

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ КОНВЕЙЕРОМ

Пигнастый О. М. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Ивановская О. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры композиционных конструкций и авиационно-материаловедения Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема оптимального управления потоковыми параметрами транспортной системы конвейерного типа при наличии ступенчатого регулирования скорости ленты секции конвейера. Объектом исследования являлась аналитическая модель транспортного конвейера, которая использована в качестве фундамента для синтеза алгоритмов оптимального управления потоковыми параметрами транспортного конвейера. Цель работы заключается в развитии методов проектирования систем оптимального управления потоковыми параметрами транспортного конвейера с учетом транспортной задержки при ступенчатом регулировании потоковых параметров транспортной системы.

Метод. Разработана аналитическая модель секции конвейера с учетом ступенчатого регулирования значений потоковых параметров транспортной системы. При построении модели секции конвейера для определения зависимостей между потоковыми параметрами транспортной системы записаны уравнения в частных производных. Для синтеза алгоритмов оптимального управления скоростью движения ленты секции конвейера введен критерий качества управления. Используя принцип максимума Понтрягина, поставлена задача оптимального управления потоковыми параметрами секции конвейера. Для транспортной системы записана функция Гамильтона, учитывающая критерий качества управления, наложенные ограничения и дифференциальные связи между параметрами системы. Продемонстрирована методика синтеза алгоритма оптимального управления скоростью ленты секции конвейера и определены условия переключения скорости движения ленты.

Результаты. Разработанная модель секции конвейера использована для синтеза алгоритма оптимального управления потоковыми параметрами транспортной системы при ступенчатом переключении режимов скорости ленты.

Выводы. Разработана методика синтеза алгоритмов оптимального управления потоковыми параметрами транспортной системы при ступенчатом регулировании скорости движения ленты секции конвейера. Полученные алгоритмы могут быть использованы для снижения удельных энергетических затрат на транспортировку материала на предприятиях горнодобывающей промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конвейер, распределенная система, PDE-модель, поточная линия, производственная линия, регулирование скорости ленты.

АББРЕВИАТУРЫ

PDE-model – аналитическая модель непрерывного представления движения материала по технологическому маршруту производственной линии с использованием уравнений в частных производных;

PkH-model – аналитическая модель конвейерной линии, позволяющая определить плотность материала и расход материала в произвольной точке конвейерной ленты.

НОМЕНКЛАТУРА

$a(t)$ – скорость ленты конвейерной секции;

a_{\max} – максимальное значение скорости ленты конвейерной секции;

a_j – значение j -ой ступени регулирования скорости ленты секции конвейера;

a_n – номинальное значение скорости ленты;

C – масса погонного метра движущихся частей;

G^{-1} – функция, обратная к функции $G(\tau)$;

$E(M_{\max})$ – затраты энергии на транспортировку тонны породы на расстояние километра при максимальной загрузке конвейера M_{\max} ;

$E(M_i)$ – затраты энергии на транспортировку тонны породы на расстояние километра при загрузке конвейера M_i ;

$H(S)$ – функция Хевисайда;

M_{\max} – транспортируемая масса груза на ленте секции конвейера, соответствующая максимальной загрузке конвейера по приемной способности;

N_s – количество ступеней регулирования скорости ленты секции конвейера;

N_{xx} – мощность, потребляемая конвейером на холстом ходу;

n_1 – приращение потребляемой мощности при увеличении массы груза на конвейере на одну тонну;

P_j – доля времени, в течение которого секция конвейера функционирует со скоростью ленты a_j ;

S_{dk} – длина секции (k -ой секции) конвейера;

S – координата, характеризующая местоположение материала вдоль маршрута транспортировки $S \in [0, S_d]$;

S_d – длина транспортного маршрута конвейера;

$T(t)$ – величина транспортної задержки;

T_d – характерное время транспортировки материала вдоль секции конвейера;

α (sec^{-1}) – величина, обратно пропорциональная времени корреляции;

β – угол наклона секции конвейера;

$\delta(S)$ – функция Дирака;

Θ – максимально допустимое значение линейной плотности материала для секции транспортного конвейера;

$\lambda(t)$ – интенсивность поступления материала на вход поточной линии;

σ_Q^2 – дисперсия входного грузопотока материала;

$\Psi(S)$ – линейная плотность распределения горной породы на конвейерной ленте в начальный момент времени $t = 0$;

$[\chi]_0(t, S)$ – линейная плотность распределения материала вдоль конвейерной линии в момент времени t в точке транспортного маршрута с координатой S ;

$[\chi]_{0\max}(t, S)$ – максимальное значение линейной плотности материала вдоль секции конвейера;

$[\chi]_{\text{in}}(t)$ – грузопоток, поступающий на вход секции конвейера;

$[\chi]_{\text{t}}(t)$ – экспериментальное значение грузопотока поступающего на вход секции конвейера;

$[\chi]_{\text{t}}(t, S)$ – поток материала в момент времени t в точке транспортного маршрута с координатой S ;

$[\chi]_{\text{нп}}(t, S)$ – нормативная производительность обработки деталей в момент времени t для технологической позиции S ;

w – коэффициент сопротивления движения;

Δt – транспортная задержка для секции конвейера.

ВВЕДЕНИЕ

Конвейер является основным способом транспортировки породы на горнодобывающих предприятиях. При протяженности в несколько десятков километров и пропускной способности $\sim 10^4$ t/h потребляемая мощность конвейерных транспортных систем $\sim 10^5$ kW [1]. Нормативный расход электроэнергии конвейерным транспортом для перемещения тонны горной породы на расстояние в 1,0 km оценивается

$(0,1 \div 1,0) \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}}$ [1, 2]: Çöllolar Lignite Open Pit Mine (Turkey, 2010) $0,39 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}}$, Coarse ore conveyor system

Minera Los Pelambres (Chile, 1998) $0,79 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}}$, Belt conveyor with gearless drive Solution Prosper Haniel

Coal Mine (Germany, 2010) $0,24 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{t} \cdot \text{km}}$ [1], а общие

затраты энергии для перемещения тонны породы вдоль всей конвейерной линии соответственно $\sim 6,79 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $\sim 10,03 \text{ kW} \cdot \text{h}$, $\sim 3,24 \text{ kW} \cdot \text{h}$. Фактические затраты энергии существенно выше в силу не полной загруженности конвейерной линии из-за неравномерного поступления породы на вход конвейера. Исследованию зависимости затрат энергии для транспортирование груза от величины грузопотока посвящено достаточное количество работ, начиная с [3–6]. Теоретическое и экспериментальное исследования конвейера показали, что уменьшение загруженности конвейера приводит к гиперболическому увеличению затрат энергии на транспортирование. При коэффициенте загруженности конвейера 0,75 затраты энергии на транспортирование увеличиваются на 10%, при 0,5– на 50%, при 0,25– на 160% и при 0,1– на 675% [7]. Такой характер зависимости вызывает существенный практический и теоретический интерес исследователей к указанной проблеме. Предложенные методы, позволяющие обеспечить снижение затрат энергии конвейерной системы до 30%, в большинстве случаев основываются на использовании аккумулирующего буфера для устранения неравномерности загрузки ленточного конвейера [8–11]. Бункер обеспечивает равномерную подачу породы на вход линии, аккумулирует излишек породы в накопителе, если темп поступления выше нормативного, или, если темп ниже нормативного, использует запасы породы в бункере для ликвидации отклонения. При этом скорость ленты, как правило, остается неизменной. Использование бункера в целях стабилизации темпа поступления породы на конвейерную линию требует дополнительного технологического пространства для его размещения [9, 10]. Другая проблема, которую следует учитывать при проектировании конвейерных систем с бункером – ограниченность емкости бункера, что требует наличия системы управления, которая не допустит переполнение [12]. Альтернативный подход повышения эффективности конвейерного транспорта заключается в проектировании систем управления скоростью ленты. При уменьшении потока породы на конвейер скорость ленты уменьшают, обеспечивая нормативную линейную плотность породы на конвейерной ленте, что приводит к аккумулярованию горной породы вдоль конвейера. При увеличении потока породы на входе скорость ленты увеличивается, что приводит к снижению значения линейной плотности породы.

Объект исследования – аналитическая модель транспортного конвейера.

Предмет исследования – аналитические методы проектирования системы управления транспортным конвейером.

