

УДК 622: 647.2

И.Д. КУРГАНОВ, ассистент

Криворожский технический университет

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ РУДНОЙ МАССЫ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ЛЕНТЫ

Предложено оптимальное управление конвейером в транспортном потоке путем изменения натяжения ленты с целью снижения затрат на транспортирование груза при увеличении срока эксплуатации ленты и снижении затрат на энергопотребление.

Развитие микропроцессорной техники и применение ее в промышленном исполнении для управления технологическими процессами позволило отойти от старых принципов построения АСУ ТП, которые базировались на принципах передачи по двухпроводной линии. Применение современных сетевых технологий позволило повысить скорость передачи информации и при этом расширить ее объем, что дает возможность системе выполнять не только аварийные отключения и блокировки, связанные с несогласованной работой конвейеров, но осуществлять предшествующее им управление, позволяющее исключить возможные ситуации.

Примером применения АСУ ТП конвейерной линией на базе современных промышленных микроконтроллеров есть система управления конвейерным трактом дробильной фабрики ДФ-3 горно-обогатительного комбината СевГОК.

Разработки систем автоматизированного управления конвейерными линиями ведутся с времен начала применения ленточных конвейеров. Так в 60-е годы авторами работы [1] были сформулированы требования к системам автоматического управления линиями ленточных конвейеров:

1. Централизованный автоматический пуск всех конвейеров линии в необходимой последовательности, с требуемой выдержкой времени между включением двигателей конвейеров.
2. Дистанционный визуальный контроль за пуском и работой конвейеров.
3. Автоматический контроль времени пуска (нормального разгона) отдельных конвейеров.
4. Автоматизированный контроль состояния механизмов установки и автоматическое отключение конвейера при механических повреждениях, остановке или пробуксовке его ленты.
5. Автоматическое отключение всех конвейеров, передающих груз на остановившийся конвейер.
6. Возможность остановки всей конвейерной линии с пункта управления и экстренной остановки электродвигателей с любого места вдоль конвейерной линии или с места установки двигателей.
7. Местный ручной пуск любого конвейера вне блокировочной зависимости при ремонтах, регулировке и опробовании.
8. Двухсторонняя звуковая оперативная и предупредительная сигнализация.
9. Автоматическое приведение схемы в положение “выключено” при снятии напряжения.
10. Отключение конвейера при сходе ленты в сторону, отключение последующих конвейеров при переполнении перегрузочной точки, пуск с пульта управления части конвейерной линии с последующим дозапуском остальной части, пуск и остановка боковых ответвлений при разветвленной схеме конвейерной линии.

В работе [2] рассмотрена постановка задач для разных уровней иерархии АСУ с точки зрения теории автоматического управления. Для исследований представляет интерес задача низшего уровня, лежащая в основании всей пирамиды иерархии задач управления. Это задача управления отдельными агрегатами или технологическими процессами. Единственно разумным критерием функционирования каждой отдельной установки является технологическая себестоимость, зависящая от характера протекания технологического процесса. В работе классифицируются задачи:

статическая оптимизация, в которой существуют возмущения постоянных времени, намного больше среднего времени нахождения объекта в статическом состоянии;

оптимальная стабилизация объекта управления относительно некоторого заданного состояния;

учет динамических свойств объекта при необходимости оперативного согласования нагрузок в масштабе всего производства.

В настоящей работе будут рассмотрены вопросы выполнения требований к управлению конвейерной линией, представленных в п. 4 требований, относящихся к работе [1].

Предлагается для устранения аварийной пробуксовки ленты на барабане и ее чрезмерного истирания в процессе транспортирования рудной массы применять управление натяжением ленты. Для реализации разрабатываемого метода управления необходимо использовать математическую модель с распределенными параметрами, на основе которой и будет сформирована модель оптимального управления с применением принципов управления рассмотренных в работе [2].

Первопричина всех затрагиваемых вопросов заложена в параметрах транспортируемого грузопотока, который предъявляет требования к формированию тягового фактора для реализации представленных выше физических процессов во фрикционной паре при транспортировании материала. Основным параметр это погонная масса транспортируемого материала. Так в работе, выполненной В.С. Волотковским, отражены следующие результаты. На ленточных конвейерах большой протяженности от 467 до 1870 м площадь сорванной нижней обкладки изменяется от 15 до 25 %, что вызвано возникновением пробуксовывания ленты и большими значениями напряжений в нижней обкладке ленты при ее взаимодействии с приводным барабаном. Повышение загрузки конвейера, ослабленное натяжение ленты приводит к увеличению дуги рабочего проскальзывания, что повышает истирание ленты и может вызвать аварийную пробуксовку. В случае пробуксовки возрастает температура в зоне сцепления ленты и барабана, которая достигает 300-350 °С за 15 мин его работы[4]. В случае рабочего проскальзывания происходят потери энергии, затрачиваемые на преодоление сил трения, часть которых вызывает изменение температуры в зоне контакта барабан - лента.

