

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.316.7:622.647.2

В.Т. Заика, д-р техн. наук, проф.,
Ю.Т. Разумный, д-р техн. наук, проф.,
В.Н. Прокуда

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: prokudav@gmail.com

ВЛИЯНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА НА ГРУЗОПОТОКИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ШАХТНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

V.T. Zaika, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Yu.T. Razumny, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.N. Prokuda

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: prokudav@gmail.com

REGULATED DRIVES INFLUENCE ON COAL FLOW AND ENERGY EFFICIENCY OF MINE CONVEYOR TRANSPORT SYSTEM

Цель. Выявить особенности формирования грузопотоков в узлах сложно разветвленной транспортной сети без регулирования и при регулировании скорости движения ленты конвейерных установок и использовать эти особенности для повышения энергоэффективности конвейерного транспорта.

Методика. Методы статистического анализа и теория матриц использованы для нахождения распределения значений грузопотоков в узлах конвейерной сети, теория Марковских процессов использована при описании потоков из очистных забоев, а также для имитационного моделирования.

Результаты. Предложен метод определения плотности вероятности грузопотоков в узлах шахтной конвейерной сети с использованием регулирования скорости конвейерных лент при известных законах распределения угольного потока из каждого очистного забоя. Получены зависимости и алгоритмы, которые доказывают дополнительное уменьшение расхода электроэнергии при использовании регулируемого привода на цепочке конвейеров.

Научная новизна. Впервые доказано, что регулирование скорости движения ленты на нескольких конвейерах в цепочке приносит дополнительное уменьшение расхода электроэнергии за счет увеличения времени работы с минимальной скоростью каждого последующего конвейера, причем характер зависимости прироста энергоэффективности от количества конвейеров с преобразователями частоты – экспоненциальный с отрицательным показателем степени. Также доказано, что при уменьшении длины первого конвейера в цепочке этот эффект снижается.

Практическая значимость. Доказанные зависимости позволяют определять оптимальные места установки регулируемых приводов на шахтных магистральных конвейерах при ограниченном числе преобразователей частоты. Предложенные алгоритмы и аналитические модели при соответствующем информационном обеспечении позволяют в реальном времени производить контроль энергоэффективности транспортных линий, включающих конвейерные установки с регулируемым приводом.

Ключевые слова: *расход электроэнергии, конвейерный транспорт, регулируемый привод, скорость ленты, грузопоток, очистной забой, распределение угля на конвейере, энергоэффективность*

Постановка задачи. Повышение энергоэффективности шахтного транспорта непрерывного действия заключается в увеличении грузопотоков и снижении неравномерности распределения угля, поступающего на конвейеры. Выполнение первого условия возможно за счет увеличения количества лав или повышения нагрузки на существующие. Для реализации второго условия необходимо регулировать скорость движения ленты путем оснащения конвейеров регулируемым приводом.

В основополагающих работах авторов Шахмейстера Л.Г., Дмитриева В.Г., Монастырского В.Ф., в качестве эффективного средства энергосбережения предлагается регулировать скорость движения конвейерной ленты пропорционально входному грузопотоку, но при этом не раскрыта та особенность, что в сложно разветвленной транспортной сети при этом изменяются статистические характеристики массовых потоков каждого конвейера, такие как математическое ожидание поступления груза, среднее время отсутствия и наличия грузопотока и ряд других, которые определяют нелинейный характер изменения их электропотребления.

© **Заика В.Т.**, Разумный Ю.Т., Прокуда В.Н., 2015

Эти обстоятельства требуют дополнительных исследований по учету и количественной оценке влияния регулируемого привода на характеристики грузопотоков и энергоэффективность транспортной системы в целом.

Анализ исследований. Описанию грузопотоков из забоев посвящены работы Шахмейстера Л.Г., Дмитриева В.Г., Кримана С.А., а также [1–3]. Дополняют эти исследования работы [4,5], в которых представлен анализ вероятностных характеристик грузопотоков, полученных для очистных забоев в ходе натурных экспериментов. Исследованию регулируемого привода посвящены работы [6–9].

Предлагаемый ниже материал посвящен исследованию законов распределения грузопотоков, которые формируются конвейерами с регулируемой скоростью, в том числе при слиянии нескольких потоков. Уделено внимание оценке энергоэффективности такой системы транспорта.