Цель работы – развитие методов проектирования систем оптимального управления потоковыми параметрами транспортного конвейера.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть для секции транспортного конвейера с целью синтеза оптимального управления потоковыми параметрами транспортной системы на интервале управления $\tau \in [0, \tau_k]$ задан количественный критерий качества управления

$$K(\tau) = \int_0^{\tau_k} J(\tau, u(\tau)) d\tau,$$

который является показателем эффективного функционирования секции конвейера. Экстремальное значение критерия качества управления достигается при оптимальном управлении $u(\tau)$ скоростью конвейерной ленты.

Для заданного критерия качества управления сформулируем задачу синтеза оптимальной программы управления скоростью ленты для установившегося режима функционирования секции конвейера $\tau > \tau_d$:

– требуется определить управление скоростью движения конвейерной ленты $u(\tau)$ на временном интервале $\tau \in [0, \tau_k]$, которое приводит к минимуму функционал

$$K(\tau) = \int_0^{\tau_k} J(\tau, u(\tau)) d\tau \rightarrow \min,$$

а) при дифференциальных связях вида

$$\frac{\partial \theta_0(\tau, \xi)}{\partial \tau} + u(\tau) \frac{\partial \theta_0(\tau, \xi)}{\partial \xi} = \delta(\xi) \gamma(\tau),$$

которые соответствуют аналитической PDE-model производственной системы;

б) при ограничениях на погонную плотность материала секции конвейера и максимально допустимую нагрузку на привод конвейера

$$\theta_{0\max} \geq \theta_0(\tau, \xi) \geq 0, \\ m(t) = \int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi \leq m_{\max};$$

в) при ограничении на управление

$$g_{\max} \geq u(\tau) = g(\tau);$$

г) для начального условия старта ленты транспортной секции

$$\theta_0(0, \xi) = H(\xi) \psi(\xi),$$

определяемого линейной плотностью начального распределения материала вдоль маршрута транспортировки.

© Пигнастый О. М., Ивановская О. В., 2022
 DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-16

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема повышения эффективности функционирования конвейерного транспорта за счет регулирования скорости ленты достаточно много обсуждалась специалистами в области проектирования конвейерного транспорта [3]. Однако, несмотря на наличие большого количества работ, данная проблема имеет высокую актуальность и в настоящее время. Конвейер с движущейся горной породой вдоль транспортного маршрута – это распределенная система с рядом ограничений, среди которых не мало важными является ограничение по максимальной удельной линейной нагрузке на конвейерную ленту и ограничение по максимальному объему транспортируемой массы [4]. Конвейерная система является стохастической системой. Неопределенность величины поступающего потока породы на вход конвейера (неопределенность граничных условий) требует при расчете конвейерной линии использовать вероятностные методы [5]. В [13] представлен алгоритм управления скоростью ленты, использующий методы теории математического программирования. В работе записана целевая функция, определены необходимые условия регулирования скорости ленты, представлена имитационная модель конвейерной линии с постоянным значением скорости для j -ой ступени регулирования и инкрементным алгоритмом регулирования скорости. Скорость a_j определяется через величину номинальной погонной нагрузки

$$\psi = \frac{[\chi]_{1n}}{a_n}$$

и значение грузопотока $[\chi]_{1n}$ для j -ступени режима регулирования скорости

$$a_j = \frac{[\chi]_{1j}}{\psi} = \frac{[\chi]_{1j}}{[\chi]_{1n}} a_n,$$

где $[\chi]_{1n}$ – номинальные значения производительности секции конвейера. Расчетное значение средней скорости ленты конвейера за наблюдаемый период определяется выражением

$$\langle a \rangle = \sum_{j=1}^{N_s} a_j P_j, \quad \sum_{j=1}^{N_s} P_j = 1.$$

Режимы управления задаются из условия минимума средней скорости движения ленты

$$\frac{\partial \langle a \rangle}{\partial [\chi]_{1j}} = 0.$$

Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного конвейера выполнен в [14]. При моделировании входного грузопотока использовался нормальный и логарифмический нормальный закон распределения величины шахтного потока материала с корреляционной функцией [4, 14]:

$$R_Q(\tau) = \sigma_Q^2 \exp(-\alpha\tau) \text{ (kg/sec)}^2.$$

Для определения грузопотока материала использованы осциллограммы токов очистных комбайнов. В течение двух суток с шагом одна секунда записывались усилия, действующие на съемное тензоизмерительное устройство, и в течение четырех суток – фактическая мощность привода конвейера при переменном грузопотоке. Гистограмма распределения грузопотока как случайной величины подтвердила гипотезу о логарифмическом нормальном законе распределения грузопотока. Максимальное значение грузопотока составляет 533 (kg/sec). Математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение грузопотока, соответственно: 134 kg/sec и 66,4 kg/sec. Для построения зависимости мощности привода и коэффициента сопротивления движению от величины грузопотока определялась масса груза на конвейере в момент времени, соответствующую текущему значению мощности привода:

$$M(t) = \int_{t-4(\text{sec})}^{t+361(\text{sec})} Q(\tau) d\tau, \text{ (kg)}.$$

Пределы интегрирования соответствуют моментам времени разгрузки и погрузки взвешиваемой порции груза. Получена зависимость потребляемой мощности и окружного тягового усилия на приводе от величины погонной нагрузки [14]

$$N(t) = N_{xx} + n_1 M(t).$$

Значения $N_{xx} = 160 \text{ kW}$, $n_1 = 1,11 \text{ kW/t}$ определены по данным эксперимента. Адекватность математической модели оценена по критерию Фишера. Экспериментальное значение $N_{xx} = 160 \text{ kW}$ в 3 раза больше расчетного значения мощности холостого хода $N_{xx} = 55 \text{ kW}$ [14, 15], что объясняется неудовлетворительным состоянием роликовых опор на шахтном конвейере, трением ленты об элементы конструкции, наличием местных сопротивлений движению в местах перегиба профиля трассы и другими факторами. В работе [16] представлена модель контейнера в виде динамического звена с транспортной задержкой, зависимой от времени. Величина выходного потока породы с конвейера $[\chi]_{\text{out}}$ определяется через значение входного потока $[\chi]_{\text{in}}$ и скорость ленты a_{in} :

$$[\chi]_{\text{out}}(t) = \frac{[\chi]_{\text{in}}(t-T(t))}{a_{\text{in}}(t-T(t))}, \quad [\chi]_{\text{out}}(t) = [\chi]_{\text{out}}(t) a_{\text{in}}(t).$$

Для переменной скорости ленты конвейера величина транспортной задержки определена с использованием численных методов [17]. Масса горной породы, распределенная вдоль маршрута транспортировки, представлена интегральным уравнением

$$M(t) = M(t_n) \int_{t_n}^{t_k} [\chi]_{\text{in}}(t) \frac{[\chi]_{\text{in}}(t-T(t))}{a_{\text{in}}(t-T(t))} a_{\text{in}}(t) dt,$$

дополненным уравнением связи для определения статического тягового усилия F

$$F = a(M(t) + b),$$

которое необходимо преодолеть приводному электродвигателю. Записанные выше уравнения составляют математическую модель конвейера как элемента системы автоматического регулирования статической нагрузки привода [17]. Коэффициенты a, b учитывают удельную массу ленты, роликов, сцепление между лентой и барабаном, сопротивление движению ленты и другие конструкционные и технологические особенности транспортного конвейера. Для случая, когда входной грузопоток может быть измерен, предложен алгоритм управления скоростью по возмущению величины входного грузопотока [16]. Влияние неравномерной загруженности ленточного конвейера на транспортные затраты изучено в [7]. Произведена оценка энергетических показателей по результатам экспериментальных исследований грузопотока и мощности привода конвейера 2ЛУ120В при длине конвейера $L=0,730 \text{ km}$, скорости ленты $a=2 \text{ m/sec}$, мощности привода $N=500 \text{ kW}$ и максимальной производительности $[\chi]_{\text{imax}} = 1500 \text{ t/h}$. Масса транспортируемой породы определялась выражением

$$M(t) = M(t_n) \int_{t+t_1}^{t+t_1+t_2} [\chi]_{\text{it}}(\tau) d\tau,$$

где t_1 и t_2 – значения времени прохождения груза от места взвешивания до разгрузки и от места загрузки до разгрузки; Регрессионное уравнение для расчета мощности конвейерной установки в зависимости от массы груза на ленте представлено в [14]. Исследования зависимости коэффициента энергопотребления

$$K_e = \frac{E(M_i)}{E(M_{\text{max}})}$$

от коэффициента загрузки и его приемной материалоемкости

$$K_z = \frac{M_i}{M_{\max}},$$

которая может быть преобразована следующим образом

$$K_e = f(K_z) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{K_z} + 1 \right).$$