Исследованием вопросов изменения температуры занимались такие авторы как М.А. Малютин, Л.И. Попов, В.Г. Пилецкий и др. [3,4]. Решение проблемы создания системы автоматического управления фрикционной парой приводной барабан-лента выдвигает в качестве основного вопроса задачу построения математической модели распределения температуры на дуге обхвата как объекта управления.

Управление такого рода объектами обуславливается технологической необходимостью компенсации возникающего проскальзывания ленты на приводном барабане конвейера, в основе которого лежит процесс передачи движения посредством трения, и реализуется путем изменения теплового поля на дуге обхвата посредством изменения натяжения ленты конвейера или скорости вращения барабана.

Проблема управления рассматривается как задача оптимального управления с распределенными параметрами.

Подход к построению системы управления основан на построении детерминированной оптимальной модели пары барабан-лента и организация управления по этой модели. Под моделью фрикционной пары приводной барабан-лента понимается тепловое поле $\tau_1(x,y,z,t)$, где x,y,z - декартовы координаты точки на приводном барабане или $\tau_1(R,\varphi,z,t)$, где R,φ,z - цилиндрические координаты точки, t - время.

Считаем, что температура по ширине барабана распределяется равномерно, в этом случае задача рассматривается только в одной пространственной плоскости декартовой (x,y) или цилиндрической (R,φ) . Краевая задача сводится к классу двумерных уравнений теплопроводности с постоянными коэффициентами.

Таким образом, с точки зрения теории управления системами с распределенными параметрами в процессе управления тепловым полем приводного барабана и ленты в качестве управляемой координаты выступает температура или ее распределение на дуге обхвата.

При выборе управляющих воздействий, определяющих режим охлаждения (нагрева) рабочей области фрикционной пары (дуги скольжения), необходимо соблюсти технологические ограничения на допустимую величину температуры рабочей области, в качестве выходной координаты объекта управления необходимо иметь непосредственно температурное поле $\tau_1(R,\varphi,z,t)$ или величину температуры в заданной точке пространства.

Процесс управления строится так, чтобы наилучшим образом по выбранному критерию оптимальности добиться наилучшего приближения величины теплового источника к желаемой его величине при соблюдении естественных ограничений на управление и состояние объекта.

Управление процессом нагрева или охлаждения осуществляется путем изменения натяжения ленты. Опишем это действие некоторой функцией $S(t)$ и подчиним эту функцию следующему ограничению

$$A_1 \leq S(t) \leq A_2, \quad (1)$$

где константы A_1 и A_2 соответствуют предельным значениям управляющей величины.

Теперь необходимо задать связь между $\tau_1(t)$ и $S(t)$. Согласно терминам теории автоматического управления, требуется определить передаточную функцию системы, входом которой служит изменение натяжения ленты $S(t)$, а выходом температура нагрева $\tau_1(t)$ на дуге обхвата приводного барабана и ленты конвейера при их фрикционном взаимодействии. Возможны, по крайней мере, два способа описания этой передаточной функции. Простейший из них состоит в следующем. Будем считать, что между входом и выходом системы имеются лишь два элементарных звена: звено запаздывания, характеризующее задержку работы привода натяжной станции и конечной длины конвейера, и инерционное звено, учитывающее постепенность нарастания температуры при скачкообразном изменении натяжения ленты. При этом связь между $\tau_1(t)$ и $S(t)$ может быть выражена следующим уравнением

$$B \frac{d\tau_1}{dt} + \tau_1 = k \cdot S(t - \tau), \quad (2)$$

где τ - время запаздывания, B - постоянная времени инерционного звена, k -статический коэффициент передачи. Данное уравнение дает очень упрощенную картину работы конвейера, так как натяжение ленты не может изменяться скачком, а изменяется под действием груза на ленте и работой привода натяжной станции.

Более точное описание связи между функциями $\tau_1(t)$ и $S(t)$ может быть получено, если произвести полный тепловой расчет фрикционной пары барабан-лента, решая совместно с уравнением теплопроводности (4), которое описывает теплообмен в системе футеровка барабана – дуга рабочего скольжения - лента конвейера.