Цель. Выявить особенности формирования грузопотоков в узлах сложно разветвленной транспортной сети без регулирования и при регулировании скорости движения ленты конвейерных установок и использовать эти особенности для повышения энергоэффективности конвейерного транспорта.

Изложение основного материала. В общем случае грузопоток из очистного забоя представляет собой последовательность импульсов случайной длины со случайными интервалами отсутствия груза, рис.1. Грузопоток может быть описан как непрерывный случайный процесс.

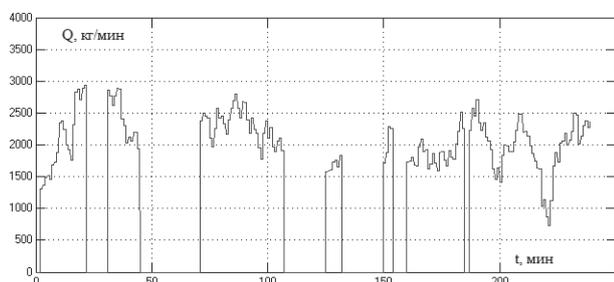


Рис. 1. Пример реализации транспортного грузопотока

Для вычисления основных характеристик реального грузопотока $Q(t)$ представим его как произведение двух взаимно некоррелированных величин [10]: непрерывной — $Q'(t)$ и — дискретной — $Y_Q(t)$. Тогда

$$Q(t) = Q'(t) \cdot Y_Q(t). \quad (1)$$

Каждая компонента в (1) представляет собой временной ряд со своими характеристиками. Принимаем, что непрерывная составляющая грузопотока аппроксимируется случайной функцией с распределением мгновенных значений производительности по закону близкому к нормальному.

$$p(Q') = \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right], \quad (2)$$

где $M_{Q'}$ — математическое ожидание; $\sigma_{Q'} = \sqrt{D_{Q'}}$ — среднее квадратичное отклонение; $D_{Q'}$ — дисперсия.

Для процесса $Y_Q(t)$ плотность распределения времени наличия и отсутствия грузопотока удовлетворительно описывается экспоненциальным законом

$$p(\tau_n) = \lambda \exp[-\lambda \tau]; \quad (3)$$

$$p(\tau_0) = \mu \exp[-\mu \tau], \quad (4)$$

где $\lambda \cdot \Delta t$ — вероятность перехода от 1 к 0; $\mu \cdot \Delta t$ — вероятность перехода от 0 к 1; Δt — рассматриваемый интервал времени (одна минута); также $\lambda = 1/T_n$; $\mu = 1/T_0$, где T_n и T_0 — математические ожидания времени поступления и отсутствия грузопотока.

Выражение для плотности вероятности распределения грузопотока из очистного забоя имеет вид

$$p(Q) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right], \quad (5)$$

где $\delta(0)$ — дельта-функция, описывающая вероятность отсутствия грузопотока.

Опираясь на выражения (1–5), уточним закон распределения потока угля на выходе конвейера при регулируемой скорости ленты.

Представим конвейер с регулируемой скоростью звеном запаздывания с переменной задержкой, пропорциональной входящему грузопотоку. При этом, после достижения горной массой конца конвейера, выходной поток идентичен входному. При постоянстве скорости ленты, изменения минутного объема груза от начала до конца происходят за одинаковые промежутки времени, а при регулировании скорости передаются мгновенно, так как уровень заполнения конвейера по всей длине все время поддерживается практически постоянным. В то же время при отсутствии входного грузопотока и существующих системах такой режим часто нарушается, конвейер полностью не останавливается, а работает с минимально возможной скоростью, обычно не менее 1/10 от номинальной.

Введем параметр $K_{ск}$ — „коэффициент скорости“, учитывающий глубину регулирования скорости в период не поступления горной массы на конвейер: под $K_{ск}$ подразумевается отношение минимально возможной скорости к скорости, которая устанавливается системой регулирования при поступлении потока, равное его математическому ожиданию — то есть $K_{ск}$ численно обратно пропорционален величине D , известной в теории привода как глубина регулирования. Учет коэффициента $K_{ск}$ позволяет представить известную запись для расчета плотности вероятности закона распределения скорости движения конвейерной ленты при ее регулировании в виде

$$p(v_k) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) \cdot K_{ск} \cdot v_{ном} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \cdot v_{ном}, \quad (6)$$

где $v_{ном}$ – скорость, которая соответствует математическому ожиданию M_Q поступающего на конвейер потока.