В работе оценено влияние неравномерной загрузки ленты на затраты энергии при транспортировке горной породы по транспортному маршруту. Подчеркнута необходимость построения адекватных математических моделей функционирования конвейера с адаптивной системой управления приводом [7]. Решение данных задач способствует решению проблемы интенсификации угледобычи путем создания для горной промышленности надежных и эффективных конвейеров нового поколения. В работе [18] разработана математическая модель частотно-управляемого электропривода, учитывающая распределенную нагрузку на конвейерной линии. Синтезирован нечеткий регулятор скорости ленты конвейера. Проведен сравнительный анализ переходных процессов в электроприводе конвейера с системой управления, основанной на использовании нечеткого регулятора величины скорости ленты. Распределенная численная модель динамики конвейера на основе конечно-разностного подхода представлена в [19]. Для выполнения численного моделирования лента разбивалась на $10^3 \div 10^4$ элементов, в пределах каждого из которых решается система уравнений, определяющая динамику движения участка ленты, наполненной материалом. В работе [20] введена плотность распределения материала $[\chi]_0(t, S)$, формируемая входным грузопотоком $[\chi]_{in}(t)$ и записано уравнение, определяющее значение линейной плотности материала на входе в секцию конвейера

$$[\chi]_0(t, 0) = \frac{dm_{in}(t)}{dt} \frac{1}{a(t)} = \frac{[\chi]_{in}(t)}{a(t)} = \frac{[\chi]_1(t, 0)}{a(t)}.$$

Выходной поток представлен выражением

$$[\chi]_{out}(t) = [\chi]_1(t, S_d) = \frac{dm_{out}(t)}{dt} = [\chi]_0(t, S_d) a(t),$$

в котором линейная плотность распределения материала на входе $[\chi]_0(t, 0)$ и выходе $[\chi]_0(t, S_d)$ конвейера связана соотношением

$$[\chi]_0(t, S_d) = [\chi]_0(t - T(t), 0),$$

$$\int_{t-T(t)}^t a(\lambda) d\lambda = S_d.$$

При постоянной скорости $a(t) = a_1$ следует

$$T(t) = \frac{S_d}{a_1} = \text{const}.$$

С учетом последнего допущения, в работе дано выражение для расчета максимально допустимого грузопотока, поступающего на вход конвейерной линии [20]

$$[\chi]_{out_max} = \frac{dm_{out_max}}{dt} = [\chi]_{0max}(t, S) a_{max}.$$

В работе [21] исследуются методы описания величины случайного грузопотока, поступающего на вход конвейера с использованием эмпирических распределений. В работах [22, 23] с применением моделей теории массового обслуживания выполнен анализ шахтного потока материала. В [22] разработана модель магистрального сборного конвейера для двух очистных забоев, поток материала с каждого из забоев является случайной величиной. В [23] рассмотрено влияние регулируемого привода на динамику потоков материала и эффективность функционирования шахтного конвейера. Представлена модель транспортной системы, состоящей из нескольких последовательно расположенных конвейеров с регулирование скорости движения ленты. Обоснован выбор длины конвейеров в предложенной модели [23]. Практический интерес представляет модель транспортной сети при слиянии потоков с регулируемыми и нерегулируемыми приводами [23]. Исследованы законы распределения потоков, которые формируются конвейерами с регулируемой скоростью. В работе [24] установлена зависимость коэффициента сопротивления движению ленты от величины погонной нагрузки, динамика изменения которой имеет достаточно сложный характер. Эта зависимость играет принципиально важную роль при оценке затрат энергии на транспортирование груза вдоль секции конвейером с постоянной и регулируемой скоростью, нуждается в экспериментальной проверке в шахтных условиях эксплуатации.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Уравнения в частных производных для моделирования движения материала в производственных поточных линиях применены в [25]. В работах [26, 27] дан обзор моделей поточных линий, где особое внимание уделено моделям с использованием уравнений в частных производных (PDE-модели). Новый класс моделей производственных систем предназначен для описания производственных поточных линий, функционирующих в стационарных и переходных режимах, позволяет моделировать распределение деталей вдоль поточной линии и учитывает стохастический характер взаимодействия предметов труда с оборудованием и между собой в результате технологической

обработки при переходе от одной технологической операции к другой технологической операции.

Система уравнений, определяющая динамику состояния потоковых параметров производственной линии в одномоментном описании, может быть представлена в виде [28]:

$$\frac{\partial[\chi]_0(t, S)}{\partial t} + \frac{\partial[\chi]_1(t, S)}{\partial S} = \delta(S)\lambda(t),$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(S) dS = 1,$$

$$[\chi]_1(t, S) = [\chi]_{1\psi}(t, S).$$

Дополним систему уравнений начальным условием

$$[\chi]_0(t_0, S) = H(S)\Psi(S),$$

$$H(S) = \begin{cases} 0, & \text{if } S < 0, \\ 1, & \text{if } S \geq 0, \end{cases}$$

которое задает распределение деталей по технологическим позициям в момент времени $t = t_0$. Решение системы уравнений определяется начальным условием $[\chi]_0(t_0, S)$ и известной нормативной производительностью обработки деталей в соответствии с технологическим процессом $[\chi]_{1\psi}(t, S)$ [25; 28].

Конвейерная линия является одной из простейших разновидностей поточной линии. Особенность построения модели конвейерной линии заключается в том, что размещенная на конвейерной ленте в разных местах, определенных координатой S , горная порода движется с одной и той же скоростью $a(t)$, которая равна скорости движения ленты конвейера. Это позволяет представить систему уравнений для потоковых параметров транспортной системы в следующем виде:

$$\frac{\partial[\chi]_0(t, S)}{\partial t} + a(t) \frac{\partial[\chi]_0(t, S)}{\partial S} = \delta(S)\lambda(t), \quad (1)$$

$$[\chi]_1(t, S) = a(t)[\chi]_0(t, S). \quad (2)$$

Дополним систему уравнений (1), (2) начальным условием

$$[\chi]_0(t_0, S) = H(S)\Psi(S), \quad (3)$$

которое определяет распределение материала вдоль маршрута транспортировки в момент времени $t_0 = 0$.

Функция $\lambda(t)$ задает поток материала на входе в секцию конвейера. Система уравнений (1)–(3) опре-

деляет модель конвейера, которую используем для построения алгоритма оптимального управления скоростью ленты.

Введем безразмерные параметры и функции:

$$\tau = \frac{t}{T_d}, \quad \xi = \frac{S}{S_d}, \quad \delta(\xi) = S_d \delta(S), \quad H(\xi S_d) = H(S), \quad (4)$$

$$\psi(\xi) = \frac{\Psi(S)}{\Theta}, \quad \gamma(\tau) = \lambda(t) \frac{T_d}{S_d \Theta}, \quad g(\tau) = a(t) \frac{T_d}{S_d}, \quad (5)$$

$$\theta_0(\tau, \xi) = \frac{[\chi]_0(t, S)}{\Theta}, \quad \Theta = \max \left\{ \Psi(S), \frac{\lambda(t)}{a(t)} \right\}. \quad (6)$$

Принимая во внимание безразмерные переменные и функции (4)–(6), запишем уравнения (1)–(3) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \theta_0(\tau, \xi)}{\partial \tau} + g(\tau) \frac{\partial \theta_0(\tau, \xi)}{\partial \xi} = \delta(\xi)\gamma(\tau), \quad (7)$$

$$\theta_0(0, \xi) = H(\xi)\psi(\xi). \quad (8)$$

Выбор характерного значения Θ позволяет обеспечить масштаб значений функции $\theta_0(\tau, \xi)$. Конвейерные линии, которые имеют одинаковый вид функций $\gamma(\tau)$ и $g(\tau)$ являются подобными, имеют одинаковое поведение при подобном начальном условии $\psi(\xi)$. Это дает возможность строить лабораторные аналоги крупных конвейерных линий для проведения практических экспериментов. Результаты, полученные на модельных конвейерных линиях, могут быть с достаточной степенью точностью перенесены на действующие конвейерные линии, что позволяет экономить средства, требуемые для проведения экспериментальных исследований. Особенно актуальным является использование методов теории подобия в тех случаях, когда отсутствует возможность проводить экспериментальные исследования действующих конвейерных линий в связи с их загрузкой производственной программой. Системе уравнений в частных производных (7), (8) соответствует система характеристических уравнений:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = g(\tau), \quad (9)$$

$$\xi|_{\tau=0} = \beta,$$

$$\frac{d\theta_0(\tau, \xi)}{d\xi} = \delta(\xi) \frac{\gamma(\tau)}{g(\tau)}, \quad (10)$$

$$\theta_0(0, \beta) = H(\beta)\psi(\beta).$$

Решение уравнения (9) представим в следующем виде

$$\xi = G(\tau) + C_1 = G(\tau) - G(0) + \beta, \quad (11)$$

$$G(\tau) = \int g(\tau) d\tau,$$

где константа интегрирования

$$C_1 = \beta - G(0)$$

определяется из начального условия (9).

