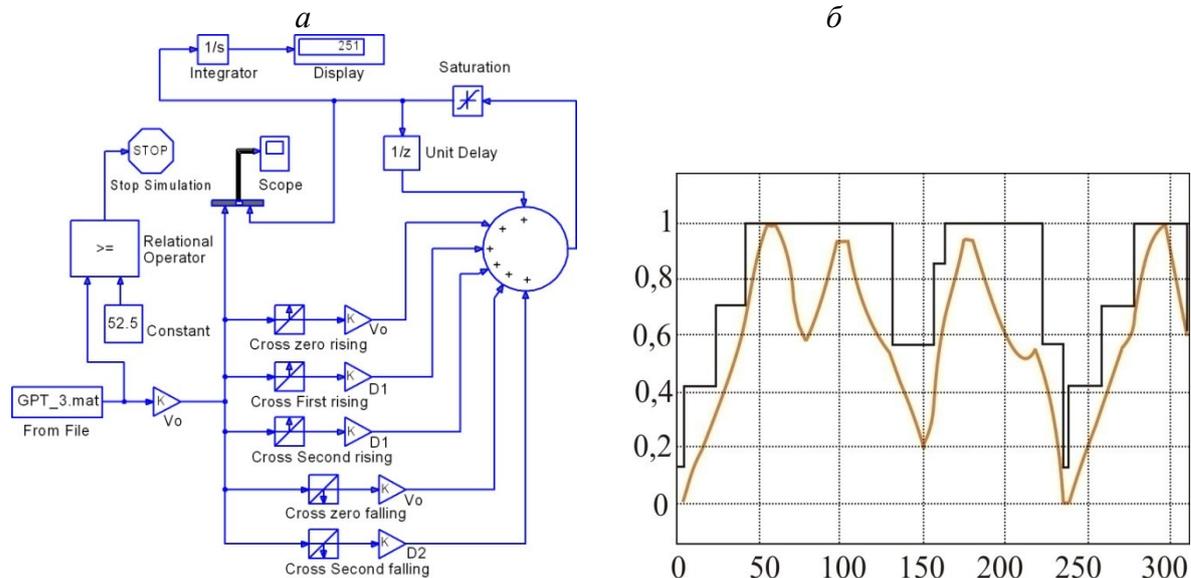


Рис. 2 – Схема модели (а) и графики (б) изменения грузопотока Q_c и скорости V конвейера, полученные с использованием Simulink (масштаб по оси абсцисс для t – 1:1 с; масштаб по оси ординат для Q_c – 1:50 кг/с, для V – 1:2,5 м/с)

Модель включает 3 блока «HitCrossing» (Cross zero rising, Cross First rising, Cross Second rising), соответствующие трем ступеням возрастания Q_c и 2 блока «HitCrossing» (Cross zero falling, Cross Second falling), соответствующие двум ступеням снижения Q_c (см. рис. 2). Параметры блоков «HitCrossing» настроены так, что переключение ступеней происходит, если $Q_c = \{0, Q_n/3, 2Q_n/3\}$ при возрастании грузопотока и $Q_c = \{Q_n/2, 0\}$ при снижении грузопотока. Блок «Stop Simulation» контролирует превышение максимальной приемной способности конвейера и останавливает моделирование, если $Q_c > Q_{max}$.

Уменьшение количества ступеней регулирования при снижении грузопотока позволило сократить по сравнению с полностью трехступенчатым режимом (см. рис. 1б) количество переключений до 12 и незначительно увеличило $V_{\text{ср}}$ до 2,03 м/с. То есть количество переключений сократилось в 1,54 раза, средняя скорость увеличилась на 12,8 % (см. табл. 1).

Имитационное моделирование инкрементного алгоритма регулирования показало возможность управления плавностью изменения скорости конвейера при монотонном изменении грузопотока. Однако осцилляции величины Q_c около значений ступеней приводят к необоснованному завышению или занижению скорости конвейера.