При плотности вероятности распределения грузопотока согласно выражению (5) и плотности вероятности распределения скорости ленты согласно выражению (6), поступающий на ленту уголь будет распределяться следующим образом. В периоды поступления горной массы конвейер заполняется равномерно на заранее выбранный уровень (назовем его „максимальный“), скорость поддерживается пропорциональной входному потоку. В периоды отсутствия поступления горной массы конвейер не заполняется, скорость поддерживается минимальной. Для описания погонного распределения груза на конвейерной ленте представим конвейер бесконечным, при этом суммы промежутков, соответственно, отсутствия и наличия грузопотока будут стремиться к значениям их математических ожиданий. Тогда с вероятностью $\mu / (\mu + \lambda \cdot K_{ck})$ погонная нагрузка будет на „максимальном“ уровне, а с вероятностью $\lambda \cdot K_{ck} / (\mu + \lambda \cdot K_{ck})$ погонная нагрузка будет отсутствовать.

Обоснуем длину конвейера, более которой груз на нем будет распределяться как на условно „бесконечном“ с вероятностью в 95%, что упрощает вид выражения плотности вероятности грузопотока. Как известно из математической статистики, при экспоненциальном законе распределения значение вероятности 95% соответствует значению $\ln(20)/\lambda \approx 3/\lambda$ случайной величины. Если время поступления грузопотока меньше чем время его транспортировки, то заполненный участок на конвейере ограничивается длиной конвейера (рис. 2). При этом вероятностная граница возможно максимально заполненного участка на конвейере становится реальной и фактически ограничивает справа кривую распределения плотности вероятности.

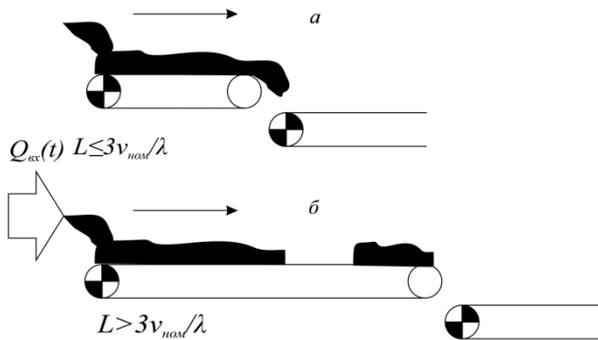


Рис. 2. Распределение груза на конвейере при разных отношениях длины и скорости транспортирования к вероятности поступления груза: а – длина конвейера $L \leq 3v_{ном}/\lambda$; б – длина конвейера $L > 3v_{ном}/\lambda$

Это означает, что если утроенное произведение математического ожидания времени поступления грузопотока на скорость транспортирования (отвечающую математическому ожиданию величины потока в период поступления) больше длины конвейера, то, с вероятностью 95 %, его можно считать условно „бесконечным“, то есть 95 % всех периодов поступления полностью „вмещаются“ на конвейер. В противном случае

необходимо учитывать длину конвейера, влияющую на экспоненциальные распределения вероятностей промежутков отсутствия и наличия грузопотоков на конвейерной ленте.

При длине конвейера $l > 3T_{п}v_{ном}$ (условно бесконечный конвейер) плотность вероятности выходного грузопотока описывается выражением (7), что следует из композиции плотности вероятности закона распределения скорости движения ленты и закона распределения погонной нагрузки конвейера

$$p(Q_{вых}) = \frac{\lambda \cdot K_{ck}}{\lambda \cdot K_{ck} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ck}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{ck} \cdot M_Q) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ck}} \cdot \frac{1}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_Q)^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \quad (7)$$

В выражении (7) вероятность наличия погонной нагрузки на „максимальном“ уровне $\mu / (\mu + \lambda \cdot K_{ck})$ разбивается на две составляющие

$$\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ck}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad ; \quad \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ck}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad ,$$

что соответствует вероятностям отсутствия и наличия грузопотока на входе конвейера соответственно. Когда на входе поток отсутствует, на выходе имеем минимальный поток ($K_{ck} \cdot M_Q$), а когда поток присутствует, то на выходе имеем поток аналогичный в это время входному $\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(Q' - M_Q)^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]$.