В результате интегрирования уравнения (10) получается выражение для безразмерной линейной плотности материала $\theta_0(\tau, \xi)$ вдоль маршрута транспортировки в форме:

$$\begin{aligned} \theta_0(\tau, \xi) &= \int \delta(\xi) \frac{\gamma(\tau)}{g(\tau)} d\xi + C_2 = \\ &= H(\xi) \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{g(G^{-1}(G(\tau) - \xi))} + C_2. \end{aligned}$$

Определив константу интегрирования C_2 в результате решения уравнения (9):

$$\theta_0(0, \beta) = H(\beta) \frac{\gamma(G^{-1}(G(0) - \beta))}{g(G^{-1}(G(0) - \beta))} + C_2 = H(\beta)\psi(\beta),$$

запишем выражение для безразмерной линейной плотности материала $\theta_0(\tau, \xi)$:

$$\begin{aligned} \theta_0(\tau, \xi) &= H(\xi) \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{g(G^{-1}(G(\tau) - \xi))} - \\ &- H(\beta) \frac{\gamma(G^{-1}(G(0) - \beta))}{g(G^{-1}(G(0) - \beta))} + H(\beta)\psi(\beta). \end{aligned}$$

Из уравнения (11) выразим переменную β

$$\beta = \xi - \int_0^\tau g(z) dz,$$

получим решение уравнения (7) при начальном условии (8):

$$\begin{aligned} \theta_0(\tau, \xi) &= \left[H(\xi) - H\left(\xi - \int_0^\tau g(z) dz\right) \right] \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{g(G^{-1}(G(\tau) - \xi))} + \\ &+ H\left(\xi - \int_0^\tau g(z) dz\right) \psi\left(\xi - \int_0^\tau g(z) dz\right). \quad (12) \end{aligned}$$

Уравнение (12) позволяет вычислить плотность горной породы для момента времени τ в точке транспортного маршрута с координатой ξ . Получен-

ное решение определяет неравномерность распределения материала вдоль маршрута транспортировки.

Уравнение движения в виде

$$\xi - \int_0^\tau g(z) dz = 0,$$

задает закон $\xi(\tau)$ перемещения элемента конвейерной ленте, справа от которой находится материал, линейная плотность которого задана начальными условиями (9), (10). Общее время τ_d переходного режима, при котором начальные условия оказывают влияние на значение выходного потока материала с конвейерной линии, может быть получено в результате решения уравнения

$$1 = \int_0^{\tau_d} g(z) dz. \quad (13)$$

Неравенство

$$\tau > \tau_d$$

задает режим работы конвейерной линии, когда ее параметры не зависят от начальных условий (8)

$$\theta_0(\tau, \xi) = \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{g(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}.$$

Если ввести обозначение

$$G^{-1}(G(\tau) - 1) = \tau - \Delta\tau_1,$$

то для рассмотренного случая на выходе конвейерной линии $\xi = 1$ имеем:

$$\begin{aligned} \theta_0(\tau, 1) &= \frac{\gamma(\tau - \Delta\tau_1)}{g(\tau - \Delta\tau_1)} = \frac{\theta_1(\tau - \Delta\tau_1, 0)}{g(\tau - \Delta\tau_1)} = \theta_0(\tau - \Delta\tau_1, 0), \\ \theta_1(\tau, 1) &= \frac{\gamma(\tau - \Delta\tau_1)}{g(\tau - \Delta\tau_1)} g(\tau) = \theta_0(\tau - \Delta\tau_1, 0) g(\tau), \quad \tau > \tau_d. \end{aligned}$$

В предположении того, что скорость ленты секции конвейера постоянна

$$g(\tau) = g_0 = \text{const},$$

решение уравнения (13) позволяет определить длительность задержки [20]

$$\tau_d = \frac{1}{g_0}.$$

Представленная взаимосвязь между входными и выходными потоковыми параметрами конвейера использована для построения модели секции конвейера [16, 20]. При этом предполагалось, что в начальный момент времени конвейер является незаполненным [16]

$$\theta_0(0, \xi) = \Psi(S) = 0, \quad (14)$$

откуда из выражения (12) следует частное решение:

$$\theta_0(\tau, \xi) = \left[H(\xi) - H\left(\xi - \int_0^\tau g(z) dz\right) \right] \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{g(G^{-1}(G(\tau) - \xi))},$$

$$\theta_1(\tau, \xi) = \theta_0(\tau, \xi)g(\tau),$$

которое позволяет рассчитать линейную плотность материала $\theta_0(\tau, \xi)$ и поток материала $\theta_1(\tau, \xi)$ в произвольный момент времени τ в заданной точке ξ транспортного маршрута. Начальные условия заполнения конвейерной линии (14) объясняют наличие колебаний значения скорости ленты секции конвейера и значения выходного потока в исследовании [16], в котором рассмотрено моделирование процесса транспортировки материала вдоль секции конвейера с продолжительностью переходного режима составила 250 sec при общей продолжительности эксперимента 2000 sec и критерии управления для моментов времени $t > T_d = 250$ sec [16]

$$M(t) = M_{\max} = \text{const}. \quad (15)$$

Разброс амплитуды колебания величины скорости ленты и значения потока материала на выходе конвейера составляет ~30% на протяжении промежутка времени имитационного моделирования [16]. Амплитуда и период колебания потоковых параметров секции конвейера обусловлены начальными условиями (14) и критерием управления (15). Для момента времени $\tau < \tau_d$ выходной поток материала с секции конвейера определяется начальным распределением материала вдоль транспортного маршрута.

Расход электроэнергии на конвейерный транспорт $W_{k,l}$ kWh определяется количеством транспортируемого груза $Q_p(t)$ и средней продолжительности работы конвейерной линии t_p h [2]:

$$W_{k,l} = 0,013 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) L_k \cdot w \cdot [C \cdot v_k \cdot t_p + 0,28 \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{h}^2}{\text{sec} \cdot \text{t}} \right) \cdot Q_p \cdot \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{w} \right)].$$

Для стационарных конвейеров $w = 0,02 \div 0,03$; для конвейеров выемочных участков $w = 0,04 \div 0,06$; для

конвейеров, работающих в тяжелых условиях $w = 0,08 \div 0,12$. Потребляемая мощность стационарным конвейером ($w = 0,03$), расположенным горизонтально ($\beta = 0$) определяется выражением:

$$N(t) = \frac{W_{k,l}}{t_p} = 0,0039 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) S_d [C \cdot a(t) + 1008 \left(\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right) \frac{1}{S_d} \int_0^{S_d} [\chi]_1(t, S) dS],$$

где dQ_p/dt t/h – средняя пропускная способность конвейерной линии. Мощность, затрачиваемая на транспортировку породы представляется в виде суммы мощностей на перемещение движущихся частей конвейера и горной породы массой $M(t)$

$$N(t) = 0,0039 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) S_d C a(t) + 0,3931 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{t} \cdot \text{m}} \right) a(t) M(t), \text{ kW} \quad (16)$$

$$M(t) = \int_0^{S_d} [\chi]_0(t, S) dS.$$

Используя (16), определим затраты энергии, требуемые для функционирования конвейерной линии 2LU120V [2] длиной $S_d = 730$ m при средней скорости движения ленты $a(t) = 2,0$ m/sec [7, 14]:

$$N_{xx} = 0,0039 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) 730(m) 138,1 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right) 2,0 \left(\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right) = 78,63 \text{ kW},$$

$$n_1 = 0,3931 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{t} \cdot \text{m}} \right) 2,0(m/\text{sec}) = 0,786 \text{ kW/t}.$$