В качестве критерия качества управления выберем следующий функционал

$$J = \int \int \int_D \left[\tau_1^*(R, \varphi, z) - \tau_1(R, \varphi, z, T) \right]^2 dR \cdot d\varphi \cdot dz, \quad (3)$$

где D - некоторая пространственная область, T - время процесса управления, $\tau_1^*(R, \varphi, z)$ - требуемое температурное распределение.

Структурно математическую модель можно представить в следующем виде (рис. 1). Натяжение ленты, изменяемое приводом натяжной станции, изменяет тяговую способность приводного барабана, что приводит к изменению температуры в зоне дуги обхвата фрикционной пары.

Сигнал управления $\tau_1(t)$ и сигнал возмущения $\alpha_{ск}(t)$ поступают на вход блока температурного поля, который представим в виде функции

$$\tau_1(R, \varphi, z, t) = A(\tau_1(t), \alpha_{ск}(t)),$$

где A - некоторый оператор.

Практически этот оператор представляет собой в общем случае решение дифференциального уравнения в частных производных, которое описывает процесс теплообмена в фрикционной паре приводной барабан-лента. Нахождение оператора A для описания динамики искомых координат процесса управления и составляет задачу управления.

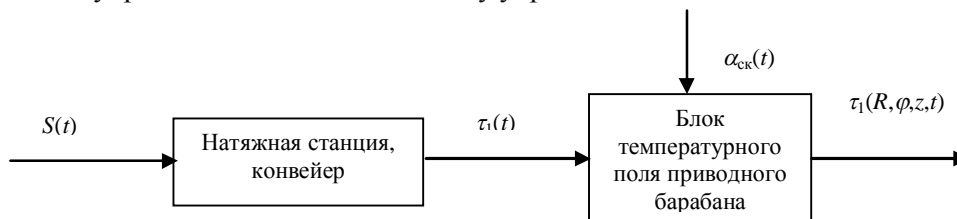


Рис. 1. Структурная схема модели системы управления

Рассмотрим детально формирование краевой задачи, которая включает в себя уравнение теплопроводности, а также начальные и граничные условия.

Подобные краевые задачи ранее выполнялись авторами [3,4] при моделировании тепловых процессов взаимодействия приводного барабана и ленты.

Уравнение теплопроводности представляет собой параболическое уравнение, характеризующее нестационарные процессы температурного распределения

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\varphi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q, \quad t > 0; \quad R_1 \leq R \leq R_2; \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (4)$$

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\varphi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q, \quad t > 0; \quad R_2 \leq R \leq R_3; \quad 0 \leq \varphi \leq \pi,$$

где τ_1 - температура перегрева (сверх температуры окружающего воздуха), град; ζ - коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; τ_2 - температура ленты, град; R_1, R_2 - внутренний и внешний радиусы барабана, включая футеровку, м; R_3 - внешний радиус ленты, огибающей барабан, м (рис. 2); q - источник теплового потока.

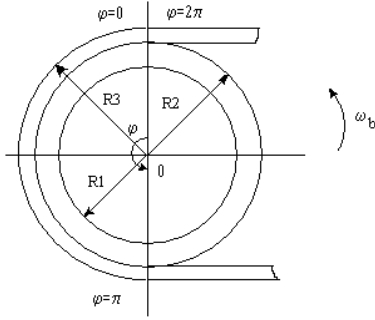


Рис. 2. Фрикционная пара барабан-лента конвейера

В качестве начальных условий задаем температурное распределение в начальный момент времени

$$\tau_1(R, \varphi, 0) = \tau_{1,0}$$

В качестве граничных условий используем условие ||-го рода, для описания процессов теплообмена футеровки барабана и ленты конвейера и теплообмена с окружающей средой. При этом не учитываем теплообмен с окружающей средой торцовых поверхностей ленты и барабана, также внутренней поверхности барабана и наружной поверхности ленты. Рассматриваемые тела считаем однородными изотропными с постоянными теплофизическими характеристиками.

Считаем, что температура по ширине барабана распределяется равномерно, в этом случае задача рассматривается только в одной пространственной плоскости - цилиндрической (R, φ) .