Анализируя выражение (7), можно утверждать, что математическое ожидание вероятности отсутствия грузопотока после конвейера с регулируемой скоростью уменьшилось с $\lambda / (\lambda + \mu)$ для входящего и до $\lambda \cdot K_{ck} / (\lambda \cdot K_{ck} + \mu)$ для исходящего потоков. При полученных в ходе эксперимента на шахте „Павлоградская“ для потока угля из очистного забоя значениях $\lambda = 0,25$ и $\mu = 0,164$ (приняв $K_{ck} = 0,1$), имеем соответствующее значение приведенных выражений 0,604 и 0,132. Представляет интерес то, что при этом время работы следующего конвейера в цепочке (тоже с регулируемым приводом) с минимальной скоростью, определяемой коэффициентом K_{ck} , увеличится с $\lambda / (\lambda + \mu)$ до $\frac{\lambda \cdot K_{ck}}{\lambda \cdot K_{ck} + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ck}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$, что при приведенных ранее данных составит 0,604 и 0,656 соответственно. Это означает, что регулируемый привод на следующем конвейере в цепочке приносит дополнительное уменьшение расхода электроэнергии за счет увеличения времени работы с минимальной скоростью.

От случая бесконечного конвейера перейдем к реальному конвейеру с конечной длиной. Если конвейер не „бесконечный“, вероятности наличия и отсутствия груза на конвейере принимают вид, соответственно,

$$\mu \left(1 - \exp \left(-\frac{l}{v_{ном}} \right) \right) \quad ; \quad (8)$$

$$\lambda \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right), \tag{9}$$

где l – длина конвейера; $v_{ном}$ – скорость конвейера при поступлении математического ожидания грузопотока. Выражения (8, 9) следуют из экспоненциального распределения длительности периодов наличия и отсутствия груза на конвейерной ленте.

При длине конвейера $l \leq 3T_{п} v_{ном}$, используя выражение (7) и умножая соответствующие вероятности поступления и не поступления грузопотока на выражения (8, 9), что необходимо для их приведения к фактической длине конвейера, получим

$$p(Q_{вск}) = \frac{\lambda \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right) \cdot K_{ск}}{\lambda \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right) \cdot K_{ск} + \mu \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном}} \right) \right)} \cdot \delta(0) +$$

$$+ \frac{\mu \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном}} \right) \right)}{\mu \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном}} \right) \right) + \lambda \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right) \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{ск} \cdot M_{Q'}) +$$

$$+ \frac{\mu \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном}} \right) \right)}{\mu \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном}} \right) \right) + \lambda \left(1 - \exp \left(- \frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right) \cdot K_{ск}} \cdot$$

$$\cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]. \tag{10}$$

Выражение (10) является общим видом плотности вероятности распределения грузопотока после конвейера с регулируемым приводом. При уменьшении отношения длины конвейера к номинальной скорости, выражение (10) вырождается в частный случай – выражение (7).

При длине конвейера меньше $3T_{п} v_{ном}$ (из рис. 2, используя $\lambda = l/T_{п}$) распределение погонной нагрузки на конвейере с уменьшением длины будет приближаться к аналогичному нерегулируемому конвейеру.

Получив выражения (7,10), определим вероятностное распределение результирующего потока в узлах транспортной схемы при слиянии n регулируемых и m нерегулируемых потоков (рис. 3).

Для решения поставленной задачи примем следующие допущения: после нерегулируемого конвейера, принимающего уголь из одной лавы, выходит поток, который представляется двумя дискретными состояниями: отсутствие потока и его наличие на уровне математического ожидания и флуктуаций вокруг этого значения. После конвейеров с регулируемой скоростью, соответственно, получается грузопоток, который представляется тремя дискретными состояниями: отсутствие потока, наличие на уровне математического ожидания поступления на конвейер (и флуктуаций вокруг него) и наличие на уровне $(K_{ск} \cdot M_{Q'})$ в периоды отсутствия на входе и наличия на выходе конвейера гор-

ной массы. В этом случае, для определения статистических характеристик результирующего (суммарного) грузопотока, можно использовать слагаемые выражений (7,10). Для этого запишем для n регулируемых грузопотоков два массива значений. В первом, по столбцам, указываем вероятности отсутствия грузопотока, наличие на минимальном уровне, наличие на уровне мат. ожидания, по строкам – номера грузопотоков. Во втором, по столбцам – соответствующие математические ожидания уровней поступления грузопотоков, по строкам – то же, что и для первого массива значений. Приведенные далее алгоритмы необходимы для нахождения произведения соответствующих вероятностей наличия результирующего грузопотока на определенном уровне или его отсутствия. Данный прием используется ввиду нелинейных зависимостей энергопотребления конвейера при регулировании скорости в зависимости от загрузки. При этом необходимо учитывать каждый уровень загрузки конвейера отдельно. Для этого использованы следующие методы сложения и умножения вероятностей:

$$n_{вер} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \cdot K_{ск1} & \mu_1 & \lambda_1 & \mu_1 & \mu_1 \\ \lambda_1 \cdot K_{ск1} + \mu_1 & \lambda_1 \cdot K_{ск1} + \mu_1 & \mu_1 + \lambda_1 & \lambda_1 \cdot K_{ск1} + \mu_1 & \lambda_1 + \mu_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_i \cdot K_{ски} & \mu_i & \lambda_i & \mu_i & \mu_i \\ \lambda_i \cdot K_{ски} + \mu_i & \lambda_i \cdot K_{ски} + \mu_i & \mu_i + \lambda_i & \lambda_i \cdot K_{ски} + \mu_i & \mu_i + \lambda_i \end{pmatrix}; \tag{11}$$

$$n_{ур} = \begin{pmatrix} 0 & K_{ск1} \cdot M_{Q1} & M_{Q1} \text{ или } \left(\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \right)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{ски} \cdot M_{Qi} & M_{Qi} \text{ или } \left(\frac{1}{Q' \sigma_{Qi} \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(Q' - M_{Qi})^2}{2\sigma_{Qi}^2} \right] \right)^2 \end{pmatrix}. \tag{12}$$

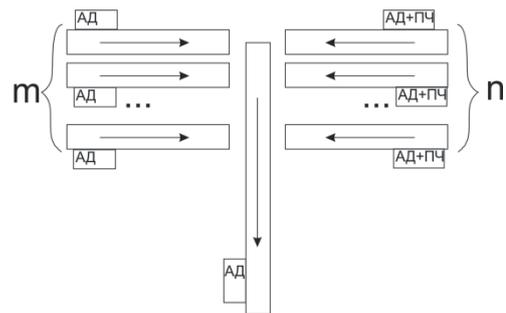


Рис. 3. Схема транспортной сети при слиянии угольных потоков с n регулируемым и m нерегулируемым приводом конвейеров: АД – асинхронный двигатель, АД+ПЧ – он же с преобразователем частоты

Для нерегулируемых конвейеров сделаем то же самое, с той лишь разницей, что второй столбец в массивах будет равен нулю, ведь у нерегулируемого потока лишь два дискретных состояния. В общем случае в каждый из массивов вносим характеристики регулируемых и нерегулируемых конвейеров. Алгоритм, пред-

ставлений на рис. 4, реалізує знаходження щільності ймовірності при суммуванні кількох потоків, поступаючих з регульованих і нерегульованих конвеєрів.

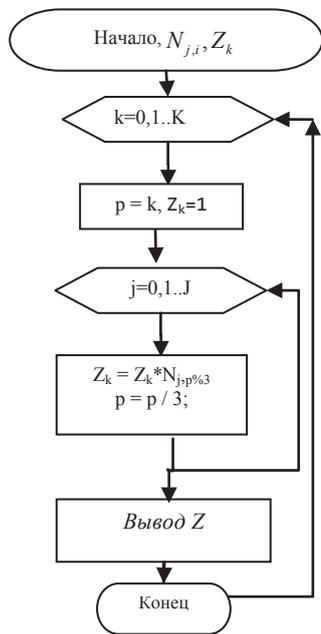


Рис. 4. Алгоритм знаходження значень щільності ймовірності при суммуванні кількох потоків з регульованих і нерегульованих конвеєрів

Дискретні рівні результуючого потоку найдемо шляхом суммування тих елементів масиву n_{yp} , для яких знаходили добуток відповідних ймовірностей з масиву $n_{вер}$. Алгоритм обробки фактично повторює принцип роботи з масивами Z_k і $N_{j,i}$, але визначається не добуток визначених елементів вихідного масиву, а їх сума.

По алгоритму, представленою на рис. 4, і алгоритму знаходження рівнів вантажопотоку, можна отримати розподіл сумарного вантажопотоку при злитті з кількох конвеєрних ланцюжків з сумішними типами приводу, кожна з яких приймає уголь тільки з однієї лави.

На рис. 5 представлено смодельований сумарний потік з чотирьох лав за десять годин з дискретністю надходження вантажу в 1 хв. Кожен потік проходить через один конвеєр з регульованою швидкістю ленти.