Для конвейера 2LU120V, предназначенного для перемещения породы с нормативной скоростью $a(t) = 3,15$ m/sec, максимальной производительностью $dQ_p/dt = 1450$ t/h и массой погонного метра движущихся частей $C = 138,1$ kg/m потребление энергии определяется следующим выражением

$$N(t) = 123,84 + 1,23 M(t) \text{ kW}.$$

В расчетах использован коэффициент сопротивления ($w = 0,03$) и угол наклона ($\beta = 0$) при постоянной скорости $a(t) = 3,15$ m/sec ленты конвейера. Максимальная мощность, которую потребляет конвейер для перемещения только материала с равномерно распределенной нагрузкой Θ по длине конвейера S_d и скоростью движения ленты S_d/T_d (4), (5) определяется в соответствии с формулой

$$N_{\Theta_{\max}} = 0,3931 \left(\frac{\text{kW} \cdot \text{sec}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \right) \frac{S_d \left(\frac{m}{\text{sec}} \right) S_d(m) \Theta \left(\frac{t}{m} \right),}{T_d \left(\frac{m}{\text{sec}} \right)}$$

$$\frac{N(t)}{N_{\Theta_{\max}}} = m_c g(t) + m(t) g(t), \quad (17)$$

$$m(t) = \int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi = \frac{M(t)}{M_{\max}}, \quad m_c = 10^{-3} \frac{C}{\Theta} \left(\frac{t}{\text{kg}} \right).$$

Для максимального значения транспортируемой массы материала на конвейера $M_{\max} = 126 \text{ t}$ [7] следует:

$$\Theta = \frac{126}{730} = 0,172 \text{ t/m},$$

$$m_c = 10^{-3} \frac{138}{0,172} = 0,79 \text{ t/kg}.$$

Разделив левую и правую часть безразмерного соотношения для мощности (15) на коэффициент рациональной загрузки ленты

$$m(t) = \frac{M(t)}{M_{\max}},$$

получим затраты на единицу массы для фактического и номинального режима загрузки

$$\frac{N(t)/M(t)}{N_{\Theta_{\max}}/M_{\max}} = \frac{m_c}{m(t)} g(t) + g(t) \quad (18)$$

Последнее выражение будем использовать в качестве критерия качества для управляемого процесса. При $g(t) = 0,5$ и $m_c = 0,79$ критерий оптимальности имеет вид

$$\frac{N(t)/M(t)}{N_{\Theta_{\max}}/M_{\max}} = \frac{0,4}{\int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi} + 0,5. \quad (19)$$

Принимая во внимание систему характеристических уравнений (9), (10), дифференциальные связи принимают следующий вид:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = u(\tau), \quad \xi|_{\tau=0} = \beta,$$

$$\frac{d\theta_0(\tau, \xi)}{d\xi} = \delta(\xi) \frac{\gamma(\tau)}{u(\tau)},$$

$$\theta_0(0, \beta) = H(\beta) \psi(\beta),$$

с учетом которых можно записать функцию Понтрягина и сопряженную систему уравнений для поставленной задачи

$$H = \psi_1 u(\tau) - u(\tau) - \frac{u(\tau) m_c}{1 - \int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi} \rightarrow \max,$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \xi}.$$

Значение переменной $\theta_{0\max}$ определяет максимально допустимую погонную нагрузку на ленту. Так как правый конец фазовой траектории свободен, то

$$\psi_1(\tau_k) = 0,$$

и, следовательно:

$$\psi_1(\tau) = 0,$$

откуда выражение для функции Понтрягина принимает упрощенный вид

$$H = -u(\tau) - \frac{u(\tau) m_c}{1 - \int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi} \rightarrow \max.$$

Дифференциальная связь (10) позволяет для установившегося режима функционирования конвейера $\tau > \tau_d$ выразить плотность распределения горной породы вдоль конвейера через входящий поток и скорость движения ленты

$$\theta_0(\tau, \xi) = \frac{\gamma(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}{u(G^{-1}(G(\tau) - \xi))}.$$

Рассмотрим построение оптимального алгоритма управления скоростью ленты конвейера для случая, когда входной поток является постоянным

$$\gamma(\tau) = \gamma_0 = \text{const}. \quad (20)$$

Масса горной породы на конвейерной ленте определяется выражением:

$$m(t) = \int_0^1 \theta_0(\tau, \xi) d\xi = \sum_{j=1}^{N_s} \theta_0(\tau, \xi_j) \Delta \xi_j =$$

$$= \sum_{j=1}^{N_s} \frac{\gamma_0 \Delta \xi_j}{u(G^{-1}(G(\tau) - \xi_j))} = \gamma_0 \sum_{j=1}^{N_s} \Delta \tau_j = \gamma_0 \Delta \tau,$$

$$1 = \int_{\tau - \Delta \tau}^{\tau} g(z) dz$$

При $u(\tau) = g(\tau)$ для значения $\xi = 1$. Введем в рассмотрение значение средней скорости за промежуток времени $\Delta \tau(\tau)$:

$$u_m(\tau) = \frac{1}{\Delta\tau(\tau)}.$$

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{m_{\max}}{\gamma_0}.$$

При максимальной загрузке конвейерной линии

$$m(t) \rightarrow m_{\max}$$

Следует

$$\Delta\tau(\tau) = \Delta\tau_{\max},$$

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{m_{\max}}{\gamma_0} = \frac{1}{u_{\max}}.$$

С уменьшением скорости ленты увеличивается масса горной породы, которая находится в конвейерной секции в процессе транспортировки. При выполнении условия (20) функцию Понтрягина запишем в виде

$$H = -u(\tau) \left(1 + \frac{m_c}{\gamma_0 \Delta\tau} \right) = -u_m(\tau) \left(1 + u_m(\tau) \frac{m_c}{\gamma_0} \right) \rightarrow \max.$$

где $u_m(\tau)$ – среднее значение скорости ленты конвейера на промежутке $\Delta\tau(\tau)$

$$H_m = -u_m(\tau) \left(1 + u_m(\tau) \frac{m_c}{\gamma_0} \right) \rightarrow \max.$$

Функция Понтрягина H является убывающей функцией при увеличении $u_m(\tau)$, принимает минимальное значение при значении

$$u_m(\tau) = u_{\min}.$$

Последнее условие соответствует режиму управления конвейерной линией, которая максимально загружена горной породой.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения численных экспериментов разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать значения параметров потока транспортного конвейера в соответствии с РіКх-моделью (7)–(8). Используя численную реализацию для модели секции конвейера, исследуем особенности применения релейного управления скоростью ленты $u(\tau) = (u_1, u_2)$ для режима функционирования транспортной системы, определяемого критерием качества (19). Минимальные затраты на перемещение материала будут в случае скорости движения ленты

$$u_{\max} = \frac{\gamma_0}{m_{\max}}$$

с периодом релейного регулирования

Точку переключения при заданных значениях и u_2 в пределах интервала $\Delta\tau_{\max}$ с режима, характеризующегося скоростью u_1 на режим, характеризующегося скоростью u_2 определим из соотношения:

$$u_1 \Delta\tau_1 + u_2 \Delta\tau_2 = 1,$$

$$\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 = \Delta\tau_{\max},$$

откуда

$$\Delta\tau_1 = \frac{1 - u_2 \Delta\tau_{\max}}{u_1 - u_2}.$$

Точка переключения делит интервал $\Delta\tau_{\max}$ на два интервала $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, в пределах которых конвейерная линия функционирует со скоростью u_1 и u_2 соответственно. Величина интервала $\Delta\tau_{\max}$ определяется из условия максимальной загрузки конвейерной системы.