Граничные условия представим в виде

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R_1} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R_1, \varphi, t) - t_o], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R_2} = \alpha_1 \cdot [\tau_1(R_2, \varphi, t) - t_o], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (6)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R_3} = \alpha_2 \cdot [\tau_2(R_3, \varphi, t) - t_o], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (7)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R_2} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R_2, \varphi, t) - t_o], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi \quad (8)$$

$$\tau_1(R, \varphi, t) = \tau_1(R, \varphi + 2\pi n, t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} = \frac{\partial \tau_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'+2\pi n}, \quad n=0,1,2,\dots, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \frac{\partial \tau_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\pi} = 0, \quad (11)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала барабана и ленты, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$; α_1 - коэффициент теплообмена между трущимися поверхностями барабана и ленты, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$; α_2 - коэффициент теплообмена с воздухом внешней поверхности барабана, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{град}$ [4]. Коэффициенты ζ и λ связаны соотношением $\zeta = \lambda/c \cdot \rho$, где ρ - плотность нагреваемого тела, $\text{кг}/\text{м}^3$; c - теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$.

Для решения поставленной задачи используем приложение PDE Toolbox (от англ. Partial Differential Equation - дифференциальное уравнение в частных производных), содержащее пакет MATLAB. Приложение обеспечивает решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в двухмерной постановке. Оно включает графический интерфейс, инструменты задания формы уравнений и граничных условий, процедуру автоматической генерации сетки конечных элементов, средства для визуализации полученного решения и его анимации. Результат выполнения представлен на рис. 3.

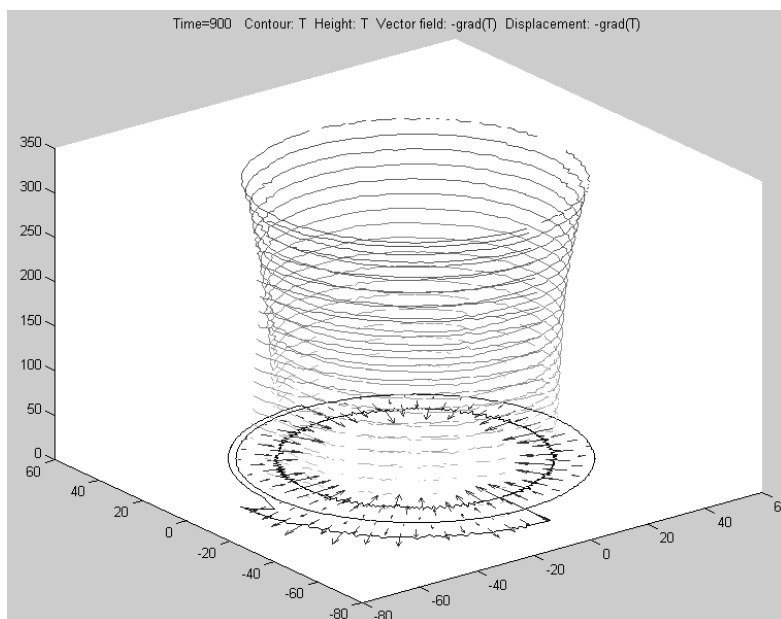


Рис. 3. Распределение теплового поля во фрикционной паре барабан-лента при аварийной пробуксовке

приводит к изменению величины теплового потока как по амплитуде, так и по пространственному распределению (изменяется величина дуги рабочего проскальзывания $\alpha_{ск}$, т.е. площадь упругого взаимодействия), что компенсируется путем управления натяжением ленты.

Список литературы

1. **Вологжковский С. А., Фурсов В.Д.** Автоматизация управления линиями ленточных конвейеров на рудных шахтах и карьерах//Изв. вузов. Горный журнал. – 1960. -№12. -С.117-128.
2. **Колесник В.В., Коробцов А.А.** Производство с непрерывной технологией, как объект автоматического управления//Адаптивные системы автоматического управления. – 1973. - №1. - С. 70-77.
3. **Малютин М. А., Попов Л.И.** Исследование контактной температуры в приводах ленточных конвейеров//Изв. вузов. Горный журнал. – 1972. -№2. –С. 115-119.
4. **Трошило В.С., Пилецкий В.Г.** Исследование нагрева ленты конвейера при пробуксовке приводного барабана//Гірнич електромеханіка та автоматика. – 1999. - №2(61). – С. 200-204.

Таким образом, задача оптимального управления может иметь следующую формулировку.

Для уравнения теплопроводности (4) с начальными и граничными условиями (5)-(11), включая уравнение связи (2), требуется подобрать управление $S(t)$, $0 \leq t \leq T$, удовлетворяющее условию (1), чтобы функционал (3) удовлетворял условию $J \leq \delta$ (где δ - некоторое положительное число, характеризующее точность приближения к желаемому распределению) за минимально возможное время T .

В результате изменения окружного усилия на приводном барабане изменяется давление ленты на футеровку барабана, что