Нами було проведено імітаційне моделювання для випадку з чотирьох регульованих конвеєрів, що отримують уголь з чотирьох незалежних лав. Сходився потік в один вузол транспортної схеми. Отриманий з допомогою імітаційного моделювання за добуток (рис. 5) вантажопотік з точністю до 10% збігається з розрахунком при використанні запропонованої методики (рис. 4), що говорить про прийнятність запропонованого підходу.

Використовуючи спрощений тяговий розрахунок конвеєра [8], зробимо розрахунок електроспоживання ленточних

конвеєрів при відомих параметрах їх установки і погонної навантаження, розташованих за схемою, зображеною на рис. 6. Вважаємо, що параметри установки конвеєрів однакові і прийняті наступними: $q''_p = 9,2$ кг/м; $q'_p = 20$ кг/м; $q_s = 15$ кг/м; $c' = 1,1$; $\omega = 0,06$; $\beta = 0^\circ$; $v = 2$ м/с; $L = 1$ км. Звернемо увагу, що нерівномірність вантажопотоку також впливає на коефіцієнт опору руху конвеєрної ленти ω , але, за експериментальними даними, наведеною в літературі, з ростом погонної навантаження ω зменшується, а значить цей факт може тільки посилити наведеному далі доказування ефективності зниження швидкості конвеєрної ленти. Параметри вантажопотоку з очистного забору приймаємо наступні: $\lambda = 0,25$; $\mu = 0,164$; $M(Q) = 3420$ кг/хв; $D(Q) = 202500$ (кг/хв)². Розрахунок характеристик потоку в вузлах ланцюжка конвеєрів з регульованою швидкістю ленти виробимо за вираженням (12).

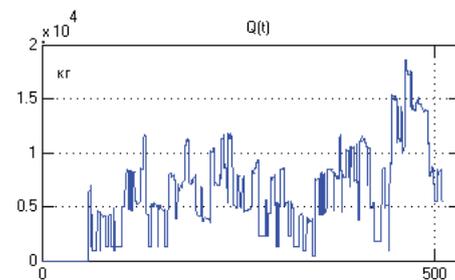


Рис. 5. Симульований в Simulink MATLAB сумарний потік з чотирьох лав

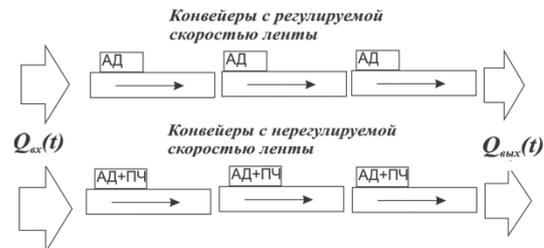


Рис. 6. Схема розташування конвеєрів для розрахунок їх електроспоживання: АД – асинхронний двигатель; АД+ПЧ – асинхронний двигатель з перетворювачем частоти; $Q_{вх}(t)$ і $Q_{вих}(t)$ – вхідний і вихідний вугільний потік, залежний від часу

На рис.7 наведено споживання електроенергії магістральним конвеєром в залежності від кількості працюючих на ньому лав. Столбці a – показують електроспоживання конвеєра при відсутності регулювання швидкості руху ленти, b – те саме, але з регулюванням швидкості, v – те саме, що і випадок b , але при регулюванні швидкості руху ленти за вантажопотоком наступного в ланцюжку конвеєрів. Зменшення витрати електроенергії в цьому випадку досягається за рахунок збільшення часу роботи на мінімальній швидкості наступного в ланцюжку конвеєрів.

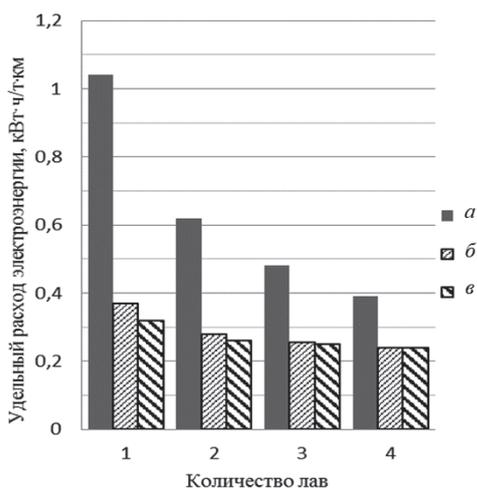


Рис. 7. Зависимость энергоэффективности транспортирования горной массы от количества лав и регулирования работы конвейеров: а – электропотребление конвейера при отсутствии регулирования скорости движения ленты; б – электропотребление конвейера с регулированием скорости движения ленты; в – электропотребление конвейера с регулированием скорости движения ленты, но также при регулировании скорости движения ленты по грузопотоку последующего в линии конвейера

Представленная на рис. 7 зависимость демонстрирует снижение потребления электроэнергии магистральными конвейерами при регулировании скорости ленты пропорционально поступающему грузопотоку, причем на каждом последующем конвейере в цепочке имеем дополнительное снижение расходы электроэнергии.