Для транспортной системы при величине поступающего потока материала

$$\gamma(\tau) = \gamma_0 = 0,5$$

и коэффициенте загрузки транспортной системы

$$m_{\max} = 0,5$$

в случае релейного режима управления скоростью конвейерной ленты $u(\tau) = (0,5; 1,5)$ получаем значение точки переключения $\Delta\tau_1 = 0,5$ на интервале (рис. 1)

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{m_{\max}}{\gamma_0} = \frac{0,5}{0,5} = 1.$$

Данный закон управления скоростью конвейерной ленты определяет выходной поток $\theta_1(\tau, 1)$ (рис. 2) с конвейерной линии и линейную плотность материала $\theta_0(\tau, 0)$ на входе конвейерной линии (рис. 3). В течение переходного периода $\tau \in [0, \tau_k = 1, 0]$ выходной поток $\theta_1(\tau, 1)$ зависит от погонной плотности материала, распределенного вдоль транспортного маршрута

$$\theta_1(\tau, 1) = H \left(1 - \int_0^\tau u(z) dz \right) \Psi \left(1 - \int_0^\tau u(z) dz \right) u(\tau).$$

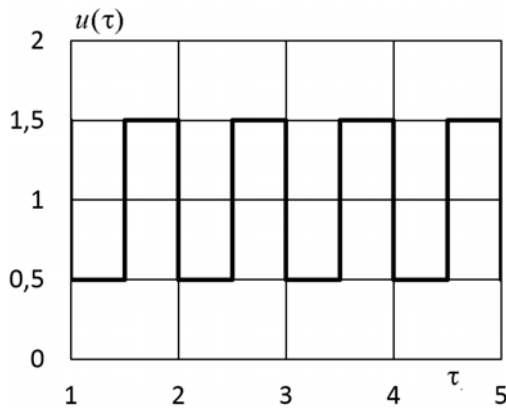


Рисунок 1 – Релейний режим управління швидкістю конвейерної ленти $u(\tau) = (0,5;1,5)$

Начальне розподілення матеріала при вичисленому експерименті задано функцією

$$\psi(\xi) = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} \sin\left(\pi\xi + \frac{\pi}{4}\right).$$

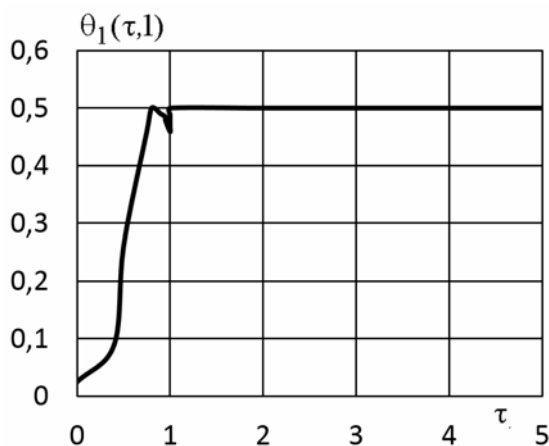


Рисунок 2 – Вихідний потік з конвейерної лінії $\theta_1(\tau,1)$ при $\gamma_0 = 0,5$, $u(\tau) = (0,5;1,5)$

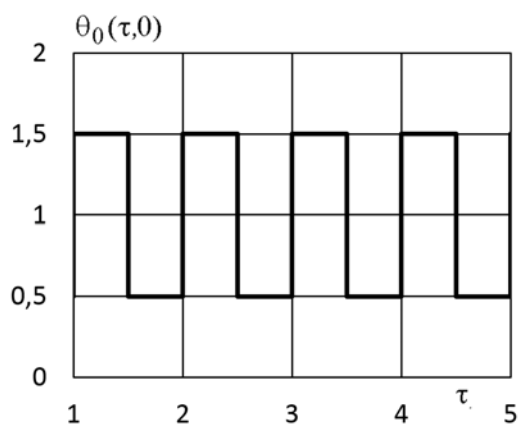


Рисунок 3 – Погонна щільність матеріалу на вході конвейерної лінії $\theta_0(\tau,0)$ при $\gamma_0 = 0,5$, $u(\tau) = (0,5;1,5)$

При $\tau \geq \tau_k = 1,0$ величина вихідного потоку матеріалу $\theta_1(\tau,1)$ розраховується з соотношения (18) і при заданих даних має значення $\theta_1(\tau,1) = 0,5$. Постійне значення вихідного потоку $\theta_1(\tau,1)$ для установившегося режиму має просте пояснення. Алгоритм оптимального управління, отриманий з заданого критерія якості при відсутності обмеження, пов'язаного з перевищенням максимального значення погонної навантаження матеріалу на ленту, забезпечує постійне значення матеріалу в транспортній системі. Соотвєтственно, при установившемся режимі величина вихідного потоку буде відповідати величині входного потоку $\theta_1(\tau,1) = \gamma_0 = 0,5$. Погонна щільність матеріалу на вході конвейерної лінії представлена на рис. 3.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для критерія оптимальності (19) отриман в аналітичному вигляді алгоритм управління швидкістю ленти, який підтверджує передположення об оптимальному управлінні потіковими параметрами секції конвейера, вивдвинуті в роботах [7, 14, 24, 29, 30]: при прочих рівних умовах максимальне наповнення конвейерної ленти горною породою соотвєтствует мінімальному значенню затрат енергії на переміщення матеріалу. При максимальному допустимому загрузке конвейерної лінії в течение промежутка $\Delta\tau_{\max}$ енергопотребление является постоянным для режиму швидкостей $u(\tau) = (u_1, u_2)$, у которых одно и тоже среднее значение скорости движения ленти за период $\Delta\tau_{\max}$.

Таким образом, при максимальной загрузке конвейера потребление энергии за период $\Delta\tau_{\max}$ не зависит от плотности распределения горной породы вдоль маршрута транспортировки. Минимальное потребление энергии обеспечивается для режиму постоянной скорости ленти конвейера $u_m(\tau) = u_{\min}$. Закон распределения линейной плотности горной породы вдоль конвейерной линии определяется заданными значениями режимов швидкостей. Изменение закона управления приводит к изменению закона распределения линейной плотности матеріалу вдоль маршрута транспортировки. Многоступенчатое управление швидкістю ленти представляет интерес для режимов запуску и остановки конвейера, когда коэффициент загрузки секції конвейера отличается от максимального значения.

При построении алгоритма оптимального управления швидкістю ленти принято допущение постоянного значения входного потока матеріалу (20). В то же время для шахтных конвейеров характерны возмущения на вході конвейера, которые выражаются в дискретном характере грузопотоков и их переменной интенсивности в период непрерывных поступлений. Это является предметом дальнейших исследований. Принятое в работе упрощение нацелено на то, чтобы

показать перспективность использования PDE-моделей транспортных систем при проектировании высокоэффективных систем управления. Дополнительно в работе предполагалось, что поступающий грузопоток является измеряемой и контролируемой величиной. В случае, когда невозможно или затруднительно оценить грузопоток, контролируемой величиной является статическое усилие на валу двигателя.

В заключении остановимся оценке продолжительности переходного периода, в течение которого выходной поток материала с секции конвейера определяется начальным распределением материала вдоль маршрута транспортировки. Для расчета скорости конвейерной ленты и выходного потока материала транспортной системы на протяжении переходного периода необходимо использовать модели транспортного конвейера, основанные на прогнозировании значений потоковых параметров. Это приводит к ошибкам в расчете режимов управления скоростью конвейерной линии и к работе системы в ненормативном режиме, а в случае значительных отклонений – к перегрузке приводных электродвигателей и остановке конвейера. В связи с этим, факт наличия переходного периода, а также величина продолжительности переходного периода имеет важное значение при синтезе алгоритмов оптимального управления потоковыми параметрами. Оценим среднюю продолжительность переходного периода для действующих транспортных систем конвейерного типа [1]:

а) Belt conveyor with gearless drive Solution Prosper Haniel Coal Mine (Germany, 2010) общая длина 3800 m, средняя скорость движения ленты 5,5 m/sec, средняя продолжительность переходного периода

$$\Delta\tau_1 = \frac{3800}{5,5} = 690 \text{ sec};$$

б) Conveyor line for Neyveli Lignite Corporation (India, 2007) общая длина 14000 m, средняя нормативная скорость движения ленты 5.4 m/sec, средняя продолжительность переходного периода

$$\Delta\tau_1 = \frac{14000}{5,4} = 2590 \text{ sec}.$$

Средняя продолжительность переходного периода составляет от нескольких минут до часа. При использовании систем управления скоростью ленты с диапазоном колебания $[0 \div 5]$ m/sec продолжительность переходного периода достигает несколько часов, что отражается на эффективности работы конвейерной линии. В течение переходного периода предложенный в настоящей работе алгоритм управления не обеспечивает оптимальное управление секцией конвейера для рассмотренного критерия качества управления.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена актуальная задача синтеза алгоритмов оптимального управления потоковыми параметрами транспортной системы конвейерного типа со ступенчатым переключением режимов скорости движения ленты секции конвейера.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что для транспортных систем конвейерного типа с двухступенчатым переключением скорости ленты предложена аналитическая модель секции конвейера, которая позволяет рассчитать линейную плотность материала и поток материала вдоль маршрута транспортировки. Аналитическая модель секции конвейера является фундаментом для проектирования высокоэффективных систем управления потоковыми параметрами транспортной системы. Для заданного критерия качества управления транспортной системой предложен метод синтеза оптимального управления параметрами потока транспортной системы со ступенчатым переключением скорости ленты.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке методики построения алгоритмов оптимального управления параметрами потока транспортной системы со ступенчатым регулированием величины потоковых параметров.