Рассмотренные подходы к имитационному моделированию применимы не только для конвейерного транспорта, но и для экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров [10]. Они позволяют оценить эффективность диспетчерского алгоритма, определить путь повышения производительности.

Заключение

Эффективным способом снижения эксплуатационных расходов конвейерного транспорта является регулирование скорости конвейера в соответствии с фактическим грузопотоком.

Вероятностные методы расчета характеристик процессов загрузки и регулирования скорости конвейера не позволяют получать результаты с достаточной для практического использования точностью из-за сложности формального описания грузопотоков горных предприятий. Для проверки работоспособности алгоритмов регулирования и более точного определения характеристик системы регулирования необходимо имитационное моделирование процесса регулирования скорости с реальными значениями грузопотока за рабочую смену или за сутки. Характеристики минутных грузопотоков пригодны для расчетов конвейеров с загрузочным бункером, а для анализа безбункерной загрузки конвейеров необходимы значения грузопотока за время 1...3 с.

С учетом больших объемов эмпирических данных замеров грузопотоков имитационное моделирование регулирования скорости конвейера с использованием программ Mathcad, Simulink позволяет определить характеристики системы регулирования с приемлемой точностью и трудозатратами.

Рассмотренный пример моделирования показал, что среднее значение скорости конвейера $V_{\text{ср}}$ наиболее заметно снижается при двух- и трехступенчатом регулировании. Дальнейшее увеличение количества ступеней регулирования незначительно снижает $V_{\text{ср}}$ по сравнению с трехступенчатым, но заметно увеличивает интенсивность переключений скорости.

Инкрементный алгоритм использует разное количество ступеней регулирования при возрастании и снижении грузопотока и позволяет управлять интенсивностью переключения ступеней регулирования скорости конвейера. Имитационное моделирование инкрементного алгоритма регулирования в среде Simulink показало возможность управления интенсивностью переключений ступеней регулирования скорости конвейера при монотонном изменении грузопотока. Однако осцилляции величины грузопотока около значений ступеней приводят к необоснованному завышению или занижению скорости.

Литература

1. Гудалов В.П. Выбор ленточных конвейеров для транспортирования угля из очистных забоев / В.П. Гудалов // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 2. - М.: Недра, 1975. - С. 80 – 86.
2. Semenchenko A. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation/ A. Semenchenko, M. Stadnik, P. Belitsky, D. Semenchenko, O. Stepanenko// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Issue 4/1 (82). - 2016. - P. 42 –51.

3. Пономаренко В.А. Исследование внутриминутных характеристик забойных грузопотоков / В.А. Пономаренко, Е.Л. Креймер // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 4. - М.: Недра, 1978. - С. 27 – 33.
4. Реутов А.А. Обеспечение загрузки конвейеров с регулируемой скоростью ленты / А.А. Реутов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2005. - № 3 (7). - С. 4 – 6.
5. Реутов А.А. Основы автоматизации проектирования машин / А.А. Реутов. – Брянск: Изд-во Брянского государственного технического университета, 2013. - С. 44 – 48.
6. Шахмейстер Л.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. - М.: Машиностроение, 1983. - С. 100 – 114.
7. Мерцалов Р.В. Обобщение статистики о неравномерности забойных грузопотоков на угольных шахтах / Р.В. Мерцалов // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 9. - М.: Недра, 1984. - С. 5 – 13.
8. Кондрахин В.П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник, П.В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. - 2013. - № 2 (26). - С. 140 – 150.
9. Пат. 2600404 Российская Федерация, МПК В65G 43/08. Способ регулирования скорости ленты конвейера / А.А. Реутов. - № 2015144201/11; заявл. 14.10.2015, опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29.
10. Захаров А.Ю. Алгоритм оперативной диспетчеризации карьерного автотранспорта / А.Ю. Захаров, А.Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2012. - № 5 (93)