Выводы. Получены выражения и алгоритмы для нахождения значений плотности вероятности грузопотоков в узлах транспортной схемы при известных законах распределения угольного потока из каждого очистного забоя. Аналитически доказано и подтверждено на имитационной модели, что установка регулируемого привода в цепочке конвейеров (при пропорциональном регулировании) дает дополнительный эффект снижения расхода электроэнергии за счет работы последующего конвейера более продолжительное время на минимальной скорости. Также доказано, что при уменьшении длины первого конвейера в цепочке такой эффект снижается.

Предложенные алгоритмы и аналитические модели при соответствующем информационном обеспечении позволяют в реальном времени производить контроль энергоэффективности транспортных линий, включающих конвейерные установки с регулируемым приводом.

Список литературы / References

1. Снижение энергозатрат при транспортировании насыпных грузов с помощью управления скоростью ленты конвейера / В. Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, Р.В. Кирия, И.А. Бужинский // Науковий вісник НГУ. – 2007. – №10. – С. 35–37.

Monastyirskiy, V.F., Maksyutenko, V.Yu., Kiriya, R.V. and Buzhinskiy, I.A. (2007), “Reduction of energy consumption during transportation of bulk cargoes using the conveyor belt speed control”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 10, pp. 35–37.

2. Усатов К.С. Бесконтактный метод контроля нагрузки горных машин / К.С. Усатов, С.Н. Проценко, Н. Нойбергер // Сборник научных трудов НГУ. – 2004. – № 19. – Т. 2. – С. 84–90.

Usatov, K.S., Protsenko, S.N. and Noyberger, N. (2004), “Contactless methods of mining machines load monitoring”, *Collection of Scientific Works of National Mining University*, no. 19, Vol. 2, pp. 84–90.

3. Кондрахин В.П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник, П.В. Белицкий // Наукові праці ДонНТУ. – 2013. – № 2(26). – С. 140–150.

Kondrakhin, V.P., Stadnik, N.I. and Belitskiy, P.V. (2013), “Statistical analysis of the operational parameters of coal mine belt conveyor”, *Collection of Scientific Works of DonNTU*, no. 2(26), pp. 140–150.

4. Ильин А.И. Анализ работы очистных забоев / А.И. Ильин, И.В. Косарев, Г.В. Андреев // Уголь Украины. – 2010. – С. 3–7.

Ilin, A.I., Kosarev, I.V. and Andreev, G.V. (2013), “Analysis of the Mining Areas Operation”, *Ugol Ukrainy*, no. 6, pp. 3–7.

5. Прокуда В.Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП „Шахта „Павлоградская“ ПАО ДТЭК „Павлоградуголь“ / В.Н. Прокуда, Ю.А. Мишанский, С.Н. Проценко // Гірнична електромеханіка. – 2012. – № 88. – С. 107–111.

Prokuda, V.N., Mishanskiy, Yu.A. and Protsenko, S.N. (2012), “Research and evaluation cargo flows on the main conveyor transport PSP “Mine Pavlogradskaaya” of “PAT DTEK Pavlogradugol””, *Hirnycha Elektromekhanika*, no. 88, pp. 107–111.

6. Lauhoff, H. (2005), “Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really Save Energy?”, *Bulk Solids Handling*, no. 25(6), pp. 368–377.

7. Бешта О.С. Використання регульованого електропривода в задачах підвищення енергоефективності технологічних процесів / О.С. Бешта. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – №. 4. – С. 98–107.

Beshta, O.S. (2012), “Electric drives adjustment for improvement of energy efficiency of technological processes”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 4, pp. 98–107.

8. Гаврилов П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / П.Д.Гаврилов, А.П. Носков // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – Вып. 3. – С. 18–21.

Gavrilov, P.D. and Noskov, A.P. (2009), “Control system structure multidrive belt conveyor Regulated conveyor as a basis for improving the efficiency of transportation of rocks”, *Gornoye Oberudovaniye i Elektromekhanika*, no. 3, pp. 18–21.