Перспективами дальнейших исследований является разработка систем управления скоростью ленты секции конвейера при стохастическом динамическом входном потоке материала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» «Развитие теории и методов синтеза систем управления квазистатическими технологическими процессами» (ID:0108U001452).

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. SIMINE for conveyors. Siemens. [Electronic resource]. Access mode: <https://new.siemens.com/global/en/markets/mining-industry.html>
2. Дегтярев В. В. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов энергопотребления / В. В. Дегтярев. – М. : Недра, 1983. – 244 с.
3. Шахмейстер Л. Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев, А. К. Лобачева. – М. : Недра, 1972. – 173 с.
4. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – М. : Недра, 1978. – 392 с.
5. Шахмейстер Л. Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин / Л. Г. Шахмейстер. – М. : Машиностроение, 1983. – 312 с.
6. Кариман С. А. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля / С. А. Кариман, А. В. Брайцев, В. М. Шрамко. – М. : Наука, 1983. 135 с.

7. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation / [A. Semenchko, M. Stadnik, P. Belitsky et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – №82. – С. 42–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75936>
8. Монастырский В. Ф. Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / В. Ф. Монастырский, В. Ф. Максютенко, Р. В. Кирия // Геотехническая механика. – 2010. – № 88. – С. 185–191.
9. Разумный Ю.Т. Повышение энергоэффективности конвейерного транспорта угольных шахт / Ю. Т. Разумный, А. В. Рухлов, А. В. Козарь // Горная электромеханика и автоматика. – 2006. – № 76. – С. 24–28.
10. Проценко С. Н. Снижение энергопотребления на конвейерном транспорте угольных шахт / С. Н. Проценко // Горная электромеханика и автоматика. – 2008. – № 81. – С. 31–40.
11. Прокуда В. Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО «Павлоградуголь» / В. Н. Прокуда, Ю. А. Мишанский, С. Н. Проценко // Горная электромеханика. – 2012. – № 88. – С. 107–111.
12. Ставицкий В.Н. Математическое моделирование транспортной системы добычного участка / В. Н. Ставицкий, А. С. Оголобченко // Научные труды ДНТУ. – 2013. – № 1. – С. 53–63.
13. Reutov A. Simulation of load traffic and steeped speed control of conveyor / A. Reutov // IOP Conference Series: Earth and Environmental. – 2017. – № 87. – P.1–6.
14. Кондрахин В. П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Научные труды ДНТУ. – 2013. – №2. –С. 140–150.
15. Ададуров В. В. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоёмких производств / В. В. Ададуров, В.В. Ариненков, В. А. Будишевский // ДНТУ. – 1999. – С. 216. ISBN 966–7559–02–5.
16. Ставицкий В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера / В. Н. Ставицкий // Научные труды ДНТУ. – 2012. – № 23. – С. 49–53.
17. Ставицкий В. Н. Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера / В. Н. Ставицкий // Научные труды ДНТУ. – 2011. – № 20. – С. 59–66.
18. Ребенков Е. С. Синтез нечеткого регулятора частотно-управляемого электропривода конвейера с упругими связями / Е. С. Ребенков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 68–75.
19. Затонский А.В. Динамическая пространственная модель многоприводного ленточного конвейера / А. В. Затонский // Вестник АГТУ. – 2017. – № 4. – С. 99–110.
20. Кожубаев Ю. Н. Моделирование поточно-пространственной системы ленточных конвейеров / Ю. Н. Кожубаев, О. В. Прокофьев, В. И. Филимонов // Научно-технические ведомости СПбГУ. – 2010. – №3. – С. 73–78.
21. Дьяченко В. П. Методы описания величины случайного грузопотока ленточных конвейерных предприятий на основе ее эмпирических распределений / В.П. Дьяченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 3. – С. 287–289.
22. Маркарян Л. В. Анализ и моделирование случайного шахтного грузопотока на магистральном сборочном конвейере / Л. В. Маркарян // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 5. – С. 67–74.
23. Заика В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и эффективность системы шахтного конвейерного транспорта / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Научный вестник НГУ. – 2015. – № 3. – С. 82–88.
24. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors–Does it Really Save Energy? / H. Lauhoff // Bulk Solids Handling. – 2005. – № 25(6). – P. 368–377.
25. Пигнастый О. М. Инженерно-производственная функция предприятия с серийным или массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2005. – № 42(3). – С. 111–117.
26. Пигнастый О. М. Использование методов статистической физики для исследования экономико-производственных систем с массовым выпуском продукции / О. М. Пигнастый, В. П. Демущий, М.Н. Азаренкова // Вісник Харківського національного університету. – 2005. – № 710(2). – С. 128–134.
27. Pihnastyi O. M. Model of a composite magistral conveyor line / O. M. Pihnastyi, V. D. Khodusov // International Conference on System analysis & Intelligent computing (SAIC 2018): proceedings. – Kyiv, Ukraine : IEEE, 2018. – P. 68–72. <https://doi.org/10.1109/saic.2018.8516739>
28. Pihnastyi O. M. Statistical theory of control systems of the flow production. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 436 p. ISBN: 978-613-9-95512-1.
29. DIN 22101:2002-08. Continous conveyors. Belt conveyors for loose bulk materials. Basics for calculation and dimensioning: Standart. – [Effective from 2002]. – Normenausschuss Bergbau (FABERG) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Normenausschuss Maschinenbau im DIN, 2022. – P. 51.
30. Pihnastyi O. M. Optimal control problem for a conveyor-type production line / O. M. Pihnastyi, V. D. Khodusov // Cybern. Syst. Anal. [Springer Science+Business Media, LLC, 1060-0396/18/5405-0744]. – 2018. – № 54(5). – P. 744–753.

Received 22.05.2022.
Accepted 30.07.2022.

УДК 658.51.012

СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ КОНВЕЄРОМ

Пігнастий О. М. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м Харків, Україна.

Івановська О. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянута проблема оптимального управління потоковими параметрами транспортної системи конвейерного типу при наявності ступенчатого регулювання швидкості ленти секцій конвейера. Об'єктом дослідження була аналітична модель транспортного конвейера, яка використана в якості фундаменту для синтезу алгоритмів оптимального управління потоковими параметрами транспортного конвейера. Мета роботи полягає в розвитку методів проектування системи оптимального управління потоковими параметрами транспортного конвейера з урахуванням транспортної задержки при ступенчатому регулюванні потокових параметрів транспортної системи.

Метод. Розроблено аналітичну модель секції конвеєра з урахуванням ступінчастого регулювання значень потокових параметрів транспортної системи. При побудові моделі секції конвеєра визначення залежностей між потоковими параметрами транспортної системи записані рівняння в приватних похідних. Для синтезу алгоритмів оптимального управління швидкістю руху стрічки секції конвеєра запроваджено критерій якості управління. Використовуючи принцип максимуму Понтрягіна, поставлено завдання оптимального керування потоковими параметрами секції конвеєра. Для транспортної системи записано функцію Гамільтона, що враховує критерій якості управління, обмеження та диференціальні зв'язки між параметрами системи. Продемонстровано методику синтезу алгоритму оптимального управління швидкістю стрічки секції конвеєра. Визначено умови перемикання швидкості руху стрічки конвеєра.

Результати. Розроблена модель секції конвеєра використана синтезу алгоритму оптимального управління потоковими параметрами транспортної системи при ступінчастому перемиканні режимів швидкості стрічки.

Висновки. Розроблено методику синтезу алгоритмів оптимального керування потоковими параметрами транспортної системи при ступінчастому регулюванні швидкості руху стрічки секції конвеєра. Отримані алгоритми можуть бути використані для зниження питомих енергетичних витрат на транспортування матеріалу на підприємствах гірничодобувної промисловості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: конвеєр, розподілена система, PDE-модель, поточна лінія, виробнича лінія, регулювання швидкості стрічки.

UDC 658.51.012

SYNTHESIS OF AN ALGORITHM FOR CONTROL OF A TRANSPORT CONVEYOR

Pihnastyi O. M. – Dr. Sc., Professor of the Department of distributed information systems and cloud technologies, National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine.