9. Кучерявенко В.Ф. Регулируемый конвейер – основа повышения эффективности транспортирования горной

массы / В.Ф. Кучерявенко, А.А. Семченко // Майнинг Репорт Глюкауф. – 2008. – № 1. – С. 58–63

Kucheryavenko, V.F. and Semchenko, A.A. (2008), “Regulated conveyor as a basis for improving the efficiency of the rock mass transportation”, *Mining Report Glückauf*, no. 1, pp. 58–63.

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

Razumny, Yu.T., Zaika, V.T. and Prokuda, V.N. (2013), “Formation of the Coal Flow Characteristics of Transport Conveyor According to Freight Traffic Modeling of Production Faces”, *Collection of Scientific Works of DonNTU, series of Electrical Engineering and Energy*, no. 2(15), pp. 201–206.

Мета. Виявити особливості формування вантажопотоків у вузлах складно розгалуженої транспортної мережі без регулювання та при регулюванні швидкості руху стрічки конвеєрних установок і використовувати ці особливості для підвищення енергоефективності конвеєрного транспорту.

Методика. Методи статистичного аналізу та теорія матриць використані для знаходження розподілу значень вантажопотоків у вузлах конвеєрної мережі, теорія Марковських процесів використана при описі потоків з очисних вибоїв, а також для імітаційного моделювання.

Результати. Запропонований метод визначення щільності ймовірності вантажопотоків у вузлах шахтної конвеєрної мережі з використанням регулювання швидкості конвеєрних стрічок при відомих законах розподілу вугільного потоку з кожного очисного вибою. Отримані залежності й алгоритми, що доводять додаткове зменшення витрати електроенергії при використанні регульованого приводу на послідовно працюючих конвеєрах.

Наукова новизна. Уперше доведено, що регулювання швидкості руху стрічки на декількох послідовно працюючих конвеєрах приносить додаткове зменшення витрати електроенергії за рахунок збільшення часу роботи з мінімальною швидкістю кожного наступного конвеєра, причому характер залежності приросту енергоефективності від кількості конвеєрів з перетворювачами частоти – експонентний з від’ємним показником ступеня. Так само доведено, що при зменшенні довжини першого з послідовно встановлених конвеєрів цей ефект знижується.

Практична значимість. Доведені залежності дозволяють визначати оптимальні місця установки регу-

льованих приводів на шахтних магістральних конвеєрах при обмеженому числі перетворювачів частоти. Запропоновані алгоритми та аналітичні моделі при відповідному інформаційному забезпеченні дозволяють в реальному часі проводити контроль енергоефективності транспортних ліній, що включають конвеєрні установки з регульованим приводом.

Ключові слова: витрати електроенергії, конвеєрний транспорт, регульований привід, швидкість стрічки, вантажопотік, очисний вибій, розподіл вугілля на конвеєрі, енергоефективність

Purpose. To identify features of formation of cargo flows in the nodes of complicated transport links without and with speed control belt conveyor systems and to use these features to improve the energy efficiency of conveyor transport.

Methodology. Statistical analysis methods and matrix theory were used to find the value distribution of cargo flows in the nodes of the conveyor network. Theory of Markov processes was used to describe the flow of working faces and for simulation.

Findings. The method of determining the probability density of traffic flows in the nodes of mine conveyor network using speed control of conveyor belts with known distribution laws the flow of coal at each working face. The dependencies and algorithms, which prove an additional reduction of energy consumption by using variable speed drive on conveyor chains, were obtained.

Originality. For the first time, it was proved that the regulation of belt speed on multiple conveyor chain brings an additional reduction of energy consumption by increasing the operating time with a minimum speed of each subsequent conveyor wherein energy dependence of growth on the number of conveyors with frequency inverters is exponential with negative exponent. It was also proved that a decrease in length of the first conveyor in the chain, this effect is reduced.

Practical value. The proven dependencies make it possible to determine optimum installation position for variable speed drives on the main mine conveyors with a limited number of frequency converters. The proposed algorithms and analytical models with the appropriate information provision allow producing real-time control energy efficient transport lines, including conveyor systems with variable speed drive.

Keywords: energy consumption, conveyor transport, variable speed drive, belt speed, cargo flow, working face, coal distribution on the conveyor, energy efficiency

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунюм. Дата надходження рукопису 26.04.14.