Ivanovska O. V. – PhD, Assistant Professor of the Department of Composite Structures and Aviation Materials, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of optimal control of the flow parameters of a transport system of a conveyor type in the presence of stepwise regulation of the speed of the conveyor section belt is considered. The object of the study is the analytical model of the transport conveyor, which was used as a foundation for the synthesis of optimal control algorithms for the flow parameters of the transport conveyor. The purpose of the work is to develop methods for designing systems for optimal control of the flow parameters of a transport conveyor, taking into account the transport delay with stepwise regulation of the flow parameters of the transport system.

Method. An analytical model of the conveyor section has been developed, taking into account the stepwise regulation of the values of the flow parameters of the transport system. When building a model of a conveyor section to determine the dependencies between the flow parameters of the transport system, equations in partial derivatives are written. For the synthesis of algorithms for optimal control of the speed of the conveyor section belt, a control quality criterion is introduced. Using the Pontryagin maximum principle, the problem of optimal control of the flow parameters of the conveyor section is posed. For the transport system, the Hamilton function is written, which takes into account the criterion of control quality, imposed restrictions and differential relationships between the system parameters. A technique for synthesizing an algorithm for optimal control of the speed of a conveyor section belt is demonstrated. The conditions for switching the speed of the conveyor belt are determined.

Results. The developed model of the conveyor section is used to synthesize an algorithm for optimal control of the flow parameters of the transport system with stepwise switching of belt speed modes.

Conclusions. A technique for synthesizing algorithms for optimal control of the flow parameters of a transport system with stepwise regulation of the speed of the belt of a conveyor section has been developed. The obtained algorithms can be used to reduce the specific energy costs for material transportation at mining enterprises.

KEYWORDS: conveyor, distributed system, PDE model, production line, production line, belt speed control.

REFERENCES

1. SIMINE for conveyors. Siemens, 2017. <https://new.siemens.com/global/en/markets/mining-industry.html>
2. Degtyarev V.V. Normirovanie toplivno-energeticheskikh resursov i regulirovanie rezhimov energopotrebleniya. Moscow, Nedra, 1983, 244 p.
3. Shahmeyster L. G., Dmitriev V. G., Lobachyova A.K. Dinamika gruzopotokov i regulirovanie skorosti lentochnykh konveyerov. Moscow, Nedra, 1972, 173 p.
4. Shahmeyster L.G. Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov / L.G. Shahmeyster, V.G. Dmitriev. – M.: Nedra, 1978. – 392 s.
5. Shahmeyster L.G. Veroyatnostnyie metodyi rascheta transportiruyuschih mashin. Moscow, Mashinostroenie, 1983, 312 p.
6. Kariman S. A., Braytsev A. V., Shramko V. M. Modelirovanie i optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov pri dobyche uglya. Moscow, Nauka, 1983, 135 p.
7. Semenchenko A., Stadnik M., Belitsky P. et al. 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, No. 82, pp. 42–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75936>
8. Monastyirskiy V. F., Maksyutenko V. F., Kiriya R.V. Effektivnost' raboty lentochnykh konveyerov na gornyykh predpriyatiyah, *Geotekhnicheskaya mehanika*, 2010, No. 88, pp. 185–191.
 9. Razumnyiy Yu. T., Ruhlov A. V., Kozar A. V. Povyishenie energoeffektivnosti konveyernogo transporta ugolnykh shaht, *Gornaya elektromekhanika i avtomatika*, 2006, No. 76, pp. 24–28.
 10. Protsenko S.N. Snizhenie energopotrebleniya na konveyernom transporte ugolnykh shaht, *Gornaya elektromekhanika i avtomatika*, 2008, No. 81, pp. 31–40.
 11. Prokuda V. N., Mishanskiy Yu. A., Protsenko S.N. Issledovanie i otsenka gruzopotokov na magistralnom konveyernom transporte PSP «Shahta «Pavlogradskaaya» PAO «Pavlogradugol», *Gornaya elektromekhanika*, 2012, No. 88, pp. 107–111.
 12. Stavitskiy V.N., Ogolobchenko A.S. Matematicheskoe modelirovanie transportnoy sistemy dobychnogo uchastka, *Nauchnyye trudy DNTU*, 2013, No. 1, pp. 53–63.
 13. Reutov A. Simulation of load traffic and steeped speed control of conveyor, *IOP Conference Series: Earth and Environmental*, 2017, No. 87, pp. 1–6.
 14. Kondrahin V. P., Stadnik N.I., Belitskiy P.V. Statisticheskyy analiz ekspluatatsionnykh parametrov shahtnogo lentochnogo konveyera, *Nauchnyye trudy DNTU*, 2013, No. 2, pp. 140–150.
 15. Adadurov V. V., Arinenkov V. V., Budishevskiy V. A. Teoreticheskie osnovy i raschety transporta energoemkikh proizvodstv, *DNTU*, 1999, P. 216. ISBN 966–7559–02–5.
 16. Stavitskiy V.N. Dinamika nagruzki reguliruemogo privoda lentochnogo konveyera, *Nauchnyye trudy DNTU*, 2012, No. 23, pp. 49–53.
 17. Stavitskiy V. N. Algoritm identifikatsii transportnoy zaderzhki konveyera, *Nauchnyye trudy DNTU*, 2011, No. 20, pp. 59–66.
 18. Rebenkov E.S. Sintez nechetkogo regulatora chastotno-upravlyаемого elektroprivoda konveyera s uprugimi svyaziyami, *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten*, 2016, No. 4, pp. 68–75.
 19. Zatonkiy A.V. Dinamicheskaya prostranstvennaya model mnogoprivodnogo lentochnogo konveyera, *Vestnik AGTU*, 2017, No. 4, pp. 99–110.
 20. Kozhubaev Yu. N., Prokofev O.V., Filimonov V.I. Modelirovanie potочно-prostranstvennoy sistemy lentochnykh konveyerov, *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SGPU*, 2010, No. 3, pp. 73–78.
 21. Dyachenko V.P. Metody opisaniya velichiny sluchaynogo gruzopotoka lentochnykh konveyernykh predpriyatiy na os-nove ee empiricheskikh raspredeleniy, *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten*, 2007, No. 3, pp. 287–289.
 22. Markaryan L.V. Analiz i modelirovanie sluchaynogo shahtnogo gruzopotoka na magistralnom sborochnom konveyere, *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten*, 2016, No. 5, pp. 67–74.
 23. Zaika V. T., Razumnyiy Yu. T., Prokuda V. N. Vliyanie reguliruemogo privoda na gruzopotoki i effektivnost' sistemy shahtnogo konveyernogo transporta, *Nauchnyy vestnik NGU*, 2015, No. 3, pp. 82–88.
 24. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors—Does it Really Save Energy? *Bulk Solids Handling*, 2005, No. 25(6), pp. 368–377.
 25. Pihnastyi O.M. Inzhenerno-proizvodstvennaya funktsiya predpriyatiya s seriynim ili massovym vyipuskom produktsii, *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktivnykh lelatelnykh apparatov*, 2005, No. 42(3), pp. 111–117.
 26. Pihnastyi O. M., Demutskiy V. P., Azarenkova M. N. Spol-zovanie metodov statisticheskoy fiziki dlya issledovaniya ekonomiko-proizvodstvennykh sistem s massovym vyipuskom produktsii, *Visnik Kharkivskogo natsionalnogo universitetu*, 2005, No. 710(2), pp. 128–134.
 27. Pihnastyi O. M., Khodusov V. D. Model of a composite mag-istral conveyor line, *International Conference on System analysis & Intelligent computing (SAIC 2018): proceedings*. Kyiv, Ukraine, IEEE, 2018, pp. 68–72. <https://doi.org/10.1109/saic.2018.8516739>
 28. Pihnastyi O.M. Statistical theory of control systems of the flow production. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018, 436 p. ISBN: 978-613-9-95512-1,
 29. DIN 22101:2002-08. Continuous conveyors. Belt conveyors for loose bulk materials. Basics for calculation and dimensioning: Standart. – [Effective from 2002]. Normenausschuss Bergbau (FABERG) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Normenausschuss Maschinenbau im DIN, 2022. – p 51.
 30. Pihnastyi O. M., Khodusov V.D. Optimal control problem for a conveyor-type production line, *Cybern. Syst. Anal. [Springer Science+Business Media, LLC, 1060-0396/18/5405-0744]*, 2018, No. 54(5), pp. 744–753.